

## КЛАСИФІКАЦІЯ НЕУСТАЛЕНИХ РУХІВ РІДИНИ

© Гнатів Р.М., Тазалова Н.М., 2013

Наведено результати узагальнення і класифікація неусталених (нестационарних) рухів рідини на основі аналізу експериментальних і теоретичних робіт з метою охопити ширше коло теоретичних і прикладних задач.

**Ключові слова:** неусталений, нестационарний, турбулентний.

**In the article it is resulted results of generalization and classification of unwithstand (unstationary) motions of liquid on the basis of analysis of experimental and theoretical works with the purpose of to overcome the wide circle of theoretical and applied tasks.**

**Key words:** unwithstand, unstationary, turbulent.

### Постановка проблеми

До сьогодні для усталеного руху рідини є історично прийнята термінологія, що обумовлює класифікацію, яка відображає тією чи іншою мірою явища, що відбуваються при усталеному руху рідини. Але систематизації питань термінологічного характеру до цього часу не приділено потрібної уваги. Вся класифікація проводиться на основі роботи Чугаєва [1].

Якщо розглянути термінологію і класифікацію неусталених рухів рідини, то більшість питань у цій галузі можуть бути розв'язані на основі роботи [1]. Але у зв'язку з різними прикладними задачами в цій галузі гідродинаміки назріло завдання класифікувати неусталені рухи рідини. В [1] для неусталеного руху рідини відводиться один пункт:

– рух неусталений (або нестационарний) – рух (течія) рідини, при якому в кожній непорушній точці простору, що зайнята рухомою рідиною, швидкість руху її частинок змінюється протягом часу за значенням і (або) за напрямком.

Наведене вище визначення стосується тільки випадку руху нестискуваної рідини. До зазначеного необхідно додати наведений в [2] поділ неусталених рухів ще на прискорені і сповільнені в часі рухи.

Неусталені рухи рідини використовуються в сучасних енергетичних пристроях і технологічній апаратурі, що належать до хімічної і харчової технології, ядерної техніки, авіації і ракетної техніки, гідротехніки, металургії тощо. Широке коло прикладних задач неусталених рухів обумовлює різні підходи і постановки досліджень цих задач. Цим пояснюється і різноманітна термінологія, що використовується під час описування одних і тих самих явищ.

**Мета і задачі досліджень.** Узагальнити класифікацію задач неусталених рухів рідини.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведено узагальнення і класифікація неусталених (нестационарних) рухів рідини з метою охопити широке коло теоретичних і прикладних задач.

Основою цієї класифікації, що визначає приналежність до однієї або іншої групи неусталених напірних рухів, є характер руху рідини. Поділ неусталених рухів на групи за цією ознакою наводиться на рис. 1. Згідно з цією таблицею неусталені рухи поділяються на *періодичні* і *одноразові* (*аперіодичні*) рухи.

1. **Періодичні рухи** рідини характеризуються періодичним чергуванням додатних і від'ємних прискорень, що впливають на рідину. При цьому відзначений період може бути або постійним, або

змінним у часі. Експериментальні дослідження гідродинамічної структури таких періодичних рухів показують, що для встановлення внутрішньої структури потоку необхідний час, який значно перевищує час регулювання таких періодичних течій. Здебільшого із таких течій (особливо це стосується високочастотних), через швидке чергування пришвидшених і сповільнених періодів, структура потоку не встигає установитись у відповідності до знака прискорення періоду і в результаті отримується накладання попереднього періоду на наступний, так звана передісторія процесу. У результаті такого накладання гідравлічні характеристики таких періодичних потоків підпорядковуються складним законам і нині важко піддаються математичному моделюванню.

