

УДК 532.54.013.2

Яхно<sup>1</sup> О.М., д.т.н., проф., Гнатів<sup>2</sup> Р.М., к.т.н., доц.

1- НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

2- НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

## ЗАЛЕЖНІСТЬ СЕРЕДНЬОЇ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ВІД ЗРОСТАННЯ ТИСКУ ПРИ НЕУСТАЛЕНОМУ РУСІ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДІ

Yahno<sup>1</sup> A., Hnativ<sup>2</sup> R.

1 - Technical University «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

2 - «Politechnika Lwowska», Lviv, Ukraine

### DEPENDENCE OF THE AVERAGE FLOW RATE FROM RISING PRESSURE IN UNSTEADY FLUID MOVEMENT IN PIPELINE

---

*За результатами теоретичних і експериментальних досліджень отримано залежності між середньою швидкістю потоку, при якій втрачається стійкість ламінарного режиму і швидкістю зростання тиску.*

*Результати проведених досліджень дозволяють визначити ці величини і враховувати їх вплив при перехідних процесах неусталеного руху рідини в трубопроводах.*

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

---

#### Вступ

Розвиток гідравлічних систем, призначених для управління різними автоматизованими технологічними процесами, а також прагнення до інтенсифікації відповідних енергетичних процесів обумовлює необхідність проектування і розробки гідравлічних систем, де неусталений режим руху рідини є основним визначальним фактором. Проектування таких систем зазвичай починається з розробки фізичної моделі і виведення відповідних цій моделі математичних співвідношень, що описують у формі рівнянь поведінку робочого середовища в проточній частині пристрою.

В працях [1-5] розглянуті диференціальні рівняння, які описують нестационарні турбулентні течії і методи замикання цих рівнянь з метою подальшого чисельно розрахунку. В цих роботах вказано, що для замикання рівнянь, що описують нестационарні течії використовуються коефіцієнти, котрі отримані із експериментів і призначені для розрахунків стаціонарних турбулентних потоків. Відповідно при замиканні рівнянь неусталених рухів нехтують впливом локальних сил інерції, які викликають значні зміни в структурі неусталених потоків.

Результати експериментальних досліджень [6] показують, що теоретичні моделі для дослідження неусталеного руху рідини не дозволяють без коректування отримувати задовільні результати в умовах неусталеного руху. Для цього необхідно провести експериментальні дослідження із визначення характеристик турбулентності в умовах не стаціонарності.

Дослідження структури неусталеного потоку експериментальним шляхом зроблено в працях Букреева, Шахіна [7], Калмикової, Попова і Мохова [8], Мохова і Попова [9]. Методом термоанеметрії виміряні епюри локальних швидкостей при пульсуючому і осцилюючому рухах в'язкої рідини в циліндричних трубах. За виміряними профілями локальних швидкостей в цих роботах обчислені значення енергії турбулентності в перерізі труби з використанням поняття сумарного коефіцієнту в'язкості.

Експериментальні дослідження [10] показують, що рух рідини із стану спокою зберігає ламінарний режим течії при більших миттєвих значеннях числа Рейнольдса, ніж за стаціонарного руху. Важливим є питання залежності виникнення турбулентності від характеристик нестационарного процесу.

**Метою** запропонованої роботи є експериментальні та теоретичні дослідження для встановлення залежності зміни середньої швидкості від зростання тиску при неусталеному русі рідини в трубах.

### Дослідження

В даній роботі наведені експериментальні дані, отримані в процесі дослідження перехідних процесів. Отримані залежності між середньою швидкістю, при якій втрачається стійкість ламінарного режиму течії і швидкістю лінійного зростання тиску.

Для проведення дослідів використана експериментальна установка із замкнутим контуром. Експериментальна ділянка діаметром 0,0334 м виготовлена з нержавіючої сталі. Переріз для вимірювання розподілу швидкостей розташований на відстані 5,6 метрів від плавного входу в експериментальний трубопровід. Це забезпечує відсутність впливу вхідних умов в мірному перерізі трубопроводу.

Для визначення поздовжніх локальних швидкостей застосовувались термоанемометричні плівкові датчики типу 55A83 і 55A85 разом з підсилювальною апаратурою «DISA».

