

УДК 532.54.013.2

Гнатів Р.М., к.т.н., доц., Босак М.П., к.т.н., доц.
НУ «Львівська політехніка» м. Львів, Україна

ЗМІНА ЕНЕРГІЇ ПРИШВИДШЕНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКУ РІДИНИ В ТРУБОПРОВІДІ ЗА ДАНИМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Hnativ R., Bosak M.
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

CHANGING ENERGY ACCELERATED TURBULENT FLUID FLOW IN THE PIPELINE ACCORDING TO SPECTRAL ANALYSIS

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень пришвидшеної течії рідини в циліндричному напірному трубопроводі проведено якісну оцінку спектрального складу енергії турбулентного потоку. Отримані густини спектрів на різних відстанях від стінки труби. Згідно оцінок, передача енергії між низькими і високими частотами в нестационарному потоці суттєво відрізняється від передачі енергії в стаціонарному потоці.

Ключові слова: неусталений, нестационарний, рух рідини, спектральний аналіз, зміна енергії

Вступ

У стаціонарних турбулентних потоках для характеристики енергетичних властивостей течії успішно використовується спектральне розкладання пульсаційної енергії із застосуванням автокореляційної функції за частотами [1, 2] або просторової кореляційної функції за хвильовими числами [3, 4]. Враховуючи гіпотезу Тейлора, в стаціонарних потоках можна зробити порівняння отриманих результатів.

В роботі [4] наводяться виміряні спектри локальних швидкостей u при стаціонарній течії на різних відстанях від стінки каналу. Характерно, що відстань від стінки впливає на розподіл енергії швидкості. Відносна частка енергії низькочастотних компонентів від усієї енергії в пристінній області більше, ніж у ядрі потоку.

Спектри дотичних напружень на стінці τ_0 в умовах стаціонарної течії наводяться в багатьох роботах [1-3, 5]. У результаті аналізу цих експериментальних робіт бачимо, що в характеристиці τ_0 при збільшенні числа Re збільшується відносна частка енергії високочастотних компонентів пульсації.

На основі [6] з'ясовується, що розподіли u і τ_0 відрізняються від нормального розподілення. У пристінній зоні течії коефіцієнт асиметрії $A > 0$, а в ядрі потоку $A < 0$. Змінюється і ексцес розподілу по радіусу труби.

Для розрахунку спектрального розподілу енергії в нестационарних течіях немає загальноприйнятої методики. Огляд відповідних теоретичних робіт наведено в [7], однак явища гідродинамічної нестационарності не можна описати в межах детермінованої нестационарної моделі і тому викладені методи аналізу не застосовні.

При розгляді пришвидшеного руху рідини із стану спокою процес течії можна розділити на три частини: початковий ламінарний режим, перехід в турбулентний режим і розвинений нестационарний турбулентний режим. Питання деформації епіюр швидкостей такого розгінного потоку розглянуті в роботі [8].

Метою запропонованої роботи є оцінка зміни енергії в турбулентній частині пришвидшеного процесу за допомогою спектрального аналізу.

Дослідження

У стаціонарній турбулентній течії оцінки турбулентних характеристик можна одержати через одну реалізацію. За нестационарних течій необхідно провести серію дослідів і оцінити характеристики через обробку ансамблю. Для отримання оцінки спектрального складу нестационарної течії необхідно розділити реалізацію u і τ_0 на короткі інтервали і провести відповідний розрахунок.

Експериментальні дані u і τ_0 можна описати наступним чином:

$$x = \bar{x} + x_c, \quad (1)$$

де \bar{x} для короткого проміжку часу має вигляд:

$$\bar{x} = \alpha t + \beta. \quad (2)$$

При цьому α і β є випадковими величинами і x_c можна розглядати як квазістаціонарну турбулентну реалізацію. Надалі розглядаємо u і τ_0 нестационарної течії як стаціонарні величини з лінійним трендом, викликаним нестационарністю. Випадкові коефіцієнти α і β визначаємо з наступних умов:

$$\int_0^T (x - \alpha t - \beta) dt = 0, \quad (3)$$

$$\int_0^T (x - \alpha t - \beta)^2 dt = \min. \quad (4)$$

Після знаходження для кожної нестационарної реалізації x_c , обчислюємо спектральні густини та статистичні розподіли (гістограми) і проводимо обробку за методом ансамблю.

