

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Бігун Ірина Володимирівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 532.559.3:532.542
(індекс)

ДИСЕРТАЦІЯ

ГІДРАВЛІЧНІ МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ РОЗДАЧІ РІДИНИ З НАПІРНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

(назва дисертації)

192 – Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

19 Архітектура та будівництво
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

І. В. Бігун
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Гнатів Роман Маріянович, д. т. н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Львів – 2022

АНОТАЦІЯ

Бігун І.В. Гідравлічні методи регулювання роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2022.

Створення високоефективних засобів керування напірними потоками рідин, зокрема зі змінною шляховою витратою, є перспективним напрямком удосконалення виробничих технологій. Напірні розподільні трубопроводи (РТ) з дискретною шляховою роздачою рідини застосовуються в різних технічних системах, зокрема іригації (крапельне та внутрішньогрунтове зрошення), сільськогосподарській авіації (обприскування рослин), водопостачанні та водовідведенні (очисні споруди), вентиляції (припливні системи), енергетиці (системи охолодження циркуляційних вол ТЕС й АЕС) й ін. На практиці реалізується нерівномірنا шляхова роздача рідини уздовж РТ. Прагнення забезпечити зменшення нерівномірності роздачі рідини уздовж потоку, спонукало науковців до удосконалення наявних і створення нових методів гідравлічного розрахунку РТ. Розповсюдження напірних розподільних трубопроводів і відсутність надійних методик розрахунку РТ свідчить про актуальність задачі удосконалення методів їх проектування та розробки способів регулювання нерівномірності шляхової роздачі рідини уздовж РТ.

У цій дисертаційній роботі представлено основні галузі застосування напірних розподільних трубопроводів. Нерівномірність шляхової роздачі рідини уздовж напірних РТ регулюють змінюванням їх геометричних параметрів, зокрема зменшенням відстані між випускними отворами, збільшенням площі вихідних отворів $\omega_{\text{от}}$ уздовж потоку та зменшенням діаметра РТ у напрямку течії рідини в ньому.

Досвід показав, що найточніші методики проектування РТ ґрунтуються на розв'язанні диференціального рівняння руху рідини зі змінною витратою

(Навоян Х. А., 1975). Теоретичний підхід до вирішення цієї задачі запропоновано в Київському національному університеті будівництва й архітектури (Кравчук А. М., 2004, Чернишов Д. О. 2005). У Національному університеті “Львівська політехніка (Чернюк В. В., 2008) розробляються методи, що базуються на розв’язанні диференціального рівняння руху рідини зі змінною витратою, котрі беруть до уваги усі геометричні параметри РТ і гідродинамічні характеристики внутрішнього та зовнішнього потоків рідин, а також струменів, які відгалужуються від РТ. Наявні теоретичні розробки потребують їх експериментальної перевірки та впровадження у виробництво.

Ефективним і перспективним є запропонований науковцями Львівської політехніки метод регулювання роботи РТ за допомогою циліндричних поворотних насадок з бічним, ортогональним до їхніх поздовжніх осей, входом струменя у насадки [63]. Однак, у літературі відсутні довідкові дані про значення коефіцієнта витрати μ для таких насадок. На основі літературного аналізу з урахуванням актуальності теми і господарських потреб України, визначені мета й задачі дисертаційних досліджень.

Мета роботи: на основі аналізу теоретичних та експериментальних досліджень вказати шлях уточнення запропонованого у Національному університеті “Львівська політехніка” методу гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів.

Проведено докладний теоретичний аналіз рівнянь, запропонованих Чернюком В. В. (Львівська політехніка) для гідравлічних розрахунків напірних розподільних трубопроводів, прокладених у потоці рідини, котрий омиває РТ зовні. Ці рівняння відображають фізичну суть гідродинамічних процесів, які реалізуються при роботі РТ. Результати обчислень за цими рівняннями практично збігаються з експериментальними даними лише при прямих кутах відгалуження струменів від РТ і близькі за значеннями до даних, отриманих за формулами, рекомендованими Кравчуком А. М. і Чернишевим Д. О. (Київ, КНУБА). Однак при виведенні своїх формул Кравчук А. М. і Чернишев Д. О. заклали умову, що кути відгалуження струменів прямі.

Виявлено, що причиною розбіжності результатів гідравлічного розрахунку РТ за рівняннями В. В. Чернюка з експериментальними даними, при непрямих кутах відгалуження струменів, найімовірніше є урахування у вихідному диференціальному рівнянні дії сили зовнішнього тиску уздовж напрямку, не ортогональному до внутрішньої стінки розподільного трубопроводу. З метою отримання достовірних результатів гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів при кутах $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$ рекомендовано у вихідному диференціальному рівнянні руху рідини зі змінною витратою опустити силу зовнішнього тиску, направлену неортогонально до внутрішньої стінки РТ.

Запроектовано та виготовлено експериментальний стенд для встановлення значень коефіцієнта витрати вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до їхніх поздовжніх осей, входом струменя в насадку та стенд для дослідження шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів. Сумарна відносна похибка визначення коефіцієнта витрати вихідних циліндричних насадок з бічним входом струменя на застосованому експериментальному стенді рівна 0,71 %.

Експериментально встановлено залежність значення коефіцієнта μ витрати циліндричних насадок з бічним, ортогональним до поздовжньої осі насадки, входом струменя, від кута β між напрямками руху потоку води в розподільному трубопроводі та струменя, котрий входить у насадку та від'єднується від РТ. Досліди проведено при різних значеннях відношення площ поперечного перерізу насадки і патрубку, у якому її монтували. Регулюванням значення кута β отримано змінювання значення коефіцієнта μ до 22.2 % лише для однієї насадки. Найбільшу пропускну здатність вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до осі насадки входом струменя води, отримано при куті $\beta = 0^\circ$. Найменше значення μ , тобто найменшу її пропускну здатність насадок, отримано при $\beta=90^\circ$ і $\beta=135^\circ$. Показано, що змінюванням кута β між напрямом течії потоку рідини в розподільному трубопроводі і напрямом

руху струменя, котрий від'єднується від нього, можна істотно регулювати значення коефіцієнта витрати циліндричних насадок з бічним входом рідини та нерівномірність роздачі рідини уздовж напірних розподільних трубопроводів. Отримані результати матимуть істотне практичне значення.

Винайдено “Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації”, згідно з яким, за наявності транзитного потоку на вході у трубопровід-збирач, усувають роздачу рідини на початковій його ділянці та забезпечують збирання рідини по усій довжині трубопроводу-збирача. Регулювання притоку рідини здійснюється за рахунок використання енергії транзитного потоку.

Дисертаційна робота характеризується економічним й екологічним ефектами, має соціальне значення та технічні переваги в порівнянні з відомим розв'язанням задачі оптимізації роботи розподільних трубопроводів і трубопроводів-збирачів.

Проведені наукові дослідження пов'язані з науковими програмами України та Національного університету “Львівська політехніка”. Результати роботи передано Львівському міському комунальному підприємству “Львівводоканал” з метою застосування їх при гідравлічних розрахунках зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів у каналізаційних очисних спорудах. Отримані здобувачкою залежності $\mu = f[\beta, (d/D)^2, Re]$ упроваджено в навчальний процес у Національному університеті “Львівська політехніка” при викладанні навчального предмету “Гідравліка та протипожежне водопостачання”.

Ключові слова: напірний розподільний трубопровід; кут від'єднання вихідних струменів; нерівномірність шляхової роздачі рідини; вихідна циліндрична насадка з бічним входом струменя.

Основні положення дисертаційної роботи отримали належну апробацію на дев'яти міжнародних науково-практичних конференціях/

Список праць, опублікованих здобувачкою за темою дисертації

Розділ монографії

1. I. Bihun. Coefficient of flow rate for outlet cylindrical nozzles with lateral inflow installed in distributive pipelines / I. Bihun, V. Ivaniv, V. Cherniuk // In the monograph „Water Supply and Wastewater Disposal. Designing, Construction, Operation and Monitoring”. Edited by Henryk Sobczuk, Beata Kowalska. - Publishing house: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2020. – S. 23-32. (ISBN: 978-83-7947-409-7).

Статті

2. Bosak N. Studying the mutual interaction of hydraulic characteristics of water distributing pipelines and their spraying devices in the coolers at energy units / N. Bosak, V. Cherniuk, I. Matlai, I. Bihun // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. - № 3/8 (99). - P. 23-29. (DOI: 10.15587/1729-4061.2019.166309). (*SCOPUS*)

3. Cherniuk V. V. Coefficient of Flow Rate of Inlet Cylindrical Nozzles with Lateral Orthogonal Inflow / V. V. Cherniuk, V. V. Ivaniv, I. V. Bihun, and Ja. M. Wojtowicz // Proceedings of CEE 2019. Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering. – Springer. Nature Switzerland AG 2020. – P. 50-57 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_7). (*SCOPUS*)

4. Бігун І. В. Особливості застосування напірних розподільних трубопроводів у різних технічних системах / І. В. Бігун // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. – 2019. – № 1(2). – С. 14-20. (*Фахова, одиночне авторство*)

5. Flys I. Ya. Cylindric nozzles with lateral inlets installed in distributive pipeline. investigational bench for investigation of operation of nozzles / I. Ya. Flys, V. V. Ivaniv, I. V. Bihun. // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. – 2019. – № 912. – С. 187-192. (*Фахова*)

6. Іванів В. В. Застосування та методи гідравлічного розрахунку напірних трубопроводів-збирачів / В. В. Іванів, І. В. Бігун // Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Збірник наукових праць. Технічні науки. Випуск № 4(88). – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 2019. – С. 76-89. (<https://doi.org/10.31713/vt420190>), (*Фахова*)

7. Volodymyr Pohrebennyk. Evaluation of the Pollution Level of Surface and Waste Water / Volodymyr Pohrebennyk, Mykhailo Kulyk, Iryna Bihun // Journal of Ecological Engineering. Volume 21, Issue 5, July 2020. - Pages 180-188. (<https://doi.org/10.12911/22998993/122675>) (*SCOPUS*)

8. Cherniuk, V., Hnativ, R., Kravchuk, O., Orel, V., Bihun, I., Cherniuk, M. The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 6, No. 7 (114), 2021, p. 93-103. (doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852>), (*SCOPUS*).

9. Volodymyr Snitynskyi, Petro Khirivskyi, Volodymyr Cherniuk, Ihor Hnativ, Roman Hnativ, Orest Verbovskiy, Irina Bihun. The Influence of Self-Cleaning Processes on the Quality of Drinking Water of Stryi Water Intake Wells / Journal of Ecological Engineering (JEE), ISSN 2299-8993. 2022, No. 23(4), p. 25-32. (<https://doi.org/10.12911/22998993/146335>), (*SCOPUS*).

Матеріали конференцій

10. Чернюк В. В. Напірні розподільні трубопроводи в енергетиці / В. В. Чернюк, В. В. Іванів, І. В. Бігун // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам в регіоні. Матеріали X-ої міжнародної наук.-практичн. конференц. (4-5 квітня, 2019 р.): Збірник наукових праць. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2019. – С. 62-67. (Книга має 258 с.)

11. Чернюк В. В. Напірні трубопроводи-збирачі у водопостачанні та водовідведенні / В. В. Чернюк, В. В. Іванів, І. В. Бігун // Ресурси природних вод карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання.

Матеріали Вісімнадцятої міжнародн. наук.-практичн. конференц. (м. Львів, 23-24 травня, 2019 р.): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2019. - С. 254-257. (Книга має 276 с.)

12. Bihun I. V. Coefficients of flow rate of nozzles with lateral inlets installed in pressure distributive pipelines / I. V. Bihun, V. V. Ivaniv, V. V. Cherniuk // Proceedings of the 3rd International Scientific-Practical Conference Water Supply and Wastewater Disposal: designing, construction, operation and monitoring. October, 23th-25th, 2019, Lviv, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House 2019. - S. 256-258. (The book has 265 pages).

13. Kulyk M. Determination of the procedure for elimination of polluting components from industrial and drainage sewage / M. Kulyk, I. Bihun // 3-я міжнародна науково-практична конференція Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг. (23-25 жовтня, 2019 р.): Матеріали конференції. - Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2019. - С. 55-56. (Книга має 265 с.)

14. I. V. Bihun Coefficient of Flow Rate of a Nozzle with Lateral Inlet for Regulation of Fluid Dispensation from Distributive Pipelines / Bihun I. V., Ivaniv V. V., Cherniuk V. V. // 2nd Polish IWA Young Water Professionals Conference “Emerging Technologies in Water and Wastewater Sector” Warsaw 12-14. 02.2020.

15. Чернюк В. В. Пропускна здатність вихідної циліндричної насадки з бічним входом залежно від кута підведення струменя / В. В. Чернюк, С. В. Андреюк, І. В. Бігун, В. Є. Фасуляк // Ресурси природних вод карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали Дев'ятнадцятої міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 8-9 жовтня 2020 р.): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2020. - С. 151-156. (Книга має 230 с.)

16. The influence of self-cleaning processes on the quality of drinking water of Stryi water intake wells. V. Snitynskyi, P. Khirivskyi, V. Cherniuk, I. Hnativ, R. Hnativ, I. Bihun. / Proceedings of the IV International Scientific-Practical

Conference Water Supply and Wastewater Disposal: Designing, construction, operation and monitoring. 20-22 October, 2021, Lviv. P. 183-184.

Заявка на винахід

17. Заявка на винахід № а202201571. Україна, МПК G05D 7/00, F17D 1/02, F17D 1/08. Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації / В. В. Чернюк, В. В. Іванів, І. В. Бігун, В. Є. Фасуляк, М. В. Чернюк (Україна); Національний університет “Львівська політехніка”. Заявлено 16.05.2022. Український інститут інтелектуальної власності. – 9 с.

ANNOTATION

Bihun I.V. Hydraulic methods of regulating the development of fluid from pressure distribution pipelines - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 Construction and Environmental Engineering. - Lviv Polytechnic National University. - Lviv, 2022.

Creation of highly effective means of control of pressure flows of liquids, in particular with a variable travel expense, is a perspective direction of improvement of production technologies. Pressure distribution pipelines (RT) with discrete path fluid distribution are used in various technical systems, including irrigation (drip and groundwater irrigation), agricultural aviation (spraying plants), water supply and drainage (treatment facilities), ventilation (supply) systems cooling of circulating waves of thermal power plants and nuclear power plants), etc. In practice, uneven track distribution of fluid along the RT is realized. The desire to reduce the uneven distribution of fluid along the flow, encouraged scientists to improve existing and create new methods of hydraulic calculation of RT. The proliferation of pressure distribution pipelines and the lack of reliable methods for calculating RT indicates the urgency of improving the methods of their design and development of ways to regulate the unevenness of the track distribution of fluid along the RT.

This dissertation presents the main areas of application of pressure distribution pipelines. The unevenness of the track distribution of fluid along the pressure RT is regulated by changing their geometric parameters, in particular by reducing the distance between the outlets, increasing the area of the outlets ω or along the flow and reducing the diameter of the RT in the direction of fluid flow.

Experience has shown that the most accurate methods of RT design are based on solving the differential equation of fluid motion with variable flow rate (Navoyan HA, 1975). A theoretical approach to solving this problem is proposed at the Kyiv National University of Construction and Architecture (Kravchuk AM, 2004, Chernyshov DO 2005). Lviv Polytechnic National University (Chernyuk VV, 2008)

is developing methods based on solving the differential equation of fluid flow with variable flow, which take into account all the geometric parameters of RT and hydrodynamic characteristics of internal and external fluid flows, and also jets that branch off from RT. Existing theoretical developments require their experimental verification and implementation in production.

The method of regulating the work of RT with the help of cylindrical rotary nozzles with lateral, orthogonal to their longitudinal axes, the inlet of the jet into the nozzles proposed by scientists of Lviv Polytechnic is effective and promising [63]. However, there is no reference in the literature on the value of the flow rate μ for such nozzles. On the basis of the literary analysis taking into account urgency of a theme and economic needs of Ukraine, the purpose and tasks of dissertation researches are defined.

Purpose: based on the analysis of theoretical and experimental studies to indicate the way to clarify the proposed at the National University "Lviv Polytechnic" method of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines.

A detailed theoretical analysis of the equations proposed by Chernyuk VV (Lviv Polytechnic) for hydraulic calculations of pressure distribution pipelines laid in the fluid flow, which washes the RT from the outside. These equations reflect the physical essence of hydrodynamic processes that are realized during the operation of RT. The results of calculations by these equations practically coincide with the experimental data only at right angles of branching of jets from RT and are close in values to the data obtained by the formulas recommended by Kravchuk AM and Chernyshev DO (Kyiv, KNUBA). However, in deriving their formulas Kravchuk AM and Chernyshev DO laid the condition that the angles of branching of the jets are straight.

The reason for the discrepancy between the results of hydraulic calculation of RT according to VV Chernyuk's equations with experimental data, at indirect angles of jet branching, is most likely to take into account in the initial differential equation the action of external pressure along a direction not orthogonal to the inner wall of the distribution pipe. In order to obtain reliable results of hydraulic calculation of

pressure distribution pipelines at angles $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$, it is recommended to lower the force of external pressure directed non-orthogonally to the inner wall of the RT in the initial differential equation of fluid motion with variable flow.

An experimental stand was designed and manufactured to establish the values of the flow rate of the original cylindrical nozzles with lateral, orthogonal to their longitudinal axes, the jet inlet to the nozzle and a stand for the study of track distribution of fluid from pressure distribution pipelines. The total relative error in determining the flow rate of the original cylindrical nozzles with a side jet inlet on the applied experimental stand is equal to 0.71%.

The value of the flow coefficient μ of cylindrical nozzles with lateral, orthogonal to the longitudinal axis of the nozzle, jet inlet, the angle β between the directions of water flow in the distribution pipeline and the jet entering the nozzle and disconnected from the RT. The experiments were performed at different values of the ratio of the cross-sectional areas of the nozzle and the pipe in which it was mounted.

By adjusting the value of the angle β , the value of the coefficient was changed μ to 22.2% for only one nozzle. The highest throughput of the original cylindrical nozzles with lateral, orthogonal to the axis of the nozzle inlet water jet, obtained at an angle $\beta = 0^\circ$. The lowest value, ie the lowest capacity of the nozzles, was obtained at $\beta = 90^\circ$ and $\beta = 135^\circ$.

It is shown that by changing the angle β between the flow of liquid in the distribution pipe and the direction of flow of the jet that is disconnected from it, you can significantly adjust the flow rate of cylindrical nozzles with lateral fluid inlet and uneven distribution of fluid along pressure distribution pipes. The results obtained will be of significant practical importance.

The method of regulating the flow of fluid into the pressure pipeline collector and device for its implementation was invented, according to which, in the presence of transit flow at the entrance to the pipeline collector, eliminate the distribution of fluid at its initial section and ensure fluid collection. Regulation of fluid flow is carried out by using the energy of the transit flow.

The dissertation is characterized by economic and environmental effects, has social significance and technical advantages in comparison with the well-known solution of the problem of optimizing the operation of distribution pipelines and collecting pipelines.

The conducted research is related to the research programs of Ukraine and the National University "Lviv Polytechnic". The results of the work were transferred to the Lviv City Utility Company "Lvivvodokanal" in order to apply them in hydraulic calculations to reduce the unevenness of the track distribution of fluid from the pressure distribution pipelines in sewage treatment plants. Obtained by the addict $\mu = f[\beta, (d/D)^2, Re]$ were introduced into the educational process at the National University "Lviv Polytechnic" in teaching the subject "Hydraulics and fire water supply".

Key words: pressure distribution pipeline; angle of disconnection of output jets; uneven track distribution of fluid; output cylindrical nozzle with side jet inlet.

The main provisions of the dissertation were properly tested at nine international scientific and practical conferences.

List of works published by the applicant on the topic of the dissertation

Monograph section

1. I. Bihun. Coefficient of flow rate for outlet cylindrical nozzles with lateral inflow installed in distributive pipelines / I. Bihun, V. Ivaniv, V. Cherniuk // In the monograph „Water Supply and Wastewater Disposal. Designing, Construction, Operation and Monitoring”. Edited by Henryk Sobczuk, Beata Kowalska. - Publishing house: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2020. – S. 23-32. (ISBN: 978-83-7947-409-7).

Articles

2. Bosak N. Studying the mutual interaction of hydraulic characteristics of water distributing pipelines and their spraying devices in the coolers at energy units / N. Bosak, V. Cherniuk, I. Matlai, I. Bihun // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. - № 3/8 (99). - P. 23-29. (DOI: 10.15587/1729-4061.2019.166309). (SCOPUS)

3. Cherniuk V. V. Coefficient of Flow Rate of Inlet Cylindrical Nozzles with Lateral Orthogonal Inflow / V. V. Cherniuk, V. V. Ivaniv, I. V. Bihun, and Ja. M. Wojtowicz // Proceedings of CEE 2019. Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering. – Springer. Nature Switzerland AG 2020. – P. 50-57 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_7). (SCOPUS)

4. Bihun I.V. Features of application of pressure distribution pipelines in different technical systems / I.V. Bihun // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: Theory and practice of construction. - 2019. - № 1 (2). - P. 14-20. (Professional, single authorship)

5. Flys I. Ya. Cylindric nozzles with lateral inlets installed in distributive pipeline. investigational bench for investigation of operation of nozzles / I. Ya. Flys, V. V. Ivaniv, I. V. Bihun. // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: Theory and practice of construction. - 2019. - № 912. - P. 187-192. (Professional)

6. Ivaniv V.V. Application and methods of hydraulic calculation of pressure pipelines-collectors / V.V. Ivaniv, I.V. Bihun // Bulletin of the National University of Water Management and Environmental Sciences: Collection of scientific works. Technical sciences. Issue № 4 (88). - Rivne: National University of Water Management and Environmental Sciences, 2019. - P. 76-89. (<https://doi.org/10.31713/vt420190>), (Professional)

7. Volodymyr Pohrebennyk. Evaluation of the Pollution Level of Surface and Waste Water / Volodymyr Pohrebennyk, Mykhailo Kulyk, Iryna Bihun // Journal of Ecological Engineering. Volume 21, Issue 5, July 2020. - Pages 180-188. (<https://doi.org/10.12911/22998993/122675>) (SCOPUS)

8. Cherniuk, V., Hnativ, R., Kravchuk, O., Orel, V., Bihun, I., Cherniuk, M. The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 6, No. 7 (114), 2021, p. 93-103. (doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852>), (SCOPUS).

9. Volodymyr Snitynskyi, Petro Khirivskyi, Volodymyr Cherniuk, Ihor Hnativ, Roman Hnativ, Orest Verbovskiy, Irina Bihun. The Influence of Self-Cleaning Processes on the Quality of Drinking Water of Stryi Water Intake Wells / Journal of Ecological Engineering (JEE), ISSN 2299-8993. 2022, No. 23(4), p. 25-32. (<https://doi.org/10.12911/22998993/146335>), (SCOPUS).

Conference materials

10. Chernyuk V.V. Pressure distribution pipelines in energy / V.V. Chernyuk, V.V. Ivaniv, I.V. Bihun // Unconventional and renewable energy sources as alternatives to primary sources in the region. Materials of the X-th international scientific-practical conference (April 4-5, 2019): Collection of scientific works. - Lviv: National University "Lviv Polytechnic", 2019. - P. 62-67. (The book has 258 pages.)

11. Chernyuk V.V. Pressure collectors-collectors in water supply and drainage / V.V. Chernyuk, V.V. Ivaniv, I.V. Bihun // Resources of natural waters of the Carpathian region / Problems of protection and rational use. Materials of the Eighteenth International scientific-practical conference (Lviv, May 23-24, 2019): Collection of scientific articles. - Lviv: National University "Lviv Polytechnic", 2019. P. 254-257. (The book has 276 pages.)

12. Bihun I. V. Coefficients of flow rate of nozzles with lateral inlets installed in pressure distributive pipelines / I. V. Bihun, V. V. Ivaniv, V. V. Cherniuk // Proceedings of the 3rd International Scientific-Practical Conference Water Supply and Wastewater Disposal: designing, construction, operation and monitoring. October, 23th-25th, 2019, Lviv, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House 2019. - S. 256-258. (The book has 265 pages).

13. Kulyk M. Determination of the procedure for elimination of polluting components from industrial and drainage sewage / M. Kulyk, I. Bihun // 3rd International Scientific and Practical Conference Water Supply and Sewerage: Design, Construction, Operation, Monitoring. (October 23-25, 2019): Proceedings of the conference. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2019. P. 55-56. (The book has 265 pages.)

14. I. V. Bihun Coefficient of Flow Rate of a Nozzle with Lateral Inlet for Regulation of Fluid Dispensation from Distributive Pipelines / Bihun I. V., Ivaniv V. V., Cherniuk V. V. // 2nd Polish IWA Young Water Professionals Conference “Emerging Technologies in Water and Wastewater Sector” Warsaw 12-14. 02.2020.

15. Chernyuk VV Bandwidth of the output cylindrical nozzle with a side entrance depending on the angle of supply of the jet / VV Chernyuk, SV Andreyuk, IV Bigun, VE Fasulyak // Resources of natural waters of the Carpathian region / Problems of protection and rational use. Proceedings of the Nineteenth International Scientific and Practical Conference (Lviv, October 8-9, 2020): Collection of scientific articles. - Lviv: National University "Lviv Polytechnic", 2020. P. 151-156. (The book has 230 pages.)

16. The influence of self-cleaning processes on the quality of drinking water of Stryi water intake wells. V. Snitynskyi, P. Khirivskyi, V. Cherniuk, I. Hnativ, R. Hnativ, I. Bihun. / Proceedings of the IV International Scientific-Practical Conference Water Supply and Wastewater Disposal: Designing, construction, operation and monitoring. 20-22 October, 2021, Lviv. P. 183-184.

Application for the invention

17. Application for invention № a202201571. Ukraine, IPC G05D 7/00, F17D 1/02, F17D 1/08. V.V. Chernyuk, V.V. Ivaniv, Bihun I.V., Fasulyak V.E., Chernyuk M.V. (Ukraine); Lviv Polytechnic National University. – 16.05.2022 ; Declared. 2022. Ukrainian Institute of Intellectual Property. - 9 p.

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	20
ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМА ЗМЕНШЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗДАЧІ РІДИНИ З НАПІРНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРУБОПОВОДІВ (РТ)	28
1.1. Поширення напірних розподільних трубопроводів	28
1.2. Нерівномірність роздачі рідини уздовж напірних РТ	34
1.3. Методи гідравлічного розрахунку напірних РТ	35
1.3.1. Аналітичні рівняння	35
1.3.2. Диференціальні рівняння	36
1.3.2.1. Розвиток гідравліки змінної витрати	36
1.3.2.2. Класифікація РТ	38
1.3.2.3. Методи інтегрування диференціального рівняння руху рідини змінної витрати	39
1.4. Чисельні й експериментальні дослідження роботи РТ	56
1.5. Підсумок до розділу 1. Мета роботи. Завдання досліджень	59
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ЗМЕНШЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ШЛЯХОВОЇ РОЗДАЧІ РІДИНИ З НАПІРНИХ РТ	61
2.1. Постановка задачі теоретичних досліджень	61
2.2. Теоретичний аналіз рівняння (1.20) і формули (1.21)	63
2.3. Фактори, що впливають на роздачу рідини з напірних РТ	66
2.3.1. Кінематичні характеристики потоків і струменів	66
2.3.2. Геометричні параметри РТ	67
2.3.3. Зовнішній статичний тиск	68
2.3.4. Кут між струменями, що від'єднуються, і зовнішнім потоком ...	68
2.3.5. Кут нахилу поздовжньої осі РТ до обрїю	68

2.3.6. Кут відгалуження струменів від потоку в РТ	70
2.3.7. Підсумок теоретичного аналізу розв'язку ДРРРЗВ	74
2.4. Підсумок до розділу 2	75
3. ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	76
3.1. Обґрунтування геометричних параметрів і гідродинамічних характеристик досліджуваних РТ	76
3.2. Планування експериментів	77
3.3. Стенд для встановлення значень коефіцієнта витрати вихідних циліндричних насадок з бічним входом струменя	79
3.4. Стенд для дослідження шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів	87
3.5. Методика проведення дослідів	91
3.5.1. Встановлення значень коефіцієнта витрати насадок	91
3.5.2. Нерівномірність шляхової роздачі рідини з РТ	92
3.6. Математична обробка експериментальних даних	93
3.7. Оцінка точності вимірів	97
3.8. Підсумок до розділу 3	101
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХОВОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗДАЧІ РІДИНИ З НАПІРНОГО РТ	102
4.1. Коефіцієнт витрати вихідних циліндричних насадок з бічним входом струменя залежно від впливу різних факторів	102
4.1.1. Інтегральні графічні залежності	102
4.1.2. Кут відведення струменя від основного потоку в РТ	105
4.1.3. Ступінь струменя стиснення при вході у вихідну насадку	110
4.1.4. Критерій Рейнольдса	111
4.2. Нерівномірність шляхової роздачі рідини з напірного РТ залежно від впливу різних факторів	114

4.3. Підсумок до розділу 4	119
РОЗДІЛ 5. ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	120
5.1. Спосіб керування напірним потоком рідини зі змінною витратою ...	120
5.2. Ефективність результатів досліджень	125
5.2.1. Економічний ефект	125
5.2.2. Соціальне значення	127
5.2.3. Екологічний ефект	128
5.2.4. Технічні переваги	128
5.3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами	129
5.4. Упровадження результатів роботи	130
5.5. Перспективи подальших досліджень	130
5.6. Підсумок	130
ВИСНОВКИ	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	133
ДОДАТКИ	147
Додаток А. Акт впровадження у БУВР Західного Бугу і Сяну	148
Додаток Б. Акт впровадження у навчальний процес НУЛП	149
Додаток В. Список публікацій	150

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ

- ДРРРЗВ – диференціальне рівняння руху рідини змінної витрати;
- ЕТ – експериментальний трубопровід;
- РТ – розподільний трубопровід;
- ТЗ – трубопровід-збирач;
- D – внутрішній діаметр трубопроводу, [м];
- d – внутрішній діаметр вхідної циліндричної насадки з ортогональним бічним виходом, [м];
- $(d/D)^2$ – співвідношення площ поперечних перерізів вихідної насадки насадки розподільного трубопроводу [0];
- H_{beg} – робочий напір на першій вихідній насадці розподільного трубопроводу, у наших дослідах це напір на першій насадці, [м];
- H_i – робочий напір на вихідній насадці розподільного трубопроводу, [м];
- H_{min} – мінімальний напір на вихідних насадках, у наших дослідах це напір на останній насадці розподільного трубопроводу, [м];
- H_{out} – фактичний напір ззовні трубопроводу, [м];
- $p_i/\rho g$ – п'єзометричний напір на i -ій насадці, [м];
- Q_{tr} – транзитна витрата основного потоку, що прикладається до початок трубопроводу, [m^3/c];
- q_{beg} – витрата крізь першу насадку, [m^3/c];
- q_m – максимальна або мінімальна витрата води крізь одну насадку, [m^3/c];
- $p_{o_{out}}$ – тиск на вільній поверхні рідини, в котру занурений РТ [Па];
- Re_d – критерій Рейнольдса для струменя всередині насадки, [0];
- Re_D – критерій Рейнольдса для струменя всередині трубопроводу, [0];
- V – середня швидкість основного потоку в трубопроводі, [м/с];
- v – середня швидкість приєднуваного струменя, [м/с];
- $(\alpha V^2/2g)_i$ – швидкісний напір потоку всередині трубопроводу перед створом i -ої насадки, [м];

β – кут між напрямками руху основного потоку в РТ і струменів, які від нього від'єднуються, [град];

Z_i – робочий напір на вхідній насадці трубопроводу-збирача, [м];

$Z_{(0)}$ - глибина занурення РТ під рівень зовнішнього потоку рідини [м].

