

О.М. Яхно, д-р техн. наук

Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”, Київ, Україна

Р.М. Гнатів, канд. техн. наук

Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

## РОЗРАХУНОК ПУЛЬСУЮЧОГО РУХУ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДАХ

### CALCULATION OF PULSATING FLUID FLOW IN PIPELINES

*Проведено аналіз наукових робіт з вивчення періодичного і пульсуючого руху нестисливої рідини. Він показав, що не завжди дані експериментальних досліджень задовільно узгоджуються з результатами розрахунків. Оскільки, в даний час все частіше використовуються технологічні системи, які вимагають більш детального визначення втрат механічної енергії в будь-який момент пульсуючого руху, виникає необхідність удосконалення методики розрахунку структур неусталених потоків рідини в трубопровідних системах.*

*Експериментально досліджено зміну середньої швидкості, прискорення і напору при виникненні руху рідини в круглому трубопроводі із стану спокою і при сповільненні потоку. На підставі проведених досліджень зроблено висновок, що прийняті розрахункові залежності нестационарного руху за осередненими характеристиками швидкості і тиску прийнятні тільки для невеликого проміжку пульсуючого течії. Для більш точного визначення балансу енергії такої течії необхідно ввести в дані залежності складові, що враховують структуру турбулентної течії.*

*Ключові слова: неусталений, нестационарний, пульсуючий, рух рідини, дисипативна модель, структура потоку.*

#### Вступ

В даний час все частіше в технологічних системах виникають задачі нестационарних режимів перебігів рідини. Окремим випадком нестационарного перебігу є пульсуючий режим. Нерідко вони характеризуються високими у звичайному розумінні параметрами. Прискорення досягають декількох сотень  $m/c^2$ , а частоти вимірюються десятками герц. При цьому довжини трубопроводів таких систем можуть бути незначними, що дозволяє розглядати їх як такі, що складаються з коротких трубопроводів.

#### Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Більшість теоретичних розв'язків періодичного неусталеного руху відносяться до осцилюючого руху, причому цю задачу в постановці в'язкої нестисливої рідини у круглій трубі можна вважати класичною. Це питання розглянуте в роботах [1–6].

В статтях [4, 7–9] надається огляд робіт, які присвячено дослідженню осцилюючого руху в жорстких і пружних трубах. Розв'язки, що стосуються довільних періодичних коливань тиску і швидкості рідини в круглій трубі на основі дисипативної моделі, докладно досліджені у монографіях [10, 11].

З числа пульсуючих рухів слід зазначити [12], де вивчається вплив стаціонарної течії на динамічні характеристики гідравлічних трубопроводів на основі дисипативної моделі. Відповідний профіль збуреної швидкості описується конфлюентною гіпергеометричною функ-

цією з двома комплексними параметрами. Крім цього, в цій роботі наводиться наближений розв'язок, який отримано за допомогою розкладу хвиль тиску і швидкості за ступенями числа Маха пульсуючого потоку.

Вплив пульсуючого осесиметричного руху Пуазейля на розподіл швидкості і передаточної матриці при русі стисливої рідини в циліндричних трубах описано у роботі [13]. Для пульсації використовуються рівняння Стокса, дисипативної моделі, і розв'язки шукають шляхом розкладу в ряд за числом Маха. В результаті знайдено нульові і перші наближення в цих розкладах.

Експериментальні дослідження області відриву в пульсуючому потоці за перешкодою в круглій трубі проведені в роботі [14]. Пульсуючий рух дисперсної рідини в пружних трубках розглянутий в працях [15–16] та ін.

**Мета дослідження** дослідити пульсуючий рух рідини в круглих трубопроводах для вдосконалення методики розрахунку структур неусталених потоків у трубопровідних системах.

#### Результати досліджень

Гідравлічний розрахунок пульсуючого руху зазвичай ґрунтується на закономірностях неусталеного руху, який в умовах горизонтального трубопроводу зводиться до рівняння Бернуллі з інерційною складовою

$$\left( \frac{\Delta p}{\gamma} \right)_D = (h_L)_D + h_i, \quad (1)$$

при цьому  $\left(\frac{\Delta p}{\gamma}\right)_D$  — миттєвий п'єзометричний напір, виміряний датчиками тиску;  $(h_L)_D$  — миттєва втрата напору;  $h_i$  — інерційний напір.