На рис. 1 наведено зміну τ_0 при початковому пришвидшенні течії $dV / dt = 7,15 \text{ м/с}^2$ разом з 90%-ми довірчими межами, отриманими після обробки ансамблю з 52 дослідів. Як видно, середній тренд для двох проміжків часу T_1 і T_2 , що характеризують нестационарність процесу, знаходиться добре в 90%-них межах. Віднімання тренду з реалізацій необхідно також для отримання достовірного складу енергії високочастотних компонентів пульсацій.

Статистичні розподіли обчислюємо звичайним методом, а спектральні густини методом швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [1] для дискретної випадкової величини x_n

$$X_k(n) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot b_n \cdot \exp\left(\frac{-2\pi i k n}{N}\right), \quad (5)$$

де: b_n - згладжуючий фільтр косинусоїдного типу для зменшення просочування енергії в наступному вигляді

$$b_n = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{10\pi n}{N}\right) \right], \quad 0 \leq n \leq \frac{N}{10};$$

$$b_n = 1, \quad \frac{N}{10} < n < \frac{9N}{10}$$

$$b_n = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left[\frac{10\pi(N-n)}{N}\right] \right], \quad \frac{9N}{10} \leq n \leq N. \quad (6)$$

Оцінку спектральної густини отримуємо таким чином:

$$\bar{F}(f_k) = \frac{2h}{NH_b} |X_k|^2, \quad (7)$$

де: h - інтервал часу між відліками ($h = 0,001$) та $H_b = 0,875$ для вищенаведеного косинусоїдного фільтра.

Після цього проводимо згладжування спектру за частотами і опрацьовуємо за ансамблем. У всіх наведених розрахунках число відліків $N = 256$.

Характер дисперсії нормованих спектрів описується через параметр q , наведений в роботі [9]

$$q = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \lambda_2}}. \quad (8)$$

Моменти спектрального розподілу знайдемо за формулою

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^m f_k^i \cdot \frac{F(f_k)}{\sigma^2} \Delta f, \quad (9)$$

де спектральне розподілення визначено на рівномірних частотах $f = f_k$, $k = 1, 2 \dots m$ і σ^2 дисперсія u і τ_0 . Фактор q є розміром дисперсії частоти випадкового процесу і повинен знаходитися в межах $0 \leq q \leq 1$. Для коливання у вигляді чистого синуса $q = 0$ і для вузькосмугового процесу q набагато менше одиниці.

При розгоні рідини зі стану спокою перехід від ламінарного режиму в турбулентний виникає в пристінних областях [8], після цього відбувається поширення турбулентних зон в радіальному напрямку до осі труби. Як показують досліді, характеристики турбулентності в різні моменти переходу з розвитком турбулентності, зазнають великих зміни і поступово з плином часу наближаються до величин стаціонарних потоків.

Прикладом сказаного є проведений в рамках даного дослідження аналіз спектрального розподілу енергії локальної швидкості u . На рис. 2 наведені нормовані спектральні густини, для різних точок живого перерізу після виникнення турбулентності в даній точці. Так як турбулізація живого перерізу відбувається з деякою швидкістю по радіусу, то представлені спектри відповідають різним моментам часу. Звідси видно, що низькочастотні компоненти спектрів в пристінній області мають більшу енергію, ніж спектри в ядрі течії. Причому максимум спостерігається на відстані $r / R = 0,79$.

