

Розподіл локальних швидкостей в круглій трубі за розгінного руху рідини

О.М. Яхно¹ • Р.М. Гнатів² • І.Р. Гнатів² • Сейед Фаршад Разави¹

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

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

Received: 26 October 2018 / Accepted: 20 November 2018

***Анотація.** 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*

Вступ

За прискореного руху рідини спостерігається затягування ламінарного режиму з подальшим переходом до турбулентного при миттєвих числах Re , які на кілька порядків перевищують критичне Re в стаціонарних умовах. Дослідження цієї ділянки нестационарного ламінарного руху має практичне значення, оскільки за неусталених потоків перехід від ламінарного до турбулентного режиму течії відбувається складніше, ніж при стаціонарних потоках, тому виникає необхідність проведення досліджень для вивчення механізму цього переходу.

Кількість опублікованих експериментальних робіт з дослідження неусталених течій рідини в трубах незначна. Більшість робіт присвячено вимірюванню тільки інтегральних характеристик - визначенню тиску або часу виникнення турбулентності. Дослідженню локальних характеристик присвячені роботи [1, 2], де представлені результати дослідження дотичних напружень на стінці труби при виникненні руху рідини в трубі та деякі дані про розподіл швидкостей до виникнення турбулентності.

Грунтовне дослідження структури швидкостей за поширення штучно генерованих збурень при переході від одного турбулентного стаціонарного режиму до іншого наведено в роботах [3, 4]. У цих роботах локальні швидкості визначені електрохімічним способом.

Мета

Експериментальне дослідження розподілу швидкостей в живому перерізі трубопроводу для вдосконалення методики розрахунку структур неусталених потоків рідин в круглих трубопроводах.

Дослідження

Ця робота є продовженням робіт [1, 2]. В ній наводяться експериментальні результати вимірювання локальних швидкостей руху по радіусу труби за розгінного руху рідини зі стану спокою термоанемометричним способом. Досліди проводилися на експериментальній установці, основні вузли якої описані в роботі [5]. Дослідна схема, яка використовувалась для проведення дослідів, має закритий контур і виготовлена з нержавіючої сталі, а робоча ділянка установки з плавним входом має довжину $L = 12,6$ м та внутрішній діаметр $d = 0,0596$ м.

Для визначення локальних характеристик нестационарного потоку застосовувалася термоанемометрична апаратура фірми "DISA". Як датчики для вимірювання локальної швидкості в трубі був застосований

✉ О.М. Яхно
mmi@kpi.ua

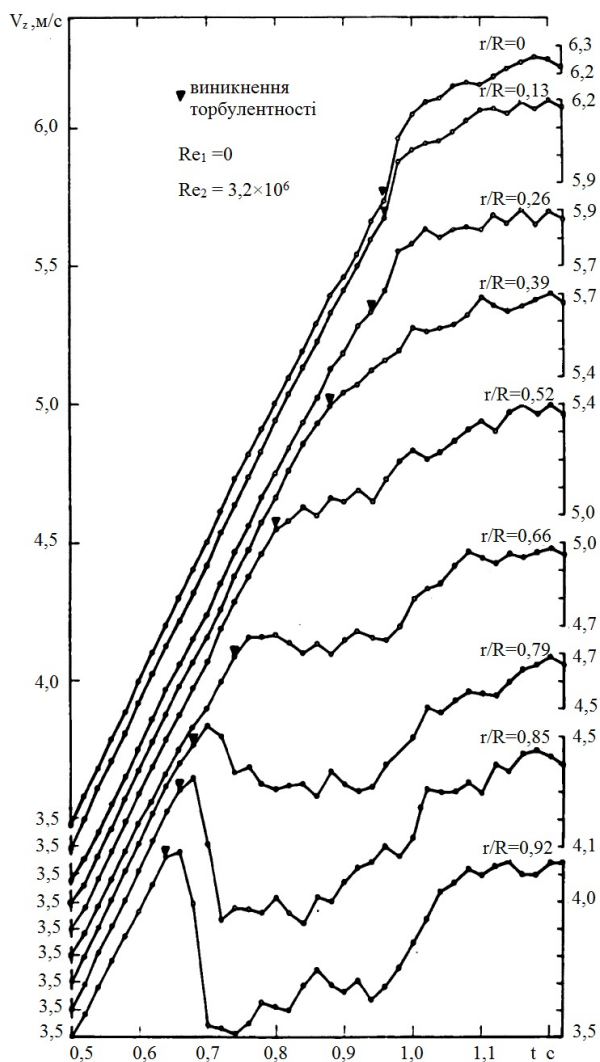


Рис. 1. Зміна поздовжніх швидкостей V_z в різних точках поперечного перерізу ($\xi=0,47$)

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.