Втрата напору визначається за формулою Вейсбаха–Дарсі

$$(h_L)_D = \lambda \frac{L V^2}{d 2g}, \quad (2)$$

враховуючи, що коефіцієнт гідравлічного тертя  $\gamma$  однаковий як при усталеному, так і при неусталеному русі рідини. Інерційний напір визначається без урахування впливу розподілу швидкостей (коректив кількості руху  $\alpha_0=1,0$ ) за залежністю

$$h_i = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt}. \quad (3)$$

Однак практика свідчить, що дослідні дані не узгоджуються з результатами розрахунку. З іншого боку, є низка технологічних систем, які вимагають більш детального визначення втрат механічної енергії у будь-який момент часу пульсуючого руху рідини. Крім цього, при обробці дослідних даних з'ясовується чимало обставин, не врахованих формулою (1).

При швидкому відкритті клапана, розташованого на початку трубопроводу [17], виникає різке збільшення потенціального напору, яке поширюється вниз зі швидкістю розповсюдження збурень  $C$ . Через деякий час  $t$ , в перерізах трубопроводу встановлюється середня швидкість (рисунок 1).

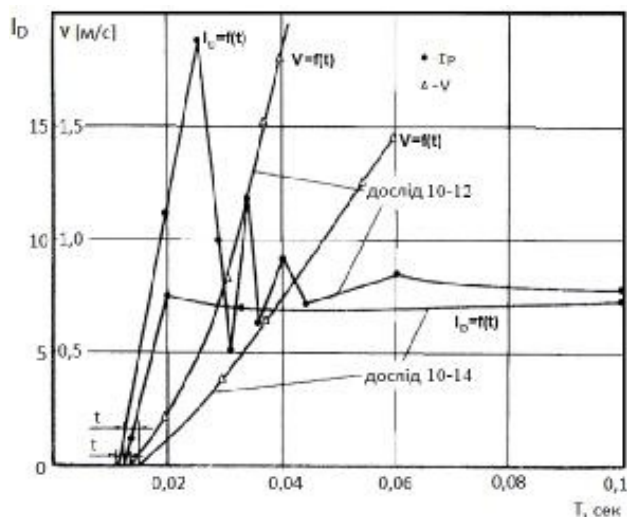


Рисунок 1 — Зміна миттєвого п'єзометричного похилу  $I_D$  і середньої швидкості  $V$  при різкому відкритті клапана

На проміжку часу  $t$  втрата напору за формулою (2) і інерційний напір (3) дорівнюють нулю і формула (1) залишається незамкнутою. Крім цього, в залежності від швидкості зміни відносного відкриття отвору клапана ( $d/d_0$ ) зро-

стання потенціального напору може бути або порівняно плавним (дослід 10–14), або виникає коливальна зміна тиску (дослід 10–12). Час загасання залежить, очевидно, від градієнта тиску за часом, а також від характеристик тубопроводу.

При сповільненні потоку, після того як клапан прикрився, потік продовжує рухатися далі за рахунок отриманої кінетичної енергії. Тиск за клапаном падає до тиску насиченої пари, з рідини виділяється розчинене повітря і густина зменшується. П'єзометричні лінії, згідно проведених дослідів, починають відрізнятися від прямих ліній (рисунок 2).

У таких випадках миттєвий п'єзометричний похил залежить крім шорсткості також від координати вздовж осі трубопроводу і часу.



Рисунок 2 — Зміна п'єзометричних ліній при сповільненні потоку

Низка авторів [18–21] вказує на те, що еюра розподілу швидкостей під час неусталеного руху деформується і при розрахунку інерційного напору повинен бути введений відповідний коректив, причому [19, 21] пропонують ввести змінний по часу коефіцієнт  $\alpha_0$  у формулу

$$h_i = \alpha_0 \frac{L}{g} \frac{\partial V}{\partial t}, \quad (4)$$

а [20] визначає інерційний напір як

$$h_i = \frac{L}{g} \left( \alpha_0 \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{2} \frac{d\alpha_0}{dt} \right). \quad (5)$$

Порівняння запропонованих формул розрахунку інерційного напору, а також інших характеристик пульсуючого руху рідини показано на рисунку 3. Літерами  $I_D$  і  $I_{eD}$  позначені відповідно миттєві п'єзометричні і гідравлічні похили. Лінія  $V$  показує зміну по часу середньої швидкості. Щоб визначити величину  $\alpha_0$  за графіком, спочатку для будь-якого розрахункового моменту визначається па-

раметр  $\frac{d}{V^2} \frac{dV}{dt}$ . Аналіз розрахункових точок  $I_{eD}$ , які

були обчислені за (1), і  $h_i$ , обчислений за (4) і (5), показує, що в окремі моменти часу гідравлічний похил від'ємний, що суперечить закону збереження енергії. Отже, для складання повного балансу енергії слід ввести додаткові складові у формулу (1).