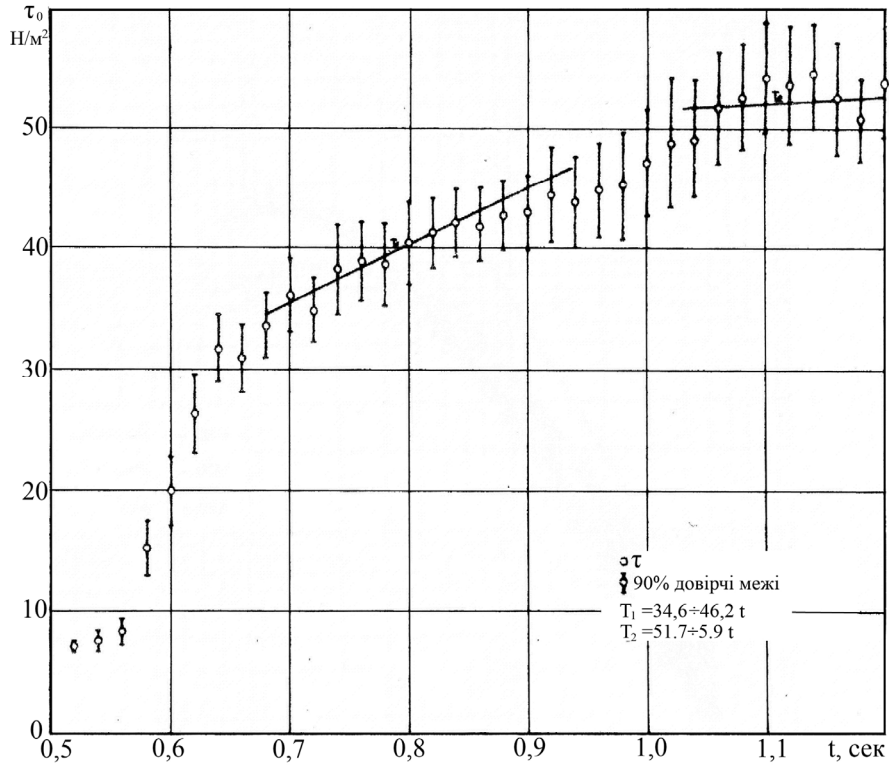


Рис. 1. Визначення лінійного тренду при розрахунку характеристики величини дотичного напруження на стінці τ_0

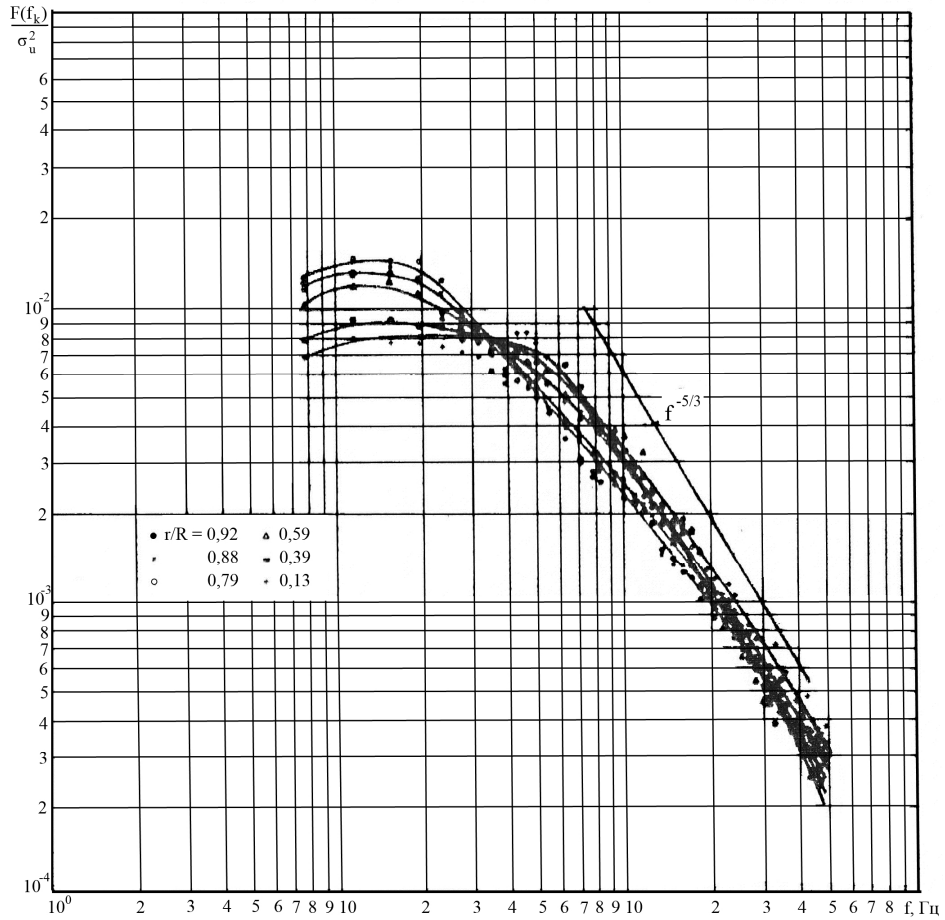


Рис. 2. Спектральний розподіл турбулентної енергії в точках після виникнення турбулентності в розглянутій точці