Коефіцієнт γ виражається як функція від відносного часу

$$\gamma = f\left(\frac{t-t_0}{\Delta t}\right), \quad (2)$$

де Δt - час поширення турбулентності від стінки до осі; t - момент виникнення турбулентності в даній точці; t_0 - момент виникнення турбулентності на стінці.

Розподіли швидкості по перерізу труби представлені на рис. 3 і 4. Видно, що до виникнення турбулентності має місце рівномірний розподіл і лише у відносно тонкому пристінному шарі спостерігаються градієнти швидкості. Тому до виникнення турбулентності, завдяки значним силам інерції, рідина поводить як пружне тіло, що здійснює коливальний рух та ковзає по твердих стінках. У зв'язку з цим дотичні

термоанемометричний кінцевий 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 сусіднім точкам. Виявилось, що для отримання більш гладких функцій для шуканої характеристики необхідно в ансамблі мати набагато більше дослідів, особливо в пристінній ділянці. На графіках чітко видно моменти заміни режиму течії від ламінарної в турбулентну, які на рисунку позначені чорними трикутниками.

Наведені на рис. 1 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 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 γ [6]. Нижче, на рис. 2 наводиться зміна коефіцієнта γ в умовах нестационарного потоку в трубі. Коефіцієнт γ визначається в такий спосіб

$$\gamma = \frac{S_T}{S} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad (1)$$

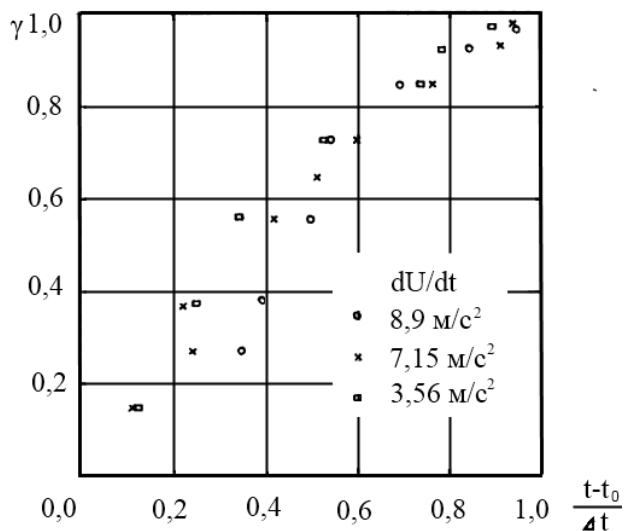


Рис. 2. Залежність коефіцієнта переміжності γ від відносного часу $(t - t_0 / \Delta t)$

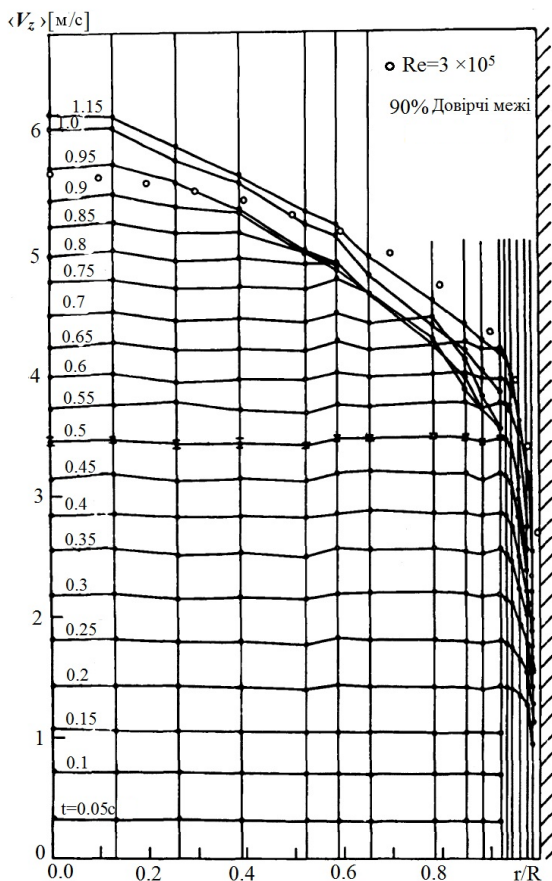


Рис. 3. Експериментальні дані зміни поздовжніх швидкостей V_z в процесі розгону рідини ($\xi=0,47$)