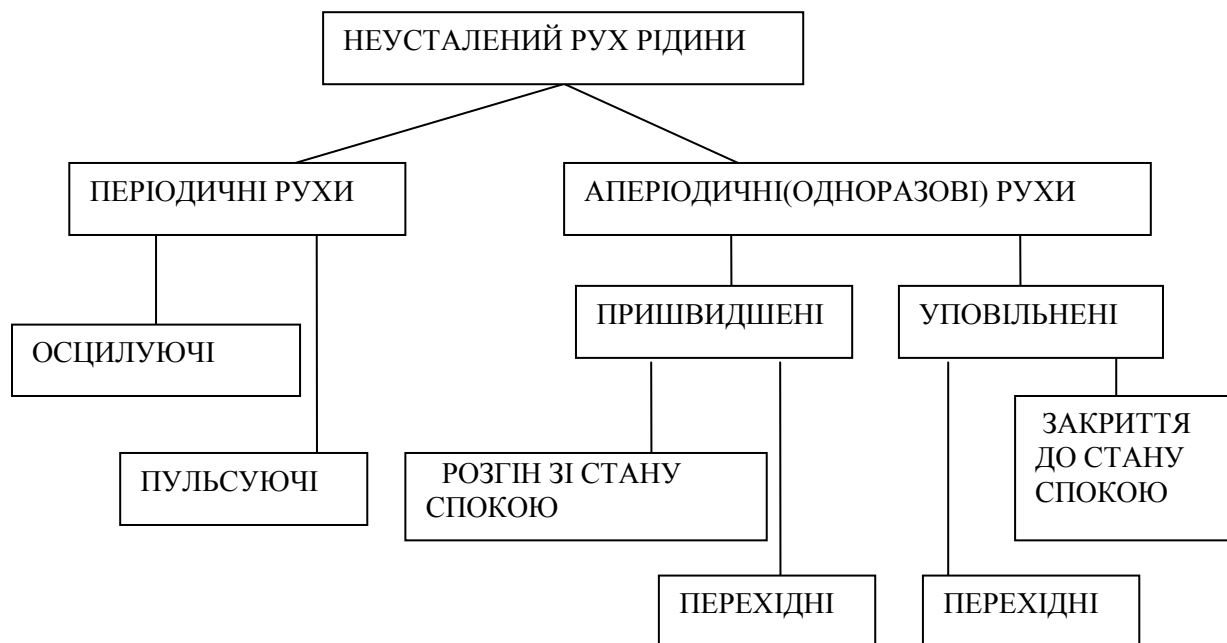


Рис.1. Класифікація неусталеного руху

У зв'язку із цим необхідно ще раз відзначити можливість ламінаризації турбулентного періодичного руху під впливом великого додатного пришвидшення.

Далі, як видно із схеми, періодичні рухи можуть своєю чергою розділені на дві підгрупи:

1.1. *Осцилюючі рухи*, при яких рідина в трубах здійснює коливальні рухи і при цьому середня витрата по часу відсутня ( $Q_{\text{ср}}=0$ ).

1.2. *Пульсуючі рухи* рідини характеризуються тим, що до середньої витрати ( $Q_{\text{ср}} \neq 0$ ) накладається пульсація витрати. Період пульсації витрати може бути постійним, або змінюватись по часу.

2. Відмінність від періодичних неусталених рухів складають **одноразові (аперіодичні) рухи** рідини, які характеризуються тим, що під час такого процесу прискорення не змінює знака. Характерним є також те, що після закінчення зміни витрати в часі є ще досить часу для того, щоб локальні характеристики потоку поступово приймали значення, що спостерігаються в усталених потоках.

Як показують експериментальні дані, отримані при вивченні характеристик нестационарної турбулентності, як додатні, так і від'ємні прискорення спричиняють значні зміни в структурі потоку. Час для заспокоєння "надлишкової" турбулентності, зумовленої неусталеним рухом рідини, за експериментальними даними значно перевищує час установлення витрати, що відповідає кінцевому режиму руху рідини.

Відповідно до схеми одноразові неусталені рухи рідини поділяються на:

2.1. *Пришвидшені рухи*;

2.2. *Уповільнені рухи*.

При цьому пришвидшені рухи рідини своєю чергою можуть бути підрозділені на:

**Розгінні рухи** із стану спокою – тут рідина приводиться в рух із стану спокою (при  $t=0, Q=0$ );

**Перехідні рухи** – в цій групі розглядаються такі задачі, за яких до виникнення прискорення маємо початковий усталений рух ( $Q_1$ ) і під впливом прискорення відбувається перехід на новий усталений рух із більшою витратою ( $Q_1 < Q_2$ ).