Тиски вимірювались тензометричними датчиками типу ЛХ-415 з межею виміру – 0- 10<sup>6</sup> Па і похибкою – ± 0,8 %. В межах вимірюного діапазону тиску датчики мають лінійну характеристику.

При вимірюванні витрати нестационарного потоку використано спеціальний електромагнітний витратомір, що призначений для вимірювання швидкісних гідравлічних процесів.

Нестационарні режими створювались швидкодіючим клапаном, який розміщувався в кінці експериментальної ділянки. До відкриття клапану у напірному баку насосом встановлювався необхідний напір. Діапазон вимірювання середніх швидкостей на установці від 0 до 5 м/с. Цьому відповідає зміна числа Рейнольдса до 3×10<sup>5</sup>. Реєстрація і обробка експериментальних даних здійснювалась автоматичною електронною системою, яка забезпечувала добру відтворюваність проведених дослідів.

Експериментально було визначено зміну середньої швидкості руху рідини від часу  $v(t)$  при різних режимах лінійного по часу зростання тиску. Моменти переходу до турбулентної течії визначені співставленням експериментально отриманої середньої швидкості із середньою швидкістю, визначеною теоретичним розрахунком. При цьому використовується теорія ламінарної нестисливої рідини.

Досліди, проведені в межах роботи, показують, що ця математична модель добре описує зміну середньої швидкості до появи різкої турбулізації потоку на стінці труби. Відповідно, можна припустити, що точка розбіжності середніх швидкостей, які визначені експериментально і теоретично, визначає момент турбулізації потоку.

Рух нестисливої рідини в циліндричній трубі описується рівнянням:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right), \quad (1)$$

де:  $v_z$  – складова вектора швидкості в напрямі осі координат  $z$ ;  $p$  – тиск;  $\rho$  – густина рідини;  $\mu$  – коефіцієнт в'язкості;  $t$  – час.

Були введені безрозмірні величини, які визначаються наступними співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{z}{L}; & \eta &= \frac{r}{R}; & \tau &= \frac{c}{L} t \\ u_\xi &= \frac{v_z}{U}; & q &= \frac{p}{c\rho U} \\ q^* &= \frac{p^*}{c\rho U}; & q^{**} &= \frac{p^{**}}{c\rho U}; & \chi &= \frac{L\mu}{R^2 c\rho} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де:  $c$  – швидкість звуку в рідині;  $R$ ,  $L$  – радіус і довжина труби;  $U$  – нормуюча швидкість.

В нових змінних рівняння (1) можна зобразити у безрозмірній формі:

$$\frac{\partial u_\xi}{\partial \tau} - \chi \left( \frac{\partial^2 u_\xi}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial u_\xi}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial q}{\partial \xi} = 0 \quad (3)$$

Рівняння (3) розв'язується за наступних початкових і граничних умов:

$$u_\xi = 0, q = 0 \text{ при } \tau = 0, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} q &= q^* \text{ при } \xi = 0 \\ q &= q^{**} \text{ при } \xi = L \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

і

$$u_\xi = 0, \text{ при } \eta = 1. \quad (6)$$

Середня по перерізу швидкість в прийнятих позначеннях визначається як:

$$v = \frac{2\pi}{\pi R^2} \int v_z r dr. \tag{7}$$

У безрозмірних величинах вона набуває вигляду:

$$v = UW, \quad v = UW, \tag{8}$$

де

$$W = 2 \int_0^1 u_\xi \eta d\eta, \tag{9}$$

З умов експерименту випливає, що зміну по часу безрозмірного тиску  $q^*$  можна зобразити у вигляді:

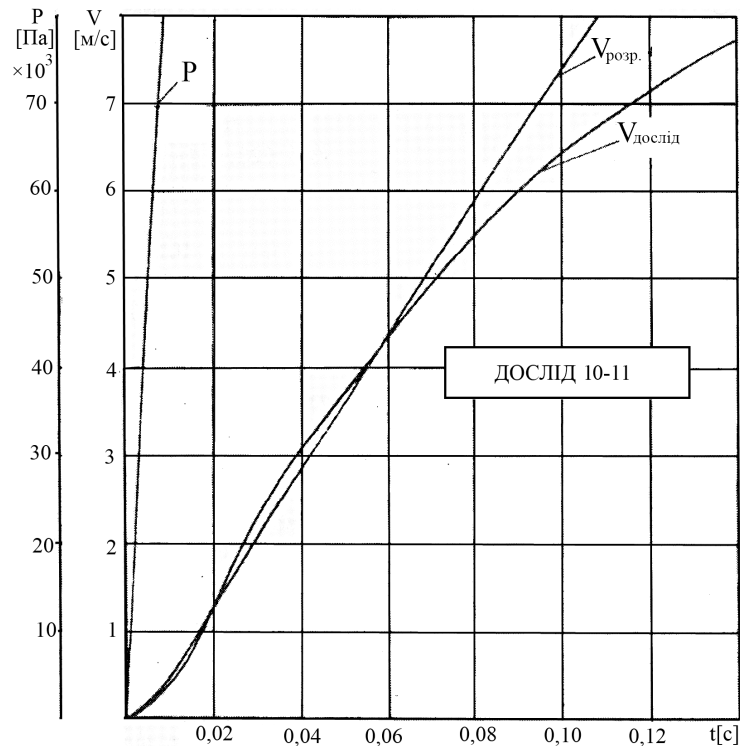


Рис. 1. Зміна середньої швидкості  $V$  і тиску  $p$  в залежності від часу проходження нестационарного процесу

$$q^* = \frac{1}{\tau} \tau - \eta (\tau - \tau') \frac{1}{\tau} (\tau - \tau'), \tag{10}$$

а

$$q^{**} = 0.$$

Відповідно

$$q = \frac{1}{\tau} \tau (1 - \xi) - \eta (\tau - \tau') \frac{1}{\tau} (\tau - \tau') (1 - \xi) \tag{11}$$

Розв'язок рівняння (3) разом з граничними умовами (4 – 6) проведено аналогічно і набуває вигляду:

$$W = -\frac{1}{8\chi\tau} \left[ \frac{1}{6\chi} - \tau \frac{32}{\chi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k^6} e^{-\chi\lambda_k^2 \tau} \right] - \eta (\tau - \tau') \left[ -\frac{1}{8\chi\tau} \left( \frac{1}{6\chi} - \tau + \tau' - \frac{32}{\chi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k^6} e^{-\chi\lambda_k^2 (\tau - \tau')} \right) \right] \tag{12}$$

де  $\lambda_k$  – розв'язок рівняння  $J_0(\lambda) = 0$ , тобто нулі функції Бесселя першого роду нульового порядку.

На основі залежності (12) проведено розрахунки на ЕОМ і визначені зміни середньої швидкості  $V$  від часу за різних  $\tau'$ , які відповідають експериментальним задачам.

Проведено співставлення значень  $V(t)$  для одного дослідження. Порівняльні дані наведені на рис. 1. Як видно, до моменту часу  $t = 0,06$  с, при якому  $V = 4,4$  м/с, значення середньої швидкості  $V$  із задовільною точністю співпадають і розбіжність між даними розрахунку і значеннями, одержаними експериментально не перевищують  $\pm 5\%$ . Починаючи з цієї швидкості, розбіжність збільшується. Тому цю середню швидкість можна вважати швидкістю, за якої відбувається перехід до турбулентного режиму течії.

Визначені таким чином середні швидкості для різних значень швидкості лінійного зростання тиску наведено на рис. 2.