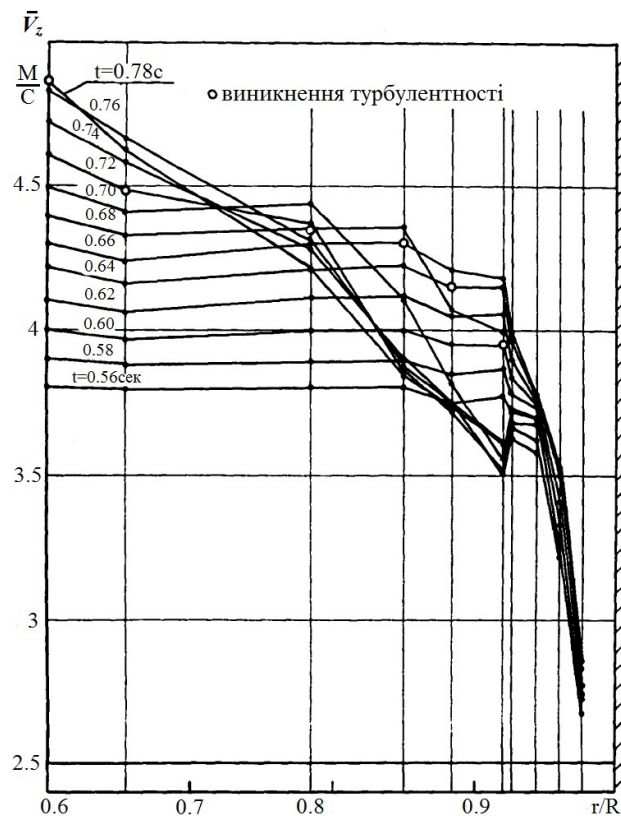


Рис. 4. Експериментальні дані зміни поздовжніх швидкостей V_z ($r/R=0,6-0,99$)

напруження сконцентровані в тонкому пристінному шарі і характеризуються величиною дотичного напруження на стінці τ_0 . Як видно з рис. 5, в момент виникнення турбулентності виміряне τ_0 зростає стрибкоподібно, чому відповідає стрибкоподібна зміна градієнта швидкості на стінці. Внаслідок цього виникає загальмованість рідини в пристінній ділянці. Експериментальні дані цього явища представлені на рис. 1, 3, 4. На цих графіках добре видно, що чим ближче до стінки, тим більше і зменшення швидкості після виникнення турбулентності.

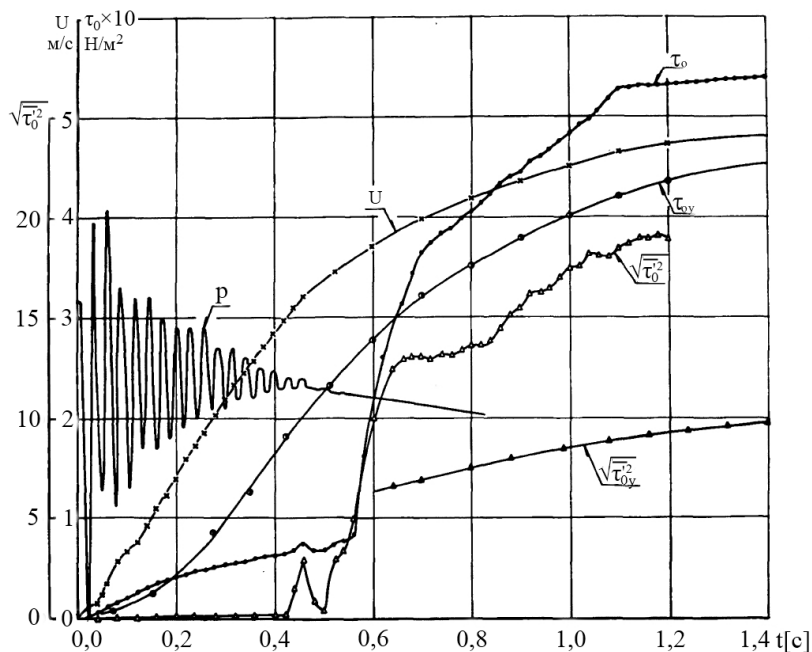


Рис. 5. Порівняння експериментальних даних дотичного напруження τ_0 та інтенсивності цієї величини $\sqrt{\tau_0^2}$ з квазістаціонарними величинами

