

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПУЛЬСАЦІЇ ДОТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА СТІНЦІ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ПЕРЕХІДНОМУ РЕЖИМІ РУХУ РІДИНИ

На основаних аналіза наукових робіт проведена якісна оцінка рівня пульсації касательного напруження трення при ускореному і замедленому теченнях жидкості в трубопроводі. Експериментально дослідовані касательные напружения трения на стенке трубопровода диаметром 33,4 мм при помощи термоанемометрических датчиков.

Based on a review of scientific work carried out a qualitative assessment of the level of shear stress fluctuations friction acceleration and deceleration of the flow in the pipeline. Experimentally studied tangential shear stress at the wall pipe diameter 33.4 mm by hot-wire sensors.

### Вступ

Значна зацікавленість, яка обумовлена розвитком гідравлічних систем, викликала за останні роки появу великої кількості наукових робіт з дослідження нестационарної течії рідини. При цьому можна зазначити, що кількість експериментальних робіт відстає від теоретичних в цій галузі прикладної гідравліки. Важливим моментом в розв'язку задач неусталеного руху рідини є момент втрати стійкості ламінарних течій і зв'язаний з цим перехід ламінарного прискореного потоку в турбулентний, а також сповільнення неусталеної течії. В прикладних розрахунках прискорених потоків цьому відповідає заміна математичної моделі для розрахунку. Якщо при усталених течіях зона ламінарного руху займає невелику галузь інженерних задач, то фізичні явища неусталеної течії свідчать, що вказана зона при неусталеному русі значно ширша.

Практично під зміною режиму течії розгінного потоку необхідно розуміти, що ламінарні пограничні шари переходять в турбулентні [1]. Фізично це зв'язано з появою в окремих точках потоку низькочастотних пульсацій швидкостей, які мають при цьому значно більшу амплітуду. Потім проходить об'єднання цих збурених ділянок в турбулентні плями, які розширюються і тільки після того формуються явища, що спостерігаються в нестационарних турбулентних пограничних шарах. Подібна картина зміни режиму в даний час знайшла чітке експериментальне підтвердження при дослідженні зміни режиму в стаціонарних пограничних шарах [2–3]. Одним із вихідних рівнянь при розгляді нестационарного одновимірного по довжині турбулентного руху нестисливої рідини у круглих трубопроводах є рівняння Рейнольдса, записане в циліндричних координатах у вигляді:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} - \nu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial (r u_x u_r)}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

де  $u_x$  і  $p$  — осереднені, відповідно, місцева швидкість рідини і тиск;  $\nu$  — кінематичний коефіцієнт в'язкості;  $t$  — час.

При визначенні турбулентних напружень використовується відома гіпотеза Буссінеска:

$$-u_x u_r = -\varepsilon \frac{\partial u_x}{\partial r} \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  — коефіцієнт вихрової або турбулентної в'язкості, який необхідно визначити з експериментальних даних.

У працях [4 і 5], де додатково використовується рівняння енергії турбулентності, у зв'язку з відсутністю дослідних даних величини  $\varepsilon$  при пульсуючій течії, при розв'язку задачі використовується гіпотеза інваріантності коефіцієнта турбулентної в'язкості  $\varepsilon$ . Її розподіл приймають як при стаціонарній течії. Тому в цих працях не враховується інерційність турбулентності, яка згідно з останніми дослідженнями може з'являтися вже при невеликих параметрах нестационарності [6–8].

Потрібно відзначити, що наведені в літературі експериментальні дослідження рівня турбулентності нестационарної течії відносяться в основному до ядра потоку. Пристінна область досліджена значно менше. В ядрі потоку рівень турбулентності прискореної течії нижче, а рівень турбулентності сповільненої течії вище рівня турбулентності рівномірної течії [6, 8]. В цих роботах припускаються зворотні явища на стінці трубопровода. За результатами [7], де розглядається пульсуюча течія рідини, видно, що на характер турбулентності значно впливає період пульсації потоку, тобто нестационарність процесу.

Мета роботи — якісна оцінка рівня пульсації дотичного напруження тертя на стінці під час прискореної і сповільненої течії рідини у трубопроводі.

### Результати досліджень

У даний час турбулентний характер в'язкого підшару при стаціонарному режимі течії експериментально доведений у багатьох дослідженнях [1,9]. Спостерігається, що турбулентність проникає безпосередньо до твердих стінок потоку. Тому вимірювання рівня пульсації дотичного напруження на стінці потоку дозволяє оцінити інтенсивність турбулентності в пристінній області течії.