З рис. 2 випливає, що існує певна залежність між швидкістю проходження нестационарного процесу, яка

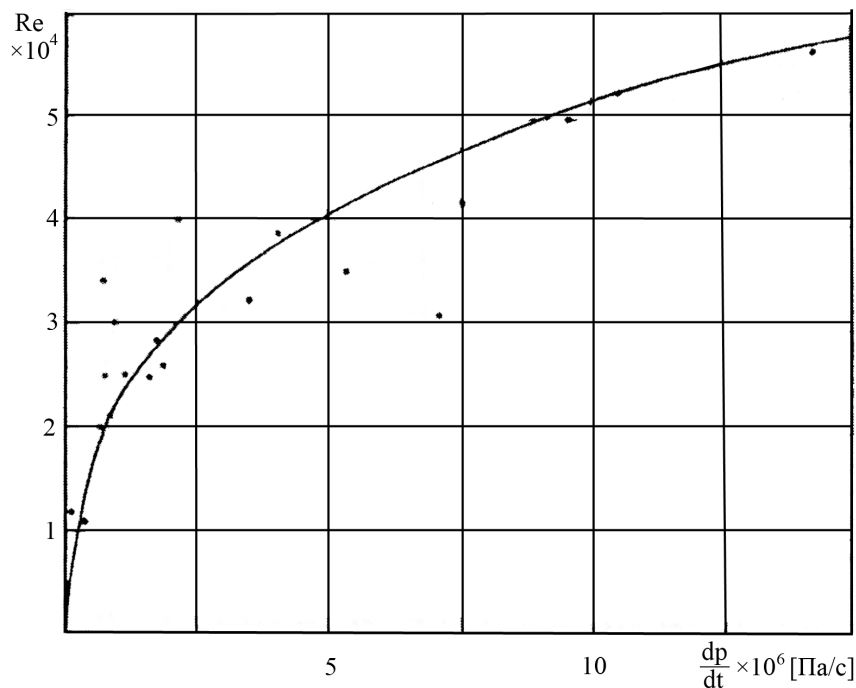


Рис. 2. Залежність швидкості проходження нестационарного процесу від швидкості зростання тиску

характеризується швидкістю зростання тиску, і середньою швидкістю течії. Причому великим швидкостям нестационарного процесу відповідають більші середні швидкості, за яких відбувається перехід від ламинарного режиму до турбулентного руху рідини. Цей результат узгоджується із раніше одержаним результатом [3].

### Висновки

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень отримані залежності між швидкістю проходження нестационарного процесу, яка характеризується швидкістю зростання тиску і середньою швидкістю течії рідини, що дозволяють враховувати їх вплив для вдосконалення розрахунку неусталених потоків.

**Аннотация.** В результате теоретических и экспериментальных исследований получены зависимости между средней скоростью потока при которой теряется стойкость ламинарного режима и скоростью повышения давления. Результаты проведенных исследования позволяют определять эти величины и учитывать их влияние при переходных процессах неуставившегося движения.

**Ключевые слова:** неуставившейся, нестационарный, движение жидкости.

**Abstract.** Experimental researches show that at motion of liquid from a spacehold, in a stream the mode of laminar of flow is saved at the greater instantaneous values of number of Reynol'dsa, than at stationary motion. Important is a question of dependence of origin of turbulence from descriptions of transient.

The purpose of the offered work are experimental and theoretical researches for establishment of dependence of change of middle speed from growth of pressure at an unwithstand motion of liquid in pipes.

Experimental information, got in the process of research of transients, is resulted in this work. It is got dependence between middle speed, at which firmness of the mode of laminar of flow is lost and by speed of growth of pressure. The moments of passing to the

turbulent flow are certain comparison of the experimentally got middle speed with middle speed, certain a theoretical calculation. The results of the conducted researches allow to determine these sizes and take into account their influence at the transients of an unwithstand motion of liquid in pipelines.

Keywords: instable, non-stational, liquid of movement.