Як показано в [2], турбулентна локальна характеристика $\sqrt{u_x'^2}$ відрізняється від тієї ж характеристики стаціонарної течії. На рис. 6 наведені експериментальні графіки інтенсивності пульсації поздовжньої швидкості $\sqrt{u_x'^2} / u_*$. Показано, що максимум інтенсивності спостерігається в точці $r/R = 0,88$. З дослідних даних видно, що максимум інтенсивності з часом поступово зменшується, а також переміщається в сторону осі труби. Починаючи з $r/R = 0,52$

інтенсивність пульсації практично не перевищує інтенсивність, що спостерігається за стаціонарного руху. Пунктирною лінією на цих епіюрах відзначені інтенсивності пульсації, що відповідають кінцевій стаціонарній течії.

Зміна структури потоку відображається також у зміні миттєвої середньої в перерізі швидкості V . На рис. 6 видно, що прискорення потоку до моменту часу $t = 0,43$ с майже постійне, проте τ_0 починає різко зростати в момент $t = 0,55$ с. Таку неузгодженість можна пояснити тим, що турбулентність виникає не на стінці, а в

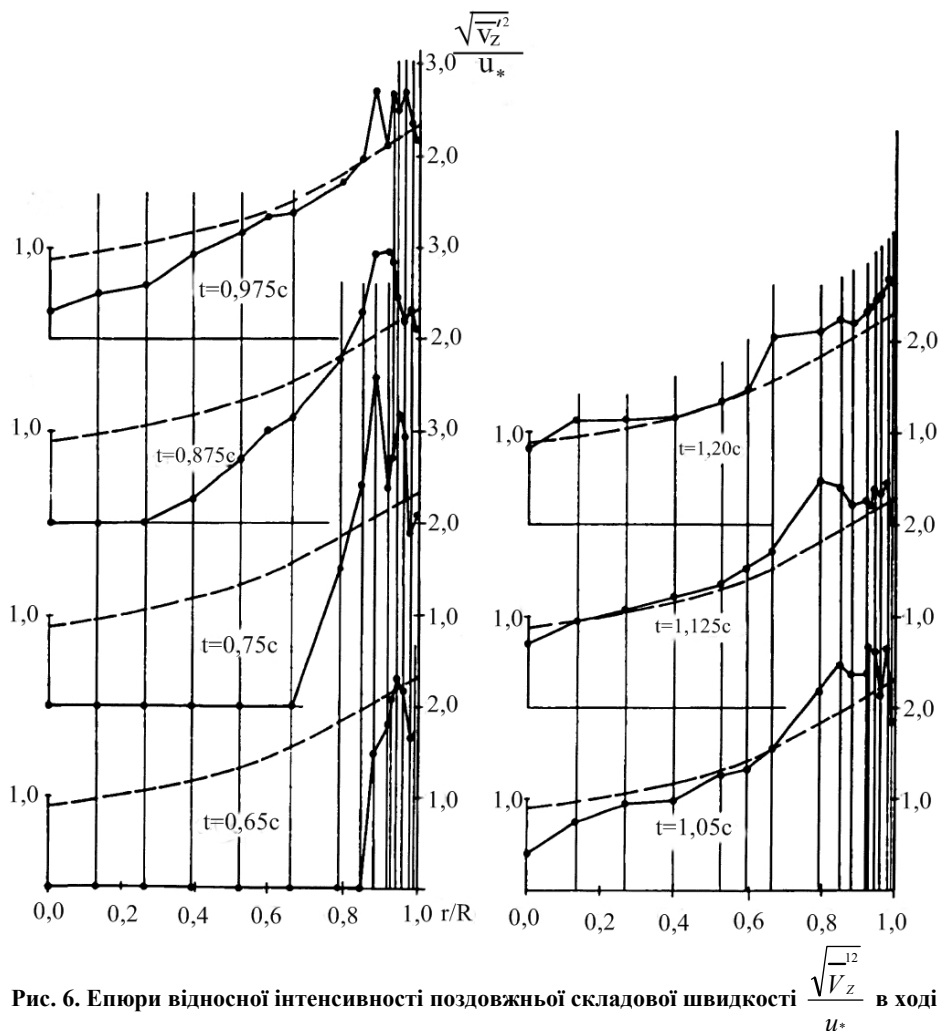


Рис. 6. Епіюри відносної інтенсивності поздовжньої складової швидкості $\frac{\sqrt{V_z^2}}{u_*}$ в ході розгону

пристінній ділянці на деякій відстані від твердих меж і на поширення турбулентності до стінки потрібен час. Підтвердженням сказаного є поведінка залежності стандартного відхилення пульсації дотичного напруження $\sqrt{\overline{\tau_x'^2}}$ на рис. 5. В момент часу $t = 0,44$ с з'являється викид, який вказує, що імпульс турбулентної пульсації досяг поверхні датчика (стінки труби). Названий момент добре узгоджується з переломною точкою характеристики середньої швидкості V .