Прискорені рухи рідини характеризуються тим, що додатні прискорення, які діють на рідину, спричиняють ламінаризацію потоку. У зв'язку з цим при розгінних течіях заміна режиму відбувається при критичних числах  $Re_{кр}$ , які можуть на три порядки перевищувати величини  $Re_{кр}$  в усталених потоках. Під час перехідного руху при початковому турбулентному русі може під впливом прискорення виникнути ламінаризація потоку (заміна режиму руху), яка після припинення впливу прискорення знову переходить в турбулентний режим руху рідини.

Уповільнені неусталені рухи характеризуються наявністю від'ємних прискорень, які спричиняють крім сповільнення і значні зміни в структурі потоку.

Уповільнені рухи поділяються на:

**Закриті рухи** до стану спокою, при яких в кінці неусталеного руху рідина приймає положення спокою.

**Перехідні рухи**, під час яких відбувається заміна одного неусталеного руху з витратою  $Q_1$ , новим усталеним рухом ( $Q_2$ ), при цьому  $Q_1 > Q_2$ .

Як і в випадку прискорених рухів, під час уповільнення для заспокоєння потоку по внутрішній структурі вимагає більше часу ніж уповільнення по середній швидкості.

Окрім такої класифікації неусталених рухів рідини по трубах необхідно розглядувати ще задачі по стану рідини.

Приймаючи тут і нижче ізотермічну постановку задач, неусталені рухи рідини можна підрозділити на: а) *стискувані*; б) *нестискувані*.

Під стискуваними переважно приймають задачі, зв'язані з гідравлічним ударом, проте при звичайних постановках задач неусталених рухів по трубах маємо області, що залежать від характеристик трубопроводів, а також параметрів неусталених рухів, де стискуваністю знехтувати не можна.

Зазвичай стискувані задачі супроводжують пружні хвилі стиску рідини, які проявляються в коливаннях тиску в перерізі потоку. Густина рідини  $\rho$  при цьому змінюється по часу.

Перші дослідження неусталених рухів рідини появились, враховуючи практичні збірники ще в кінці XIX ст. Вказані роботи велись в двох напрямках, які збереглись до цих пір:

а) дослідження гідравлічного удару; б) дослідження неусталених течій.

Основною працею з першої тематики є дослідження М.Є. Жуковського “Про гідравлічний удар у водопровідних трубах”, яка опублікована в 1898 р. [3]. У цій роботі проводиться одновимірною теорією розповсюдження ударних хвиль в трубах із врахуванням стискуваності рідини і пружності стінок.

Подальший розвиток теорія гідравлічного удару отримала в 1903р. в роботі Аллієві [4]. Цими працями створена основа для графічного розрахунку гідравлічного удару і хвильових явищ в складних трубопровідних системах, що наводяться в працях Шнідера [5] і Бержерона [6]. Запропонований в цих працях метод нині використовується для машинного варіанта розв'язування задач на ЕОМ.

Широке використання при розв'язуванні задач гідравлічного удару отримав метод характеристик. Тут необхідно відзначити роботи Христяновича [7], Мелещенко [8], Асатура [9], Стрітера і Уайла [10], Євангелісті [11,12].

В одній із останніх робіт Стрітера [13] дається огляд з використання методу характеристик, а також проводиться порівняння цього методу з іншими способами розв'язку задач гідравлічного удару.

Починаючи з тридцятих років минулого століття, набув розвитку аналітичний розв'язок задач нестационарної течії в трубах за одновимірною моделлю операційним способом (Вуд [14], Річ [15]). Модифікований варіант операційного методу – метод контурного інтегрування в площині частоти

наведений в праці Чарного [16]. Використання цього методу описано в монографіях Чарного [17, 18].

Істотною характерною особливістю розглянутої вище одновимірної моделі на першому етапі дослідження гідравлічного удару є використання постійного коефіцієнта гідравлічного тертя.

Теоретичні основи дослідження неусталеного руху рідини в трубах, враховуючи диференціальні рівняння з метою опису зміни профіля швидкості і коефіцієнта гідравлічного тертя, вперше викладені в праці І.С. Громека [19] ще в 1882 р. У цій роботі автор повністю розв'язує задачу про рух нестискуваної рідини в циліндричних трубах при завданні довільно залежного від часу перепаду на кінцях труби. У роботі Громека з 1883 р. [20] вивчено вплив пружних деформацій стінок труби при неусталених рухах нестискуваної рідини.