ξ – кут між напрямками руху струменя, котрий від'єднується у вихідному перерізі отвору-випусу, та напрямком течії зовнішнього потоку, котрий омиває РТ, [град];

η_H – нерівномірність розподілу робочих напорів у розподільному трубопроводі, [0];

η_Q – нерівномірність роздачі води з розподільних трубопроводів, [0];

λ – гідравлічний коефіцієнт тертя, обчислюють залежно від режиму течії та ділянок гідравлічного опору, [0];

μ – коефіцієнт витрати вхідної циліндричної насадки з ортогональним приєднанням струменя, [0];

ψ – кут нахилу поздовжньої осі РТ до обрію, [град];

Ω – площа поперечного перерізу трубопроводу, [м²];

ω - площа поперечного перерізу насадки, [м²];

ВСТУП

Актуальність теми. Створення високоефективних засобів керування напірними потоками рідин, зокрема зі змінною шляховою витратою, є перспективним напрямком розвитку виробничих технологій, направлений на підняття рівня життя суспільства. Напірні розподільні трубопроводи (РТ) з дискретною шляховою роздачою рідини застосовуються в багатьох виробництвах, наприклад: іригації (краплинне, внутрішньо-грунтове та поверхнєве зрошення); сільськогосподарській авіації (обприскування рослин); водопостачанні (протипожежні системи); водовідведенні (випуски очищених стоків); вентиляції (припливні системи); водному транспорті (розподільні системи живлення шлюзів); машинобудуванні (розподільні паливні магістралі багатоциліндрових двигунів внутрішнього згорання) й ін. Незважаючи на повсюдне застосування потоків зі змінною шляховою витратою, вони є недостатньо вивчені.

У відомих методиках розрахунку шляхової роздачі рідини з розподільного трубопроводу застосовують низку допущень. Наприклад, шляхову роздачу рідини беруть постійною уздовж РТ, гідравлічний коефіцієнт тертя також беруть незмінним по довжині РТ, а кут відгалуження струменів приймають прямим, тощо. Насправді вказані параметри є змінними. Відомо, що неповне врахування геометричних параметрів розподільного трубопроводу та кінематичних характеристик потоку рідини в ньому, призводить до серйозних помилок при проектуванні РТ. Однак, точний гідравлічний розрахунок напірних розподільних трубопроводів можна зробити тільки за допомогою теорії гідравліки змінної витрати. Прагнення забезпечити зменшення нерівномірності роздачі рідини уздовж потоку, спонукало науковців до пошуку достовірних методів гідравлічного розрахунку РТ.

Розробляються методи, котрі ґрунтуються на розв'язанні диференціального рівняння руху рідини зі змінною витратою та беруть до уваги усі геометричні параметри РТ і гідродинамічні характеристики внутрішнього та

зовнішнього потоків рідин, а також струменів, які відгалужуються від РТ. Ці запропоновані методи розрахунку РТ потребують експериментальної перевірки та підтвердження з подальшим їх впровадженням у виробництво. Останнє, враховуючи широке застосування напірних розподільних трубопроводів, має важливе значення для України і є актуальним напрямком наукових досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалась згідно Закону України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки" від 11.07.2001 р. № 2623-III (зі змінами від 29.01.2021 р. № 1162-IX). Праця тісно пов'язана з держбюджетною тематикою кафедри гідротехніки та водної інженерії (ГВІ) Національного університету "Львівська політехніка". Дослідження провадились на замовлення Міністерства освіти і науки України в складі науково-дослідної роботи: "Зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів" (ГС-6), державний реєстраційний номер якої 0118U007051.

Мета роботи і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є аналіз і перевірка відомих методів гідравлічного розрахунку нерівномірності роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів і надання рекомендацій для їх удосконалення.

Для досягнення мети роботи були поставлені такі **завдання досліджень**:

- проаналізувати й експериментально перевірити відомі теоретичні методи розрахунку напірних розподільних трубопроводів;
- експериментально встановити значення коефіцієнта витрати вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до поздовжньої осі насадки, входом струменя, встановлених у напірному розподільному трубопроводі;
- дослідити закономірності шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів, залежно від значень кута відгалуження струменів від потоку у розподільному трубопроводі, відношення площ поперечного перерізу насадки і розподільного трубопроводу, критерію Рейнольдса;

– теоретично обґрунтувати можливі методи зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів;

– надання рекомендацій для удосконалення методу гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів, який урахує кут відгалуження струменів.

Об’єкт дослідження – витікання рідини крізь вихідні циліндричні насадки з бічним входом струменя, встановлених в напірному розподільному трубопроводі та шляхова роздача рідини з нього.

Предмет дослідження – коефіцієнт витрати вихідних циліндричних насадок з бічним входом струменя та регулювання шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів.

Методи досліджень

У роботі застосовано фізичне й математичне моделювання витікання рідини крізь вихідні циліндричні насадки з бічним входом струменя та шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів. Теоретичні дослідження виконували із застосуванням методів математичного аналізу. Експериментальні методи досліджень опирались на теорію подібності з застосуванням сучасних технологій гідравлічних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- проведено теоретичний аналіз рівнянь для розрахунку напірних розподільних трубопроводів, які ураховують усі геометричні характеристики розподільного трубопроводу та гідродинамічні параметри внутрішнього й зовнішнього потоків рідин;

- рекомендовано уточнити ці рівняння шляхом вилучення з них компоненти сили дії зовнішнього тиску, направленої під непрямым кутом до стінки розподільного трубопроводу;

- вперше отримано залежності коефіцієнта витрати вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до їхньої поздовжньої осі, входом струменя

від: кута відведення струменя від потоку в розподільному трубопроводі; ступеня стиснення струменя при вході у насадку; критерію Рейнольдса.

Практичне значення отриманих результатів

- отримано значення коефіцієнта витрати вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до їх поздовжньої осі, входом струменя залежно від:

- a) кута відведення струменя від потоку в розподільному трубопроводі;
- б) ступеня стиснення струменя при вході у насадку;
- в) критерію Рейнольдса;

- експериментально підтверджено можливість регулювання шляхової роздачі води з напірного розподільного трубопроводу змінуванням кута відведення від'єднаних струменів;

- винайдено спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач, згідно з яким, за наявності транзитного потоку на вході у трубопровід-збирач, усувають роздачу рідини на початковій його ділянці та забезпечують збирання її по усій довжині трубопроводу-збирача.

Особистий внесок у наукових працях здобувача

Виконано аналіз сучасних методів гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів. Запроектовано, виготовлено та змонтовано експериментальний стенд. Проведено досліди. Зроблено математичну обробку й аналіз результатів експериментальних досліджень. Побудовано графічні експериментальні залежності. Описано винахід “Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації”.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на дев'яти міжнародних конференціях:

- X-а міжнародна науково-практична конференція “Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам в регіоні”, м. Львів, 4-5 квітня, 2019 р.;

- Вісімнадцята міжнародна науково-практична конференція “Ресурси природних вод карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання”. м. Львів, 23-24 травня, 2019 р.;

- International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering: Lviv - Košice – Rzeszów, Lviv, 2019;

- 3rd International Scientific-Practical Conference Water Supply and Wastewater Disposal: designing, construction, operation and monitoring. October, 23th-25th, 2019, Lviv, Ukraine;

- 3-я міжнародна науково-практична конференція “Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг”, м. Львів, 23-25 жовтня, 2019 р.;

- 2nd Polish IWA Young Water Professionals Conference “Emerging Technologies in Water and Wastewater Sector” Warsaw 12-14.02.2020;

- Дев’ятнадцята міжнародна науково-практична конференція “Ресурси природних вод карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання”, м. Львів, 8-9 жовтня 2020 р.;

- International Scientific-Practical Conference EcoComfort 2020, Lviv;

- IV International Scientific-Practical Conference Water Supply and Wastewater Disposal: Designing, construction, operation and monitoring, Lviv, 20-22 October, 2021.

Публікації

Результати дисертаційної роботи опубліковані у 17 наукових працях. Із них: 1 у міжнародній монографії (Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2020), 5 у науково-метричних виданнях, які індексуються базою даних SKOPUS; 3 у наукових фахових виданнях України, зокрема 1 в одноосібному авторстві дисертантки; 7 у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій. Подано 1 заявку на отримання патенту на винахід.

Структура та обсяг дисертаційної роботи

Дисертація включає зміст, перелік умовних позначень, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел зі 101 найменування. Робота містить 63 рисунки та 6 таблиць. Загальний її обсяг 153 стор., у т. ч. 14 стор. список використаних джерел та 3 додатки.

Розділ 1

ПРОБЛЕМА ЗМЕНШЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗДАЧІ РІДИНИ З НАПІРНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ (РТ)

1.1. Поширення напірних розподільних трубопроводів [5-6]

Напірні розподільні трубопроводи (РТ) з дискретною шляховою роздачою рідини входять у склад різних технічних систем.

В іригації напірні РТ застосовуються для зволоження ґрунту, наприклад, у *краплинній* (рис. 1.1) [1] і *внутрішньогрунтовій* системах зрошення.

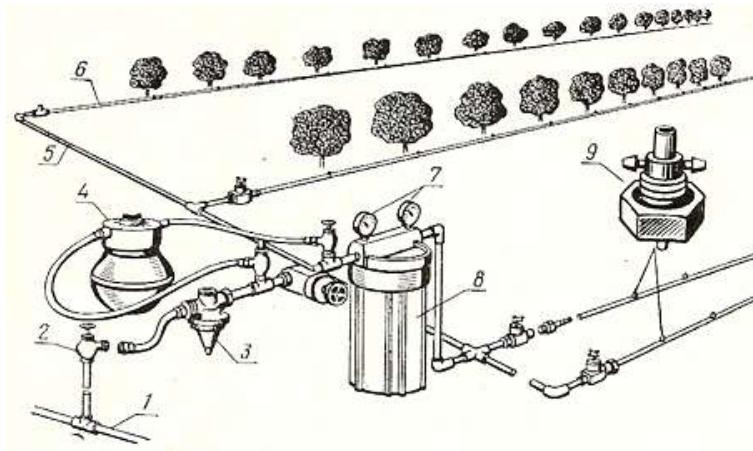


Рис. 1.1. Схема системи краплинного зрошення саду: 1 – магістральний трубопровід; 2 – засувка; 3 – регулятор тиску; 4 – ємність з добривами; 5 – розподільний трубопровід першого порядку (РТ-1); 6 – те саме, другого порядку (РТ-2, поливний трубопровід); 7 – манометри; 8 – фільтр; 9 – крапельниці (водовипускні насадки)

Особливістю роботи напірних РТ є нерівномірність шляхової роздачі рідини по їх довжині. Тому постає задача зменшення нерівномірної роботи розподільних трубопроводів.

Робота напірних РТ в іригації наглядно демонструється дощувальною технікою, наприклад, колісним розподільним трубопроводом, який є основою дощувальної машини “Волжанка” (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Дощувальна машина “Волжанка” (світлину взято з сайту: <https://webferma.com/rastenievodstvo/sistemi-orosheniya/volzhanka.html>)

Водопостачання та водовідведення. Напірні РТ застосовують при аерації води: а) у водопостачанні в *очисних водопровідних спорудах* з метою видалення з води гідроокису заліза, вільної вуглекислоти і сірководню; б) у водовідведенні в *спорудах біологічної очистки стічних вод* (аеротенках, аерофільтрах, біофільтрах) для забезпечення життєдіяльності мікроорганізмів (аеробних бактерій), які здійснюють процес мінералізації розчинених в стічних водах органічних речовин і інших забруднень (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Басейн для аерації води (автор світлині William Murphy; її взято з сайту: <http://biofile.ru/geo/4804.html>)

Напірні розподільні трубопроводи знайшли широке застосування у *протипожежному водопостачанні*, зокрема у спринклерних (автоматичних) і дренчерних (напіваавтоматичних) системах пожежогасіння (рис. 1.4).

До 90 % усіх пожеж гасять водою. Водяні системи пожежогасіння встановлюють там, де потоки води не можуть завдати значної шкоди - в школах, поліклініках тощо.

Рис. 1.4. Напірний розподільний трубопровід дренчерної системи пожежогасіння (світлина з сайту: <https://ssbb.com.ua/uk/news/vodyani-sistemi-pozhezhogasinnya/>)



У каналізаційних системах напірні розподільні трубопроводи застосовують для розосередженого випуску стічних вод у ріки (рис. 1.5) [2]. Імпульсне випускання стоків відокремленими об'ємами запобігає перевищенню гранично допустимих концентрацій локального забруднення річкової води біля водовипуску. Цим створюються умови для розбавлення стоків у річковій воді до допустимих норм.

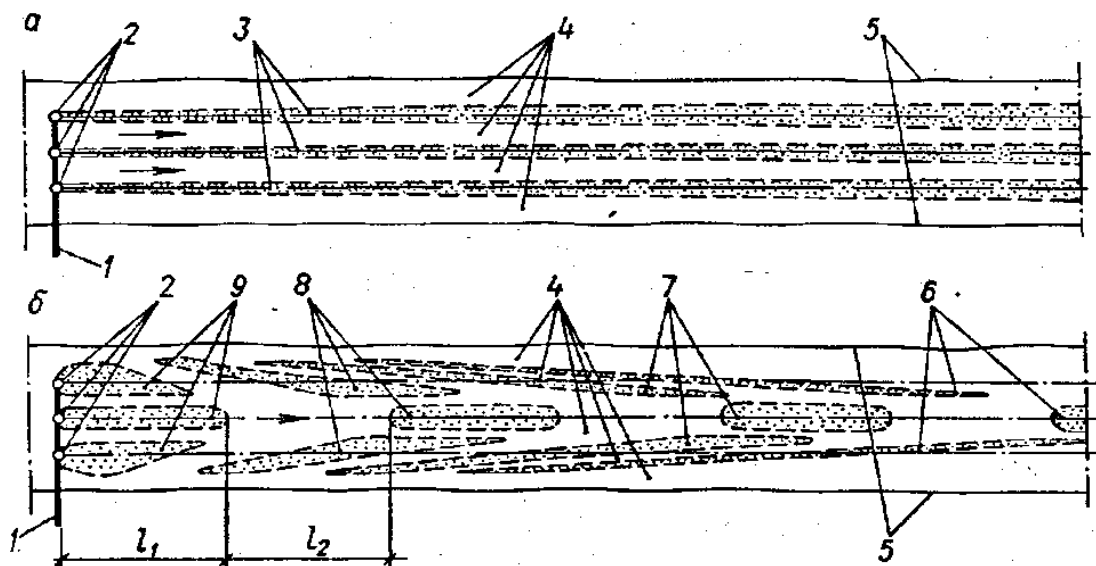


Рис. 1.5. Розосереджене випускання стічних вод у ріку: а – безперервне випускання; б – скидання періодичними об'ємами: 1 – розподільний трубопровід; 2 – водовипуски; 3 – стічна вода; 4 – річкова вода; 5 – береги ріки; 6-9 - почергово скинені об'єми стоків, які відносяться рікою

Енергетика. Для охолодження циркуляційної води в атомних і теплових електростанціях (АЕС і ТЕС) з успіхом застосовують *бризкальні басейни* (рис. 1.6,*а*) та *градирні* (рис. 1.6,*б*). Основними елементами цих споруд є напірні розподільні трубопроводи.



Рис. 1.6. Споруди для охолодження циркуляційної води у ТЕС і АЕС: а – бризкальний басейн; б – РТ з соплами-розпилювачами в градирні Карагандинської ТЕЦ-3 (світлина Вадима Махорова взято з сайту: <http://loveopium.ru/tehnologiya/gradirni.html>)

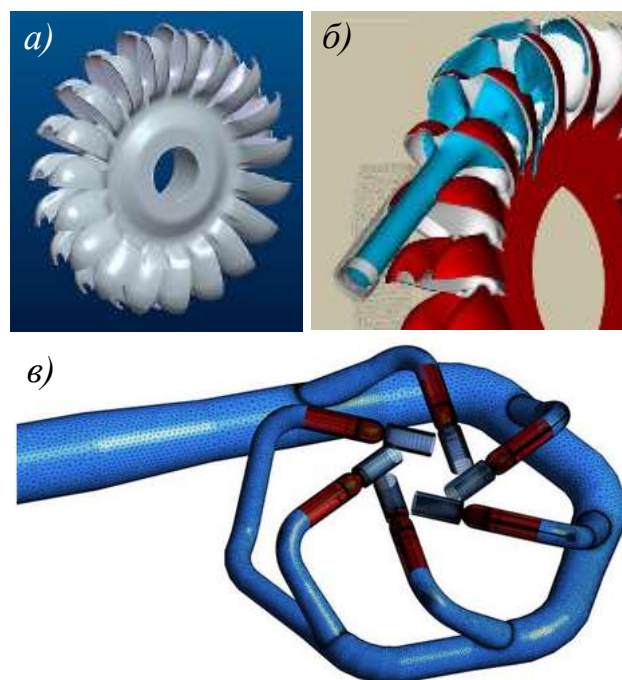
Турбіни ТЕС і АЕС також оснащені розподільними трубопроводами з напрямними соплами, котрі спрямовують струмені робочої пари на лопаті колеса турбіни (рис. 1.7). Ці РТ огинають робоче колесо турбіни і за своєю формою є багатокутними (див. рис. 1.7,*в*).

*Рис. 7. РТ турбіни Пелтона:
а - турбіна; б - струмінь пари, спрямований на лопаті турбіни;
в - кільцевий розподільний трубопровід з напрямними соплами*

(світлини “а” та “в” взято зі сайту <http://www.hfm.tugraz.at/en/references/systems/pelton-distribution-pipe.html>,

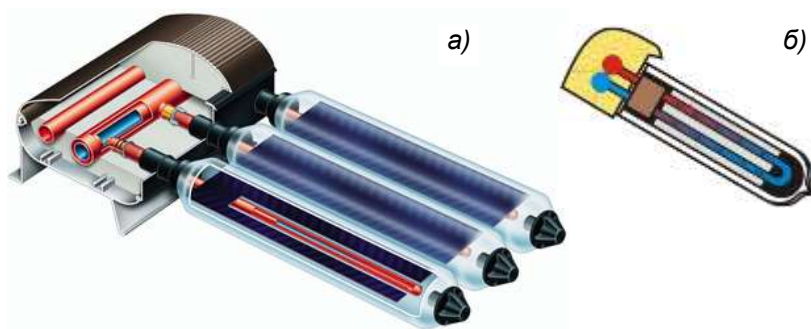
світлину “б” - з сайту <http://en.souvr.com/CaseStudy/200909/295>

[5.html](#)



Сонячні колектори деяких конструкцій містять розподільні трубопроводи та трубопроводи-збирачі, розміщені в одному корпусі (рис. 1.8). Розподільними трубопроводами підводиться холодна вода до пристрою, а трубопроводами-збирачами відводиться нагріта ним вода.

Рис. 1.8. Сонячний колектор: а - загальний вигляд; б – схема нагрівального елемента (поздовжній розріз)



Припливна вентиляція забезпечує подачу чистого зовнішнього повітря у приміщення (рис. 1.9). Забруднене повітря видаляється крізь вентиляційні отвори, фрамуги, дефлектори. Цей вид механічної вентиляції застосовується у виробничих приміщеннях зі значним тепловиділенням і низькою концентрацією шкідливих речовин. Якщо немає необхідності підігрівати припливне повітря, то його пропускають безпосередньо у виробничі приміщення крізь обвідний канал 4.

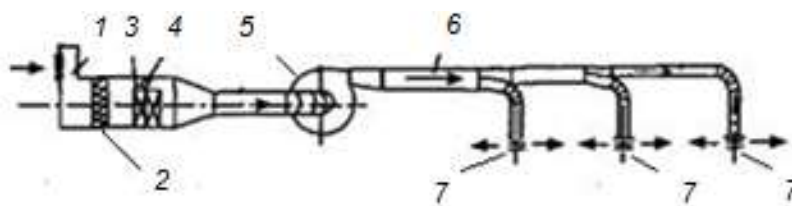


Рис. 1.9. Схема припливної механічної вентиляції: 1 - повітрозабірний пристрій; 2 - фільтр для очищення повітря; 3 - повіронагрівач; 4 - обвідний канал; 5 – вентилятор; 6 – розподільний трубопровід; 7 - припливні патрубки з насадками

У **сільськогосподарській авіації** напірні розподільні трубопроводи застосовують при обприскуванні рослин (рис. 1.10) [3, с. 272-273].



Рис. 1.10. Розподільні трубопроводи в сільськогосподарській авіації
(Cessna 188 AG Wagon, Нова Зеландія; світлина взято з сайту:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cessna188AGWagonZKCSE.jpg>)

У водному транспорті за допомогою напірних РТ наповнюють водою шлюзи та великогабаритні доки для будівництва та ремонту суден.

Напірні РТ застосовують у технологічних процесах у **хімічній, нафтохімічній і нафтовій галузях**. Наприклад, трубопровідний змішувач рідин, утворений з двох коаксіальних труб (рис. 1.11). Внутрішня труба 1, яка служить розподільним трубопроводом, заповнена першою рідиною з густиною ρ і температурою t , а кільцевий міжтрубний простір 5 – другою рідиною з ρ_{out} і t_{out} . Перша рідина з внутрішньої труби 1 крізь отвори 4 у її стінці поступає у міжтрубний простір 5, де змішується з другою рідиною [4].

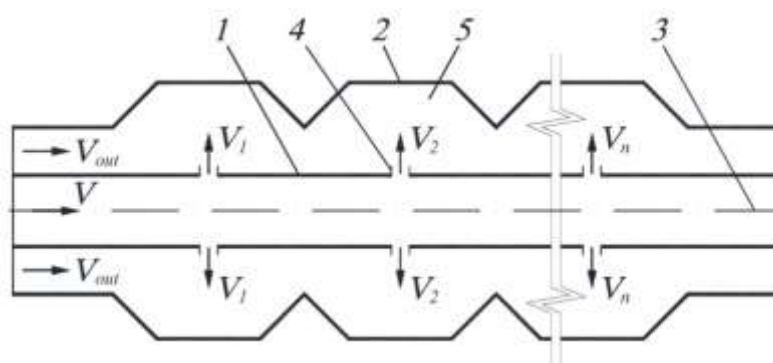


Рис.1.11 . Трубопровідний змішувач рідин: 1 – внутрішня труба (розподільний трубопровід); 2 – зовнішня труба; 3 – вісь змішувача; 4 – отвори в стінці; 5 – міжтрубний простір [4]

У машинобудуванні паливні розподільні магістралі багатоциліндрових двигунів внутрішнього згорання також представлені напірними розподільними трубопроводами (рис. 1.12) [3, с. 251-253].



Рис. 1.12. Паливні системи двигунів внутрішнього згорання: а – випробовування розподільної магістралі бензинового двигуна; б – впорскування пального в циліндр дизельного двигуна [3, с. 253]

Розповсюдження напірних РТ у різних виробництвах свідчить про актуальність поставленої задачі дослідження особливостей їх роботи.

1.2. Нерівномірність роздачі рідини уздовж напірних РТ

В експлуатації напірних розподільних трубопроводів реалізується нерівномірна їх робота. У довгому РТ найбільший напір H спостерігається на його початку (рис. 1.13) [18]. Тому максимальна витрата рідини Q є на першій насадці: $Q = \mu \omega \sqrt{2gH}$. Далі, уздовж РТ, напір рідини H спадає і найменшого значення він досягає на останній насадці. Внаслідок цього, наприклад, в іригації (див. рис. 1.1) рослини на початку поливного трубопроводу отримують необхідну кількість води, а вкінці РТ – недостатню. З цієї причини урожайність дерев уздовж поливного трубопроводу зменшуватиметься і, як результат, буде недобір урожаю. Забезпечення рівномірної шляхової роздачі рідини уздовж РТ є важливою задачею гідромеханіки для різних галузей техніки.

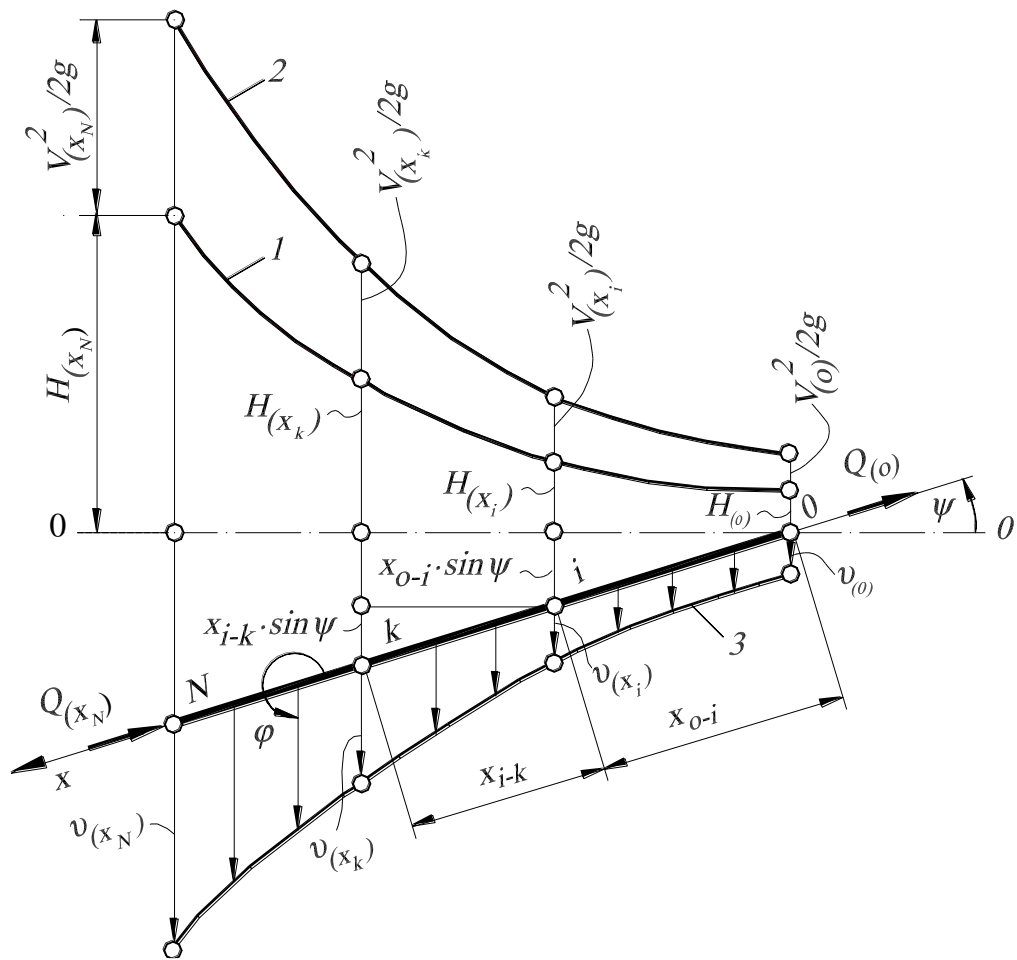


Рис. 1.13. Схема розподілу напорів уздовж РТ: 1 – п'єзометрична лінія; 2 – лінія повного напору; 3 – еюра швидкостей струменів, які від'єднуються; x – вісь РТ (направлена проти потоку); φ - кут відведення струменів [18]

1.3. Методи гідравлічного розрахунку напірних РТ

1.3.1. Аналітичні рівняння

1.3.1.1. Дергачов Б. А. та Чугаєв Р. Р. [8] запропонували замінити дійсний потік рідини у напірному РТ моделлю Рейнольдса-Буссінеска. Згідно останньої відгалужуванні струмені не перемішуючись течуть усередині РТ по паралельних траєкторіях до відповідних їм отворів-випусків [9, с. 204-206]. Проте це можливо тільки для ламінарних течій. Дергачов Б. А., застосувавши рівняння Д. Бернуллі, отримав формулу, придатну для розрахунку РТ зі змінними розмірами отворів-випусків і відстанями між ними. Згідно цієї математичної моделі гідравлічний розрахунок РТ ведуть поетапно для кожного отвору-випуску, йдучи від кінця РТ [8, с. 9-11].

1.3.1.2.Є. В. Кузнецов і Ю. А. Скобельцин [10] рекомендують обчислювати п'єзометричний напір на ділянці РТ, яка містить n випусків, за формулою, у якій швидкість основного потоку $V = V_{ноч}$, а гідравлічний коефіцієнт тертя $\lambda = \lambda_{ноч}$, тобто є такими як на початку РТ. Оскільки в РТ $V \neq const$, то вздовж потоку можуть існувати неоднакові режими руху рідини й різні закони гідравлічного опору, тобто $\lambda \neq const$.

Утім, за висновком Х. А. Навояна, точного гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів можна досягти тільки застосувавши теорію гідравліки змінної витрати, котра ґрунтується на диференціальних рівняннях [11, с. 4].