Висновки

За результатами проведеного експериментального дослідження можна зробити наступні висновки:

1. За прискореного руху рідини (з прискореннями від 1 до 12 м/с²) зі стану спокою до виникнення турбулентності зберігається рівномірний розподіл швидкостей в перерізі труби і лише в тонкому пристінному шарі спостерігаються градієнти швидкостей.

2. Різкий перехід в характеристиці τ_0 за заміни ламінарного режиму турбулентним [1, 2] спостерігається також в характеристиках локальних швидкостей. У момент переходу до турбулентного режиму з'являється переломна точка на графіку величини середньої швидкості, а розподіл швидкостей та інтенсивність турбулентності зазнають значних змін в порівнянні зі стаціонарними турбулентними потоками.

3. Фронт переходу ламінарного режиму до турбулентного режиму за неусталеного руху рідини в трубі поширюється в напрямку центру перерізу майже з постійною швидкістю.

Распределение локальных скоростей в круглой трубе при разгонном движении жидкости

О.М. Яхно, Р.М. Гнатив, И.Р. Гнатив, Сейед Фаршад Разави

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований разгонного движения жидкости в цилиндрической трубе из состояния покоя. Для определения локальных характеристик нестационарного потока использовано термоанемометрическую аппаратуру. Установлено, что при ускоренном движении жидкости из состояния покоя до возникновения турбулентности сохраняется равномерное распределение скоростей в сечении трубы и только в тонком пристеночном слое наблюдаются градиенты скоростей. В момент перехода к турбулентному режиму появляется переломная точка на графике изменения величины средней скорости, а распределение скоростей и интенсивность турбулентности претерпевают значительные изменения по сравнению со стационарными турбулентными потоками. Турбулентность генерируется в пристеночной области и распространяется к центру сечения трубопровода практически с постоянной скоростью.

Ключевые слова: неусталений, нестационарний, рух рідини, структура потоку.

Average local velocity in the round pipe for fluid flow overclocking

O.M. Yakhno, R.M. Hnativ, I.R. Hnativ, Seied Farshad Razavy

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of the accelerating motion of a liquid in a cylindrical tube from a state of rest. Thermal anemometric equipment is used to determine the local characteristics of a non-stationary flow. It is established that with accelerated fluid motion from the state of rest to the appearance of turbulence, a uniform distribution of the velocities in the cross section of the pipe remains and only gradients of velocities are observed in a thin wall layer. At the moment of transition to the turbulent regime, a turning point appears on the graph of the change in the mean velocity, and the velocity distribution and the intensity of turbulence undergo significant changes in comparison with stationary turbulent flows. Turbulence is generated in the near-wall region and extends to the center of the pipeline section at practically constant speed.

Keywords: unstable, nonstationary, fluid motion, flow structure.

References

1. Гнатив Р.М. Экспериментальне визначення пульсації дотичних напружень на стінці трубопроводу при перехідному режимі руху рідини / Р.М. Гнатив // Промислова гідраліка і пневматика. - 2012. - №3(37). - С. 52-54.
2. Гнатив Р.М. Дослідження розподілу швидкостей при неусталеній течії рідини в трубопроводі / Р.М. Гнатив // Промислова гідраліка і пневматика. - 2013. - №2(40). - С. 57-59.
3. Maruyama T. The structure of the turbulence in transient pipe flows/ T. Maruyama T. Kuribayashi, T. Mizushina. - Journ. of Chem. Eng. of Japan. - 1976. - Vol. 9, N 6. - P. 431-439.
4. Maruyama T. Transition to turbulence in starting pipe flows/ T. Maruyama, Y. Kato, T. Mizushina // J. Chem. Eng. Japan. - 1978. - V.11, No. 5. - P. 346-353.
5. Яхно О.М. Залежність середньої швидкості потоку від зростання тиску при неусталеному русі рідини в трубопроводі / О.М. Яхно, Р.М. Гнатив // Вісник НТТУ "КПІ". Серія машинобудування. - 2013. - № 3(69). - С. 198-202.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. - М.: Наука, 1974. - 712 с.