Експериментальна частина даного дослідження проведена в гідравлічно гладкій трубі діаметром 33,4 мм. Для визначення дотичного напруження тертя на стінці трубопровода  $\tau_{cm}$  використовується термоанемометричний датчик типу 55A91. Оцінка рівня пульсації  $\tau_{cm}$  в кожний момент часу визначається методом ансамблю. Визначення оцінки стандартного відхилення  $\tau_{cm}$ , а також 90% довірчих меж проводиться згідно стандартних алгоритмів [10].

Оцінкою пульсації  $\tau_{cm}$  в момент часу  $t_0$  є вибіркоче середньоквадратичне відхилення за формулою:

$$S_x(t_0) = \left\{ \left[ \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{cm_i}(t_0)^2}{N} - \mu_x(t_0)^2 \right] \frac{N}{N-1} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

де  $N$  — кількість дослідів в ансамблі;  $\tau_{cm}(t_0)$  — миттєва величина  $\tau_{cm}$ ;  $\mu(t_0)$  — оцінка математичного очікування.

Довірчі межі для середньоквадратичного відхилення визначаються таким чином:

$$\left( \frac{n \cdot \sigma_x^2(t_0)}{\chi_n^2; \alpha/2} \right)^{1/2} \leq S_x(t_0) < \left( \frac{n \cdot \sigma_x^2(t_0)}{\chi_n^2; 1 - \alpha/2} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

де  $n = N-1$ ;  $\sigma_x^2(t_0)$  — вибіркоче дисперсія;  $S_x(t_0)$  — дійсна величина стандартного відхилення.

Величини  $\chi_n^2; \alpha/2$  та  $\chi_n^2; 1 - \alpha/2$  визначаються із таблиці відсоткових точок розподілу  $\chi^2$  [6]. При обчисленні 90% довірчих меж прийнято  $\alpha = 0,10$ .

Для прискореного режиму руху рідини результати вимірювання та відповідні обчислення згідно вище наведених формул (3), (4), показано на рисунку 1.

Результати вимірювання рівня пульсації дотичного напруження на стінці  $\tau_{cm}$  представлені в даній роботі у вигляді окремих характерних дослідів.

Слід відзначити, що чутливий елемент термоанемометричного датчика виступає в потік  $\delta = 0,092$  мм (поверхня датчика плоска). Визначаючи товщину в'язкого підшару за критерієм:

$$\delta = \frac{12 \cdot U_*}{\nu}, \quad (5)$$

де  $U_*$  — динамічна швидкість.

Правіше моменту часу, який відповідає положенню  $\Delta h > \delta$  (позначено на рисунку стрілкою), де висування чутливого елемента датчика стає більшим в'язкого підшару згідно (5), виникають додаткові впливи турбулентності

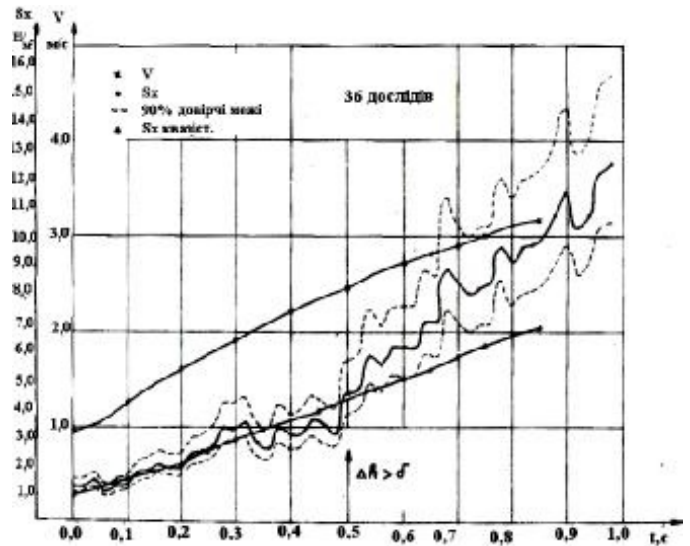


Рисунок 1 — Прискорений режим руху рідини.

на покази термоанемометричного датчика. Тому тарування датчика потребує коригування. Від початку дослідів до моменту часу 0,5 с квазістаціонарна величина стандартного відхилення  $S$  дотичного напруження на стінці по середній швидкості знаходиться в 90% довірчих меж відповідної величини прискореної течії.