Частковий випадок неусталеного руху – осцилююча течія нестискуваної рідини розглянута в працях Зексела [21], Шиманського [22], Лямбоси [23], Ухіди [24] в період з 1930 по 1956 рр.

Вивчення неусталеної течії стискуваної рідини в трубах із змінним коефіцієнтом тертя почало розвиватися в п'ятдесятих роках минулого століття. Тут необхідно відзначити роботи Кінселя, Флея [25], Стефенса, Бейта [26], а також Джаясингхе, Лойтхойзера [27]. У всіх роботах використовується найпростіша двовимірна модель – модель плоскопаралельного руху. Але широкого розповсюдження ця модель не набула, тому що вона не може бути асимптотично обгрунтована.

Ширшого використання для опису неусталених рухів набула так звана дисипативна модель. Вперше ця модель розглянута в праці Ібералла [28], подальший розвиток цієї моделі описано в працях Д'Суза, Олденбургера [29], Холмбоу, Руло [30], Джаясингхе, Лойтхойзера [27], Чарного [18] та ін.

Необхідно відзначити, що перераховані вище теоретичні роботи належать до ламінарного руху.

Дослідження ж неусталених турбулентних потоків тісно зв'язано з розвитком досліджень усталених турбулентних потоків. До використання під час розв'язань інженерних задач швидкодіючих ЕОМ, круг неусталених турбулентних задач, розв'язаних з практичною метою, обмежувався переважно експериментальними дослідженнями. Теоретичні розв'язки цього періоду базуються на використанні спрощених рівнянь інтегральних моментів рівняння Бернуллі з інерційним членом і введення великої кількості емпіричних даних (Айтсам, Пааль, Лійв [31], Лійв [32]).

Надалі розв'язували складніші задачі з використанням декількох диференціальних рівнянь першого степеня. Починаючи із шістдесятих років минулого століття, в математичній постановці досліджень неусталених турбулентних потоків використовуються вже диференціальні рівняння в часткових похідних.

Згідно з роботою Рейнольдса [32] в розвитку досліджень турбулентних потоків можна розрізняти такі етапи:

1. Моделі з нульовими рівняннями – моделі, що використовують тільки осереднені величини полів швидкостей. У цих моделях диференціальні рівняння, які описують турбулентність, не розглядаються.

2. Моделі з одним рівнянням – до розв'язання приєднується додаткове диференціальне рівняння, яке належить до масштабу турбулентних швидкостей.

3. Моделі з двома рівняннями – вводиться ще одне рівняння, що описує масштаб довжин перемішування.

4. Модель “великих вихрів” – розраховують по визначенню тривимірних великих вихрових структур, які залежать від часу. Зараховані сюди моделі на нижчому рівні дозволяють визначити дрібномасштабну турбулентність.

Сьогодні набули розповсюдження і розвиваються моделі, вказані в п. 3 і 4. При розгляді останньої моделі не враховують характеристики всередині “когерентних структур” (Дейвіс [34]).

Як показує аналіз робіт, виконаних по неусталених турбулентних течіях в світлі вищенаведеної класифікації, розглянуті задачі розв'язуються на рівні моделей, вказаних вище в п. 1–3. Але труднощі, які виникають при експериментальному визначенні коефіцієнтів, що входять у склад рівнянь при усталеному русі, що більшою мірою позначаються при дослідженні неусталених турбуле-

нтних рухів рідин. Тому відсутність емпіричних даних, що входять в рівняння неусталених турбулентних потоків, змушує в розв'язках використовувати емпіричні коефіцієнти, отримані при дослідженні усталених турбулентних потоків.

Нині опубліковано велику кількість монографій і оглядових статей, присвячених дослідженню турбулентності і руху рідини в пограничному шарі. Із них найістотнішими можна вважати монографії Бай Ши-И [35], Хинце [36], Моніна [37], Ротта [38], Шліхтінга [39], Лойцяньського [40], Бечелора [41], Федяєвського та інш. [42].

Досягнення в галузі дослідження турбулентності відображені в оглядових статтях Меллора [43], Воллмерс і Ротта [44], Рейнольдса [45,33], Бредшоу [46] і Дейвіса [34]. Але всі перераховані вище джерела належать до усталених турбулентних потоків. Питання неусталених рухів у цих працях розглядаються на рівні загальних диференціальних рівнянь, що описують крім усталених і неусталені рухи рідини.