1.3.2. Диференціальні рівняння

1.3.2.1. Розвиток гідравліки змінної витрати. Творцем теорії руху тіл змінної маси є проф. І. В. Мещерський. Він поставив задачу, вивів основні диференціальні рівняння та вказав галузі їх застосування. Роботи проф. І. В. Мещерського “Динаміка точки змінної маси” (1897 р.) і “Рівняння руху точки змінної маси в загальному випадку” (1904 р.) утворили новий розділ теоретичної механіки. Опіраючись на цей розділ стали успішно розвиватися ракетодинаміка та гідравліка рідини змінної витрати. На основі рівнянь, отриманих проф. І. В. Мещерським для точки змінної маси, проф. В. М. Маккавеев у 1928 р. вперше вивів загальне диференціальне рівняння руху рідини змінної витрати (ДРРРЗВ) і застосував його до розв’язування задачі про гідравлічний стрибок. У 1937 р. проф. Я. Т. Ненько одержав ДРРРЗВ для цілого потоку і застосував його до задач з розрахунку дірчастих розподільних трубопроводів з неперервною шляховою роздачою рідини. Ним же установлені критерії класифікації трубопроводів за довжиною. У тому самому році проф. І. М. Коновалов отримав ДРРРЗВ, виходячи із закону кількості руху, та застосував його при розв’язуванні задач про течію рідини у трубопроводах і каналах. У 1940 р. проф. А. Н. Патрашев отримав ДРРРЗВ на основі урахування зміни питомої енергії при русі рідини у каналах [12, с. 3-4].

Загальне ДРРРЗВ для нециліндричного перфорованого трубопроводу проф. Г. А. Петров подає в такому вигляді [12, с. 17]:

$$\frac{\alpha_o}{g} V dV + d\left(\frac{p}{\gamma}\right) + dz + i_f dx + \frac{V^2}{g} d\alpha_o + \frac{\alpha_o(V - v_1 \cos \beta) \cdot V}{g} \cdot \frac{dQ_1}{Q} + \frac{\alpha_o(v_2 \cos \beta - V) \cdot V}{g} \cdot \frac{dQ_2}{Q} = 0, \quad (1.1)$$

де передостанній член рівняння відноситься до приєднання маси, а останній – до її відділення; α_o - коефіцієнт кількості руху потоку, $\alpha_o = 1,03 \dots 1,05$; V - швидкість основного потоку усередині перфорованого трубопроводу; v - швидкість струменя, котрий від'єднується від основного потоку; p - тиск рідини усередині трубопроводу; $dz = \sin \psi \cdot dx$ - геометричний перепад осі трубопроводу на його ділянці довжиною dx ; ψ - кут нахилу осі трубопроводу до обрїю; $i_f dx = dh_x$ - втрати напору на тертя по довжині трубопроводу; β - кут між векторами швидкостей \vec{V} та \vec{v} ; Q - витрата основного потоку рідини всередині трубопроводу.

Г. А. Петров вважає, що “за сучасного стану гідравліки визначити заздалегідь закон змінювання коефіцієнта α_o неможливо, а так як границі його змінювання малі, то для практичних задач без великої помилки можна взяти значення α_o постійним” [12, с. 17-18]. Тоді п'ятий член $(V^2/g)d\alpha_o$ у рівнянні (1.1) випаде і для розподільного трубопроводу воно матиме такий вигляд [12, с. 18]:

$$d\left(\frac{\alpha_o V^2}{2g}\right) + \frac{dp}{\rho g} + dz + i_f dx + \frac{\alpha_o(v \cos \beta - V) \cdot V}{g} \frac{dQ}{Q} = 0, \quad (1.2)$$

Для циліндричного розподільного трубопроводу ДРРРЗВ (1.2) додатково спрощується, оскільки площа його поперечного перерізу $\Omega = const$, а $dQ = \Omega \cdot dV$, де $Q = \Omega \cdot V$:

$$\frac{\alpha_o(v \cos \beta - 2V) \cdot dV}{g} + \frac{dp}{\rho g} + \sin \psi \cdot dx + dh_x = 0. \quad (1.3)$$

1.3.2.2. Класифікація РТ. Якби вдалось розв'язати ДРРРЗМ (1.3), то цей результат був би придатним для гідравлічного розрахунку РТ з будь-якою довжиною. Однак, оскільки такого розв'язання не було, то В. В. Смыслов і Н. О. Єзерський [14], на основі роботи проф. Я. Т. Ненька, запропонували класифікацію РТ за їхньою довжиною. Для РТ з кутами відведення струменя $\beta = 90^\circ$ і з постійним значенням коефіцієнта стиснення ε від'єднаних струменів вони виявили, що

$$\frac{V_{n\text{оч}}}{v_{n\text{оч}}} = f, \quad (1.4)$$

де $v_{n\text{оч}}$ – швидкість витікання струменя крізь перший від початку РТ отвір-випуск; f – шпаруватість РТ з n випусками:

$$f = \frac{n\varepsilon_{\text{mid}}\omega_{\text{hole}}}{\Omega} \quad (1.5)$$

де ω_{hole} – площа отвору-випуску; Ω – те саме, поперечного перерізу РТ.

При малих значеннях $V_{n\text{оч}}/v_{n\text{оч}}$ РТ мають великий гідравлічний опір і при однакових розмірах отворів та постійному їх кроку забезпечують практично рівномірну дискретну шляхову роздачу рідини. Коли відношення $V_{n\text{оч}}/v_{n\text{оч}}$ великі, то гідравлічний опір РТ малий. Тоді здійснюється нерівномірна роздача рідини, котра оцінюється показником [13]:

$$\eta = \frac{q_m}{q_{n\text{оч}}}, \quad (1.6)$$

де q_m - максимальна або мінімальна витрата рідини крізь один отвір.

Залежно від значення коефіцієнта опору, котрий обчислюють за формулою

$$\zeta_l = 1,1\lambda \frac{l}{D}, \quad (1.7)$$

В. В. Смыслов і Н. О. Єзерський [13] розподіляють РТ на шість категорій.

У коротких РТ ($\zeta_l < 0,9$) шляхові втрати енергії не мають істотного значення, а максимальний напір утворюється в кінці РТ.

У РТ з проміжними довжинами реалізуються п'єзометричні лінії різної форми. При $\zeta_l = 1 \div 3$ найбільший напір виникає у кінці РТ. Коли $\zeta_l = 3,5 \div 4,5$, то напір практично постійний уздовж РТ. Якщо $\zeta_l = 5 \div 8$, то найменший напір утворюється посередині РТ; Для РТ із $\zeta_l = 8 \div 20$ найменший напір виникає у кінці РТ. У довгих РТ із $\zeta_l > 20$ втрати напору на відділення маси не мають значення, а мінімальний напір установлюється у кінці РТ.

Для кожної із шести категорій РТ отримано різні розрахункові залежності. Згідно з рекомендаціями [13] за потрібним показником нерівномірності роботи РТ η підбирають необхідну його шпаруватість f і задаються витратою основного потоку на початку РТ. Оскільки $Q_{поч}$ диктується сумарним гідравлічним опором усіх складових елементів РТ, то встановлення значення $Q_{поч}$ і його реалізація у природі є складною технічною задачею.

На практиці застосовуються методи розрахунку РТ на основі аналітичних рівнянь [14].

1.3.2.3. Методи інтегрування диференціального рівняння руху рідини змінної витрати

Запропоновано низку підходів до інтегрування рівняння (1.3) [15-19].

РТ з рівномірною роздачою рідини. В. В. Смыслов і Ю. М. Константинов [20; 21, с. 23-35] склали диференціальне рівняння руху рідини для РТ, в якому реалізується рівномірна шляхова роздача рідини: $q_{distrib} = dQ / dx = const$. Взявши: $\beta = 90^\circ$; $\lambda = const$ та знехтувавши втратами напору на відділення маси для довгого РТ, $\zeta_l > 20$, вони отримали формулу для обчислення втрат напору вздовж потоку

$$h_1 - h_2 = \lambda \frac{l_{1-2}}{D} \cdot \frac{Q_{tr} + Q_{tr} Q_{distrib} + \frac{Q_{distrib}^2}{3}}{2g\Omega^2}, \quad (1.8)$$

де Q_{tr} – транзитна витрата рідини; $Q_{distrib} = q_{distrib} \cdot l_{1-2}$ – шляхова роздача на ділянці 1-2. На основі практичного досвіду виявлено, що досягати

рівномірності роздачі рідини з РТ можна зменшенням кроку l отворів-випусків або збільшенням їх поперечних розмірів у напрямку течії потоку рідини в РТ [21, с. 29].

Гідравлічний коефіцієнт тертя λ не може бути постійним по довжині РТ. І. І. Науменко [22] застосував вираз (1.8) до РТ зі сталим кроком l отворів-випусків і постійним діаметром РТ d . Підставивши в формулу (1.8) $\lambda = const$ він отримав відхилення від експериментальних даних на 38 %. Проте, за умови, що $\lambda \neq const$ відхилення зменшилось до 20 % [22].

Методика В. Н. Коваленка і В. І. Бойка [23] додатково ураховує у (1.1) імпульс внутрішньої сили гідравлічного тертя між основним потоком у РТ струменем, який від'єднується від нього. Також у (1.1) уведено компоненту кінетичної енергії струменя, що відділяється. Унаслідок цього, після низки перетворень, рівняння (1.1) набуло вигляду рівняння Д. Бернуллі [23]:

$$\frac{\alpha v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz + \frac{\int \lambda v^2 dx}{2D} + k = const, \quad (1.9)$$

де $D = const$ – діаметр труби;

$k = k_{(x)} = k_1 + k_2$ – віднесена до одиниці маси енергія, котра витрачається на роботу внутрішніх сил тертя за виключенням сили гідравлічного опору взаємодії струмін рідини;

$$k_1 = \zeta \cdot \zeta_1 \frac{(v_1 - v_2)^2}{2} - \text{питома енергія, що витрачається на розширення потоку,}$$

оскільки у циліндричному РТ на ділянці відділення струменя основний потік розширюється і деформується);

$v_1 = const$ і $v_2 = const$ – середня швидкість руху рідини до і після розширення потоку відповідно у перерізах $x_1 = const$ і $x_2 = const$;

ζ – коефіцієнт, який залежить від кута розширення потоку;

$$\zeta_1 - \text{коефіцієнт, який враховує зміну витрати основного потоку, } \zeta_1 = \frac{\int_{x_1}^{x_2} v dx}{v_1(x_2 - x_1)};$$

$k_2 = \frac{0,2nd_1v_2v_1}{2D}$ – питома енергія, котра витрачається на деформацію потоку у

місцях зварних відгалужень; $k_2 = 0$ для РТ із дірчастих труб;

d_1 – діаметр відгалуження;

n – коефіцієнт, $n = 1$ для трійника, $n = 2$ для хрестовини.

Допустивши, що при дискретному відділенні потоку крізь окремі відгалуження на ділянках останніх можна знехтувати втратами енергії на тертя, зміною положення осі основного потоку, нелінійністю закону зміни витрати, автори [23] трансформували рівняння (1.9) до вигляду:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \alpha_o \left(v_2^2 + \frac{v_3^2 d_1^2 \cos \varphi}{D^2} - v_1^2 \right) + \frac{kv_1^2}{2} + \frac{0,2nd_1v_1v_2}{2D}, \quad (1.10)$$

де $\alpha_o = 1,035$ – коректив кількості руху;

$v_3 = const$ – середня швидкість руху струменя, котрий відділяється;

φ – кут між напрямками руху основного потоку і струменя, що від'єднується.

З використанням експериментальних даних інших дослідників з рівняння (1.10) було отримано формулу [23]:

$$\zeta = 2 \cdot \frac{2\alpha_o \left[\left(\frac{Q_3}{Q_1} \right)^2 \left(1 + \cos \varphi \cdot \frac{D^2}{d_1^2} \right) - 2 \frac{Q_3}{Q_1} \right] + k + \alpha \frac{Q_3}{Q_1} \left(2 - \frac{Q_3}{Q_1} \right)}{\left(\frac{Q_3}{Q_1} \right)^2 \left(2 - \frac{Q_3}{Q_1} \right)}, \quad (1.11)$$

де $Q_3 = const$ – витрата струмини, що від'єднується;

$Q_1 = const$ – витрата основного потоку у перерізі труби x_1 до відгалуження.

У принципі, методику [23] можна застосувати для розрахунку всього РТ, обчислюючи витрату рідини Q_3 крізь кожен окремо взятий випускний отвір РТ

і втрати напору $\frac{p_1 - p_2}{\rho}$ в основному потоці на кожній окремо взятій ділянці

відгалуження, а також втрати напору на кожній ділянці РТ між випускними

отворами. І так по усій довжині РТ, йдучи від голови РТ до його кінця. Очевидно, що розрахунок РТ за методикою [23] необхідно робити у декілька наближень. Спочатку потрібно задатись значеннями напору та витрати рідини на вході у РТ. Провести розрахунок. Якщо отриманий шляховий розподіл рідини у РТ нас не влаштовує, то потрібно цикл розрахунку повторити. І так доти, доки поставлена умова шляхової роздачі рідини буде забезпечена.

Потрібно зауважити, що при виведенні розрахункового рівняння (1.10) прийнято лінійний закон зміни витрат струменів, які від'єднуються, що не відповідає дійсній картині розглядуваного явища. Нам не відомі публікації, у яких розв'язок [23] було б завершено розробкою методики розрахунку всього РТ, а не лише окремих відгалужень.

Методика А. М. Кравчука [24, 25] базується на працях О. А. Василенка та В. В. Сміслова [26], котрі розглядаючи напірні трубопроводи-збирачі, тобто потоки з приєднанням маси, для котрих ДРРРЗВ має такий вигляд:

$$\frac{\alpha_o(2V - v \cos \beta)dV}{g} + d\left(\frac{p}{\rho g}\right) + \sin \psi \cdot dl + dh_l = 0. \quad (1.12)$$

Вони, знехтувавши членом $\alpha_o v \cdot \cos \varphi \cdot dV / g$, розв'язували ДРРРЗВ (1.12) разом з рівнянням (1.13), яке описує приплив рідини у трубопровід-збирач крізь отвір у його стінці:

$$q = \frac{dQ}{dx} = \mu a \sqrt{2g(H - h)}, \quad (1.13)$$

де q – витрата рідини на одиницю довжини трубопроводу-збирача;

μ – середній по довжині трубопроводу-збирача коефіцієнт витрати рідини крізь вхідні отвори у стінці трубопроводу-збирача;

$a = \frac{\Sigma \omega_o}{l}$ – площа вхідних отворів, віднесена до одиниці довжини

трубопроводу-збирача;

h – п'єзометричний напір рідини у трубопроводі-збирачі;

H – те саме, зовні трубопроводу-збирача.

Методику [26] розрахунку трубопроводів-збирачів розвинули А. М. Кравчук [24] і Д. О. Чернишов [25] застосувавши її до проектування напірних розподільних трубопроводів. При цьому вони взяли для РТ рівняння (1.12) та увели знак мінус у вираз (1.13) і записали його у вигляді:

$$q = -\frac{dQ}{dx} = -\mu a \sqrt{2gh} , \quad (1.13)$$

де q – витрата рідини, що витікає крізь отвір у стінці РТ.

Систему рівнянь (1.12) і (1.13) А. М. Кравчук [24] і Д. О. Чернишов [25] представили у безрозмірних координатах:

$$\frac{d\bar{Q}}{f dx} \cdot \frac{d^2\bar{Q}}{f dx^2} + A\bar{Q} \frac{d\bar{Q}}{dx} + \zeta_l \frac{\bar{Q}^2}{2} = 0; \quad (1.14)$$

$$-\frac{d\bar{Q}}{dx} = -\bar{h} , \quad (1.15)$$

де $\bar{Q} = \frac{Q}{Q_n}$;

Q – витрата основного потоку в перерізі x РТ;

Q_n – те саме, на початку РТ;

$\bar{h} = \frac{\sqrt{2gh}}{V_n}$ – п'єзометричний напір рідини в РТ.

Підстановкою (1.15) у (1.14), авторами [24] і [25] було одержано рівняння (1.16) з однією невідомою величиною \bar{Q} :

$$-\frac{d^2\bar{Q}}{d\bar{y}^2} \cdot \frac{d\bar{Q}}{d\bar{y}} - B\bar{Q} \frac{d\bar{Q}}{d\bar{y}} + C\bar{Q}^2 = 0 \quad (1.16)$$

де $A = 2 - m$; $B = A\bar{f}^2$; $C = \frac{\zeta_l \bar{f}^2}{2}$; $\bar{f} = \frac{\mu_p a l}{\Omega}$; $a = \frac{\Sigma \omega_o}{l}$;

$m = \frac{v \cos \varphi}{V}$ – коефіцієнт маси, котра від'єднується;

v – швидкість витікання струменя з отвору у стінці РТ;

V – швидкість основного потоку;

φ – кут між напрямками руху струменя й основного потоку;

μ_p – коефіцієнт витрати рідини крізь отвір у стінці РТ; у [24, 25] його значення приймається незмінним уздовж РТ: $\mu_p = const$;

$\zeta_l = \lambda_p \frac{l}{D}$ – коефіцієнт опору розподільного трубопроводу;

λ_p – гідравлічний коефіцієнт тертя; вздовж РТ; у роботах [24, 25] його значення прийнято постійним: $\lambda_p = const$;

$\bar{y} = 1 - \bar{x}$ – відносна відстань, вимірювана проти течії від кінця РТ;

$\bar{x} = x/l$ – те саме, йдучи за потоком від початку РТ.

Для РТ з різними довжинами (коротких, проміжних, довгих) отримано неоднакові розв'язки рівняння (1.16). Згідно з [24] і [25], для відносно коротких РТ п'езометрична лінія постійно зростає вздовж основного потоку (рис. 1.14, крива *а*). У розподільних трубопроводах проміжної довжини вона спочатку понижується, має точку перегин $x_{пер}$, а потім підвищується (рис. 1.14, крива *б*). У довгих РТ п'езометрична лінія спадає вздовж течії і досягає найнижчого положення в кінці РТ (рис. 1.14, крива *в*).

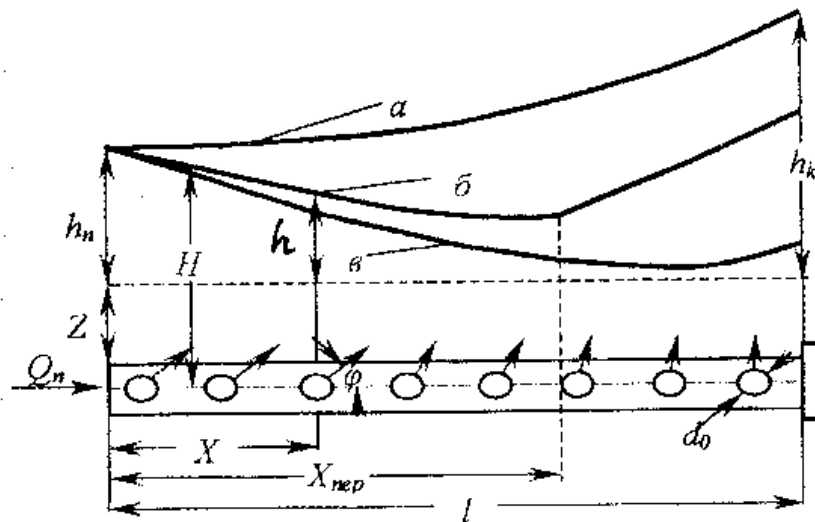


Рис. 1.14. Схема роботи і вигляд п'езометричних ліній в напірних РТ: *а* – відносно коротких; *б* – проміжних; *в* – відносно довгих РТ [24, 25]

А. М. Кравчук [24] і Д. О. Чернишов [25] отримали розв'язки рівняння (1.16) для коротких, проміжних і довгих розподільних трубопроводів за умови турбулентного режиму руху рідини. Наприклад, для довгого РТ корені рівняння (1.16) такі [24, 25]:

$$\bar{Q} = \frac{sh(k\bar{y})}{s \cdot hk} ; \quad \bar{h} = \frac{k \cdot ch(k\bar{y})}{f \cdot shk} , \quad (1.17)$$

де коефіцієнт k знаходиться з виразу (1.18):

$$k^3 - Bk + Ctg(k\bar{y}) = 0, \quad (1.18)$$

або за графіком, поданим на рис. 1.15.

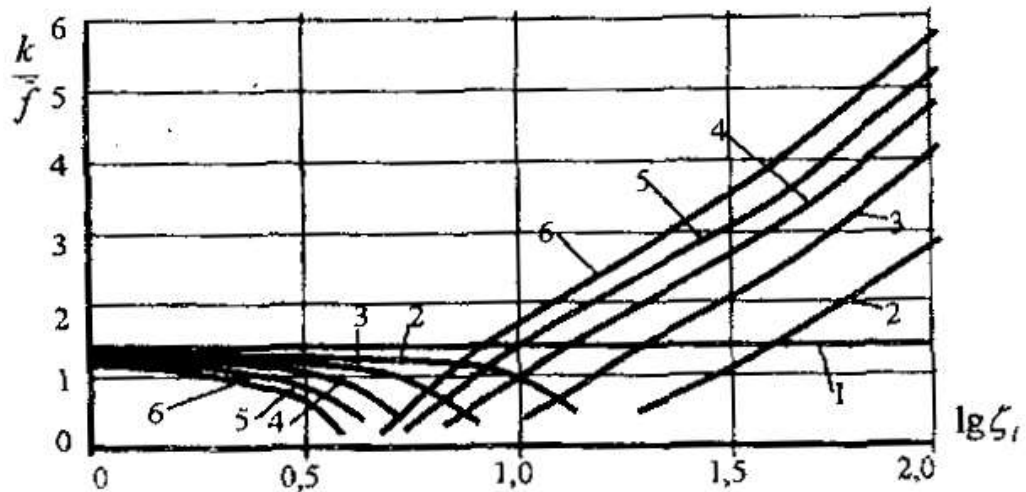


Рис. 1.15. Графік для визначення коефіцієнта k для формул (1.17) при різних \bar{x} :
(1) - 1; (2) - 0,8; (3) - 0,6; (4) - 0,4; (5) - 0,2; (6) - 0 [25]

Примітка. Рівняння (1.1)-(1.3) складені за умови, що рідина витікає з РТ у нерухому атмосферу. Тому ці рівняння не ураховують гідродинамічний тиск зовнішнього потоку рідини. Однак, на практиці застосовуються РТ, прокладені в потоці рідини або газу. Наприклад, при розосередженому випусканні очищених стічних вод у ріку (рис. 1.5, рис. 1.16) [27] або в море (рис. 1.17) [28]. Очищені стоки можуть бути теплішими чи холоднішими порівняно з річковою або морською водою. У зимовий час струмені, котрі вилились з отворів РТ тепліші, ніж води ріки або моря. Тоді вони спливають до поверхні водойми (рис. 1.17,а). У літній час, навпаки, - опускаються на дно (рис. 1.17,б).

У трубопроводному змішувачі (див. рис.1.11), який застосовується у хімічних технологіях, різниця температур струменів, які виливаються з РТ, і зовнішнього потоку може сягати десятків градусів. У сільськогосподарській авіації (див. рис. 1,10) струмені \vec{v} витікають із РТ у потік повітря, швидкість \vec{V} якого, наприклад, для літака АН-2 рівна 37,8-44,4 м/с. Також кут β між векторами \vec{v} і \vec{V} не завжди є прямим.

Отже, методики [14-16, 20-26] не ураховують зовнішнього гідродинамічного тиску, різниці температур струменів і зовнішнього потоку, кут між векторами \vec{v} і \vec{V} , інший ніж 90° , різницю температур струменів і зовнішнього потоку, а також змінювання швидкостей потоку \vec{V} та режимів гідравлічного опору уздовж РТ.

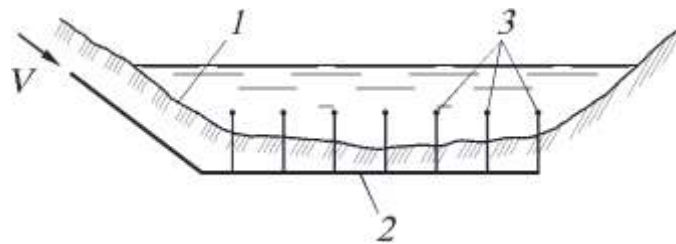


Рис. 1.16. Схема розподільного трубопроводу для випускання очищених стоків у річку: 1 - річище; 2 – РТ; 3 – випуски [29]

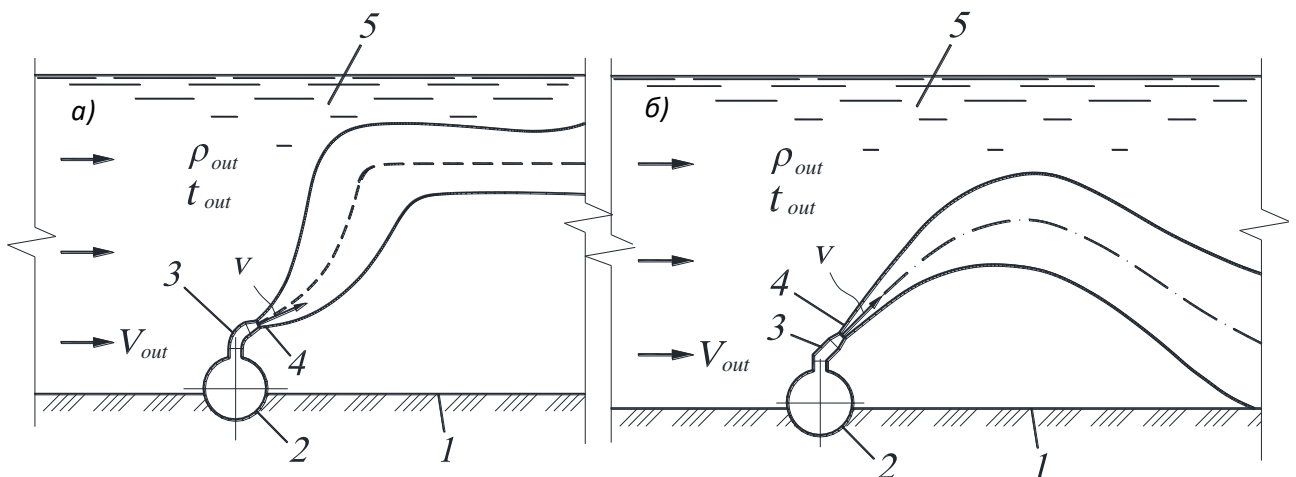


Рис. 1.17. Схеми випускання струменів очищених стоків з РТ в море: а – стоки легші ніж морська вода; б – те саме, важчі; 1 – морське дно; 2 – РТ; 3 – випускний насадок; 4 – струмінь, який витікає з РТ; 5 – морська вода [28]

Методика В. В. Чернюка [7\18]. З урахуванням зауважень, вказаних у поданій вище примітці, В. В. Чернюк узагальнив ДРРРЗВ (1.3). За основу він узяв, складену ним розрахункову схему ділянки напірного потоку \vec{V} , з нескінченно короткою довжиною dx , на котрій від'єднується струмінь \vec{v} (рис. 1.18). За алгоритмом, поданим у підручнику Ю. М. Константинова [30 с. 122-124], В. В. Чернюк застосував до неї рівняння зміни кількості руху. Унаслідок цього отримав узагальнене ДРРРЗВ, яке для циліндричних труб має вид (1.18) [18, 31]:

$$\frac{\alpha_0(v \cos \beta - 2V)dV}{g} + d \frac{p}{\rho g} + \frac{p_{out}}{\rho g} \frac{dV}{v} \cos \theta + \sin \psi \cdot dx + dh_x = 0. \quad (1.18)$$

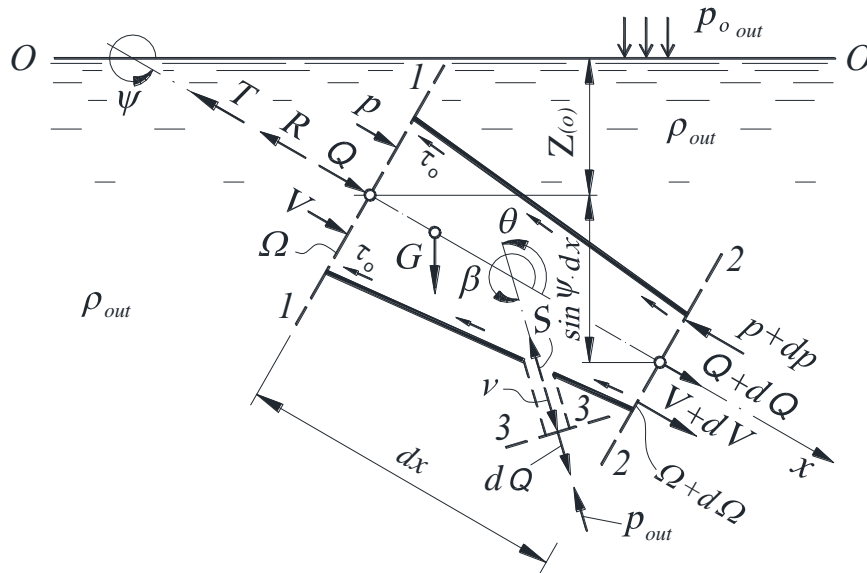
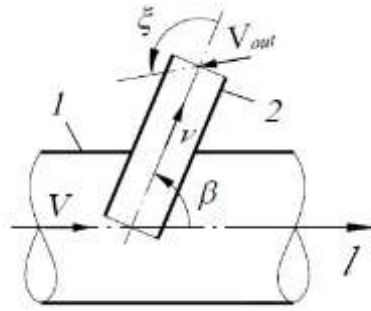


Рис. 1.18. Розрахункова схема напірного потоку із відділенням струменя [31]

Змінні V , dV , v , dp , p_{out} , dh_x , dx у рівнянні (1.18) В. В. Чернюк виразив не через витрату $Q_{(x)}$, як в аналізованих вище роботах, а через повний напір в розподільному трубопроводі $H_{(x)}$, під дією котрого відбувається витікання струменів, і через незалежну змінну відстань x . Кути β , θ , ψ та ξ (рис. 1.18, рис. 1.19) змінюються в межах від 0° , до 360° , а $m_{(x)} = (v_{(x)} \cos \beta) / V_{(x)} \neq const$, де ξ - кут між векторами швидкостей $\vec{v}_{(x)}$ струменя, що від'єднується (у вихід-

ному перерізі отвору-випуску) та \overline{V}_{out} зовнішнього потоку (див. рис. 1.19).