У випадку, якщо рух виникає із стану спокою (рисунок 3), згідно з експериментальними даними [18] виникає задача, яка описується за теорією втрати стійкості. Початкові еюри розподілу швидкостей за клапаном,

можуть бути такими, що середня швидкість в них дорівнює нулю. Однак на утворення епюри і на втрату стійкості була необхідною деяка кількість енергії. Рідина в трубопроводі починає рухатися поступово залежно від того, як відбувається деформування епюри швидкостей з часом і по осі трубопроводу.

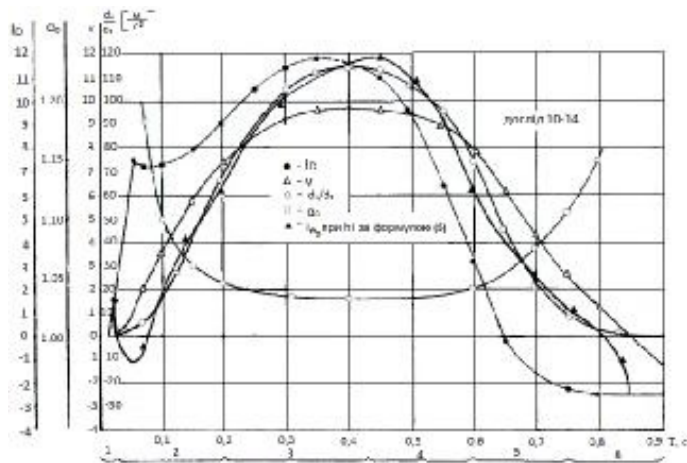


Рисунок 3 — Зміна похилу  $I_D$ , середньої швидкості  $V$ , прискорення  $dV/dt$  і корективу кількості руху  $\alpha_0$  при виникненні руху із стану спокою.

Якщо розбити весь процес на декілька проміжків, показаних на рисунку 3, по осі часу, то вся потенціальна енергія в межах проміжку 1 витрачається на подолання вищеописаного процесу, зумовленого стисливістю рідини, а також на подолання сил тертя. Частина енергії, що витрачається при цьому, виражається через  $h_c$ , тобто напір, що витрачається на подолання сил стисливості.

Формула для визначення корективу кількості руху зазвичай приймається в наступному вигляді

$$\alpha_0 = \frac{1}{\omega} \frac{\int u^2 d\omega}{V^2}, \quad (6)$$

де  $u$  — осереднена по часу величина локальної швидкості, яка може бути визначена як

$$u = u_a \pm u', \quad (7)$$

де  $u_a$  — актуальна швидкість в точці;  $u'$  — пульсаційна складова локальної швидкості.

Якщо розглядати тиск у точці, що відповідає даному моменту часу, то можна записати, що

$$p = p_a \pm p'. \quad (8)$$

В усі розрахункові формули даної статті входять тільки осереднені значення характеристик.

Можна вважати, що частина енергії витрачається на подолання сил, які виникають за рахунок пульсаційних складових. При цьому енергія, що витрачається на пульсацію, досить велика.

Отже, розбиваючи розглянутий цикл на 6 проміжків, зазначених на рисунку 3, отримуємо для першого проміжку

$$\left( \frac{\Delta p}{\gamma} \right)_D = (h_L)_0 + h_c, \quad (9)$$

тобто потенціальна енергія витрачається на виведення рідини з положення рівноваги, причому перша складова  $(h_L)_0$  у правій частині рівняння (9) характеризує дисипацію енергії, яка з'являється за рахунок течій, що виникають при середній швидкості  $v=0$ . Про природу цих течій було сказано вище.

На другому проміжку додається, крім зазначених у (9), складова, що враховує втрати на подолання пульсації  $h_s$ , а також інерційного напору. Розрахункова залежність отримує вигляд:

$$\left( \frac{\Delta p}{\gamma} \right)_D = (h_L)_D + h_c + h_s + h_i. \quad (10)$$

Лише на проміжку 3, де вплив відкриття загасає, прийнятна класична формула розрахунку (1).