Кількість оглядових статей, спеціально присвячених неусталеним турбулентним потокам, дуже незначна. Тут необхідно відзначити генеральну доповідь Тубса [47], присвячену силам, що виникають в неусталених рухах, також статті Худаско [48], Константинова [49] і Лаврівського, Мандруса [50] присвячені математичним моделям, що описують неусталені турбулентні течії і методам замикання відповідних диференціальних схем.

### Висновки

На основі проведеного аналізу літературних даних запропоновано класифікацію задач неусталених рухів рідини.

1. Чугаев Р.Р. *Гидравлические термины*. – М.: Высшая школа, 1974. – 104 с.
2. Чугаев Р.Р. *Гидравлика*. – Л.: Энергия, 1971. – 552 с.
3. Жуковский Н.С. *О гидравлическом ударе в водопроводных трубах*. – М.;Л.: Гостехиздат, 1949. – 103 с.
4. Allievi L. *Theorie du coup de Belier*. Paris, Dunod, 1921.
5. Schnyder O. *Drukstosse in Pumpensteigleitungen*. Schweizerische Bauzeitung, 1929, Nr. 6, S. 27-29.
6. Бергерон Л. *От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети*. – М.: Машгиз, 1962. – 348 с.
7. Христьянович С.А. *Неустановившееся движения в каналах и реках*. В кн.: *Некоторые новые вопросы механики сплошной среды*. – М.: 1938. – С.15–154.
8. Мелещенко Н.Т. *Общий метод расчета гидравлического удара в трубопроводах* // Изв. НИИ Гидротехники, 1941. 29. – С. 5–32.
9. Асатур К.Г. *Гидравлический удар в трубопроводах с диаметром и толщиной стенки, непрерывно меняющимся по длине* // Изв. АН Арм. ССР, 1950, 3, №4.- С. 311-326.
10. Streeter V.L., Wylie E.B. *Waterhammer and surge control*. In: *Annual Rev. Fluid Mech.* vol. 6, Palo Alto, Calif., 1973, p. 57–73.
11. Evangelisti G. *On the numerical solution of the equations of propagation by the method of characteristics*. *Mechanica*, 1969, 1, No. 1/2, p. 29-36.
12. Evangelisti G. *On Waterhammer analysis by the method of characteristics*. *L'Energia Elettrica*, 1969, 46, No 10,11,12, p. 373-692,759-771,839-857.
13. Streeter V.L., *Numerical methods for calculation of transient flow*. In: *First Int. Conf. on of Pressure Surges, Univ. of Kent, Canterbury, 6th-8th Sept. 1972, Pap. A1*.
14. Wood F.M. *The application of Heaviside's operational calculus to solution of problems in water hammer*. *Trans. ASME*, 1937, 59, p. 707–713.
15. Rich G.R. *Water hammer analysis by the Laplace- Mellin transformation*. *Trans. ASME*, 1945, 67, p. 357-376.
16. Чарный И.А. *К теории одномерного неустановившегося движения жидкости в трубах и расчету воздушных колпаков и уравнительных башен* // Изв. АН СССР, ОНТО, 1938, №6. – С. 65–82.
17. Чарный И.А. *Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах*. – М.: Гостехиздат, 1951. – 224 с.
18. Чарный И.А. *Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах*. – М.: Недра, 1975. – 296 с.
19. Громека И.С. *К теории движения жидкости в узких цилиндрических трубах* Уч. зап. Казанского ун-та, Соб. соч., Изд. АН СССР. 1952. – С.149–171.
20. Громека И.С. *О скорости распространения волнообразного движения жидкостей в упругих трубах*. – Уч. зап. Казанского ун-та, 1983.- т.XVIII. – С.41–52.
21. Sxel Th. *Uber den von E.G. Richardson entdeckten "Annulareffekt"*. *Z. Phys.*, 1930,61,S. 349.
22. Szymanski P. *Quelques solution exactes des equations de l'hydrodynamique de fluide visqueux dans un tube cylindrique*. *J. de Mathem.*, 1932,11, p.67–107.
23. Лямбоси П. *Вынужденные колебания несжимаемой вязкой жидкости в жесткой горизонталь-*