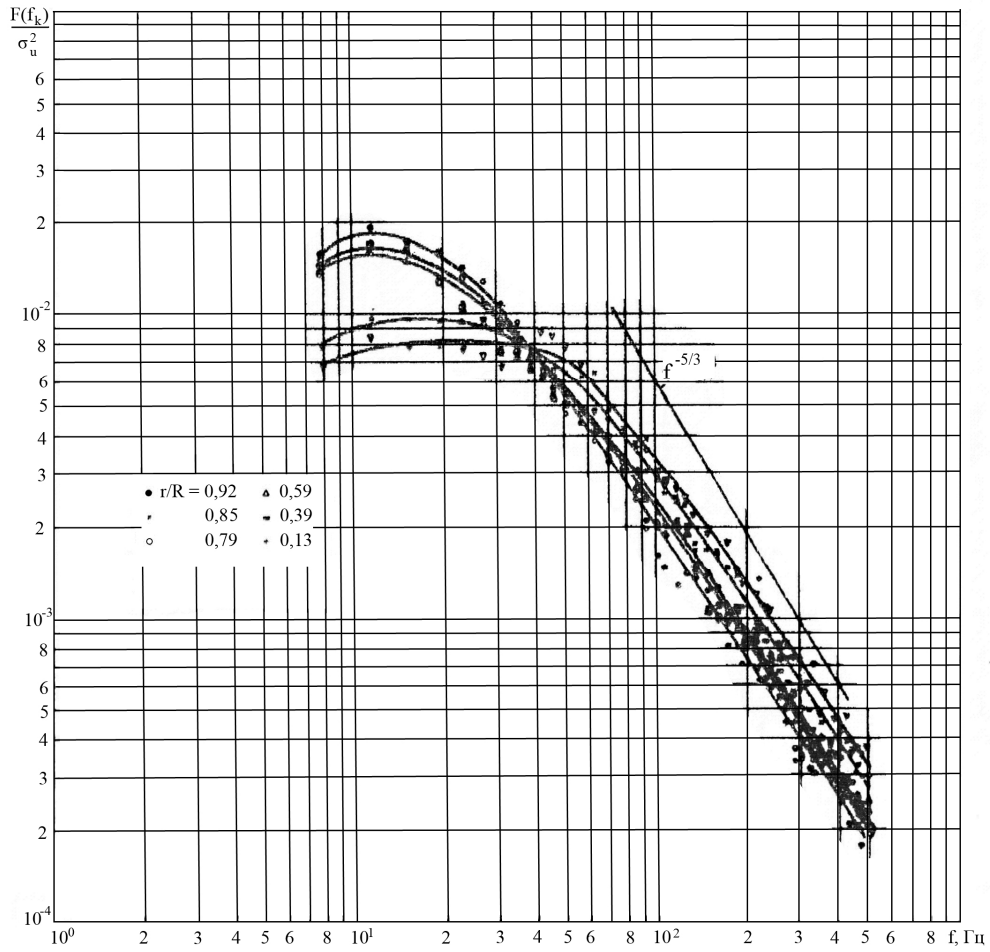


Рис. 3. Спектральний розподіл турбулентної енергії в різних точках перерізу в момент часу $t=1,04\text{с}$