1.19. Кути між напрямками швидкостей основного потоку V в розподільному трубопроводі, струменя v , котрий від'єднується, та зовнішнього потоку V_{out} ; 1 – РТ; 2 – вихідний насадок [31]

Унаслідок розв'язання ДРРРЗВ (1.19) В. В. Чернюк отримав залежність (1.20) для розрахунку витрати потоку у напірних розподільних трубопроводах, прокладених у потоці рідини [7\18, 19, 31-35]. Оскільки розрахунок РТ доцільно вести ходом від його кінця до голови, то вісь x направлено проти потоку в РТ, що відображено у рівнянні (1.20) і на рис. 1.20.

$$b \int_0^x H_{(x)}^{1/2} dx = bx \left\{ H_{(0)}^{1/2} + \frac{bx}{4g\Omega} \left[\alpha_o v_{(0)} \cos \beta - (2\alpha_o + \alpha \cos \beta) V_{(0)} \right] \right\} - \frac{bx}{4H_{(0)}^{1/2}} \left\{ \lambda_{(x)} \frac{x}{D} \frac{V_{(0)}^2}{2g} + \left(2 - \frac{\rho_{out}}{\rho} \right) x \sin \psi + f_{(x)} \left[\frac{p_{o_{out}}}{\rho g} + \frac{\rho_{out}}{\rho} \left(T_{(0)} + \frac{\alpha V_{out}^2}{2g} \cos \xi \right) \right] \cos \beta \right\}. \quad (1.20)$$

Залежність (1.21) для обчислення повного напору рідини в напірному розподільному трубопроводі (рис. 1.20) отримано диференціюванням рівняння (1.20):

$$H_{(x_k)} = \left\langle H^{1/2} + \frac{\kappa \cdot bx}{2g\Omega} \left[\alpha_o v_{(x)} \cos \beta_{(x)} - (2\alpha_o + \alpha \cos \beta) \cdot V_{(x)} \right] - \frac{\kappa}{2H_{(x)}^{1/2}} \left\{ x \cdot \left[\frac{\lambda_{(x)} V_{(x)}^2}{D_{(x)} 2g} + \left(2 - \frac{\rho_{out}}{\rho} \right) \sin \psi_{(x)} \right] + f_{(x)} \left[\frac{p_{o_{out}}}{\rho g} - \frac{\rho_{out}}{\rho} \left(T_{(x)} + \frac{\alpha V_{out}^2}{2g} \cos \xi \right) \right] \cos \beta_{(x)} \right\} \right\rangle^2, \quad (1.21)$$

де у рівняннях (1.20) і (1.21) [36]:

$b \int_0^x H_{(x)}^{1/2} dx$ – зростання витрати рідини, у напрямку проти потоку, на

розрахунковій ділянці довжиною x_{i-k} всередині розподільного трубопроводу, котра чисельно рівна роздачі рідини із РТ на тій самій ділянці x_{i-k} ;

$H_{(x_k)}$ - шуканий повний робочий напір у розрахунковому перерізі k (див. рис. 1.20);

$H_{(x_i)}$ - вихідний (відомий) робочий напір у розрахунковому перерізі i ;

$T_{(0)}$ - глибина занурення осі РТ на початку розрахункової ділянки при $x = 0$ (див. рис. 1.18);

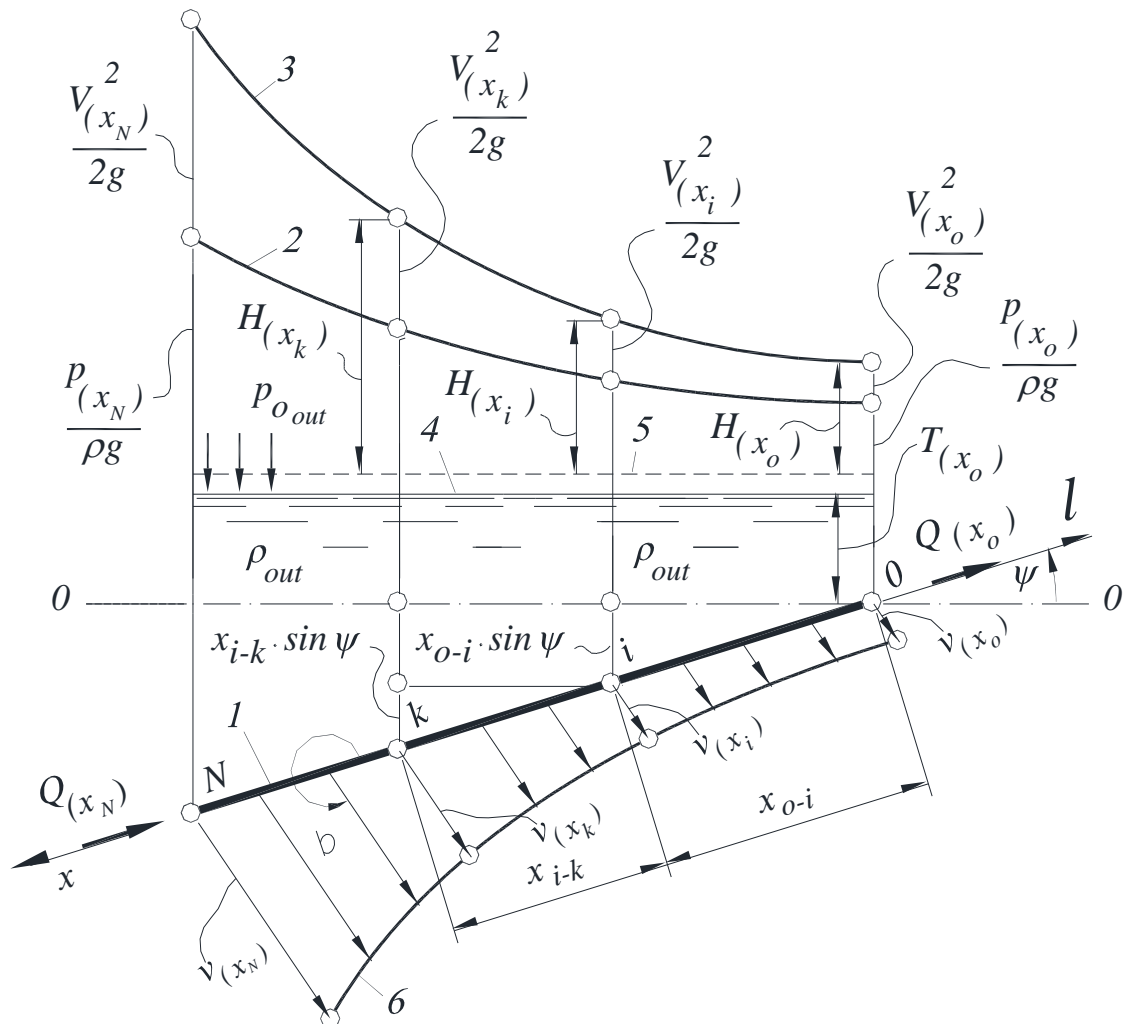


Рис. 1.20. Розрахункова схема РТ: 1 – РТ; 2 – п'єзометрична лінія для потоку в РТ; 3 – те саме, лінія повного напору; 4 – поверхня потоку зовні РТ; 5 - лінія

повного напору для зовнішнього потоку РТ; b – еюра швидкостей струменів, що від'єднуються; l – вісь РТ (вісь x направлена зустрічно потоку в РТ) [32]

$\beta_{(x_i)}$ – кут між векторами середньої швидкості \vec{V} основного потоку рідини в РТ і струменя \vec{v} , котрий від'єдується (див. рис. 1.18-рис. 1.20);

$\vartheta_{(x_i)}$ – кут між векторами середньої швидкості \vec{V} основного потоку рідини в РТ і сили \vec{S} , яка заміняє дію відкиненої частини струменя, котрий від'єдується, $\vartheta = \beta \pm 180^\circ$ (див. рис. 1.18);

$\xi_{(x_i)}$ – кут між векторами швидкостей $\vec{v}_{(x)}$ струменя, що від'єдується та \vec{V}_{out} зовнішнього потоку (див. рис. 1.19);

$\psi_{(x_i)}$ – кут між горизонталлю 0-0 та віссю l потоку (див. рис. 1.20);

$D_{(x_i)}$ – внутрішній діаметр РТ;

b_{i-k} – коефіцієнт, постійний на розрахунковій ділянці $i-k$,
 $b_{i-k} = n_{i-k} \mu_i \omega_{hole_{i-k}} \sqrt{2g} = const, m^{1.5}/c$;

n_{i-k} – кількість випускних отворів на одиниці довжини РТ, m^{-1} ;

μ_i – коефіцієнт витрати отвору-випуску;

$\omega_{hole_{i-k}}$ – площа одного отвору-випуску;

x_i – індекс при символах параметрів рівнянь вказує на їх належність до початку розрахункової ділянки $i-k$, тобто до i -го поперечного перерізу РТ;

κ – емпіричний коефіцієнт, $\kappa = 0,9$;

$V_{(x_i)} = Q_{(x_i)} / \omega_{(x_i)}$ – середня швидкість потоку води усередині РТ;

$\omega_{(x_i)}$ – площа поперечного перерізу РТ;

$v_{(x_i)} = \varphi \sqrt{2gH} = aH_{(x_i)}^{1/2}$ – швидкість витікання струменя крізь водовипуск в i -му перерізі РТ, $a = \varphi \sqrt{2g}$;

множник $\cos\varphi_{(x_i)}$ у виразі $(2\alpha_o + \alpha \cos \varphi_{(x_i)}) \cdot V_{(x_i)}$, що у перших квадратних дужках, враховує дію динамічного напору потоку, що тече усередині РТ, на поверхню живого перерізу струменя, котрий від'єднується;

ρ, ρ_{out} - відповідно, густини рідини усередині РТ та зовні нього;

$f_{i-k} = (bx/a\omega)_{i-k} = (nx\varepsilon\omega_{hole}/\omega)_{i-k}$ - шпаруватість (дірчастість) РТ на розрахунковій ділянці $i-k$;

ε_{i-k} - коефіцієнт стиснення струменя у вихідному отворі (насадці);

p_{out} - тиск рідини (повітря) зовні РТ;

$\lambda_{(x_i)}$ - гідравлічний коефіцієнт тертя (коефіцієнт Дарсі); $\lambda_{(x)}$ обчислюють за відомими формулами в залежності від режиму течії і значень критерію Рейнольдса $Re_{(x_i)}$. На розрахункових ділянках x_{i-k} , розташованих між двома сусідніми вихідними отворами (чи насадками), витрата потоку води в РТ незмінна, тому значення коефіцієнта Дарсі на цих ділянках течії прийнято постійним $\lambda_{i-k} = const$.

Гідравлічний коефіцієнт тертя $\lambda_{(x)}$ для ділянок РТ між сусідніми вихідними отворами обчислюють за такими формулами [3, с. 266-268]:

при $Re_{(x_i)} \leq 2320$ (ламінарний режим течії):

$$\lambda_{(x_i)} = \frac{64}{Re_{(x_i)}}; \quad (1.22)$$

для $Re_{(x_i)} \frac{\Delta_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} < 10$ (ділянка гідравлічно гладких труб зони турбулентного режиму руху рідини):

$$\lambda_{(x_i)} = \frac{0.3164}{Re_{(x_i)}^{0.25}}; \quad (1.23)$$

при $10 \leq Re_{(x_i)} \frac{\Delta_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} \leq 500$ (ділянка доквадратичного опору гідравлічно шорстких труб зони турбулентного режиму руху рідини):

$$\lambda_{(x_i)} = 0.11 \left[\frac{\Delta_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} + \frac{68}{\text{Re}_{(x_i)}} \right]^{0.25}; \quad (1.24)$$

для $\text{Re}_{(x_i)} \frac{\Delta_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} > 500$ (ділянка квадратичного опору гідравлічно шорстких труб зони турбулентного режиму руху рідини):

$$\lambda_{(x_i)} = 0.11 \left(\frac{\Delta_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} \right)^{0.25}. \quad (1.25)$$

Значення критерію Рейнольдса для потоку в розподільному трубопроводі встановлюють за формулою

$$\text{Re}_{(x_i)} = \frac{Q_{(x_i)} D_{(x_i)}}{\Omega_{(x_i)} \nu_{(x_i)}}, \quad (1.26)$$

де $\nu_{(x_i)}$ – кінематична в'язкість.

Коефіцієнт витрати вихідних отворів (насадок) $\mu_{(x_i)}$ так само як і коефіцієнт Дарсі $\lambda_{(x)}$ є змінним уздовж ТЗ. Значення $\mu_{(x_i)}$ В. В. Чернюк обчислює за формулою (1.27) [37, с. 69]:

$$\mu_{(x_i)} = \frac{1}{1.23 + \frac{58 \cdot l}{\text{Re}_{th(x_i)} d}}, \quad (1.27)$$

де l , d - довжина та діаметр вихідної насадки; $\text{Re}_{th(x_i)} = \sqrt{2gH_{(x_i)}} \cdot d / \nu$ – критерій Рейнольдса для струменя у насадці при теоретичній швидкості $v_{(x_i)} = \sqrt{2gH_{(x_i)}}$ течії води крізь неї [37, с. 61].

Рівняння (1.20) для витрат $Q_{(x_k)}$ та залежність (1.21) для повного напору $H_{(x_k)}$ рідини в розподільному трубопроводі Володимир Чернюк і Вадим Орел [38,39] перевірили дослідами на РТ з внутрішнім діаметром $D = 8,21$ мм і з довжиною, рівною 2644 мм. Експериментальний РТ оснащено одинадцятьма

вихідними насадками. Відстані між насадками були кратними $20D$ й неоднаковими на окремих ділянках РТ (рис. 1.21,б) [40].

Експериментальний розподільний трубопровід мав шпаруватість $f = 1,469$, коли працювали усі вихідні насадки (див. рис. 1.21,б). Для отримання значення шпаруватості $f = 0,935$ частину насадок автори [38, 39] заглушали (див. рис. 1.21,а).

Вихідні насадки та штуцери приварені до експериментального РТ під кутом $\beta = 90^\circ$ (рис. 1.22) [40]. Для зручності читання креслень насадки на рис. 1.21 зображено під РТ, а штуцери над РТ, хоча усі вони змонтовані в один ряд під РТ.

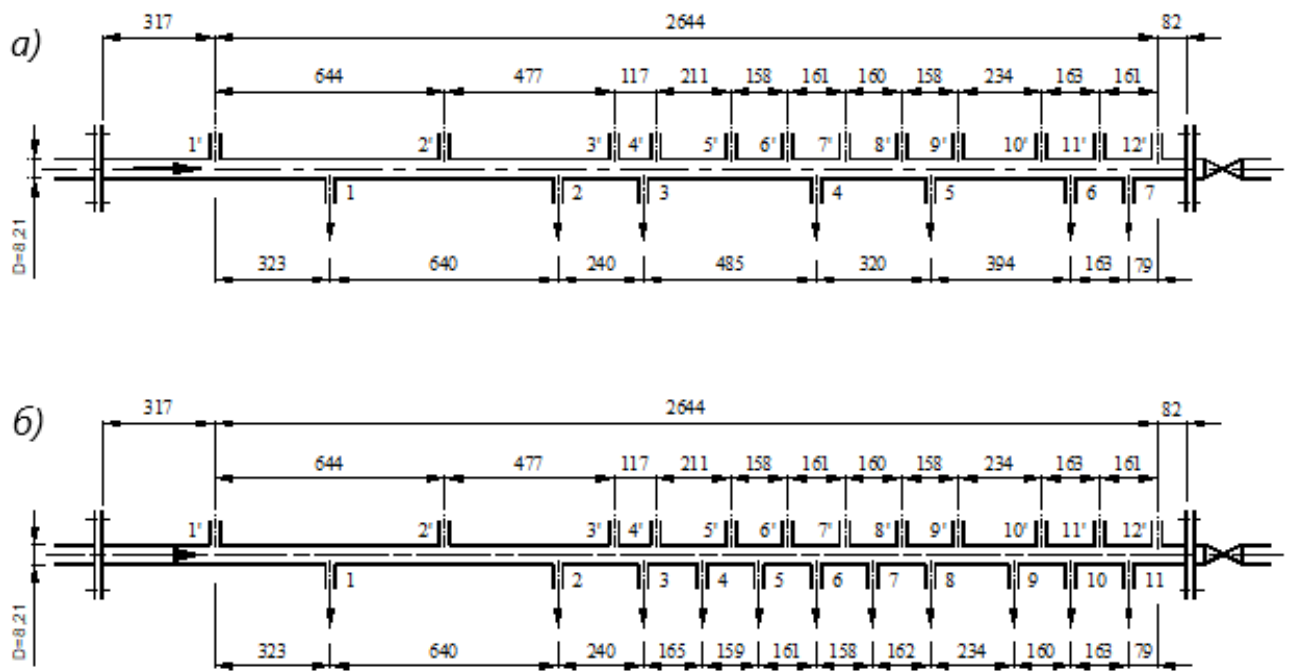


Рис. 1.21. Схеми експериментального РТ з різними значеннями шпаруватості f : 0,935 (а); 1,469 (б): 1-11 – водовипускні насадки; 1'-12' – штуцери для приєднання імпульсних трубок від п'єзометрів (розміри подано в мм) [40]

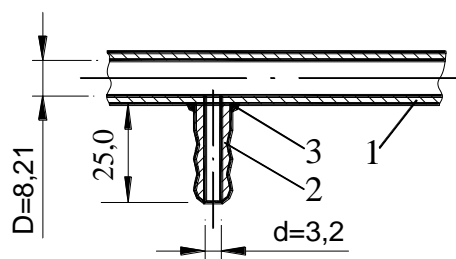


Рис. 1.22. Фрагмент експериментального трубопроводу: 1 – стінка РТ; 2 – вихідна насадка (штуцер для приєднання імпульсних трубок від п'єзометрів такої самої конструкції); 3 – зварне з'єднання (розміри подано в мм) [40]

Обчислення $H_{(x)}$ за (1.20) і $Q_{(x)}$ за (1.21) порівняно з результатами розрахунку РТ за методикою А. М. Кравчука та Д. О. Чернишова [24, 25] (рис. 1.23).

За методикою [24, 25], згідно з рис. 1.15, автори [38, 39], поділили РТ на п'ять рівних за довжиною частин. Параметри \bar{Q} і \bar{h} обчислювали для перерізів, що на межі цих ділянок. Згідно з [24, 25], взяли коефіцієнт гідравлічного тертя незмінним для всієї довжини РТ: $\lambda = 0,03 = const$, як для ділянки гідравлічно шорстких труб (автомодельного опору), за графіком, наведеним у [25, с.13]. Розрахунок автори [38, 39] звели у табл. 1.1. і зобразили на рис. 1.23.

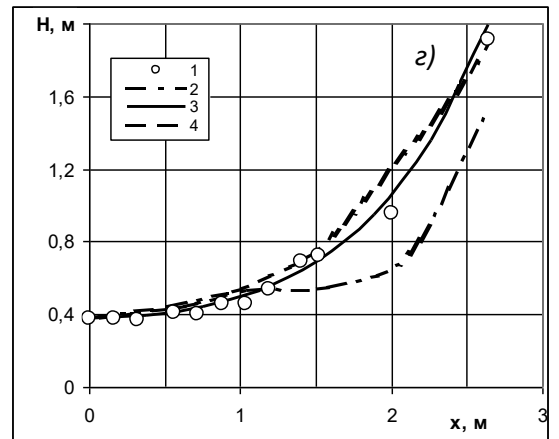
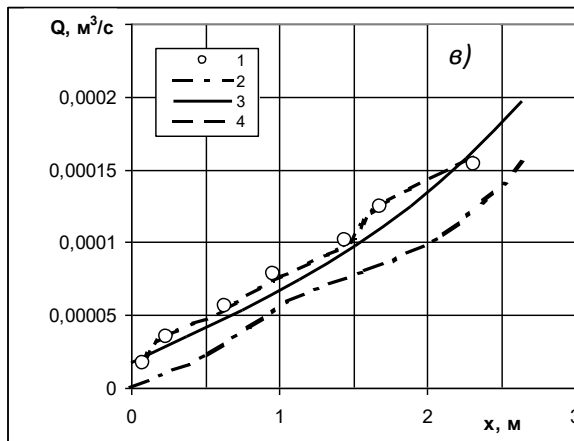
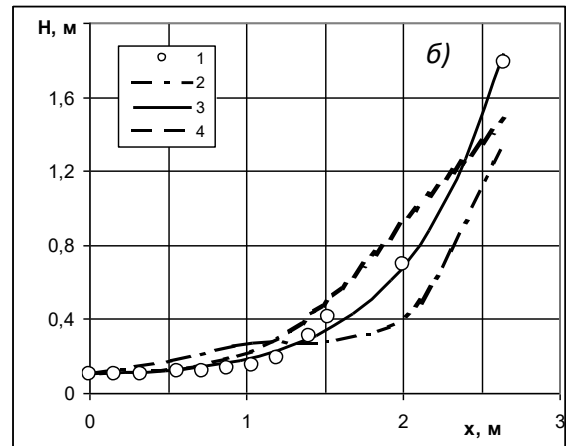
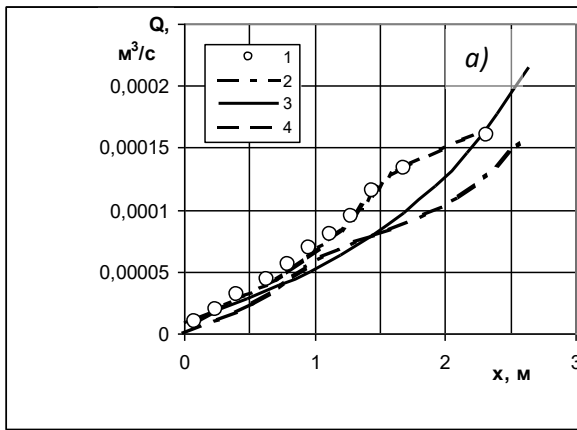


Рис. 1.23. Порівняння результатів обчислень витрати рідини всередині розподільного трубопроводу (а, в) та напору, під дією якого витікають струмені (б, з), для РТ з різними значеннями шпаруватості: $f = 1,469$ (а, б) та $f = 0,935$ (в, з): 1 – дані експерименту; 2 – за методикою [24, 25] (табл., 1); 3 – за формулами (1.20) і (1.21) [7\18] для випадку з умовним рівномірним розташуванням водовипускних насадок на експериментальному РТ; 4 – те саме, з довжинами розрахункових ділянок, рівними фактичними проміжкам між насадками

Криві 3, з однаковою відстанню між вихідними насадками, на рис. 1.23 представлено з метою коректного порівняння розрахунків РТ за методикою В. В. Чернюка з обчисленнями за методикою А. М. Кравчука і Д. О. Чернишова [24, 25], оскільки за останньою РТ поділяють на розрахункові ділянки з однаковими довжинами.

Таблиця 1.1 [38]

Розрахунок за методикою А. М. Кравчука і Д. О. Чернишова [24, 25]

k/\bar{f}	k	$\bar{y}=1-\bar{x}$	$k \cdot \bar{y}$	\bar{Q}	$Q,$ см ³ /с	$q,$ см ³ /с	q/q_1	\bar{h}
$\mu_p = 0,788; \bar{f} = 1,317; \zeta_l = 8,192; \lg \zeta_l = 0,913; Q_n = 160,22 \text{ см}^3/\text{с}$								
1,413	1,861	0,0	0,000	0,000	0,00			0,451
1,152	1,517	0,2	0,303	0,142	22,75	22,75	0,5050	0,556
0,311	0,410	0,4	0,164	0,391	62,61	39,86	0,8847	0,749
0,644	0,848	0,6	0,509	0,557	89,24	26,64	0,5912	0,765
1,065	1,402	0,8	1,122	0,719	115,17	25,92	0,5754	0,947
1,391	1,832	1,0	1,832	1,000	160,22	45,05	1,0000	1,464

Гідравлічні обчислення за формулами В. В. Чернюка (1.20) і (1.21) [7\18] для напірних РТ з кутами відведення струменів β , рівними 90° , практично збігаються з даними експериментів і близькі до результатів розрахунків за методикою А. М. Кравчука і Д. О. Чернишова [24, 25] (див. рис. 1.23). Криві 2, отримані за методикою [24, 25], далі відхиляються від експериментальних точок 1, ніж криві 4, одержані за методикою [7\18], оскільки в роботах [24, 25] прийнято, що $\lambda = const$. Насправді $\lambda \neq const$.

Над створенням надійного методу розрахунку напірних РТ трудиться проф. Андрій Кравчук [43]. Він зі співавторами [44, 45] та його послідовники [46] також працюють над удосконаленням проектування напірних трубопроводів-збирачів (ТЗ).

Окрім описаних теоретичних підходів багато дослідників вивчають роботу напірних РТ експериментально, що представлено в наступному підрозділі.

1.4. Чисельні й експериментальні дослідження роботи РТ

Нерівномірність шляхової роздачі рідини уздовж напірних розподільних трубопроводів регулюють переважно зміноюванням їх геометричних параметрів.

Chen Andrew W. і Sparrow Ephraim M. [47, 48] досліджували, за допомогою чисельного та фізичного експериментів, зменшення нерівномірності шляхової

роздачі рідини з РТ, оснащених вихідними отворами з різною геометричною формою. Застосовували РТ з отворами: а) прямокутними; б) круглими; в) у вигляді єдиної поздовжньої безперервної прямокутної щілини. З метою достовірного порівняння впливу геометричних параметрів вихідних отворів, загальну їх площу на кожному з трьох РТ брали однаковою. Вивчали змінювання тиску уздовж РТ при різних кутах β відведення струменів. Останній зростав уздовж РТ від 68° , на початку РТ, до 90° у кінці РТ [47]. Враховували довжини сторін випускних отворів. Критерію Рейнольдса в дослідях надавали значень в діапазоні $(4-20) \cdot 10^4$. Чисельні експерименти показали, що найменш нерівномірну шляхову роздачу рідини забезпечує безперервна щілина [48].

Jafar M. Hassan зі співавторами [49] виявили, що нерівномірність шляхової роздачі води з конічного РТ менша, ніж у випадку циліндричного РТ. Найменшу нерівномірність роздачі води ними досягнуто, коли вхідний діаметр конічного РТ D_{beg} вдвічі перевершував кінцевий діаметр D_{end} . Подальше збільшення відношення D_{beg}/D_{end} викликало незворотне зростання нерівномірності шляхової роздачі води [49].

Sangkyoo Lee й ін. [50] експериментально досліджували вплив товщини стінки t РТ прямокутного перерізу на нерівномірність шляхової роздачі води з нього. Зі збільшенням t від 2 до 10 мм зростав коефіцієнт стиснення струменя ε на виході з отвору. Значення коефіцієнта ε також збільшувалось зі зменшенням шпаруватості f РТ. Відповідно зменшувалася нерівномірність шляхової роздачі води з РТ. Значення коефіцієнта витрати води $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$ крізь вихідні отвори стабілізувалося в діапазоні 0,66-0,68 [50]. Звісно, що нераціонально регулювати шляхову роздачу рідини з РТ потовщенням його стінок. Достатньо до вихідних отворів приєднати насадки потрібної довжини.

Вплив геометричних параметрів струменів, які відгалужуються від розподільного трубопроводу, встановленого у теплообміннику, на нерівномірність шляхової роздачі робочої рідини з РТ експериментально

вивчали Wang C. C. й інші [51], Zeng D. зі співавторами [52] і Kim N. [53] з колегами.

Salihu Sintalma Abubakar у своїй магістерській роботі [54] представив результати дослідження впливу статичного тиску води в іригаційному трубопроводі на коефіцієнт витрати μ при витіканні води крізь отвори, влаштовані у стінці РТ. Він теоретично показав, що значення коефіцієнта μ залежить від кута β витікання води крізь отвір: $\mu=f(\beta)$. Кут β , в свою чергу, був функцією швидкості потоку води та тиску всередині іригаційного трубопроводу в створі випускного отвору [54].

Опираючись на аналіз літературних джерел Zemlyanaya N. V. і Gulyakin A. V. [55-56] дійшли висновку, що найменша нерівномірність роздачі рідини з напірного розподільного трубопроводу досягається в конфузорних РТ з неперервною щілиною у його стінці.

Розглянуті роботи посвячені витіканню рідин з напірних РТ крізь отвори та щілини. Однак, ні ті ні другі не забезпечують регулювання шляхової роздачі рідини з РТ в процесі експлуатації, оскільки їхні геометричні параметри сталі.

Цікавим є метод зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини уздовж розподільного трубопроводу, застосування котрого не потребує змінювання геометричних параметрів РТ в процесі його експлуатації. Цей спосіб ґрунтується на здатності високомолекулярних полімерних додатків з ланцюжковою будовою молекул зменшувати гідравлічний опір тертя у трубах при турбулентному режимі течії та регулювати місцеві втрати напору в трубах, що показали Б. Ф. Левицький [57] И. Л. Повх [58, 59] і V. V. Chernyuk зі співавторами [60]. Згодом В. В. Чернюк і В. І. Орел [61, 62] експериментально отримали зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини з РТ за допомогою уведення у потік води додатків поліакриламід. Цей метод можна застосовувати періодично. Ступінь зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини залежить від концентрації додатків, які уводять у потік і від критерію Рейнольдса.

В. В. Чернюк і В. В. Іванів [63] винайшли спосіб регулювання шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів, оснащених циліндричними поворотними насадками з бічним ортогональним входом струменя в насадку. За цим способом значення коефіцієнта витрати насадок μ регулюють змінюванням кута відведення струменів β . Для цього насадки обертають відносно їхніх поздовжніх осей. Тут β це - кут між напрямками руху потоку води в РТ та струменя, котрий від'єднується від нього крізь ці насадки. У результаті регулюється шляхова роздача рідини з напірних РТ.

Penghui Wang et all [64] вивчали РТ, змонтовані у хімічних апаратах, Juan M. García-Guendulain et all [65] – у сонячних колекторах, Kumar Singh R., Rama Rao A. [66] - у системах водяного охолодження атомних реакторів, Bosak N et all [67] – те саме, турбогенераторів ТЕС. Результати експериментальних досліджень РТ служать основою для побудови математичних моделей потоків рідини, зокрема диференціальних рівнянь [68].