На проміжку часу 4 виникає сповільнення потоку, з'являються сили розтягування, густина рідини зменшується, внаслідок чого збільшується пульсація. Розрахунок проводиться за формулою (10). Запропоноване відноситься і до проміжку 6, на якому спостерігається повне закриття клапана. На ділянці 5 рекомендується використовувати розрахункову формулу (1).

### Висновки

На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що формула (1), яка дозволяє провести розрахунок неусталеного руху за осередненими характеристиками швидкості і тиску, прийнятна тільки для невеликого проміжку пульсуючого перебігу рідини. Щоб точніше визначити баланс енергії такого перебігу, необхідно ввести в розрахункові формули складові, що враховують структуру турбулентної течії.

### Література

1. Tuzi, Raffaella. Перемежающаяся турбулентность в пульсирующем течении в трубе. Intermittent turbulence in a pulsating pipe flow/ Raffaella Tuzi, Paolo Blondeaux// J. Fluid Mech. — 2008. — V. 599. — С. 51—79.
2. Uchida, S. The pulsating viscous flow superimposed on the steady laminar motion of incompressible fluid in circular pipe/ S. Uchida// Zeitsch. Phys. — 1956. — V.7. — No. 5. — P. 403—422.
3. Phillips, E.M. Pulsatile Newtonian frictional losses in a rigid tube / E.M. Phillips, S.H. Chiang// Int. Eng. Sci. — 1973. — V. 11, No. 6. — P. 579—589.
4. Hirschmann, P. Geschwindigkeitsverteilung und Wandsch bei periodischer Stromung im Kreisrohr/ P. Hirschmann // Rev. Roum. Sci. Ser. mec. Appl. — 1978. — V. 23, No. 1. — P. 3—26.
5. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1987. — 840 с.
6. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. — М.: Наука, 1974. — 712 с.

7. Клаймс, Ф. Современные физико-математические модели нестационарного течения вязкой жидкости в твердой и эластической струях/ Ф. Клаймс, Л. Ионл // *Vodohosp. casopis.* — 1973.-V. 21, № 1. — С. 83-104.

8. Мельников, Р.В. Взаимосвязь колебаний стенок гидролиний и внутреннего давления рабочей жидкости/ Р.В. Мельников // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации транспортных сооружений: Материалы 1 Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Омск, 24-26 мая, 2006. Кн. 3. Омск: СибАДИ. — 2006. — С. 8-16.

9. Волобуев, А. Н. Уравнение импульса и простые волны в эластичном трубопроводе/ А. Н. Волобуев, А. П. Толстоногое// *Инж.-физ. ж.* — 2006. — Т. 79, № 5. — С. 147—151.

10. Чарный, И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах/ И.А. Чарный. — М.: Недра, 1975. — 296 с.

11. Попов, Д.Н. Динамика и регулирование гидро — и пневмо — систем/ Д.Н. Попов// М.:Машиностр. — 1977. — С. 185-249.

12. Орнер. Линейное динамическое моделирование течения в гидравлических трубопроводах/ Орнер// *Теор. осн. инж. расч.* — М.: Мир. — 1969. — № 4. — С. 186—195.

13. Inaba, T. Pulsating laminar flow in a cylindrical pipe with trough flow/ T. Inaba, M. Hashimoto, Y. Miyake, S. Murata// *Bull. ISME.* — 1977. — V.20, No. 142. — P. 442—449.

14. Davletshin, I. A. Экспериментальное исследование отрывной области в пульсирующем потоке за препятствием в круглой трубке. Experimental study of separated region in pulsating flow behind obstacle in round pipe/ I. A. Davletshin, N.I. Miheev, V.M. Molochnikov, A.A. Paereliy// 13 International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2007), Novosibirsk, 5–10 Febr., 2007: Proceedings. Pt 1. Novosibirsk: Parallel. — 2007. — P. 83—87.

15. Меркулов, В.И. Новые открытия и новые задачи гидромеханики/ В.И. Меркулов// *Препр. Ин-т теор. и прикл. мех. СО РАН.* — 2006. — № 2. — С. 1—44.

16. Амензаде, Р. Ю. Пульсирующее течение дисперсной жидкости в ортотропной трубке/ Р. Ю. Амензаде, Н. А. Джангирова, Э. Т. Киясбейли// *Вестн. Бакин. ун-та. Сер. физ.-мат. н.* — 2005. — № 4. — С. 69—78.