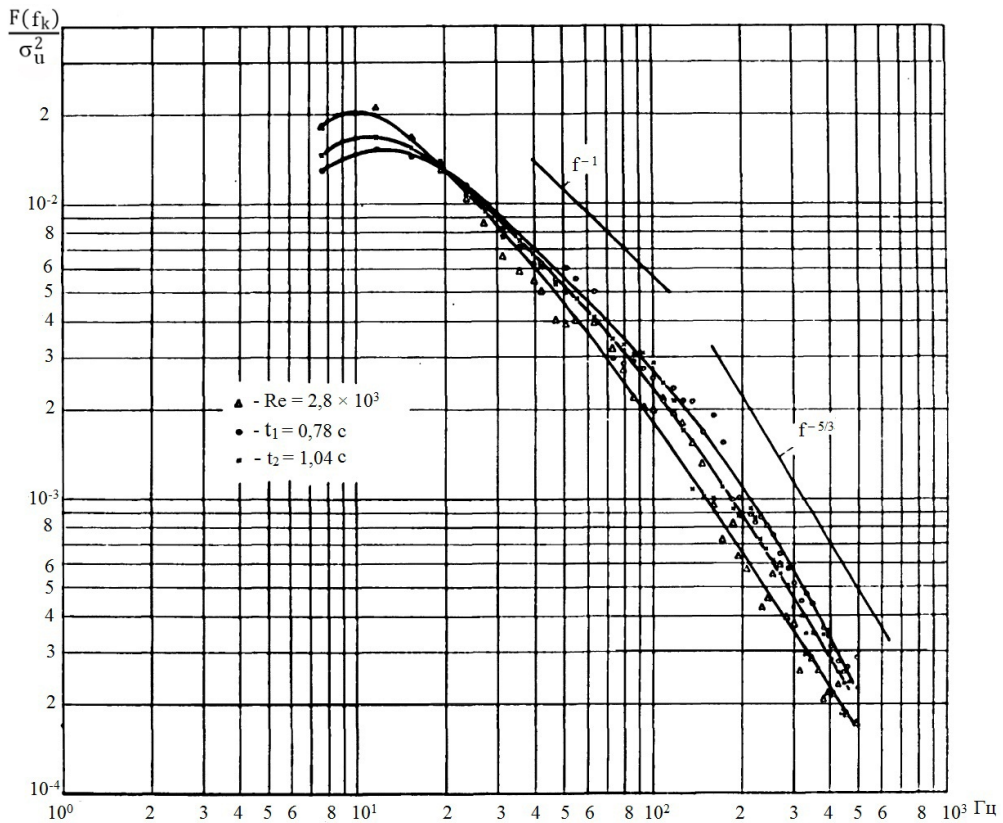


Рис. 4. Спектральний розподіл турбулентної енергії на відносному радіусі $r/R=0,79$ у процесі пришвидшеного руху

На рис. 3 представлені спектри в цих же точках в один момент часу ($t=1,04$ с), що відповідають розподіленню турбулентності до центру перерізу, коли він повністю турбулізований. При цьому характер спектрів не змінюється, але максимальне значення енергії низькочастотних компонентів знаходиться на відстані $r/R = 0,85$. Причому спостерігається, що енергія низькочастотних компонентів має тенденцію до збільшення з розвитком процесу. З іншого боку видно, що з проходженням перехідного процесу спектри наближаються до закону $-5/3$, що відповідає інерційній області. Вплив відстані від стінки на розподіл пульсаційної енергії в спектрах знайдено також після обробки результатів роботи [4].