1.5. Підсумок

Розповсюдження напірних розподільних трубопроводів у різних виробничих технологіях і відсутність надійних методик їх розрахунку свідчить про актуальність задачі удосконалення методів їх проектування та розробки способів регулювання нерівномірності шляхової роздачі рідини уздовж РТ.

Нерівномірність шляхової роздачі рідини уздовж напірних РТ регулюють змінюванням їх геометричних параметрів, зокрема зменшенням по їх довжині відстані між випускними отворами, збільшенням площі вихідних отворів $\omega_{от}$ уздовж потоку та зменшенням діаметра РТ у напрямку течії рідини в ньому.

Ефективним і перспективним є запропонований науковцями Львівської політехніки метод регулювання роботи РТ за допомогою циліндричних поворотних насадок з бічним ортогональним входом струменя у насадки [63]. Однак, у літературі відсутні дані про значення коефіцієнта витрати μ циліндричних насадок з бічним входом струменя.

На основі літературного аналізу з урахуванням актуальності теми і господарських потреб країни, визначені мета й задачі дисертаційних досліджень.

Мета роботи: на основі аналізу теоретичних та експериментальних досліджень вказати шлях уточнення методу гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів.

Для досягнення мети роботи було поставлено низку завдань:

– проаналізувати й експериментально перевірити відомі теоретичні методи розрахунку напірних розподільних трубопроводів;

– теоретично обґрунтувати можливі методи зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів;

– експериментально встановити значення коефіцієнта μ витрати вихідних циліндричних насадок з бічним ортогональним входом струменя рідини у насадку;

- експериментально встановити значення коефіцієнта μ витрати циліндричних насадок з бічним ортогональним входом струменя, залежно від кута β між напрямками руху потоку води в розподільному трубопроводі та струменя, котрий від'єднується, а також від відношення площ поперечних перерізів насадки та РТ і від значення критерія Рейнольдса;

– дослідити закономірності шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів, залежно від значень кута β , відношення площ поперечних перерізів насадки та РТ, критерію Рейнольдса;

– на основі аналізу теоретичних та експериментальних досліджень вказати шлях уточнення запропонованого у Львівській політехніці методу гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів.

Розділ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ЗМЕНШЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ШЛЯХОВОЇ РОЗДАЧІ РІДИНИ З НАПІРНИХ РТ

2.1. Постановка задачі теоретичних досліджень

Дані, отримані внаслідок фізичних і чисельних експериментальних досліджень потоків рідин в напірних розподільних трубопроводах (РТ) є підґрунтям для побудови математичних моделей цих потоків.

Диференціальні рівняння руху рідини зі змінною витратою (ДРРРЗВ) (1.2) і (1.3) складені [12] за умови, що гідравлічний коефіцієнт тертя є змінним уздовж розподільного трубопроводу: $\lambda_{(x)} \neq const$. Однак, через складність інтегрування, вони не отримали строгого математичного розв'язку від 1937 року, тобто від дня їх виведення.

У 2017 році китайські автори Liu H., Zong Q., Lv H., Jin J [69] запропонували таке ДРРРЗВ:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{\lambda}{2D} V_0^2 (1-x/L)^{2z} + V_0^2 [\alpha + 2z\zeta \ln(1-x/L)] \frac{d(1-x/L)^{2z}}{dx} = gI. \quad (2.1)$$

Рівняння (2.1) [69] складено з низкою допущень. Зокрема прийнято, що гідравлічний коефіцієнт тертя $\lambda_{(x)}$ є незмінним уздовж розподільного трубопроводу, тобто $\lambda_{(x)} = const$. Окрім того, автори [69] не представили розв'язання рівняння (2.1) [7].

Метод розрахунку гідравлічного розрахунку напірного трубопроводу-збирача, запропонований А. М. Кравчуком [24] і Д. О. Чернишевим [25] ґрунтується на основі розв'язання ДРРРЗВ (1.3). Проте, при розв'язуванні

ДРРРЗВ (1.3) у роботах [24] і [25] взято постійними за довжиною РТ значення таких величин:

- б) відстані між вихідними отворами;
- в) коефіцієнта витрати рідини крізь вихідний отвір ($\mu=const$);
- г) гідравлічного коефіцієнта тертя ($\lambda=const$);
- д) кута відгалуження струменів ($\beta=const=90^\circ$);
- е) кута нахилу осі РТ до обрію ($\psi=const=0^\circ$) [18].

Треба взяти до уваги, що у низці технологічних процесів розподільні трубопроводи працюють у потоці рідини, котрий омиває їх зовні (див. рис. 1.10). Методика гідравлічного розрахунку напірних РТ за рівняннями (1.20)-(1.27) [18] розроблена з урахуванням змінних значень уздовж РТ гідравлічного коефіцієнта тертя $\lambda_{(x)}$, коефіцієнта $\mu_{(x)}$ витрати рідини крізь вихідні насадки та кінематичних і фізичних характеристик потоку рідини, котрий омиває РТ зовні. Проте, як показали попередні експериментальні дослідження, метод [18] забезпечує точний гідравлічний розрахунок ТЗ лише при кутах відгалуження струменів $\beta=90^\circ$ [18; 38].

Тому, метою нашого теоретичного дослідження є поглиблений аналіз методу гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів, розробленого у Львівській політехніці [18], який представлено формулами (1.20)-(1.27), і вказання шляхів його удосконалення. Поліпшена математична модель забезпечить достовірний розрахунок і кероване регулювання нерівномірності роздачі рідини уздовж напірних розподільних трубопроводів, зокрема прокладених у зовнішньому потоці рідини, котрий має інші кінематичні та фізичні характеристики [18].

$$\begin{aligned}
 b \int_0^x H_{(x)}^{1/2} dx = bx \left\{ H_{(0)}^{1/2} + \frac{bx}{4g\Omega} \left[\alpha_o v_{(0)} \cos \beta - (2\alpha_o + \alpha \cos \beta) V_{(0)} \right] \right\} - \\
 - \frac{bx}{4H_{(0)}^{1/2}} \left\{ \lambda_{(x)} \frac{x}{D} \frac{V_{(0)}^2}{2g} + \left(2 - \frac{\rho_{out}}{\rho} \right) x \sin \psi + f_{(x)} \left[\frac{\rho_{out}}{\rho g} + \frac{\rho_{out}}{\rho} \left(T_{(0)} + \frac{\alpha V_{out}^2}{2g} \cos \xi \right) \right] \cos \beta \right\}.
 \end{aligned}
 \tag{1.20}$$

$$\begin{aligned}
H_{(x_k)} = & \left\langle H^{1/2} + \frac{\kappa \cdot bx}{2g\Omega} [\alpha_o v_{(x)} \cos \beta_{(x)} - (2\alpha_o + \alpha \cos \beta) \cdot V_{(x)}] - \right. \\
& - \frac{\kappa}{2H_{(x)}^{1/2}} \left\{ x \cdot \left[\frac{\lambda_{(x)} V_{(x)}^2}{D_{(x)} 2g} + \left(2 - \frac{\rho_{out}}{\rho} \right) \sin \psi_{(x)} \right] + \right. \\
& \left. \left. + f_{(x)} \left[\frac{P_{o_{out}}}{\rho g} - \frac{\rho_{out}}{\rho} \left(T_{(x)} + \frac{\alpha V_{out}^2}{2g} \cos \xi \right) \right] \cos \vartheta_{(x)} \right\}^2, \right.
\end{aligned} \tag{1.21}$$

2.2. Теоретичний аналіз рівняння (1.20) і формули (1.21)

Рівняння (1.20) і формула (1.21) є універсальними. Вони справедливі для ламінарних течій і усіх трьох ділянок опору зони турбулентного режиму руху рідин і газів [18]. Інтеграл $b \int_0^x H_{(x)}^{1/2} dx$ у рівнянні (1.20) являє собою витрату рідини, котра роздається з напірного розподільного трубопроводу на його ділянках з довжинами x .

Отримані внаслідок розв'язання ДРРРЗВ (1.3) рівняння (1.20) для обчислення витрат рідини і залежність (1.21) для визначення повного напору в РТ ураховують значення таких характеристик внутрішнього та зовнішнього потоків рідин і струменів, які від'єднуються від РТ на початку розрахункової ділянки $i-k$:

$H_{(0)}$ - повний напір під дією котрого струмені витікають з РТ;

$v_{(0)}$ - швидкість витікання з РТ струменів, які від'єднуються;

$V_{(0)}$ - середня швидкість основного потоку усередині РТ;

$\lambda_{(x)}$ - гідравлічний коефіцієнт тертя на ділянці РТ між сусідніми відгалуженнями струменів;

$\lambda_{(x)} \frac{x}{D} \frac{V_{(0)}^2}{2g}$ - втрати напору на тертя на ділянках РТ з постійними

витратами рідини та їх довжинами x між сусідніми відгалуженнями струменів;

$Z_{(0)}$ - глибина занурення РТ під рівень зовнішнього потоку рідини (див. рис. 1.18);

V_{out} - швидкість зовнішнього потоку рідини;

β - кут між напрямками руху основного потоку в РТ і струменів, які від нього від'єднуються;

ψ - кут нахилу поздовжньої осі РТ до обрію;

ξ - кут між напрямками руху струменя, котрий від'єднується у вихідному перерізі отвору-випусу, та напрямком течії зовнішнього потоку, котрий омиває РТ (див. рис. 1.19);

$p_{o_{out}}$ - тиск на вільній поверхні рідини, в котру занурений РТ (див. рис. 1.20);

ρ - густина рідини, котра тече усередині РТ;

ρ_{out} - густина рідини, котра омиває РТ зовні;

$\nu_{(x_i)}$ - в'язкість рідини усередині РТ;

$\rho_{(x_i)}$ - густина рідини внутрішнього потоку;

ρ_{out} - те саме, зовнішнього.

У рівнянні (1.20) і формулі (1.21) ураховуються усі геометричні параметри розподільного трубопроводу:

D - діаметр РТ;

$A_{(x_i)}$ - абсолютна висота виступів шорсткості на внутрішній стінці РТ;

d - діаметри вихідних насадок;

l - довжини вихідних насадок.

У рівнянні (1.20) і формулі (1.21) символ n , який означає кількість отворів, яка припадає на одиницю довжини РТ, входить множником у вираз $b = n\mu\omega_{hole}\sqrt{2g} = 0$ (див пояснення на с. 46 у розділі 1).

Спочатку аналізуємо правильність формули (1.21), яка рекомендується для обчислення повного напору в РТ, під дією котрого струмені витікають з РТ. Припустимо, що у стінках РТ відсутні випускні отвори. У цьому випадку

формула (1.21) трансформується так:

Твердження 1: при $n=0$ площа поперечного перерізу вихідного отвору чи насадки $\omega_{hole}=0$. Тоді $b=n\mu\omega_{hole}\sqrt{2g}=0$, а другий і третій доданки у формулі (1.21) за $n=0$ й $\omega_{hole}=0$ перетворюються в нуль:

$$\frac{\kappa \cdot b_{i-k} x_{i-k}}{2g\Omega_{(x_i)}} \left[(2\alpha_o + \alpha \cos \beta_{(x_i)}) \cdot V_{(x_i)} - \alpha_o v_{(x_i)} \cos \beta_{(x_i)} \right] = 0. \quad (2.2)$$

Твердження 2: за умови відсутності вихідних отворів або насадок у стінках РТ, коли $n=0$, шпаруватість РТ $f_{i-k}=0$, а чотири останні доданки у формулі (1.21) перетворюються в нуль:

$$f_{i-k} \left[\frac{p_{out}}{\rho g} - \frac{\rho_{out}}{\rho} \left(T_{(x_i)} + \frac{\alpha V_{out}^2}{2g} \cos \xi \right) \right] \cos \vartheta_{(x_i)} = 0. \quad (2.3)$$

Твердження 3: за умови, що $n=0$, немає витікання рідини з РТ назовні, тому рідина внутрішнього потоку не контактує з рідиною зовнішнього потоку і немає потреби урахувувати в'язкість ρ_{out} зовнішнього потоку; з цієї причини значення дробу $\frac{\rho_{out}}{\rho}=1$; у такому випадку:

$$\left(2 - \frac{\rho_{out}}{\rho} \right) \sin \psi_{(x_i)} = \sin \psi_{(x_i)}. \quad (2.4)$$

Твердження 4: так само, коефіцієнт $\kappa=1$.

З урахуванням тверджень 1 - 4 формула (1.21) спроститься до такого виду:

$$H_{(x_k)} = \left[H_{(x_i)}^{1/2} + \frac{x_{i-k}}{2H_{(x_i)}^{1/2}} \left(\frac{\lambda_{(x_i)} V_{(x_i)}^2}{D_{(x_i)} 2g} + \sin \psi_{(x_i)} \right) \right]^2. \quad (2.5)$$

Після виконання алгебраїчних дій з піднесення до квадрату правої частини останньої формули та знехтування величиною $\sin^2 \psi$ отримуємо формулу Дарсі-Вайсбаха для обчислення втрат напору в циліндричному напірному трубопроводі та доданок $x \sin \psi_{(x)}$, який враховує кут $\psi_{(x)}$ нахилу трубопроводу до обрію:

$$H_{(x_k)} = H_{(x_i)} + x_{i-k} \frac{\lambda_{(x_i)} V_{(x_i)}^2}{D_{(x_i)} 2g} + x_{i-k} \sin \psi_{(x_i)}. \quad (2.6)$$

Відповідно рівняння (1.20) при підстановці в нього значення $b=0$ перетворюється в тотожність $0 \equiv 0$, що означає, що роздача рідини з РТ відсутня, а саме рівняння (1.20) складено правильно.

Отримання з формули (1.21) відомого виразу для розрахунку звичайних трубопроводів дає підставу вважати, що виведене рівняння (1.20) і формула (1.21) є правильними.

2.3. Фактори, що впливають на роздачу рідини з напірних РТ

2.3.1. Кінематичні характеристики потоків і струменів

Кінематичні характеристики основного потоку в РТ, струменів, які від'єднуються та зовнішнього потоку, впливають на шляхову роздачу рідини. Їх дія ураховується у рівнянні (1.20) і залежності (1.21) такими складниками:

$Q_{tr(x_i)}$ - транзитна витрата рідини на вході в РТ;

$V_{(x_i)}$ - середня швидкість основного потоку в РТ;

$v_{(x_i)} = \varphi \sqrt{2gH}$ - середня швидкість струменів, які відгалужується від РТ;

V_{out} - швидкість зовнішнього потоку, у котрому прокладено РТ;

$\lambda_{(x_i)}$ - гідравлічний коефіцієнт тертя для основного потоку в РТ; його обчислюють за формулами (1.22)-(1.25) залежно від значення критерію Рейнольдса (1.26), береться до уваги режим течії;

$\mu_{(x_i)}$ - коефіцієнт витрати випускного отвору чи насадки; його значення знаходять за виразом (1.27) залежно від діаметра d і довжини l насадки та з урахуванням критерію Рейнольдса $Re_{or(x_i)}$ для струменя, що від'єднується від РТ.

2.3.2. Геометричні параметри РТ

Зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини вздовж напірних розподільних трубопроводів регулюється також змінюванням значень діаметра $D_{(x_i)}$ уздовж РТ. Діаметр ураховується в залежностях (1.20) - (1.27) явно та в неявному вигляді.

Значення діаметрів випускних отворів або насадок $d_{(x_i)}$ входять складовими елементами в ті самі залежності (1.20) - (1.27).

Довжини вихідних насадок $l_{(x_i)}$ входять складовими елементами у формулу (1.27).

Істотно можна зменшувати нерівномірність шляхової роздачі рідини з напірного розподільного трубопроводу, або ж регулювати її в потрібних межах, змінюванням відстаней між випускними отворами чи насадками. Ці відстані ураховано коефіцієнтом n у формулі для обчислення множника $b_{i-k} = n_{i-k} \mu_i \omega_{hole_{i-k}} \sqrt{2g}$, де n - кількість випускних отворів, яка припадає на одиницю довжини РТ, m^{-1} .

Еквівалентну шорсткість $\Delta_{e(x_i)}$ внутрішніх стінок РТ ураховано в допоміжних формулах (1.24), (1.25).

2.3.3. Зовнішній статичний тиск

Зовнішній статичний тиск урахується в (1.20) і (1.21) глибиною $T_{(x_i)}$ занурення РТ на початку кожної розрахункової ділянки $i-k$ (див. рис. 1.18 та рис. 1.20).

2.3.4. Кут між струменями, що від'єднуються, і зовнішнім потоком

Змінюванням значення кута $\xi_{(x_i)}$ між напрямками течії струменів, які від'єднуються, і напрямком руху зовнішнього потоку (див. рис. 1.19) можна в певних межах регулювати нерівномірність шляхової роздачі рідини з РТ. Вплив кута $\xi_{(x_i)}$ урахувано у рівнянні (1.20) доданком $-f_{i-k} \frac{\rho_{out}}{\rho} \frac{\alpha V_{out}^2}{2g} \cos \xi_{(x_i)} \cos \vartheta_{(x_i)}$ і тим самим виразом, піднесеним до квадрату, - у формулі (1.21). Змінюють значення кута $\xi_{(x_i)}$ регулюванням уздовж РТ просторової орієнтації вихідних отворів вихідних насадок. З цією метою насадки можна виготовляти з зігнутою поздовжньою віссю. Вплив значення кута $\xi_{(x_i)}$ на нерівномірність роботи РТ зростає зі збільшенням швидкості V_{out} і може бути істотним, наприклад, у випадку РТ, застосовуваних у сільськогосподарській авіації (див. рис. 1.10).

2.3.5. Кут нахилу поздовжньої осі РТ до обр'їю

Кут $\psi_{(x_i)}$ нахилу поздовжньої осі РТ до обр'їю урахувано доданком $+\frac{1}{4H_{(x_i)}^{1/2}} x_{i-k} \left(2 - \frac{\rho_{out}}{\rho}\right) \sin \psi_{(x_i)}$ у рівнянні (1.20), яке призначене для обчислення витрати рідини у розподільному трубопроводі, та складником $+\frac{\kappa}{2H_{(x_i)}^{1/2}} x_{i-k} \left(2 - \frac{\rho_{out}}{\rho}\right) \sin \psi_{(x_i)}$ у розрахунковій залежності (1.21), за котрою знаходять повний робочий напір в РТ. Для спрощення аналізу візьмемо, що рідини внутрішнього та зовнішнього потоків мають однакові густини: $\rho_{out} = \rho$.

Тоді згаданий доданок у рівнянні (1.20) набере такого виду

$$+ \frac{1}{4H_{(x_i)}^{1/2}} x_{i-k} \sin \psi_{(x_i)}. \text{ Відповідно доданок у залежності (1.21) стане таким:}$$

$$+ \frac{\kappa}{2H_{(x_i)}^{1/2}} x_{i-k} \sin \psi_{(x_i)}. \text{ У першому та другому квадрантах декартової}$$

прямокутної координатної системи ($0^\circ < \psi_{(x_i)} < 180^\circ$) функція $\sin \psi_{(x_i)}$ є

додатною, у третьому й четвертому ($180^\circ < \psi_{(x_i)} < 360^\circ$) – від’ємна. Отож, коли

йти проти основного потоку всередині РТ від точки i до точки k (див.

рис. 1.20), то при ($0^\circ < \psi_{(x_i)} < 180^\circ$) витрата основного потоку в РТ (1.20) і його

повний робочий напір (1.21) зростатимуть, а при ($180^\circ < \psi_{(x_i)} < 360^\circ$) –

зменшуватимуться. Якщо рухатись уздовж основного потоку в РТ, то при $0^\circ <$

$\psi_{(x_i)} < 180^\circ$ витрата рідини в РТ згідно рівняння (1.20) і повний напір згідно

залежності (1.21) будуть зменшуватись. Сказане відповідає фізичній суті для

потоку в РТ, прокладеному під кутом $\psi_{(x_i)}$ до обрїю (рис. 2.1) і підтверджено

експериментально (рис. 2.2) [7; 71; 72].

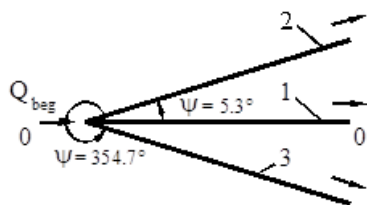


Рис. 2.1. Схема відліку кута ψ нахилу осі РТ до обрїю [7]

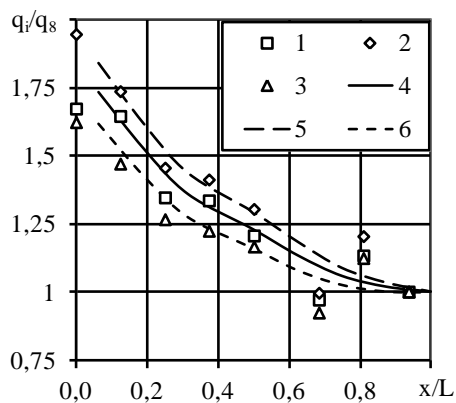


Рис. 2.2. Відносна зміна шляхової роздачі води вздовж РТ з коефіцієнтом шпаруватості $f=1.22$:

1–3 – дані експерименту; 4–6 – розрахункові криві, обчислені за формулами (1.20)–(1.27) [18];

1, 4 – $\psi = 0^\circ$; 2, 5 – $\psi = 5.3^\circ$; 3, 6 – $\psi = 354.7^\circ$; L –

довжина перфорованої частини РТ; вісь x

направлена уздовж потоку ($\beta = 90^\circ$; $Q_{tr} = 0$) [7]

2.3.6. Кут відгалуження струменів від потоку в РТ

Кут $\beta_{(x_i)}$ між напрямками руху основного потоку в РТ і струменя, що від'єднується від нього, та кут ϑ між векторами середньої швидкості \vec{V} потоку рідини у РТ та сили \vec{S} , яка заміняє дію відкиненої частини струменя, що відгалужується, пов'язані залежністю: $\vartheta = \beta \pm 180^\circ$ (див. рис. 1.18). На рис. 2.3 зображено схеми встановлення вихідних насадок в РТ, на якому у роботі [73] перевірявся вплив кута $\beta_{(x_i)}$, рівного 0° , 180° і 270° , на значення робочого напору (рис. 2.4) і витрати води (рис. 2.5) в експериментальному трубопроводі.

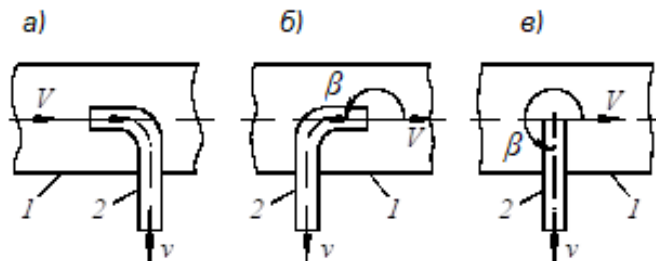


Рис. 2.3. Схема дії динамічного напору основного потоку рідини в РТ на живий переріз вхідного отвору випускної насадки при різних значеннях кута β : 0° – (а); 180° – (б); 270° – (в): 1 – стінка РТ; 2 – випускна насадка [73]

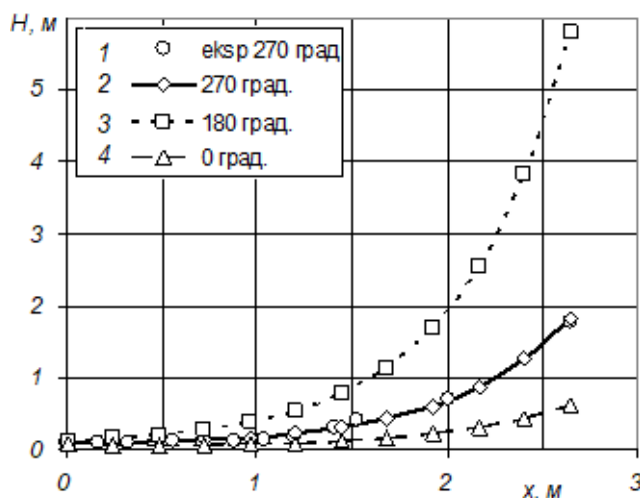
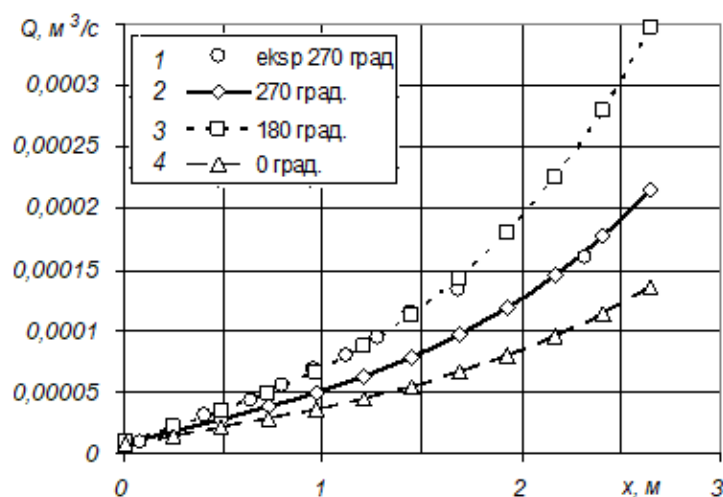


Рис. 2.4. Повний робочий напір усередині розподільного трубопроводу: 1 експериментальні точки; 2-4 – розрахункові точки та криві, отримані за формулами (1.20)-(1.27), (вісь x направлена зустрічно потоку води в РТ; $D = 8,31$ мм, $d = 3,1$ мм) [73]



*Рис. 2.5. Витрата води усередині розподільного трубопроводу:
1 експериментальні точки; 2-4 – розрахункові точки та криві, отримані за
формулами (1.20)-(1.27), (вісь x направлена зустрічно потоку води в РТ;
 $D = 8,31$ мм, $d = 3,1$ мм) [73]*

Значення повного робочого напору та витрати води усередині розподільного трубопроводу, обчислені за залежностями (1.20)-(1.27) практично збіглися з даними експерименту лише для РТ з насадками, для яких кут β був прямим, а саме, рівним 270° за схемою *в* на рис. 2.3. Суцільна і пунктирні криві, зображені на рис. 2.4 і рис. 2.5, отримані за рівняннями (1.20)-(1.27). Експериментальні дані представлені кільцями. Для кутів β , відмінних від прямих, розрахункові залежності не підтверджено експериментом.

Результати розрахунку, отримані за формулами Чернюка В. В. (Львів, НУЛП) (1.20)-(1.27) [18], порівнюємо з результатами обчислень за формулами (1.17) і (1.18) [24, 25], запропонованими Кравчуком А. М. і Чернишевим Д. О. (Київ, КНУБА), а також з даними експерименту (рис. 2.6). Щоб розпочати розрахунок РТ за методикою [24, 25] необхідно задаватись значенням витрати потоку рідини на початку РТ. Оскільки його значення невідоме, то взято $Q=160.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, отримане дослідним шляхом на експериментальному РТ з $D = 8,21$ мм (рис. 2.7, рис. 2.8) [7] (схему експериментального стенду для дослідження напірних РТ представлено на рис. 3.12). За методикою [24, 25]

обчислюється лише п'єзометричний напір на вихідних насадках (без урахування швидкісного напору) та за умови, що вихідні насадки (або отвори) розташовані рівномірно уздовж РТ, при горизонтальному РТ ($\psi_{(x)}=0^\circ$) і при від'єднанні струменів під прямим кутом ($\beta_{(x)}=90^\circ$). До того ж, за методом [24, 25] гідравлічний коефіцієнт тертя $\lambda_{(x)}$ і коефіцієнт від'єднуваної маси $m_{(x)}=(v_{(x)}\cos\beta_{(x)})/V$ приймаються постійними по довжині РТ [7].

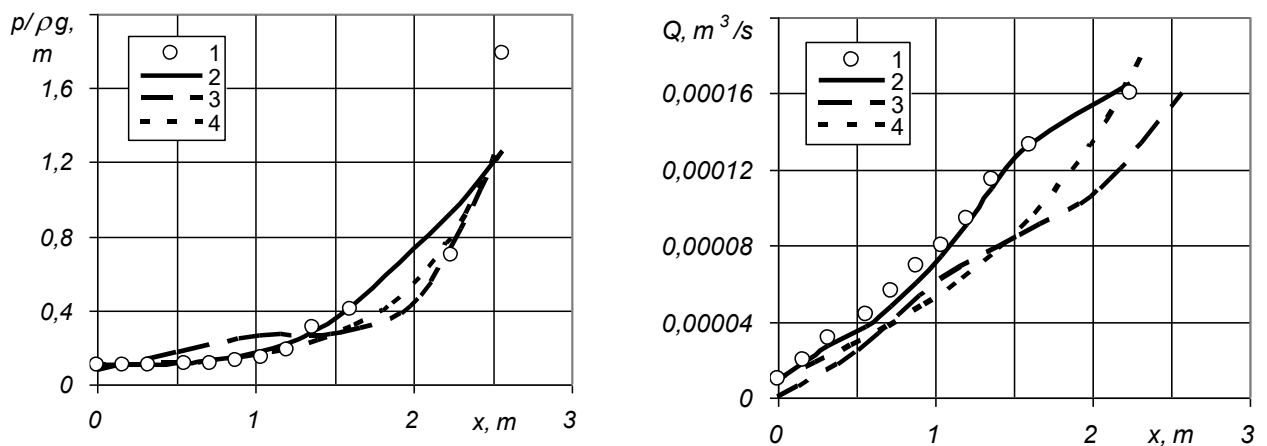


Рис. 2.6. Порівняння результатів обчислень: а – п'єзометричний напір усередині РТ; б – те саме, витрата води; 1 – дані експерименту (напір на останній насадці $H_{(0)}=0.104$ м, $Q_{tr}=0$); 2 – криві, отримані за формулами (1.20)-(1.27) [18] при $\kappa=0.6$ і відстані між вихідними насадками такими, як на експериментальному РТ (рис. 2.7); 3 – те саме, за формулами (1.17) і (1.18) [24, 25] при рівномірному розташуванню випускних насадок; 4 – криві, отримані за формулами (1.20)-(1.27) [18] при $\kappa=0.6$ за умови рівномірного розташування випускних насадок (вісь x направлена від кінця РТ зустрічно потоку води в ньому) [7]

За методикою [24, 25], згідно з рис. 1.15, РТ поділено на п'ять рівних за довжиною частин, а параметри \bar{Q} і \bar{h} обчислено для перерізів, що на межі цих ділянок. При розрахунку за методикою [24, 25] прийнято для всієї довжини РТ гідравлічний коефіцієнт тертя $\lambda = 0,03 = const$, як для ділянки гідравлічно шорстких труб зони турбулентного режиму руху [7].