Необхідно зазначити, що для більш стійкої оцінки необхідно скласти ансамбль, який включає більшу кількість дослідів при одних і тих же початкових умовах, але для якісної оцінки кількість наших дослідів достатня. Результати перехідної сповільненої течії рідини показано на рисунку 2.

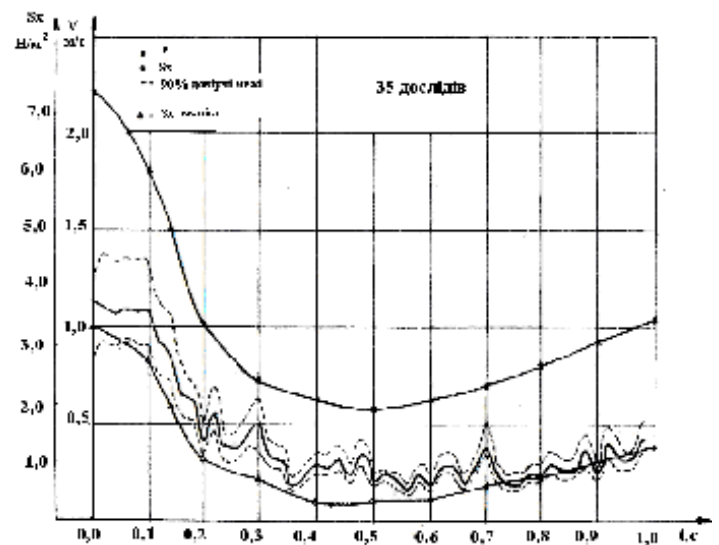


Рисунок 2 — Сповільнений режим руху рідини.

### Висновки

Результати свідчать, що величина стандартного відхилення  $S$  дотичного напруження  $\tau_{ст}$  для квазістаціонарної течії виходить з 90% довірчих меж і виявляється меншою від відповідної величини сповільненої течії. Описана вище фізична модель зміни режиму течії підтверджується в умовах неусталеного руху рідини.

Проведені раніше дослідження [3,11] і аналіз експериментальних даних показав, що при цьому критичні числа Рейнольдса на два порядки можуть перевищувати критичні числа при усталеному режимі. Період нестійкого збуреного стану продовжується досить довго і тому стійкість втрачається не на самій стінці, а на деякій відстані від неї.

Отже, на стінці трубопровода рівень пульсації дотичного напруження протягом прискореної течії співпадає, а рівень при сповільненій течії виявляється вищим за рівень рівномірної течії.

### Література

1. Козлов, Л.П. Дослідження ламінарного пограничного шару та його переходу в турбулентний / Л.П. Козлов // К.: Наукова думка, 1974.
2. Пинчуков, В.И. Численное моделирование нестационарных течений с переходными режимами / В. И. Пинчуков // Вычисл. мат. и мат. физ. — 2009. — № 10. — С. 1844—1852.
3. Гнатів, Р.М. Експериментальні дослідження турбулентних течій в трубах / Р.М. Гнатів, І.П. Вітрух // Промислова гідраліка і пневматика. — 2009. — №4 (26). — С. 28—31.

4. Васильев, О. Ф. Неустановившееся турбулентное течение в труб / О. Ф. Васильев, В. И. Квон // ПМТФ. — 1971— №6.

5. Попов, Д.Н. Гидравлические сопротивления трубопровода при неустановившемся турбулентном движении жидкости / Д. Н. Попов // Изв. вузов. Машиностроение. — 1969 — №9.

6. Марков, С.В. Исследование кинематических характеристик и гидравлических сопротивлений в неустановившихся напорных турбулентных течениях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Киев, 1971.

7. Mizushima, T., Maruyana, T., Shiozaki, J. Pulsating Turbulent Flow in a Tube. Journal of chemical Engineering of Japan, vol. 6., No. 6, 1973.

8. Cerrard, J. H. Journal of Fluid Mechanics. P. 46, 43. 1971.

9. Хабахпашева, Е.М. Некоторые данные о структуре течения в вязком подслое // Проблемы теплофиз. и физ. гидродинамики. — Новосибирск, 1974.

10. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол // М.: Мир, 1974.

11. Гнатів, Р.М. Дослідження методами візуалізації неусталеного руху плинного середовища в трубопроводах гідралічних систем / Р.М. Гнатів, І.Ф. Рип'як, В.В. Чернюк // Промислова гідраліка і пневматика. — 2010. — №1 (27). — С. 47—51.

Надійшла 2.04.2012 р.