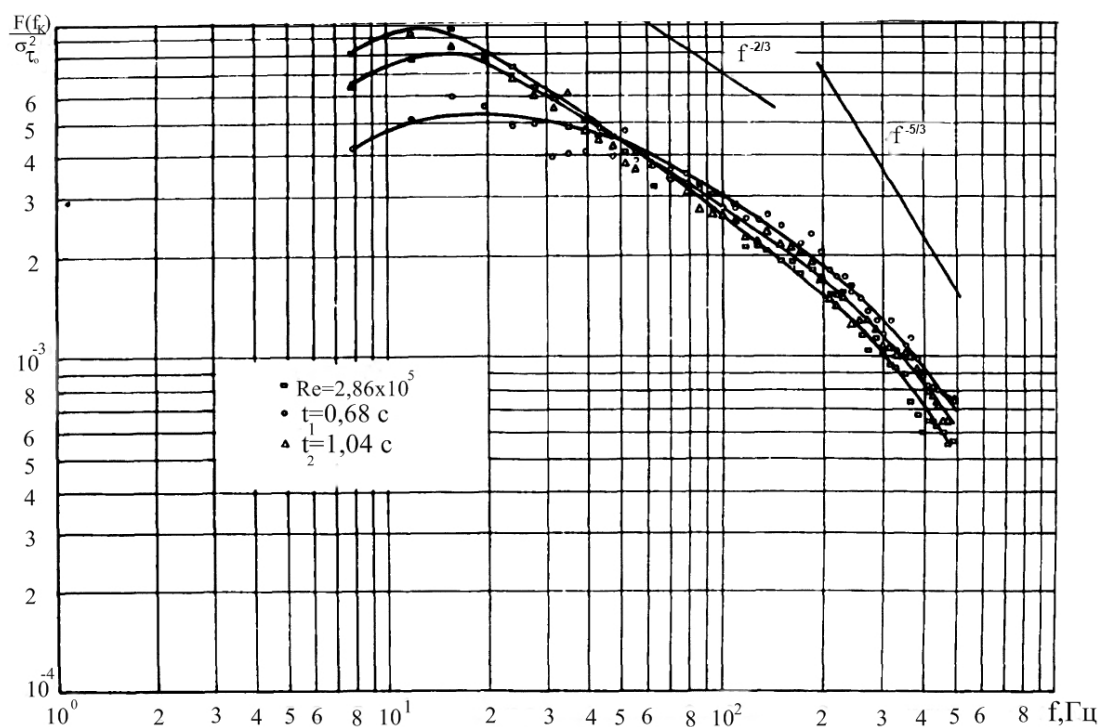


Рис. 5. Спектральний розподіл енергії τ_0

Зміна спектрів локальної швидкості u в залежності від часу протікання перехідного процесу представлено на рис. 4. Тут зображені три спектри: на відстані $r/R=0,79$ після виникнення турбулентності в момент $t_1 = 0,78$ с, після турбулізації всього перерізу труби $t_2 = 1,04$ с і в стаціонарному потоці при $Re = 2,9 \times 10^5$. Помітно, що в стаціонарному потоці низькочастотні компоненти в енергетичному відношенні більш переважаючі, ніж у спектрах, що відповідають перехідній області. На графіку можна також виділити область з нахилами -1 і $-5/3$.

Спектральний розподілення енергії τ_0 представлено на рис. 5. Зміна складу енергії в низькочастотній частині подібна на зміну спектрів локальної швидкості, але необхідно відзначити, що нахил спектра при цьому менший і при середніх частотах дорівнює приблизно $-2/3$. Такий результат узгоджується з даними роботи [1], де спостерігається закономірність зменшення нахилу нормованих спектрів τ_0 із збільшенням числа Re .

З іншого боку, необхідно відзначити, що перерозподіл енергії в низькочастотній частині спектра має протилежний характер. При стаціонарних течіях із збільшенням середньої швидкості (числа Re) відносна частина низькочастотних компонентів зменшується, однак при розгляді перехідних процесів відповідна частина спектра збільшується із зростанням миттєвого числа Re . Це вказує на те, що після турбулізації течії турбулентність є більш дрібномасштабною і з розвитком течії частка великомасштабної частини збільшується.

Висновки

1. При перехідних до турбулентності течіях низькочастотні компоненти спектрів локальної швидкості в пристінній частині течії мають відносно більшу частину із загальної енергії, ніж в ядрі потоку. Причому максимум знаходиться на $r/R = 0,79$ в перехідній частині течії і на $r/R = 0,85$ після турбулізації всього поперечного перерізу труби.

2. У стаціонарних течіях відносна частка енергії низькочастотних компонентів зменшується із зростанням середньої швидкості течії (числа Re). При перехідних течіях відбувається протилежний процес, а саме, після турбулізації течії турбулентність є більш дрібномасштабною і з розвитком течії частка великомасштабної частини збільшується.

Аннотация. По результатам теоретических и экспериментальных исследований ускоренного течения жидкости в цилиндрическом напорном трубопроводе проведена качественная оценка спектрального состава энергии турбулентного потока. Полученные плотности спектров на разных расстояниях от стенки трубы. По оценкам, передача энергии между низкими и высокими частотами в нестационарном потоке существенно отличаются от передачи энергии в стационарном потоке.

Ключевые слова: неустойчивое, нестационарный, движение жидкости, спектральный анализ, изменение энергии.

Abstract. According to the results of theoretical and experimental studies of accelerated fluid flow in a cylindrical pressure pipe made a qualitative assessment of the spectral composition of the energy of turbulent flow. Density spectra obtained at different distances from the pipe wall. According to estimates, the transfer of energy between the low and high frequencies in unsteady flow significantly different from the energy transfer in a steady stream. In the transition to the low-frequency components of turbulent currents of the spectra in the near-wall local rate of flow with a relatively large part of the total energy than in the core flow. In steady flow relative share of low-energy component decreases with the increase of average flow velocity (number Re). Transient currents reverse process occurs after the turbulence of flow turbulence is a small-scale and large-scale development of the current portion of the increase.

Keywords: unstable, unsteady, fluid motion, spectral analysis, the change in energy.