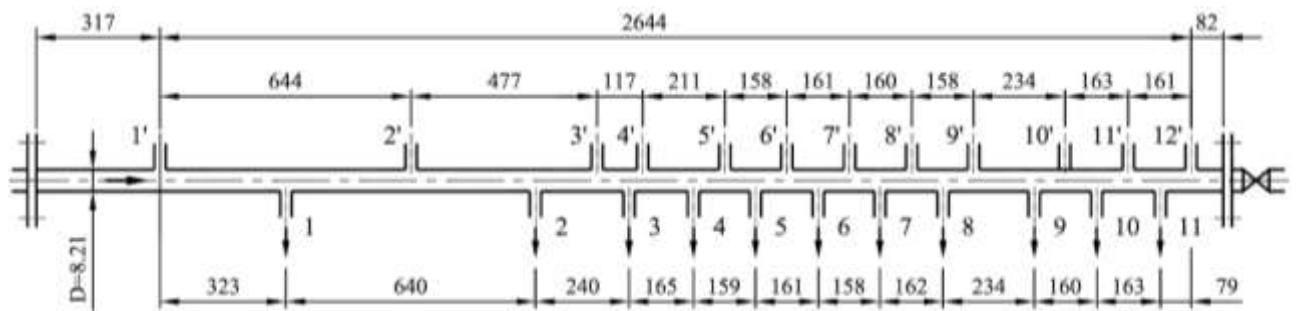


Рис. 2.7. Схема експериментального РТ: 1-11 – водовипускні насадки; 1'-12' – штуцери для приєднання імпульсних трубок від п'єзометрів (розміри подано в мм) [7]

З метою коректного порівняння методу [24,25] з методом [18], додатково за формулами (1.20)-(1.27) обчислено криві 4 (рис. 2.6), для випадку, коли вихідні насадки розташовані з постійним кроком, оскільки лише так можна робити обчислення за методом [24,25].

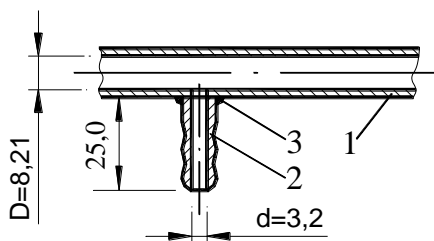


Рис. 2.8. Фрагмент РТ: 1 – стінка РТ; 2 – вихідна насадка, або штуцер для приєднання імпульсних трубок від п'єзометрів; 3 – зварне з'єднання [7]

Метод [18] враховує зміну вздовж РТ значень гідравлічного коефіцієнта тертя $\lambda_{(x)}$ і коефіцієнта витрати насадок $\mu_{(x)}$. Для того, щоб розпочати обчислення за методом [18] необхідно задаватись значенням напору $H_{(o)}$ на останній вихідній насадці, яка розташована в кінці РТ, що нескладно. Взято експериментальне значення $H_{(o)}=0.104$ м. Коефіцієнт $\lambda_{(x)}$ обчислено за відомими з гідравліки формулами, а коефіцієнт витрати насадок $\mu_{(x)}$ – за формулою (1.27) [7].

Витрата води на початку експериментального РТ (це створ вихідної насадки 1 (рис. 2.7), яка на рис. 2,6 представлена крайнім з права кружечком з

порядковим номером 11), обчислена за [18] (крива 2 на рис. 2.6), рівна $0.000165 \text{ м}^3/\text{с}$. Витрата води, отримана за [24, 25] (крива 3), рівна $0.000130 \text{ м}^3/\text{с}$. Експериментальне значення (масив точок 1) витрати води на насадці 11 рівне $0.000160 \text{ м}^3/\text{с}$. Отож витрата води, обчислена за [18], на 3.12 % перевищує експериментальне значення а, витрата, отримана за [24, 25], на 18,75 % менша від експериментального значення. Таким чином, Гідравлічні обчислення за формулами (1.20)-(1.27) [18] для напірних РТ з кутами відведення струменів β , рівними 90° , практично збігаються з даними експериментів і близькі до результатів розрахунків за методикою [24, 25]. Нагадаємо, що методика [24, 25] не забезпечує розрахунку РТ з нерівномірним розташуванням вихідних насадок [7].

Отож, у формули (1.20)-(1.21) [18], отримані у НУЛП, потрібно ввести корективи для точного урахування кута β .

2.3.7. Підсумок теоретичного аналізу розв'язку ДРРРЗВ

Причиною того, що рівняння (1.20) і формула (1.21) не ураховують вплив кута β при його значеннях, відмінних від ортогональних найімовірніше є урахування у доповненому рівнянні (2.7) [18] дії сили зовнішнього тиску уздовж прямої, що не перпендикулярна до внутрішньої стінки розподільного трубопроводу:

$$\frac{\alpha_0(v \cos \beta - 2V)dV}{g} + d \frac{p}{\rho g} + \frac{p_{out}}{\rho g} \frac{dV}{v} \cos \theta + \sin \psi \cdot dx + dh_x = 0. \quad (2.7)$$

У доповненому рівнянні (2.7) [18] силу $\frac{p_{out}}{\rho g} \frac{dV}{v}$ дії зовнішнього тиску помилково помножено на $\cos \theta$. За другим правилом гідростатики сила тиску завжди ортогональна до поверхні, на котру вона діє.

Отже, належить вилучити доданок $\frac{p_{out}}{\rho g} \frac{dV}{v} \cos \theta$ з доповненого рівняння

(2.7). Після цього (2.7) стане ідентичним рівнянню (1.3). Далі належить уточнити розв'язок рівняння (1.3) й експериментально перевірити правильність його розв'язування. Постановку експерименту викладено у розділі 3, а результати дослідів наведено у розділі 4.

2.6. Підсумок до розділу 2

Проведено докладний теоретичний аналіз рівнянь, запропонованих у 2008 році Чернюком В. В. (Львівська політехніка) для гідравлічних розрахунків напірних розподільних трубопроводів, прокладених у потоці рідини, котрий омиває РТ зовні. Ці рівняння відображають фізичну суть гідродинамічних процесів, які реалізуються при роботі таких напірних розподільних трубопроводів. Результати обчислень за цими рівняннями практично збігаються з експериментальними даними лише при прямих кутах відгалуження струменів від РТ і близькі за значеннями з даними, отриманими за формулами, запропонованими Кравчуком А. М. і Чернишевим Д. О. (Київ, КНУБА). Однак при виведенні своїх формул Кравчук А. М. і Чернишев Д. О. заклали умову, що кути відгалуження струменів прямі.

Виявлено, що причиною розбіжності результатів гідравлічного розрахунку РТ за рівняннями В. В. Чернюка та експериментальних даних, при непрямих кутах відгалуження струменів, найімовірніше є урахування у вихідному рівнянні дії сили зовнішнього тиску уздовж напрямку, не ортогональному до внутрішньої стінки розподільного трубопроводу. Запропоновано заново вивести рівняння, для розрахунку напірних РТ, опустивши при цьому силу зовнішнього тиску, направлену неортогонально до внутрішньої стінки РТ.

Розділ 3

ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1. Обґрунтування геометричних параметрів і гідродинамічних характеристик досліджуваних РТ

Метою експериментального дослідження є перевірка коректності розв'язків диференціального рівняння руху рідини зі змінною витратою (ДРРРЗВ), виконаних у Львівській політехніці [18]. Експериментальний розподільний трубопровід виготовлено у геометричному масштабі 1:1 стосовно до розподільних трубопроводів систем крапельного зрошення садів (рис. 1.1) і ягідників і в масштабі 1:3-1:4 порівняно з РТ, застосовуваних у сільськогосподарській авіації (рис. 1.10) [7].

Згідно поставленої задачі експериментальний розподільний трубопровід повинен забезпечувати ефективне регулювання нерівномірності шляхової роздачі рідини за допомогою вихідних циліндричних поворотних насадок з бічним ортогональним входом струменя в насадку. За патентом [63], який взято за основу при проектуванні експериментального РТ, повертанням вихідних циліндричних насадок відносно їхніх поздовжніх осей регулюється значення кута β відведення струменів і відповідно змінюється нерівномірність роботи РТ [7].

У літературі відсутні значення коефіцієнта μ гідравлічного опору для запропонованих [63] вихідних циліндричних поворотних насадок з бічним ортогональним прийманням струменя. Тому постала задача запроектувати та виготовити такі насадки й експериментальний стенд для їх гідравлічного дослідження.

3.2. Планування експериментів

Значення коефіцієнта μ гідравлічного опору вихідної циліндричної поворотної насадки з бічним ортогональним входом струменя в насадку, вхідний отвір якої розміщений в потоці рідини, що тече у розподільному трубопроводі, є функцією від багатьох змінних величин:

D - внутрішній діаметр РТ, м ;

d - те саме, вихідної насадки, м ;

l - довжина вихідної насадки, м ;

β – кут між векторами середньої швидкості \vec{V} основного потоку рідини в РТ і струменя \vec{v} , який від'єднується (див. рис. 1.18-рис. 1.20), ° ;

H - повний робочий напір в створі вихідної насадки, під дією котрого струмінь витікає з неї, м ;

V - середня швидкість потоку води усередині РТ, м/с ;

v - середня швидкість витікання струменя крізь насадку, м/с ;

T – температура рідини в розподільному трубопроводі, °С ;

ρ – густина рідини, котра тече в РТ, кг/м³ ;

ν –кінематична в'язкість цієї рідини, м²/с .

Кількість параметрів зменшується, об'єднанням їх у групи, наприклад, у безрозмірний критерій Рейнольдса $Re=vd/\nu$, де $v = f(T, \rho)$.

Для аналізу впливу геометричних параметрів насадки та РТ і кінематичних струменя, що витікає, на значення коефіцієнта витрати вихідної циліндричної насадки з внутрішнім діаметром d , встановленої у трубопроводі з діаметром D залишимо чотири основні змінні величини: $\beta, d, (d/D)^2, Re$. Кожній з них надаватимемо по п'ять значень. Тоді для встановлення функції $\mu = f(\beta, d, (d/D)^2, Re)$ необхідно зробити $5^4 = 625$ дослідів.

Існують різні методи планування експериментів, направлені на зменшення кількості дослідів [75-79]. Якщо експерименти запланувати за методом

латинських квадратів [77] (табл.3.1), то кількість необхідних дослідів істотно зменшиться.

Таблиця 3.1.

Схема планування експериментів зі встановлення значень коефіцієнта μ гідравлічного опору вихідної циліндричної насадки з бічним входом струменя для чотирьох факторів: $\beta, d, (d/D)^2, Re$ при п'ятьох значеннях кожного з них

β^0	d, мм	4,83					6,01					8,02					8,08					8,99				
	$Re \cdot 10^{-3}$ $(d/D)^2$	3	5	10	30	60	3	5	10	30	60	3	5	10	30	60	3	5	10	30	60	3	5	10	30	60
0°	0,0887				■																					
	0,119					■																				
	0,158												■													
	0,183																									■
	0,251																									■
45°	0,0887		■																							
	0,119																									■
	0,158																									■
	0,183																									■
	0,251																									■
90°	0,0887																									■
	0,119																									■
	0,158																									■
	0,183																									■
	0,251																									■
135°	0,0887																									■
	0,119																									■
	0,158																									■
	0,183																									■
	0,251																									■
180°	0,0887																									■
	0,119																									■
	0,158																									■
	0,183																									■
	0,251																									■

За таблицею 3.1. кожний з названих чотирьох параметрів $\beta, d, (d/D)^2, Re$ появляється в будь-якому із 25 рядків і в кожній із 25 колонок лише по одному разу. Це дозволяє так поєднати ці параметри, щоб при мінімальному числі зроблених дослідів найрівномірніше охопити всю площу таблиці при можливих комбінаціях згаданих чотирьох факторів впливу. Згідно з цим методом кількість необхідних дослідів скорочується у 5^2 разів і стає рівною 25.

Проте в процесі проведення експериментів виявилось, що рекомендована різними методами кількість дослідів є недостатньою при вивченні гідравлічних процесів. Залежності $\mu = f(\beta, Re), \mu = f(\beta), \mu = f[(d/D)^2]$ нелінійні (див. графічні залежності, подані у розділі 4). Для достовірної побудови цих залежностей потрібна значно більша кількість дослідів. Наприклад, для вірогідного представлення лише однієї із 25 представлених залежностей $\mu = f(Re)$ потрібно щонайменше п'ять точок.

3.3. Стенд для встановлення значень коефіцієнта витрати вихідних циліндричних насадок з бічним входом струменя

Запроектовано й виготовлено експериментальний стенд з самопливною подачею води на досліджувані насади (рис. 3.1). На ньому відтворювалися такі самі умови входу води у вихідні циліндричні насадки з бічним входом струменя, як у напірному розподільному трубопроводі. Експериментальний стенд забезпечував витікання води з досліджуваних насадок під дією напору, котрий змінювали в межах від 0,01 до 18,57 м. Напори, менші ніж 2,2 м, вимірювали п'езометром з ціною поділок шкали, рівною 1 мм, Напори, котрі перевищували 2,2 м, вимірювали манометром МТИ з ціною поділки 0,02 кг/см² та з класом точності 0,6 [80-81].

Робочою рідиною служила вода. Маса води, котра поступала у мірний бак, вимірювалася електронною вагою, а час її натікання – електронним секундоміром. Досліджувані насадки монтувались на внутрішній стороні передньої основи б напірного бака 2 (див. рис. 3.1), зображеного на рис. 3.2.

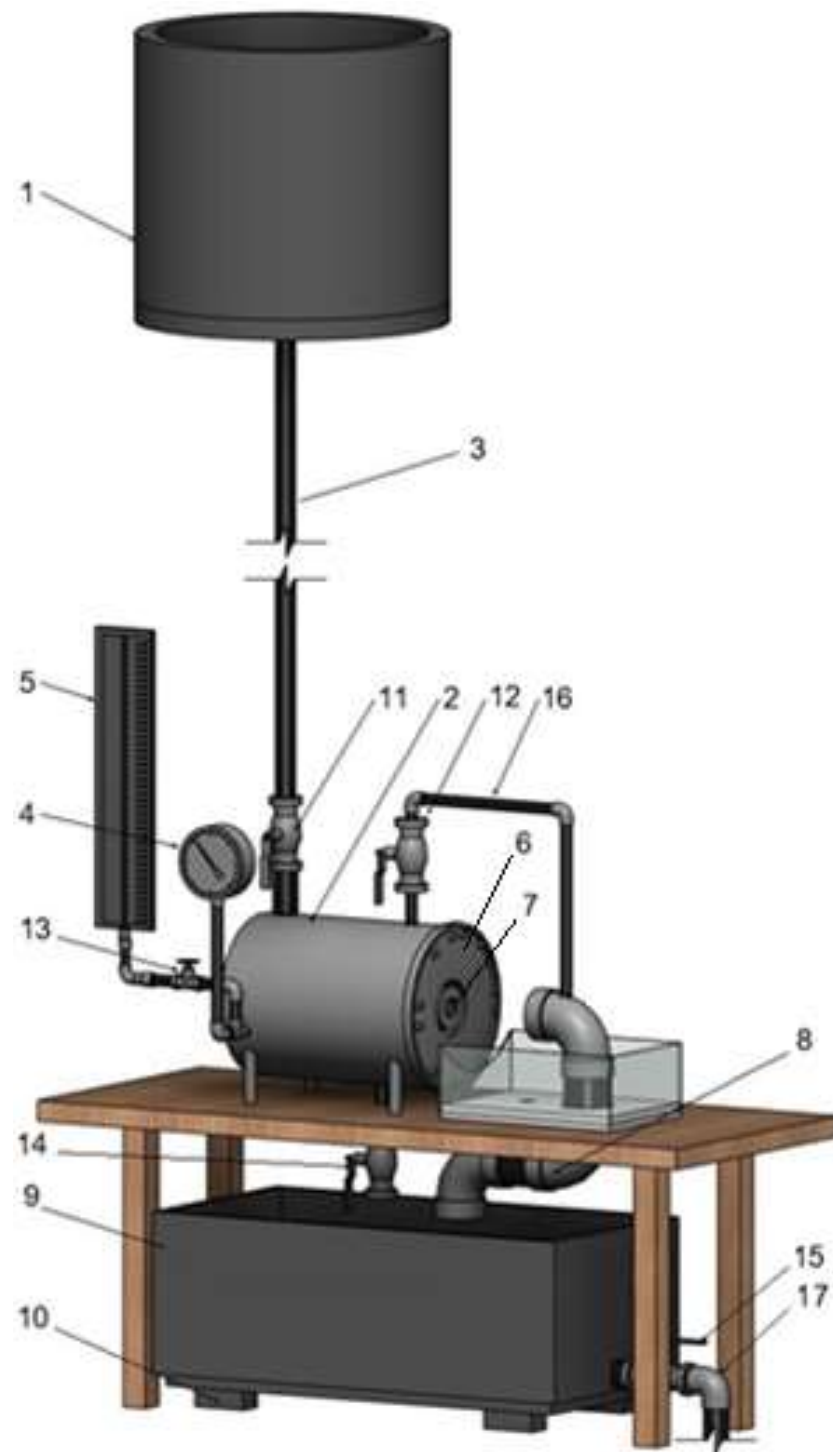


Рис. 3.1. Схема експериментального стану: 1 – резервуар з водою; 2 – напірний бак з фрагментом досліджуваного РТ всередині; 3 – з'єднувальний трубопровід; 4 – манометр; 5 – п'єзометр; 6 – передня основа бака 2; 7 – струмінь, який витікає крізь досліджувану насадку; 8 – водовідвідна труба; 9 - водоприймальний бак; 10 - електронна вага; 11-15 – вентиля; 16 – труба для випуску повітря з напірного бака 2; 17 – водовипуск [81]



Рис. 3.2. Витікання води крізь вихідну насадку, закріплену у фрагменті РТ, змонтованому на внутрішній стінці торцевої кришки напірного бака

Для відтворення умов роботи, таких як в РТ, вхідний кінець насадки закріплювали у патрубку з діаметром, рівним діаметру РТ (рис. 3.3-рис. 3.6).

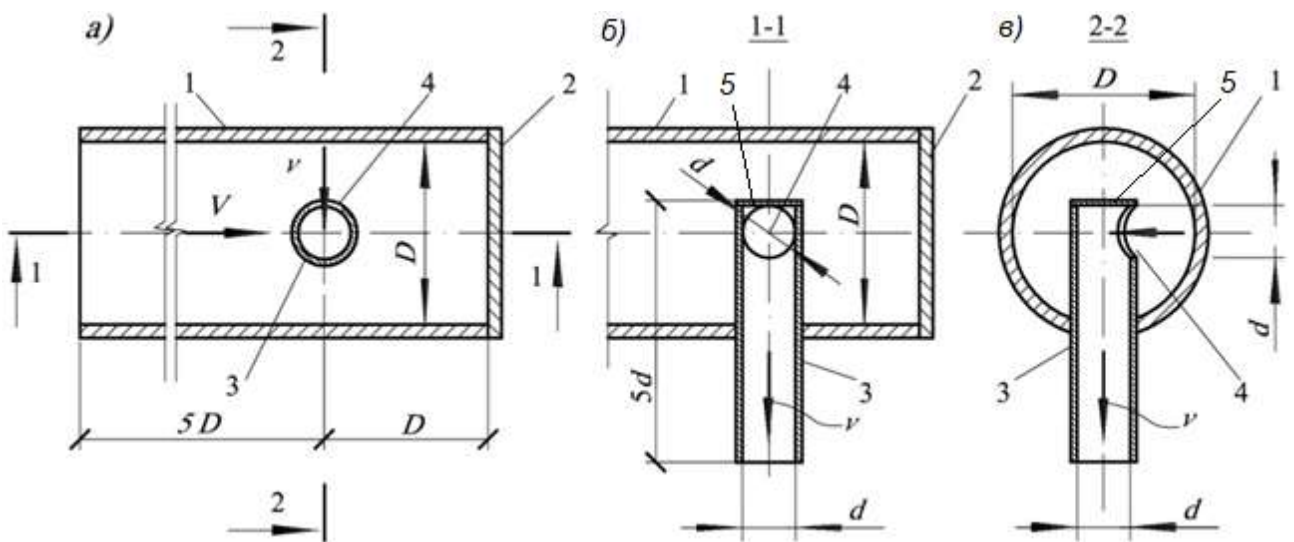


Рис. 3.3. Схема вихідної циліндричної насадки з ортогональним бічним входом струменя при $\beta = 90^\circ$, встановленої в кінці розподільного трубопроводу:
 а – поздовжній розріз РТ; б - розріз 1-1; в – розріз 2-2; 1 – стінка РТ;

2 - торцева заглушка РТ; 3 – насадка; 4 – вхідний отвір насадки; 5 – заглушка торця насадки біля вхідного отвору

Один з торців патрубку, у стінці якого закріплено насадку, заглушено (рис. 3.4,б). Таким чином відтворювали умови роботи прикінцевої вихідної насадки, розташованої на кінцевій ділянці розподільного трубопроводу.

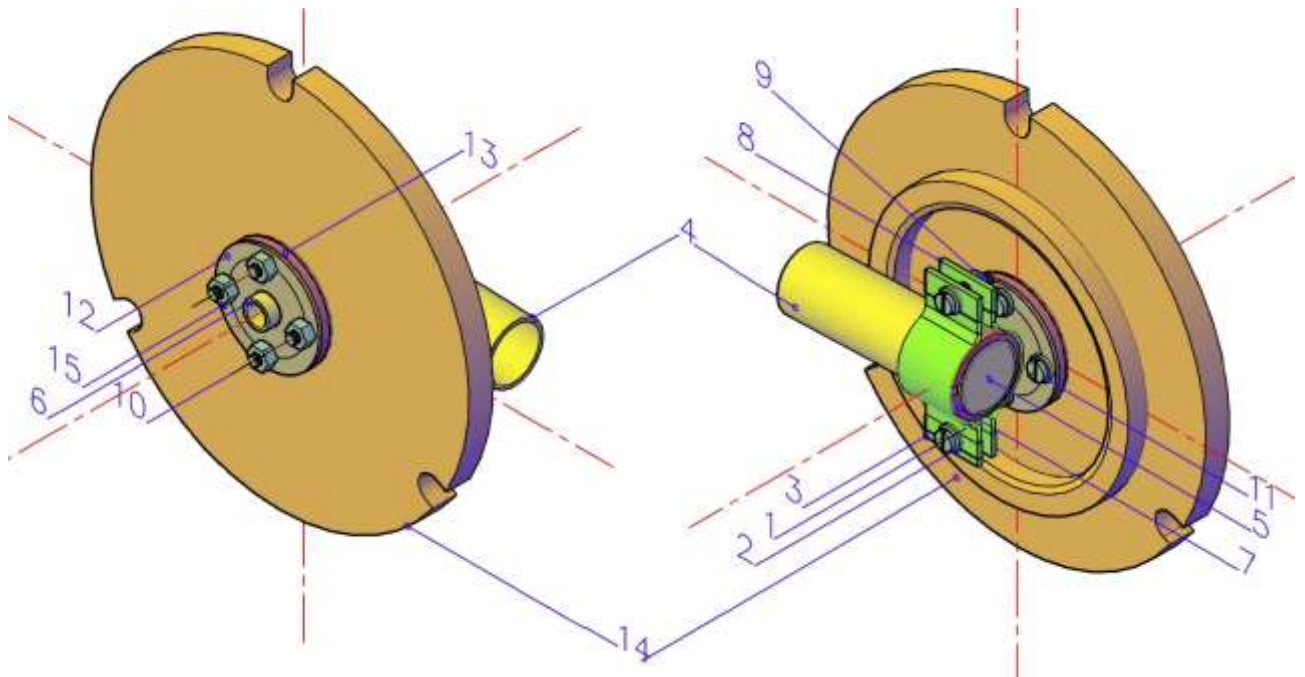


Рис. 3.4. Вузол кріплення досліджуваної насадки на торцевій кришці напірного бака: 1,10 – болти; 2, 11, 12 – шайби; 3, 8 – монтажні хомути; 4 - фрагмент РТ; 5 – заглушка на торці РТ; 6 – вихідна насадка; 7, 13 - гумові прокладки; 9, 15 – гайки; 14- торцева кришка напірного бака (вигляд на торцеву кришку з зовнішнього та внутрішнього боків) [80]

У дослідному стенді вихідний кінець насадки виведено назовні торцевої кришки напірного бака (див. рис. 3.4,а, рис. 3.5,б). На рис. 3.4 вузол кріплення відрізка РТ з насадкою у ньому показано з зовнішнього та внутрішнього боків торцевої кришки напірного бака. Для кращого розуміння схеми вузла його зображено в об'ємному вигляді. Також на рис. 3.5 наведено об'ємне зображення розрізу вузла кріплення РТ з вихідною насадкою, змонтованою у

його стінці, а на рис. 3.6 – монтажно-деталювальна схема вузла кріплення. На рис. 3.7 показано виготовлений вузол кріплення досліджуваних насадок.

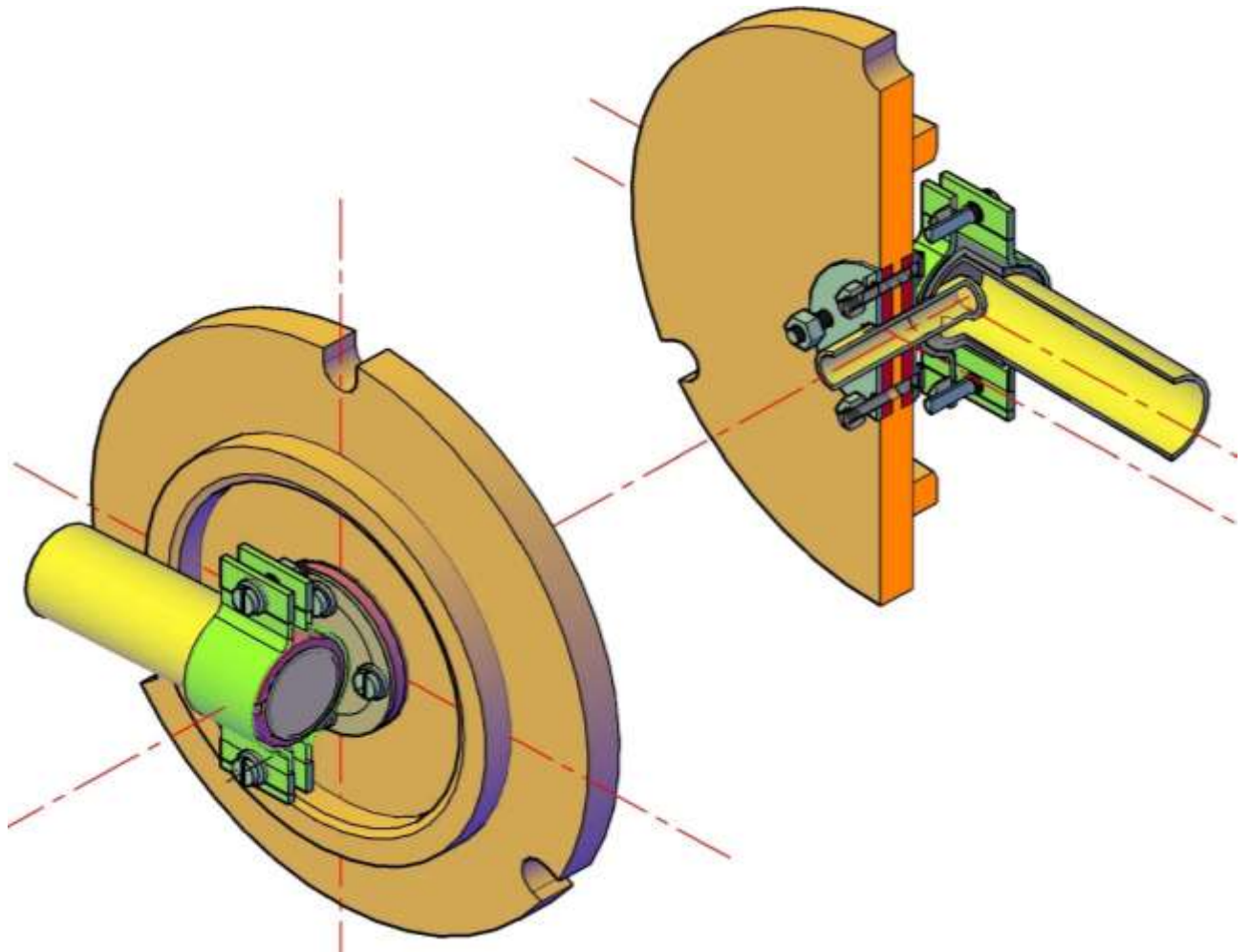


Рис. 3.5. Аксонометричний розріз вузла кріплення фрагмента РТ з досліджуваною насадкою (вигляд з внутрішнього та з зовнішнього боків) [80]

Розподільний трубопровід і досліджувані насадки виготовлено з латуні (рис. 3.7-рис. 3.9). У дослідному стенді застосовано напірні баки, наявні у лабораторії кафедри гідротехніки та водної інженерії. Об'єм напірного бака 1 (див. рис. 3.1) рівний 16 м^3 . При повному напірному баку 1 на осі досліджуваної насадки створювався напір, рівний $18,57 \text{ м}$.

Вихідні циліндричні насадки з бічним входом струменя (рис. 3.8,а), закріплювали у напірному розподільному трубопроводі з можливістю фіксованого обертання навколо їхніх поздовжніх осей (рис. 3.8,б).