17. Гнатів, Р.М. Фізичні дослідження неусталених потоків лазерним доплерівським вимірювачем швидкості / Р.М. Гнатів, В.Ю. Петриниць, В.В.Чернюк // *Вісник НУВГП.* — Вип.3 (47). — Част. 5. — 2009. — С. 264—268.

18. Гнатів, Р.М. Експерименталні дослідження неусталених течій в трубах / Р.М. Гнатів, І.П. Вітрух // *Промислова гідраліка і пневматика.* — 2009. — №4 (26). — С. 28—31.

19. Aribert, J.M. Mouvement d'interface instable de petite et grande amplitude entre deux fluides non miscibles/ J.M. Aribert, C. Thirrot// *Rev. Roam. Sci, Techn.* — *Mec. Appl.* Tome 15, № 2.

20. Панчурин, Н.А. Нестационарное периодическое течение жидкости в круглых трубах/ Н.А. Панчурин, Д.Х.

Ройзман// *Труды Ленингр. ин-та водн. трансп.* — 1975. — Вып. 151. — С. 8-16.

21. Бондаренко, Н.И. О неустановившемся движении сжимаемой жидкости в напорном трубопроводе/ Н. И. Бондаренко, Ю. И. Терентьев// *Моск. гос. техн. ун-т. М.:* 2009. — 54 с. — Деп. в ВИНТИ РАН 15.10.2009, № 620-В2009.

## Reference

1. Tuzi, Raffaella. The pulsating viscous flow in circular pipe / Raffaella Tuzi, Paolo Blondeaux// *J. Fluid Mech.* — 2008. — V. 599. — С. 51—79.

2. Uchida, S. The pulsating viscous flow superimposed on the steady laminar motion of incompressible fluid in circular pipe/ S. Uchida// *Zeitsch. Phys.* — 1956. — V.7. — No. 5. — P. 403—422.

3. Phillips, E.M. Pulsatile Newtonian frictional losses in a rigid tube / E.M. Phillips, S.H. Chiang// *Int. Eng. Sci.* — 1973. — V. 11, No. 6. — P. 579—589.

4. Hirschmann, P. Geschwindigkeitsverteilung und Wandsch bei periodischer Stromung im Kreisrohr/ P. Hirschmann // *Rev. Roum. Sci. Ser. mec. Appl.* — 1978. — V. 23, No. 1. — P. 3—26.

5. Loitsiansky, L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza / L.G. Loitsiansky. — М.: Nauka, 1987. — 840 s.

6. Shlihting, G. Teoria pogranichnogo sloia / G. Shlihting. — М.: Nauka, 1974. — 712 s.

7. Klaims F. Sovremennye fiziko-matematicheskie modeli nestatsionarnogo techenia вязkoi zhidkosti v tverdoi s elasticheskoi struiakh / F. Klaims, L. Ionl // *Vodohosp. casopis.* — 1973.— V. 21, № 1. — S. 83—104.

8. Melnikov, R.V. Vzaimosviaz kolebaniy stенок gidroliniy i vnutrennego davlenia rabochei zhidkosti/ R.V. Melnikov // *Ovsk: SibADI.* — 2006. — С. 8—16.

9. Volobuev, A.N. Uravnenie impulsa i prostye volny v elasticheskom truboprovode/ A.N. Volobuev, A.P. Tolstonogov// *Ing.-fiz. g.* — 2006. — Т. 79, № 5. — С. 147—151.

10. Charnyi I.A. Neustanovivsheesia dvizhenie realnoi zhidkosti v trubah/ I.A. Charnyi. — М.: Nedra, 1975. — 296 s.

11. Popov, D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosystem/ D.N. Popov. — М.: Mashinostr. — 1977. — С. 185—249.

12. Orner. Lineinoe dinamicheskoe modelirovanie techenia v gidravlicheskih truboprovodakh. — М.: Mir. — 1969. — № 4. — С. 186—195.

13. Inaba, T. Pulsating laminar flow in a cylindrical pipe with trough flow/ T. Inaba, M. Hashimoto, Y. Miyake, S. Murata// *Bull. ISME.* — 1977. — V.20, No. 142. — P. 442—449.

14. Davletshin, I. A. Experimentalnoie issledovanie otrivnoi oblasti v pulsiruiutchem potoke za prepiatstviem v krugloi trubke. Experimental study of separated region in pulsating flow behind obstacle in round pipe/ I. A. Davletshin, N. I. Miheev, V. M. Molochnikov, A. A. Paereliy// 13 International Conference on the Methods of Aerophysical

Research (ICMAR 2007), Novosibirsk, 5-10 Febr., 2007: Proceedings. Pt 1. Novosibirsk: Parallel. — 2007. — P. 83—87.