Бібліографічний список використаної літератури

1. *Blinco, P.H.* Turbulent structure near smooth boundary /P.H. Blinco, D.B. Simons//. - J. of the Eng. Mech. Div.- Vol. 101, № 3.-1975.-P. 241-255.
2. *Sreenivasan, K.R.* Properties of wall shear stress fluctuations in a turbulent duct flow/K.R. Sreenivasan, R.A. Antonia// Trans. ASME, E 44, № 3, 1977, p. 389-395.
3. *Рахматуллин Ш.И.* Влияние степени турбулентности и частоты турбулентных пульсаций на гидравлическое сопротивление круглой трубы/ Ш. И. Рахматуллин, Д. П. Ким// Нефт. х-во.- 2006, № 11.- С. 110-111.
4. *Chung D.* Моделирование крупными вихрями пристеночной области турбулентного потока в канале. Large-eddy simulation and wall modelling of turbulent channel flow/ D. Chung, D. I. Pullin// J. Fluid Mech.- 2009.- V. 631.- P. 281-309.
5. *Маграквелидзе Т.* К вопросу распределения скоростей при турбулентном течении жидкости в круглой трубе/ Т. Маграквелидзе// Сб. тр. Ин-т систем упр. АН Грузии.- 2005.- № 9.- С. 96-101.
6. *Ибрагимов М.Х.* Структура турбулентного потока и механизма теплообмена в каналах/М.Х. Ибрагимов, В.И. Субботин, В.П. Бобков, Г.И. Сабелев, Г.С. Таранов//Атомиздат.-1978.
7. *Харенко А.М.* Современный анализ нестационарных случайных процессов и возможность его применения к явлениям нестационарной турбулентности/А.М. Харенко.- Донецкий государственный университет. Донецк.- № 0 775-75 ДЕП в ВИНТИ.- 1974.- 22 с.
8. *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.
9. *Corotis, R.B.* Time dependent spectral content of system response/R.B. Corotis, E.H. Vanmarcke// J. of the Eng. Mech. Div.- Vol. 101, № 5.- 1975.- P. 623-637.

References

1. *Blinco, P.H., Simons, D.B.* Turbulent structure near smooth boundary. J. of the Eng. Mech. Div. Vol. 101, no 3. 1975. P. 241-255.
2. *Sreenivasan, K.R., Antonia, R.A.* Properties of wall shear stress fluctuations in a turbulent duct flow. Trans. ASME, E 44, no 3, 1977, p. 389-395.
3. *Rakhmatullin S.H.I., Kim, D.P.* Vliyaniye stepeni turbulentsnosti i chastoty turbulentsnykh pul'satsiy na gidravlicheskiye soprotivleniye krugloy truby.. Neft. kh-vo. 2006, no 11. P. 110-111.
4. *Chung D., Pullin D. I.* Modelirovaniye krupnymi vikhyami pristenochnoy oblasti turbulentsnogo potoka v kanale. Large-eddy simulation and wall modelling of turbulent channel flow. J. Fluid Mech. 2009. V. 631. P. 281-309.
5. *Magrakvelidze T.* K voprosu raspredeleniya skorostey pri turbulentsnom techenii zhidkosti v krugloy trube. Sb. tr. In-t sistem upr. AN Gruzii. 2005. No 9. P. 96-101.
6. *Ibragimov M.K.H., Subbotin, V.I., Bobkov, V.P., Sabelev, G.I., Taranov, G.S.* Struktura turbulentsnogo potoka i mekhanizma teploobmena v kanalakh.. Atomizdat. 1978.
7. *Kharenko A.M.* Sovremennyy analiz nestatsionarnykh sluchaynykh protsessov i vozmozhnost' yego primeneniya k yavleniyam nestatsionarnoy turbulentsnosti. Donetskyy gosudarstvennyy universitet. Donetsk. No 0 775-75 DEP v VINITI. 1974. 22 p.
8. *Gnativ R.M., Vitruk I.P.* Yeksperimental'ni doslidzhennya neustalenikh techiy v trubakh.. Promislova gidravlika i pnevmatika. 2009. No4 (26). P. 28-31.
9. *Corotis, R.B., Vanmarcke, E.H.* Time dependent spectral content of system response. J. of the Eng. Mech. Div. Vol. 101, no 5. 1975. P. 623-637.

Подана до редакції 24.06.2014