#### Бібліографічний список використаної літератури

1. *Toebes H.* Hydrodynamic forces on boundaries due to unsteady flow/ H. Toebes// In: 13th Congress IAHR, Paris.- 1971.- General Reports.- P. 59-74.
2. *Константинов С.В.* Замкнутое описание неустановившегося турбулентного течения реальной жидкости в трубе/ С.В. Константинов// Моск. ин-т нефтехим. и газ. пром-сти им. И.М.Губкина.- М.: 1976.- С. 1-10.
3. *Худаско В.В.* Нестационарное турбулентное течение несжимаемой жидкости/ В.В. Худаско// Обнинск, Физико-энергетический ин-т.- 1973.- С. 1-17.
4. *Васильев О.Ф.* Неустановившееся турбулентное течение в трубе/ О.Ф. Васильев, В.И. Квон// Журнал прикладной механики и техн. физики, Изв. АН СССР.- 1971.- № 6.- С. 132-140.
5. *Квон В.И.* Численное решение задачи о неустановившемся турбулентном течении несжимаемой жидкости в трубе/ В.И. Квон, Р.Т. Чернышева // Числ. методы мех. сплош. среды,(Новосибирск).- 1976.- Т. 7, № 2.- С. 32-43.
6. *Гнатів Р.М.* Експериментальні дослідження неусталених течій в трубах / Р.М.Гнатів, І.П.Вітрух // Промислова гідроліка і пневматика.-2009.-№4 (26).-С.28-31.
7. *Букреев В.И.* Экспериментальное исследование энергии турбулентности при неустановившемся течении в трубе/ В.И. Букреев, В.М. Шахин// Динамика сплошной среды, 1975.- Вып. 22.- С. 65-74.
8. *Калмыкова З.А.* Экспериментальное исследование профилей местных скоростей при переходных процессах в трубах/ З.А. Калмыкова, И.Г. Мохов, Д.Н. Попов // Транспортное и энергетическое машиностроение №2.- 1972.- С. 61 – 65.
9. *Мохов И.Г.* Экспериментальное исследование профилей местных скоростей в трубе при колебаниях расхода вязкой жидкости/ И.Г. Мохов, Д.Н. Попов// Изв. высш. учебн. заведений, Машиностроение.- 1971.- №7.- С.91-95.
10. *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.

#### References

1. *Toebes H.* Hydrodynamic forces on boundaries due to unsteady flow. In: 13th Congress IAHR, Paris. 1971. General Reports. P. 59-74.
2. *Konstantinov S.V.* Zamknuoye opisaniye neustanovivshegosya turbulentnogo techeniya real'noy zhidkosti v trube. Mosk. in-t neftekhim. i gaz. prom-sti im. I.M.Gubkina. Moscow: 1976. P. 1-10.
3. *Khudasko V.V.* Nestatsionarnoye turbulentnoye techeniye neszhimayemoy zhidkosti. Obninsk, Fiziko-energeticheskiy in-t. 1973. P. 1-17.
4. *Vasil'yev O.F., Kvon V.I.* Neustanovivshesya turbulentnoye techeniye v trube. Zhurnal prikladnoy mekhaniki i tekhn. fiziki, Izv. AN SSSR. 1971. No. 6. P. 132-140.
5. *Kvon V.I., Chernysheva R.T.* Chislennoye resheniye zadachi o neustanovivshemsya turbulentnom techenii neszhimayemoy zhidkosti v trube. Chisl. metody mekh. splosh. sredy, (Novosibirsk). 1976. T. 7, No. 2. P. 32-43.
6. *Gnativ R.M., Vitruk I.P.* Yeksperimental'ni doslidzhennya neustalenikh techiy v trubakh. Promislova gidravlika i pnevmatika.- 2009. No. 4 (26). P.28-31.
7. *Bukreyev V.I., Shakhin V.M.* Eksperimental'noye issledovaniye energii turbulentnosti pri neustanovivshemsya techenii v trube. Dinamika sploshnoy sredy, 1975. Vyp. 22. P. 65-74.
8. *Kalmykova Z.A., Mokhov I.G., Popov D.N.* Eksperimental'noye issledovaniye profiley mestnykh skorostey pri perekhodnykh protsessakh v trubakh. Transportnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye No.2. 1972. P. 61 – 65.
9. *Mokhov I.G., Popov D.N.* Zksperimental'noye issledovaniye profiley mestnykh skorostey v trube pri kolebaniyakh raskhoda vyazkoy zhidkosti. Izv. vyssh. uchebn. zavedeniy, Mashinostroyeniye. 1971. No.7. P.91-95.
10. *Gnativ R.M.* Doslidzhennya rozpodilu shvidkostey pri neustaleniy techiy rідini v truboprovodі. Promislova gidravlika i pnevmatika. 2013. No.2(40). P. 57-59.

Подана до редакції 08.08.2013