15. Merkulov, V.I. Novyie otkrytia i novyie zadachi gidromekhaniki/ V.I. Merkulov // — 2006. — № 2. — С. 1—44.

16. Amenzade, R.Yu. Pulsiruiushteie techenia dispersnoi zhidkosti v ortotropnoi trubke/ R.Yu. Amenzade, N.A. Dzangirova, E.T. Kiasbeily//Vesti. Bakin. un-ta. Ser. fiz.-mat. n. — 2005. — № 4. — С. 69—78.

17. Gnativ, R.M. Fizychni doslidzennia neustalenyh potokiv lazernym dopplerivskym vymiryuvachem shvydkosti / R.M. Gnativ, V.Yu. Petrynets, V.V. Cherniuk // Visnyk NUVGP.— Vyp.3 (47). — Ch.5.— 2009. — S.264—268.

18. Gnativ, P.M. Eksperimentalni doslidzennia neustalenyh potokiv u trubah / R.M. Gnativ, I.P. Vitruh //

Promyslova gidravlika i pnevmatika. — 2009. — №4 (26).— S. 28—31.

19. Aribert, J.M. Mouvement d'interface instable de petite et grande amplitude entre deux fluides non miscibles/ J.M. Aribert, C. Thirrot// Rev. Roam. Sci, Techn. — Mec. Appl.Tome 15, № 2.

20. Panchurin, N.A. Nestatsionarnoie periodicheskoe techenie zhidkosti v kruglyh trubah/ N.A. Panchurin, D.H. Ro]zman// Trudy Leningr. sn-ta vodn.transp. — 1975. — Vyp. 151. — С. 8—16.

21. Bondarenko, N.I. O neustanovivshemsia dvizhenii szhymaemoi zhidkosti v napornom truboprovodie/ N.I. Bondarenko, Yu.I. Terentiev. — M.: 2009. — 54 s. — Dep. v VINITI RAN 15.10.2009, № 620-B2009.

*Надійшла 15.10.2013 року*

УДК 532.54.013.2

### **РАСЧЕТ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДАХ**

**О. М. Яхно, Р. М. Гнатив**

Проведен анализ научных работ по изучению периодического и пульсирующего движения несжимаемой жидкости. Он показал, что не всегда данные экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются с результатами расчетов. Поскольку, в настоящее время все чаще используются технологические системы, которые требуют более детального определения потерь механической энергии в любой момент пульсирующего движения, возникает необходимость усовершенствования методики расчета структур неустановившихся потоков жидкости в трубопроводных системах.

Экспериментально исследовано изменение средней скорости, ускорения и напора при возникновении движения жидкости в круглом трубопроводе из состояния покоя и при замедлении потока. На основании проведенных исследований сделан вывод, что принятые расчетные зависимости нестационарного движения по осредненным характеристикам скорости и давления приемлемы только для небольшого промежутка пульсирующего течения. Для более точного определения баланса энергии такого течения необходимо ввести в данные зависимости составляющие, учитывающие структуру турбулентного течения.

*Ключевые слова: неустановившийся, нестационарный, пульсирующий, движение жидкости, диссипативная модель, структура потока.*

UDC 532.54.013.2

### **CALCULATION OF PULSATING FLUID FLOW IN PIPELINES**

**O. Yahno, R. Gnativ**

The analysis of scientific studies on the periodic and pulsatile flow of an incompressible fluid. He has shown that often the data of experimental studies are in satisfactory agreement with the calculated results. Since, at present, are being used increasingly technological systems that require a more detailed definition of the loss of mechanical energy at any point in a pulsating motion, there is need to improve the methodology for calculating the structures of unsteady fluid flow in piping systems.

Experimentally studied the change in the average velocity, acceleration, and pressure at the initiation of a liquid in a circular pipe from rest and when decelerating flow. Based on the studies concluded that the adopted design depending on the unsteady motion of the averaged characteristics of the velocity and pressure are acceptable only for a short period of pulsatile flow. For a more accurate determination of the energy balance of such a flow must be entered in the data depending on the components that take into account the structure of turbulent flow.

*Keywords: unstable, unsteady, pulsating, fluid motion, dissipation model, the structure of the flow.*