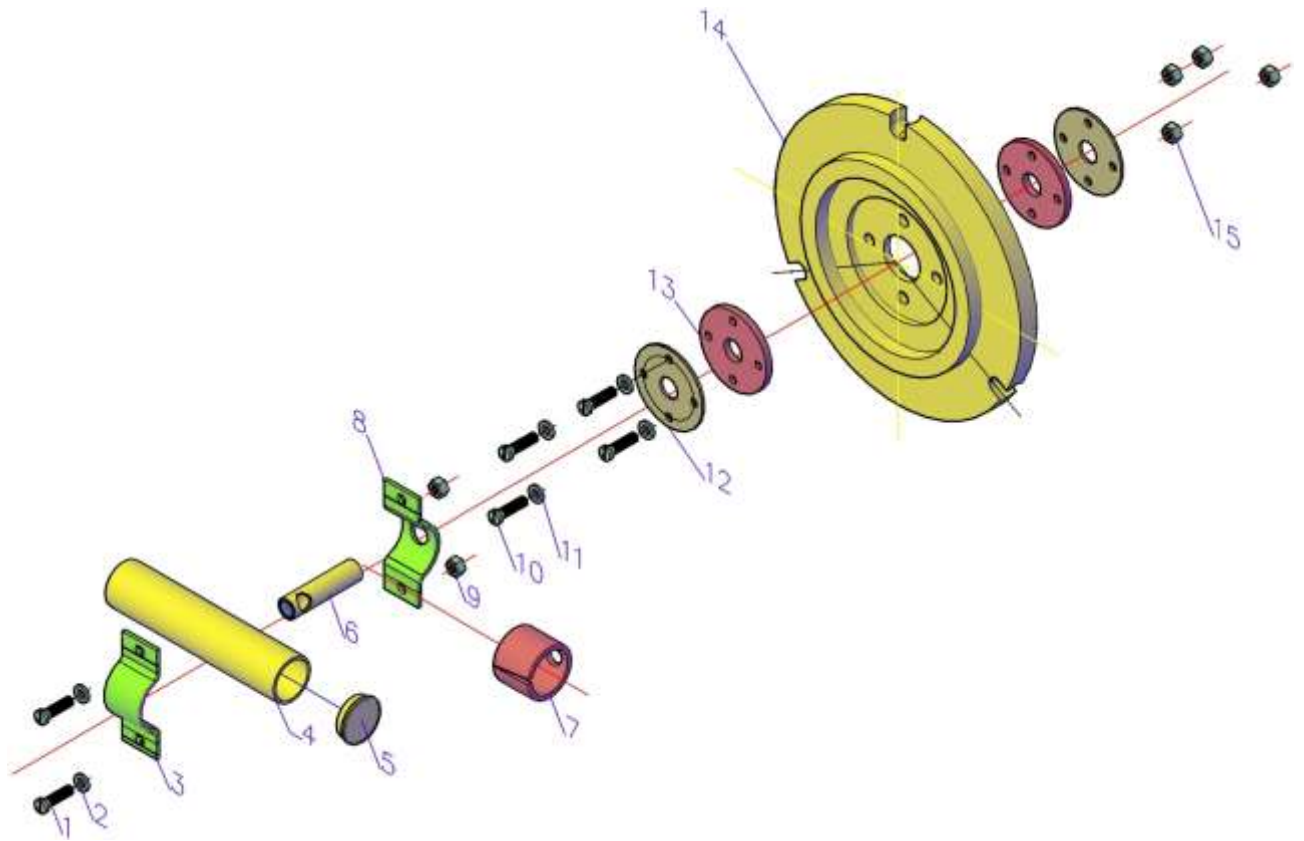


Рис. 3.6. Деталювальна схема вузла кріплення фрагмента РТ з досліджуваною насадкою: 1,10 – болти; 2, 11, 12 – шайби; 3, 8 – монтажні хомути; 4 – фрагмент РТ; 5 – заглушка на торці РТ; 6 – вихідна насадка; 7, 13 - гумові прокладки; 9, 15 – гайки; 14- торцева кришка передньої основи напірного бака [80]



Рис. 3.7. Виготовлений вузол кріплення досліджуваних насадок: 1 – кінцева ділянка РТ (відкритий торець); 2 – досліджувана насадка; 3 - пустотілий циліндр; 4 – внутрішній бік торцевої кришки напірного бака [86]

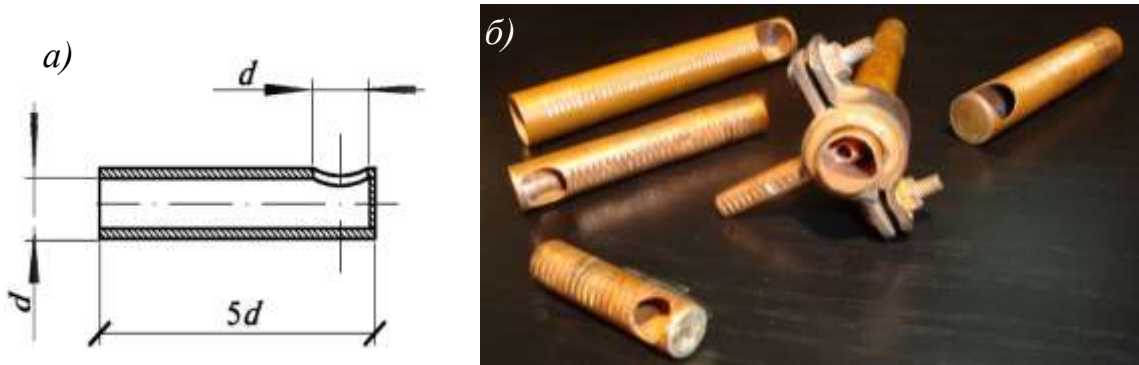


Рис. 3.8. Вихідні циліндричні насадки з ортогональним бічним входом струменя: а – схема; б – загальний вигляд виготовлених насадок (в центрі фрагмент РТ зі змонтованою в ньому насадкою)



Рис. 3.9. Виготовлені фрагменти РТ з досліджуваними насадками та шайбами для кріплення насадок на торцевій кришці напірного бака

Кутам β , між напрямком руху потоку води в розподільному трубопроводі та напрямком течії струменя, котрий від'єднується в процесі експериментів

надавали значень в межах від 0° до 360° . Досліджено насадки з кутами β , рівними 0° ; 45° ; 90° ; 135° ; 180° та діаметрами РТ і насадок, вказаними в таблиці 3.2. Схеми відліку кута β представлено на рис. 3.10.

Таблиця 3.2

Геометричні характеристики досліджених вихідних насадок

Діаметри, мм		Відношення площ поперечних перерізів вихідних насадок і РТ $(d/D)^2$
розподільних трубопроводів, D	вихідних насадок, d	
20.18	6.01	0.0887
26.01	8.99	0.119
20.18	8.02	0.158
11.28	4.83	0.183
16.13	8.08	0.251

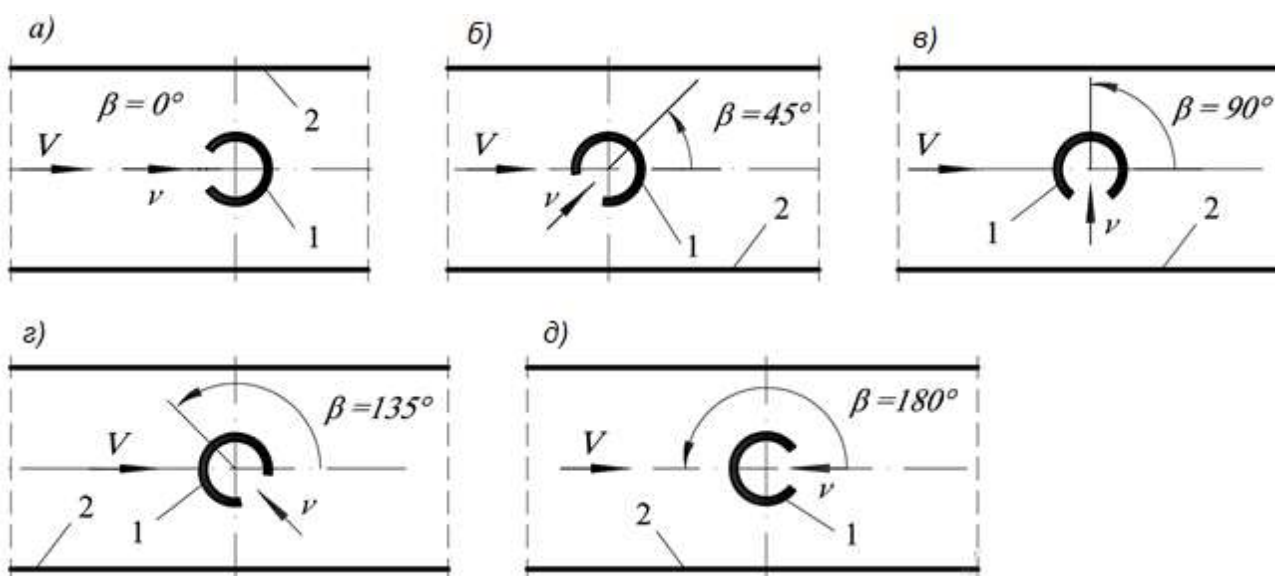


Рис. 3.10. Схеми відліку кута β між напрямком руху потоку води в розподільному трубопроводі та напрямком течії струменя, котрий від'єднується від потоку в РТ: а - 0° ; б - 45° ; в - 90° ; з - 135° ; д - 180° ;

1 – циліндрична насадка з бічним входом (поперечний розріз); 2 - стінка РТ;
 V – середня швидкість потоку в РТ; v – те саме, струменя, що входить у насадку із розподільного трубопроводу

П'ять досліджуваних фрагментів розподільних трубопроводів з закріпленими у їхніх стінках насадками (див. рис. 3.9 і табл. 3.2) виготовлені за розмірами, показаними на рис. 3.11. Довжина кожної вихідної насадки була рівна $5d$, а довжина кожного фрагменту РТ - $5D$, де d – внутрішній діаметр вихідної насадки, D - внутрішній діаметр фрагменту РТ. Відстань від осі вихідної насадки до заглушеного торця РТ рівна D , а до відкритого вхідного торця РТ – $4D$. Насадки закріплені у стінках РТ з можливістю обертання на 360° відносно своїх поздовжніх осей.

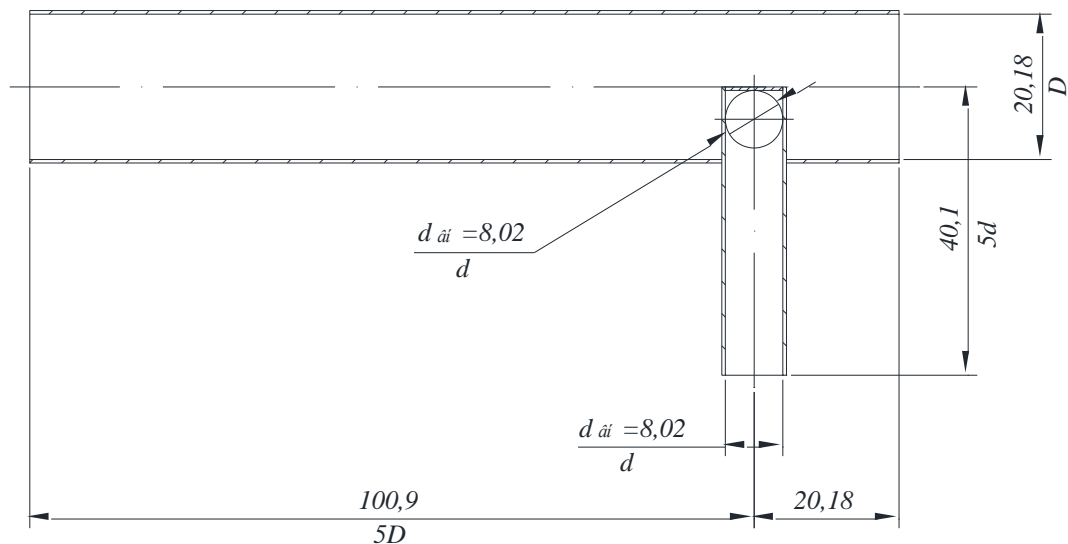


Рис. 3.11. Схема призначення геометричних розмірів досліджених фрагментів розподільних трубопроводів із закріплених у їхніх стінках вихідних циліндричних насадок з бічним входом рідини в насадку

3.4. Стенд для дослідження шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів

Для дослідження роботи напірних розподільних трубопроводів та регулювання нерівномірності роздачі води з них застосовано експериментальний стенд з гравітаційною подачею води на РТ (рис. 3.12) [7; 39]. Вода з трьох баків ємкістю кожного по $0,42 \text{ м}^3$ самопливом поступала у

напірний бачок 1 (рис. 3.13), з якого під напором, рівним 3,74 м, подавалась на досліджуваний розподільний трубопровід (див. рис. 3.12).

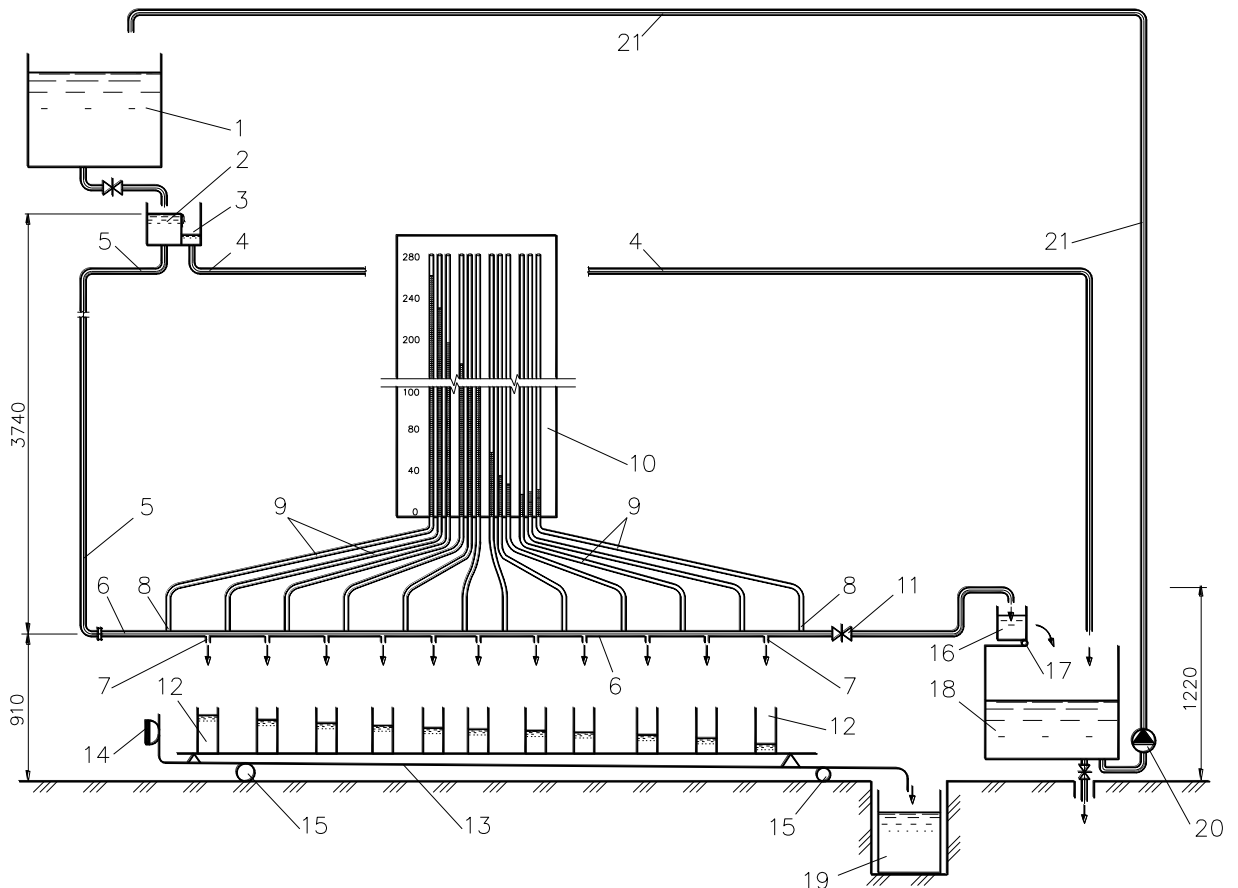


Рис. 3.12. Схема експериментального стенду: 1 – бак з водою; 2 – напірний бачок; 3 – скидний бачок; 4 – скидний трубопровід; 5 – те саме, подавальний; 6 – експериментальний розподільний трубопровід; 7 – вихідні насадки; 8 – штуцери для приєднання імпульсних трубок від п'єзометрів; 9 – імпульсні трубки; 10 – щит з п'єзометрами; 11 – вентиль; 12 – мірні посудини; 13 – рухомий лоток; 14 – ручка; 15 – опори кочення; 16 – мірний бачок; 17 – шарнір; 18 – приймальний бак; 19 – водозбірний бак; 20 – помпа; 21 – напірний трубопровід (розміри подані в мм) [7, 39]

Виготовлено розподільні трубопроводи з внутрішніми діаметрами, рівними: 11.28; 16.13; 20.18 і 26.01 мм (див. табл. 3.3; рис. 3.14). Вихідні насадки та штуцери для приєднання імпульсних ліній від п'єзометрів розміщені уздовж однієї твірної циліндричного РТ (рис. 3.15). Насадки змонтовані з можливістю поворотів від 0° до 360° відносно їхніх поздовжніх осей.

Штуцери для приєднання імпульсних ліній приварені до стінки РТ без можливості обертання.



Рис. 3.13. Баки з водою (на рівні дна центрального бака 1 закріплено напірний бачок 2 та скидний бачок 3, розміщені в одному корпусі та розділені переливною стінкою)

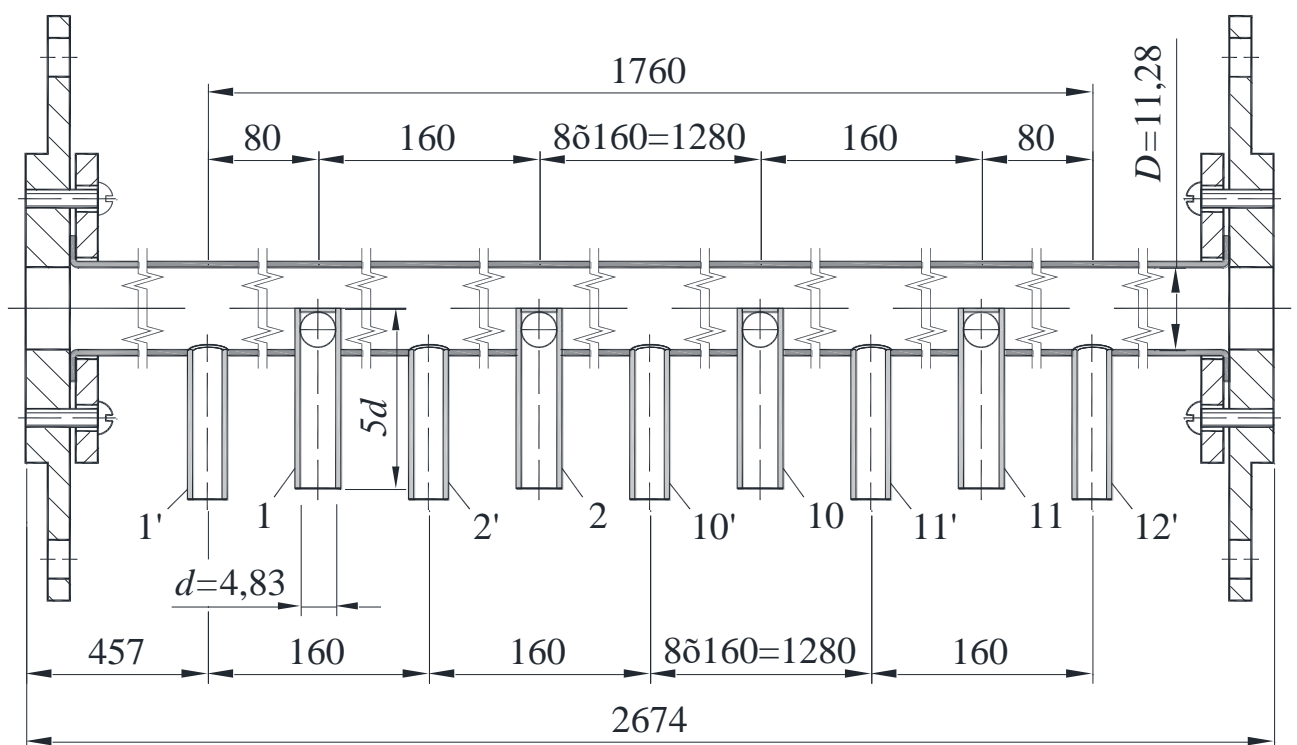


Рис. 3.14. Схема експериментального розподільного трубопроводу: 1', 2', ... 12' – штуцери для приєднання імпульсних ліній від п'єзометрів; 1, 2, ... 11 - вихідні циліндричні насадки (зображено РТ із $D = 11,28$ мм та $d = 4,83$ мм)

Таблиця 3.3

Геометричні характеристики виготовлених розподільних трубопроводів

Внутрішні діаметри, мм		$\left(\frac{d}{D}\right)^2$	Довж. перфорчастини РТ, мм	Кількість насадок на РТ n , шт	Відстань між насадками, мм	Шпаруватість РТ, $f = n\left(\frac{d}{D}\right)^2$
РТ, D	насадок, d					
20.18	6.01	0.0887		11		0,976
26.01	8.99	0.119		11		1,314
20.18	8.02	0.158	1980	11	180	1,737
11.28	4.83	0.183	1980	11	180	2,017
16.13	8.08	0.251		11		2,760



Рис. 3.15. Експериментальний розподільний трубопровід у роботі (у правому

верхньому куті зображена одинадцята, за течією води в РТ, вихідна насадка; штуцери для приєднання імпульсних ліній пронумеровані римськими цифрами; напрямок руху води в РТ зліва направо; рухомий лоток не показано)

Розподільний трубопровід сполучено з п'єзометрами, за допомогою імпульсних трубок з внутрішніми діаметрами, рівними 10 мм. Напори вимірювали п'єзометрами з точністю 0.5 мм водяного стовпа. Робочий напір на експериментальному РТ був рівним 3740 мм, коли вентиль 11 у кінці РТ перекритий (див. рис. 3.12). Напірний бачок 2, який оснащений переливною стінкою, забезпечував постійний напір на експериментальному РТ, сталу витрату рідини й запобігав пульсації напору в досліджуваному РТ.

3.5. Методика проведення дослідів

3.5.1. Встановлення значень коефіцієнта витрати насадок

Експериментально встановлювали значення коефіцієнта витрати μ вихідних циліндричних насадок з бічним ортогональним входом води в насадку, котру монтували у фрагменті розподільного трубопроводу, що його розміри котрого подано на рис. 3.11. При цьому забезпечували бажане значення кута β між векторами середньої швидкості \vec{V} основного потоку рідини в РТ і струменя \vec{v} , який від'єднується. Для кожного з п'яти значень $(d/D)^2$ відношення площ поперечних перерізів насадок і РТ, поданих в табл. 3.2, досліджувану насадку монтували при п'яти значеннях кута β , котрі по чергово вибирали і ряду значень: 0° ; 45° ; 90° ; 135° і 180° (див. табл. 3.1). Таким чином досліджено двадцять п'ять насадок при щонайменше десяти значень витрат води крізь кожну.

Застосовано резервуар 1 з об'ємом $16,7 \text{ м}^3$ (див. рис. 3.1), розташований на шостому поверсі навчального корпусу, з якого вода самопливом поступала у напірний бак 2, розміщений у лабораторії гідравліки на першому поверсі того самого будинку. Витрату води крізь насадку встановлювали об'ємним

способом. Вимірювали температуру води. Порядок обчислення коефіцієнта витрати μ насадок описано у підрозділі 3.6.

3.5.2. Нерівномірність шляхової роздачі рідини з РТ

Баки 1 (див. рис. 3.12 та рис. 3.13) заздалегідь наповнювали водопровідною водою для того, щоб остання встигла нагрітись до температури лабораторного повітря. Перед початком проведення досліду, вихідні циліндричні насадки монтували в стінці РТ з кутом β між напрямками течії основного потоку в РТ і струменів, які від'єднуються від РТ. Воду в баках 1 перемішували вимірювали, щоб усунути різницю її температуру по глибині баків. Максимально відкривши вентиль 11, розташований у кінці РТ, стежили, щоб у напірному бачку 2 з водозливною стінкою (див. рис. 3.12), підтримувався сталий рівень. Після стабілізації потоку в РТ приступали до експерименту. Об'єми води, котрі вилились крізь кожну із одинадцяти вихідних насадок, визначали об'ємним способом, за допомогою мірних посудин 12, секундоміра і ваги. У кожному досліді температуру води, котра поступила в одну з мірних посудин 12, вимірювали ртутним термометром Напір води перед першою вихідною насадкою, у проміжку між усіма одинадцятьма насадками та після одинадцятої насадки визначили за допомогою дванадцяти п'єзометрів. Циркуляцію води у дослідному стенді забезпечували побутовою відцентровою помпою "Кама-5". Знявши всі покази вимірювальних приладів, зменшували витрату води крізь РТ. Після цього приступали до другого досліду.

Витрату води, котру подавали в РТ, під час кожного з наступних дослідів зменшували від найбільшої до найменшої. Найбільшу витрату отримували при максимально можливому робочому напорі на РТ, рівному 3,74 м. Найменшою витратою була та, при якій на ділянках РТ між сусідніми вихідними насадками втрати напору були не меншими, ніж 1 мм. Методика проведення кожного досліду була однаковою.

Зробивши біля десяти дослідів при одному значенні кута β змінювали його для усіх одинадцяти вихідних насадок, вибравши значення β з ряду: 0° ; 45° ; 90° ; 135° і 180° . Так робили при кожному значенні $(d/D)^2$ відношення площ поперечних перерізів насадок і РТ

3.6. Математична обробка експериментальних даних

Розрахунки проводились на персональному комп'ютері з використанням електронних таблиць Lotus R123R3 та програми Microsoft Excell 7.0.

Витрату води, котра витікала з РТ крізь кожну окрему вихідну насадку обчислювали за формулою:

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.1)$$

де W – об'єм рідини, що надійшов у мірну посудну за час t .

Середні швидкості рідини в РТ, діаметр якого D , і у вихідних насадках з діаметрами d :

$$v_D = \frac{4Q}{\pi D^2}; \quad v_d = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad \text{м/с}. \quad (3.2)$$

Критерій Рейнольдса для потоку води в РТ з діаметрами D та струменів у вихідних насадках, внутрішні діаметри котрих d :

$$Re_D = \frac{v_D D}{\nu}; \quad Re_d = \frac{v_d d}{\nu}. \quad (3.3)$$

Кінематичну в'язкість ν води залежно від температури обчислювали за формулою [74]:

$$v = \frac{177,5 \cdot 10^{-8}}{1 + 0,0337T + 0,00022T^2}, \quad \text{м}^2/\text{с}, \quad (3.4)$$

де T – температура рідини, $^{\circ}\text{C}$.

Фактичне значення гідравлічного коефіцієнта тертя λ для ділянок РТ, розташованих між сусідніми вихідними насадками, визначали з формули Дарсі-Вайсбаха:

$$\lambda_D = \frac{\Delta h_{i-k}}{(l_{i-k}/D) \cdot (v_D^2/2g)}. \quad (3.5)$$

Зі шляховим роздаванням води з РТ її витрата в РТ уздовж потоку зменшується. Відповідно змінюються закони руху води в РТ. Якщо на початку РТ є розвинений турбулентний режим течії води, то перед останньою вихідною насадкою, за незмінного діаметра РТ, він буде ламінарним. При теоретичному розрахунку РТ за формулами (1.20) та (1.21) гідравлічний коефіцієнт тертя $\lambda_{(x)}$ на ділянках розподільного трубопроводу між сусідніми вихідними насадками, залежно від значення критерію Рейнольдса, обчислювали за формулами (3.6)-(3.9) [3, с. 266-268]. Оскільки гідравлічний розрахунок РТ ведуть ходом від останньої насадки до першої, то ділянки гідравлічного опору, йдучи проти потоку, будуть по чергово змінюватись від ламінарного режиму до ділянки квадратичного опору гідравлічно шорстких труб зони турбулентного режиму руху рідини. Отож:

для ламінарного режиму течії при $Re_{(x_i)} \leq 2320$ застосовували формулу

Пуазейля:

$$\lambda_{(x_i)} = \frac{64}{Re_{(x_i)}}; \quad (3.6)$$

для ділянки гідравлічно гладких труб зони турбулентного режиму руху

води, котра реалізується при $Re_{(x_i)} \frac{A_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} < 10$, застосовували формулу

Блазіуса:

$$\lambda_{(x_i)} = \frac{0.3164}{Re_{(x_i)}^{0.25}}; \quad (3.7)$$

для ділянки доквадратичного опору гідравлічно шорстких труб зони турбулентного режиму руху рідини, котра виникає при $10 \leq Re_{(x_i)} \frac{A_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} \leq 500$,

для обчислення значення λ користувались формулою Альтшуля А. Д.:

$$\lambda_{(x_i)} = 0.11 \left[\frac{A_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} + \frac{68}{Re_{(x_i)}} \right]^{0.25}; \quad (3.8)$$

для ділянки квадратичного опору гідравлічно шорстких труб зони турбулентного режиму руху рідини, котра настає при $Re_{(x_i)} \frac{A_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} > 500$,

послугувались формулою Шифринсона:

$$\lambda_{(x_i)} = 0.11 \left(\frac{A_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} \right)^{0.25}. \quad (3.9)$$

Значення критерію Рейнольдса для основного потоку в розподільному трубопроводі встановлювали за формулою

$$Re_{(x_i)} = \frac{Q_{(x_i)} D_{(x_i)}}{\Omega_{(x_i)} \nu_{(x_i)}}, \quad (3.10)$$

де $\nu_{(x_i)}$ – кінематична в'язкість води.

Середня швидкість $v_{(x)}$ витікання струменів крізь вихідну насадку:

$$v_{(x)} = \varphi \sqrt{2gH_{(x)}} = aH_{(x)}^{1/2}, \quad (3.11)$$

де $a = \varphi \sqrt{2g} = \text{const}$, $m^{0.5}/c$;

φ – коефіцієнт швидкості.

Кути $\beta_{(x_i)}$ й $\psi_{(x_i)}$ відраховували проти годинникової стрілки так, як це показано на рис. 4.6.