ной трубе. В сб.: "Механика", 1953, вып. 3, ИЛ. – С. 67–77. 24. Uchida S. The pulsating viscous flow superimposed on the steady laminar motion of incompressible fluid in circular pipe. *Zeitsch. Phys.*, 1956, 7, No. 5, p. 403-422. 25. Kinsler L.E., Fley A.R. *Fundamentals in acoustics*. N.Y., 1950, J. Wiley Sons, 427 p. 26. Stephens H.W.B., Bate A.E. *Acoustics and vibrational physics*. London, 1966, Edward Arnold Ltd. XIV, 818p. 27. Джаясингхе, Лойтхойзер. Гидравлический удар при условии ламинарного течения. *Теор. осн. инж. расч.* – М.: Мир, №2. – С. 229–236. 28. Iberall A.S. Attenuation of oscillatory pressures in instrument lines. *J. Res. Nat. Bur. Stand*, 1950, 45, p. 85–108. 29. Д'Суза, Олденбургер. Динамическая характеристика гидравлических трубопроводов. *Теор. осн. инж. расч.* – М.: Мир, 1964, №3. – С. 196–205. 30. Холмбоу, Руло. Влияние вязкого трения на распространение сигналов в гидравлических линиях. *Теор. осн. инж. расч.*, Изд. "Мир", 1967, №1. – С. 202–209. 31. Айтсам А.М., Пааль Л.Л., Лийв У.Р. Расчет неустановившегося напорного движения несжимаемой жидкости в жестких цилиндрических трубопроводах // *Труды Талл. политех. ин-та*, 1965. – сер. А, №223. – С.3–19. 32. Лийв У.Р. О гидравлических закономерностях при ускоренном движении жидкости в напорном цилиндрическом трубопроводе // *Труды Талл. Политех. ин-та*, 1965, №223. – С.43–50. 33. Reynolds W.C. Computation of turbulent flows. *Ann. Review Fluid Mech.*, 1976, 8, Palo Alto, p. 183–208. 34. Davies P.O.A.L. Coherent structures in turbulence. In: *Turbulent mixing in nonreactive and reactive flows*, Univ. of Southampton, England, 1974, p. 263-276. 35. Бау Ши-И. Турбулентное течение жидкостей и газов. – М.: ИЛ., 1962. – 344 с. 36. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизм и теория. – М.: Госиздат физ.мат.лит. – 680 с. 37. Монин А.С., Яглом А.М. *Статистическая гидромеханика*, I ч. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат.лит., 1965. – 639с. 38. Ротта И.К. Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости. *Судостроение*, 1967. – 232 с. 39. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с. 40. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкостей и газа*. – М.: Наука, 1978. – 736 с. 41. Бэчелор Д. *Введение в динамику жидкости*. – М.: Мир, 1973. – 758 с. 42. Федяевский К.К., Гиневский А.С., Колесников А.В. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости // – Л.: Судостроение, 1973. – 256 с. 43. Меллор Г.Л., Херринг Х.И. Обзор моделей для замыкания уравнений осредненного турбулентного течения. *Рактен.техн. и космонавт.*, 1971, 3, №5. – С.17–29. 44. Vollmers H., Rotta J.C. Similar solutions for turbulent flows described by mean velocity turbulent energy and turbulent length scale. *AIAA Paper*, 1976, No. 407, p. 1-12. 45. Шахин В.М. Исследование неустановившегося турбулентного течения жидкости в круглой трубе. АН УССР, Ин-т гидромеханики. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Киев, 1977. – 18 с. 46. Brandshaw P. Turbulence research-progress and problems. In: *Proc. 1976 Heat Transfer and Fluid Mech. Inst.*, Davis, Calif., p. 128-139. 47. Toebe H. Hydrodynamic forces on boundaries due to unsteady flow. In: *13th Congress IAHR, Paris, 1971, General Reports*, p. 59–74. 48. Худаско В.В. *Нестационарное турбулентное течение несжимаемой жидкости*. – Обнинск: Физико-энергетический ин-т, 1973. – С.1–17. 49. Константинов С.В. *Замкнутое описание неустановившегося турбулентного течения реальной жидкости в трубе*. Моск. ин-т нефтехим. и газ.пром-сти им. И.М.Губкина. – М.: 1976. – С. 1–10. 50. Лаврівський З.В., Мандрус В.І. *Технічна механіка рідин та газів*. – Львів: Сполом, 2004. – С.184.