Коефіцієнт витрати вихідної насадки $\mu_{(x_i)} = f(Re_{or_{(x_i)}}, l/d)$, де l – довжина насадки; d – діаметр насадки; $Re_{or_{(x_i)}}$ – критерій Рейнольдса для струменя, котрий витікає крізь насадку, улаштовану у перерізі x_i ПТ, $Re_{or_{(x_i)}} = f(H_{(x_i)})$. Наприклад, для циліндричної вихідної насадки при $Fr_{(x_i)} > 10$, $We_{(x_i)} > 200$ та досконалому повному стисненні й гострих вхідних кромках значення коефіцієнта $\mu_{(x_i)}$ можна обчислити за емпіричними формулами, отриманими за даними З. І. Геллера, Ю. А. Скобельцина [82, с. 68-71]. Зокрема, для співвідношень $l/d = 1 \dots 1,5$, $Re_{th_{(x_i)}} = 10^3 \dots 10^5$, або $l/d = 2 \dots 5$, $Re_{th_{(x_i)}} = 50 \dots 15 \cdot 10^4$, або $l/d = 10 \dots 50$, $Re_{th_{(x_i)}} = 80 \dots 15 \cdot 10^4$:

$$\mu_{(x_i)} = \frac{l}{1.23 + \frac{58 \cdot l}{Re_{th_{(x_i)}} d}}, \quad (3.12)$$

де $Re_{th_{(x_i)}} = \sqrt{2gH_{(x_i)}} \cdot d / \nu$ – критерій Рейнольдса для від'єднуваного струменя при “теоретичній швидкості витікання” $\sqrt{2gH_{(x_i)}}$ крізь насадку [82, с. 61].

Шпаруватість розподільного трубопроводу обчислювали за формулою

$$f = \frac{n\omega}{\Omega} \quad (3.13)$$

де ω – площа поперечного перерізу вихідної насадки, $\omega = \pi d^2/4$;

d – внутрішній діаметр вихідної насадки;

n – кількість вихідних насадок на розподільному трубопроводі;

Ω – площа поперечного перерізу експериментального РТ, $\Omega = \pi D^2/4$;

D – внутрішній діаметр РТ.

Ступінь нерівномірності роздачі рідини вздовж РТ:

$$\eta = \frac{q_n}{q_k}, \quad (3.14)$$

де q_n , q_k – значення витрати води відповідно крізь першу й останню на РТ вихідні насадки.

Будували графічні залежності: $\mu = f(Re_d, \beta)$; $\mu = f[(d/D)^2, \beta]$; $H_i/H_n = f_1(x/L)$; $q_i/q_n = f_2(x/L)$, де μ - коефіцієнт витрати рідини крізь вихідну насадку; H_n – п'езометричний напір на початку РТ; q_i – витрата рідини крізь першу вихідну насадку; L – довжина перфорованої частини РТ; x – відстань від початку РТ до i -го штуцера або до i -ї вихідної насадки; x/L – відносна довжина перфорованої частини РТ.

3.7. Оцінка точності вимірів

Коефіцієнт μ витрати рідини крізь вихідну насадку визначали непрямим способом із формули $Q = \mu\omega\sqrt{2gH}$ в яку підставляли інші вимірювані в лабораторії величини:

$$\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2gH}} = \frac{4 \cdot W}{t \cdot \pi d^2 \sqrt{2gH}} = f(W, t, d, H), \quad (3.15)$$

де Q – витрата води крізь вихідну насадку, обчислювалась за (3.1), $м^3/с$;

ω - площа поперечного перерізу вихідної насадки, $\omega = \pi d^2/4$, $м^2$;

d - внутрішній діаметр вихідної насадки, $м$;

t - час, упродовж якого наповнюється об'єм W при витіканні води з вихідної насадки, $с$.

Складова відносної похибки з вимірювання цих аргументів, наприклад, значення напору H у сумарній відносній похибці встановлення значення коефіцієнта μ , знаходиться з виразу [83, с. 154-156]

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{\partial\mu}{\partial H} \cdot \frac{\Delta H}{\mu} = \frac{\partial f(W,t,d,H)}{\partial H} \cdot \frac{\Delta H}{f(W,t,d,H)}. \quad (3.16)$$

Сумарна відносна похибка визначення μ

$$\frac{\Delta\mu_{\Sigma}}{\mu} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial\mu}{\partial W} \frac{\Delta W}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\partial\mu}{\partial t} \frac{\Delta t}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\partial\mu}{\partial d} \frac{\Delta d}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\partial\mu}{\partial H} \frac{\Delta H}{\mu}\right)^2}. \quad (3.17)$$

Взявши відповідні частинні диференціали для кожного зі складових множників функції $\mu = \frac{4 \cdot W}{t \cdot \pi d^2 \sqrt{2gH}}$ (3.15), отримуємо вираз:

$$\frac{\Delta\mu_{\Sigma}}{\mu} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{2H}\right)^2}, \quad (3.18)$$

де t - час, упродовж якого наповнюється об'єм W при витіканні води з вихідної насадки, $с$.

В дослідах з метою підвищення точності вимірювань тривалість t наповнення об'єму W у водоприймальному баку 9 (див. рис. 3.1) брали не меншою ніж 60 $с$.

За найменшої середньої швидкості $v = 2,238 \text{ м/с}$ ($Re = 1081$) витікання води крізь найменшу вихідну насадку при $d = 4,83 \text{ мм}$ за час $t = 120 \text{ с}$ у водоприймальний бак 9 поступав об'єм води $W = 0,00492 \text{ м}^3$. При температурі $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ маса води m у цьому об'ємі рівна $4,92 \text{ кг}$. Значення об'єму W встановлювали опосередковано через масу води, котра наповнювала цей об'єм. Маса води встановлювали за допомогою електронної ваги 10 (див. рис. 3.1) з декларованою ціною поділки $\Delta m = 10 \text{ г} = 0,01 \text{ кг}$. Отож, при опосередкованому вимірюванні об'єму W через масу, відносна похибка обчислювання об'єму W рівна

$$\Delta W/W = 0,01/4,92 = 0,00203.$$

Час t наповнення об'єму W при витіканні води з вихідної насадки відлічувався секундоміром з абсолютною похибкою $\Delta t = 0,2 \text{ с}$. При наповнюванні об'єму $W = 0,00492 \text{ м}^3$ упродовж 120 с , при $d = 4,83 \text{ мм}$ за найменшої середньої швидкості витікання води $v = 2,238 \text{ м/с}$, отримано відносну похибку вимірювання часу:

$$\Delta t/t = 0,2/120 = 0,00167.$$

Внутрішній діаметр d вихідних насадок встановлювали об'ємним способом. Цю процедуру робили перед виготовленням експериментального розподільного трубопроводу. Трубу довжиною L , поставлену вертикально, наповнювали водою. Воду, отриману при опорожненні труби, зважували, а за густиною води ρ встановлювали її об'єм V . У формулах (3.15)-(3.18) літерою W позначували об'єм води, котрий натікав за час t у мірні посудини. Об'єм води, котрий заповнював заготовку труби з якої виготовляли вихідні насадки, у формулі (3.19) позначили літерою V . За значенням вимірюваного об'єму V із формули $V = (\pi d^2/4)L$ обчислювали діаметр труби: $d = (4V/\pi L)^{1/2}$. Відносна похибка визначення діаметра d труби, котру використали для виготовлення вихідних насадок:

$$\Delta d/d = \pm \sqrt{(\Delta V_d/2V_d)^2 + (\Delta L/2L_d)^2}. \quad (3.19)$$

Для найменшого внутрішнього діаметра d досліджуваних вихідних насадок (див. табл. 3.2) похибка встановлення його значення є найбільшою. Це пояснюється тим, що похибка ΔV вимірювання об'єму рідини за допомогою мензурки є однаковою для усіх труб з внутрішніми діаметрами d , вказаними в табл. 3.2. Проте об'єми V наповнення водою труб зростають зі збільшенням їхнього внутрішнього діаметра. Оскільки у формулі (3.19) постійне значення похибки ΔV підставляють у чисельник, а значення вимірюваного об'єму V у знаменник, то зі збільшенням внутрішнього діаметра вихідних насадок d значення дроби $(\Delta V_d/2V_d)^2$ істотно зменшуватиметься тому, що підноситься до другої степені. Тому ми обчислювали похибку визначення діаметра d для найневигіднішого випадку, коли його значення найменше з ряду $d = 4.83; 6.01; 8.02; 8.08; 8.99$ мм, застосованих у дослідженнях вихідних насадок (див. табл. 3.2).

Похибка визначення об'єму V води, що наповнювала відрізок труби $d = 4.83$ мм (не плутати з об'ємом W наповнення водоприймального бака 9 (див. рис. 3.1) при витіканні води крізь виготовлену водоприймальну насадку), використаної для виготовлення вихідних насадок, при її довжині $L = 1613$ мм, становить:

$$\Delta d/d = \pm \sqrt{(10/2 \cdot 3600)^2 + (0,5/2 \cdot 1613)^2} = \pm 0,000161.$$

де розмірність вимірюваних величин представлено в мм.

Напори H води на осі досліджуваних вихідних насадок, які були менші, ніж 2,1 м, вимірювали п'єзометром, а більші – манометром. За найменшої середньої швидкості $v = 2,238$ м/с ($Re_d = 1081$) витікання води крізь вихідну насадку з діаметром $d = 4.83$ мм напір H на п'єзометрі був рівним 74 мм = 0,074 м. Шкала лінійки біля п'єзометра мала ціну поділки, рівну 1 мм. Це забезпечувало візуальне зняття показів напору H з точністю, рівною половині

ціни поділки, тобто $\Delta H = 0,5 \text{ мм} = 0,0005 \text{ м}$. За цих даних відносна похибка визначення напору на осі вихідної насадки рівна:

$$\Delta H/H = 0,0005/0,074 = 0,00676.$$

Сумарну відносну похибку визначення коефіцієнта витрати вихідної циліндричної насадки з бічним входом рідини обчислювали за виразом (3.18) підставивши в нього числові значення $\Delta W/W$, $\Delta t/t$, $\Delta d/d$ та $\Delta H/H$:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \mu_{\Sigma}}{\mu} &= \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{2H}\right)^2} = \\ &\pm \sqrt{0,00203^2 + 0,00167^2 + 0,000161^2 + 0,00676^2} = 0,0071 = 0,71 \%. \end{aligned}$$

Сумарна відносна похибка $\Delta \mu_{\Sigma}/\mu$ визначення на застосованому експериментальному стенді коефіцієнта витрати вихідних насадок для найневигоднішого випадку рівна 0,71 % і значно менша, ніж допустимі для інженерних розрахунків похибки, котрі не повинні перевершувати 10 %.

3.8. Підсумок до розділу 3

Запроектовано та виготовлено експериментальний стенд для встановлення значень коефіцієнта витрати вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до їхніх поздовжніх осей, входом струменя в насадку та стенд для дослідження шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів.

Сумарна відносна похибка визначення коефіцієнта витрати вихідних циліндричних насадок з бічним входом струменя на застосованому експериментальному стенді для найневигоднішого випадку, з найменшим значенням внутрішнього діаметра насадки, рівна 0,71 % і не перевищує допустимої для інженерних розрахунків похибки, котра обмежується десятьма процентами.

Розділ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХОВОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗДАЧІ РІДИНИ З НАПІРНОГО РТ

4.1. Коефіцієнт витрати вихідних циліндричних насадок з бічним входом струменя залежно від впливу різних факторів

4.1.1. Інтегральні графічні залежності

Кожну вихідну насадку, з ряду п'яти різних значень відношень $(d/D)^2 = 0.0887; 0.119; 0.158; 0.183$ і 0.250 (див. табл. 3.1 і табл. 3.2) площ поперечних перерізів насадки і розподільного трубопроводу, досліджено при п'яти різних значеннях кута $\beta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ і 180° між напрямками течії основного потоку води всередині розподільного трубопроводу та струменя, котрий від'єднується від РТ. Отримано графічні залежності коефіцієнта μ витрати вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до осі насадки, входом струменя в насадку залежно від значення критерію Рейнольдса Re_d , кута відведення струменя β та відношень $(d/D)^2$.

На рис. 3.1-рис. 3.5 подано залежності $\mu = f(Re, \beta)$ відповідно для $(d/D)^2 = 0.0887; 0.119; 0.158; 0.183$ і 0.250 . Значення коефіцієнта витрати вихідних насадок з бічним входом струменя μ істотно залежить від критерію Рейнольдса Re_d , кута відведення струменя β та відношень $(d/D)^2$.

Характер впливу геометричних характеристик β і $(d/D)^2$, та критерію Рейнольдса Re_d на значення коефіцієнта μ описано у пунктах 4.1.2-4.1.4.

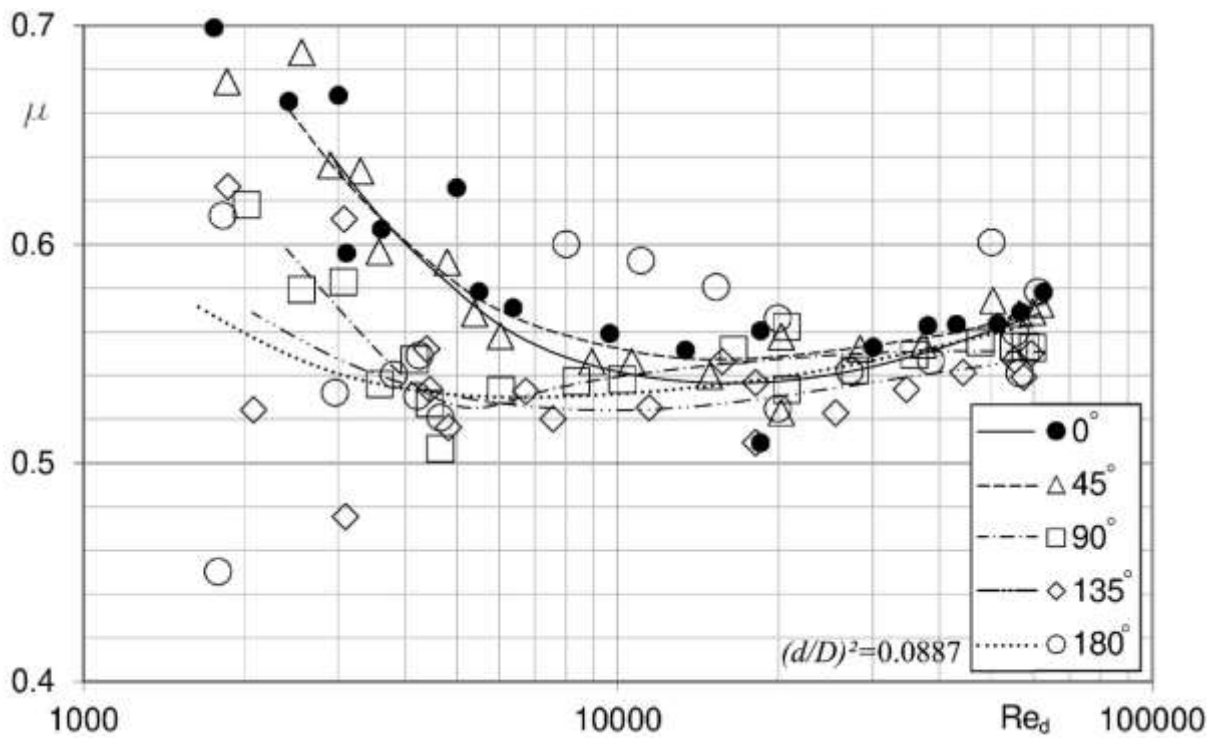


Рис. 4.1. Залежність $\mu = f(Re, \beta)$ для вихідної насадки з бічним ортогональним до її осі входом струменя при $(d/D)^2 = 0.0887$ за різних значень кута β ($Re_d = vd/\nu$ обчислено для струменя води у насадці)

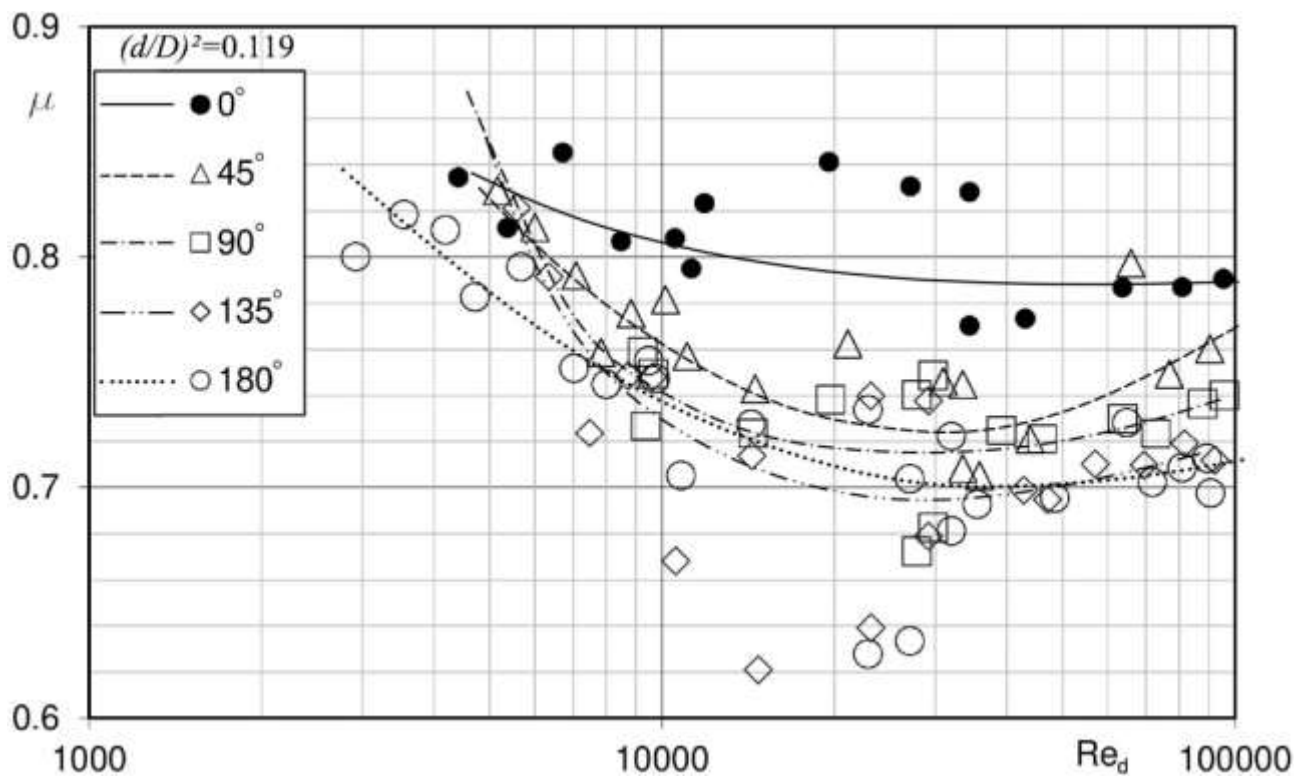


Рис. 4.2. Залежність $\mu = f(Re, \beta)$ для насадки $(d/D)^2 = 0.119$ за різних значень кута β ($Re_d = vd/\nu$ обчислено для струменя води у насадці)

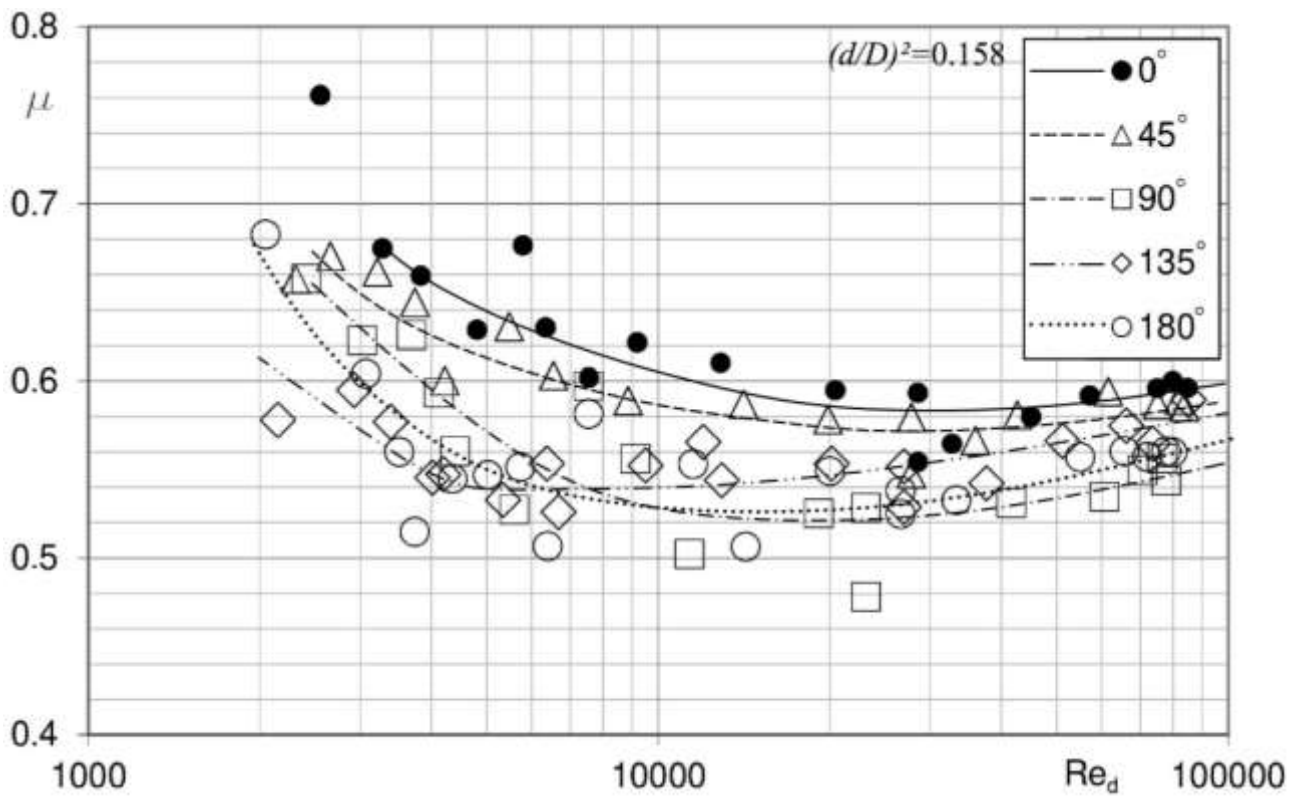


Рис. 4.3. Залежність $\mu = f(Re, \beta)$ для насадки з $(d/D)^2 = 0.158$ за різних значень кута β ($Re_d = vd/\nu$ обчислено для струменя води у насадці)

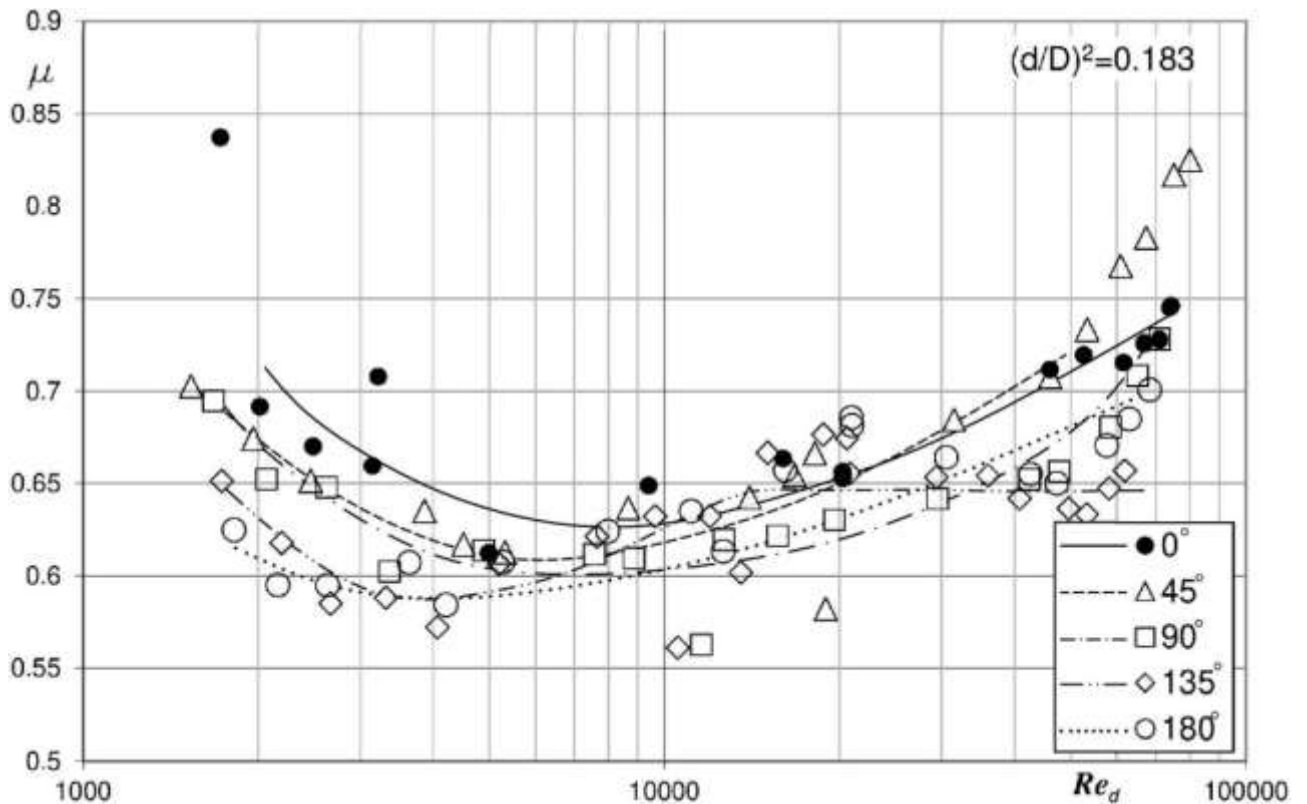


Рис. 4.4. Залежність $\mu = f(Re, \beta)$ для насадки з $(d/D)^2 = 0.183$ за різних значень кута β ($Re_d = vd/\nu$ обчислено для струменя води у насадці)

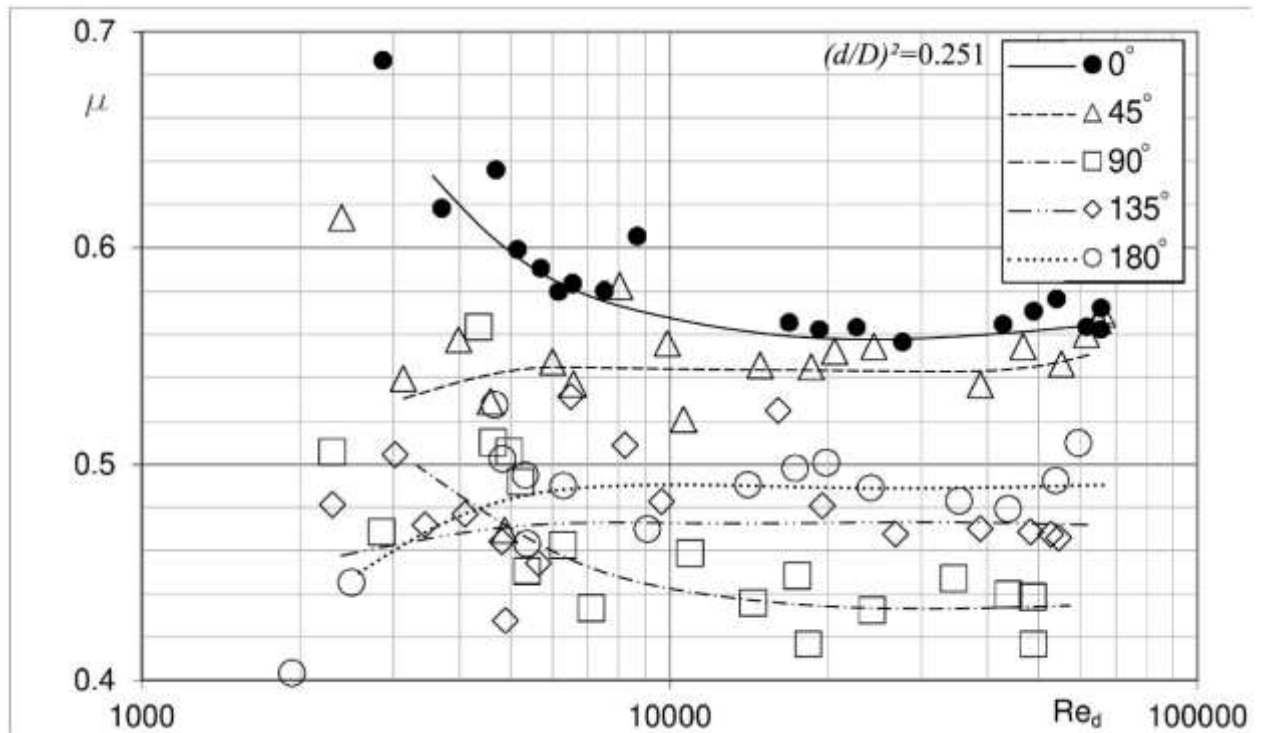


Рис. 4.5. Залежність $\mu = f(Re, \beta)$ для вихідної циліндричної насадки з бічним ортогональним до її осі входом струменя при $(d/D)^2 = 0.251$ за різних значень кута β (критерій Рейнольдса $Re_d = vd/\nu$ обчислено для струменя води у насадці)

4.1.2. Кут відведення струменя від основного потоку в РТ

Залежності $\mu = f[(d/D)^2, \beta, Re]$ коефіцієнта витрати циліндричної насадки з бічним ортогональним до її осі входом струменя мають подібну поведінку в дослідженому діапазоні критерію Рейнольдса, котре змінювали від 10^3 до $100 \cdot 10^3$ (див. рис. 4.1-рис. 4.5). При усіх п'яти досліджених відношеннях $(d/D)^2$ найвище значення коефіцієнта μ і, відповідно, найбільшу пропускну здатність $Q = \mu \omega \sqrt{2gH}$ отримано для насадок, змонтованих так, що кут β від'єднання струменя від напірного розподільного трубопроводу був рівним 0° (рис. 4.6).

При збільшенні кута β від 0° до 135° значення коефіцієнта витрати μ вихідної насадки з $(d/D)^2 = 0,119$ зменшувалось від 0,800 до 0,697.

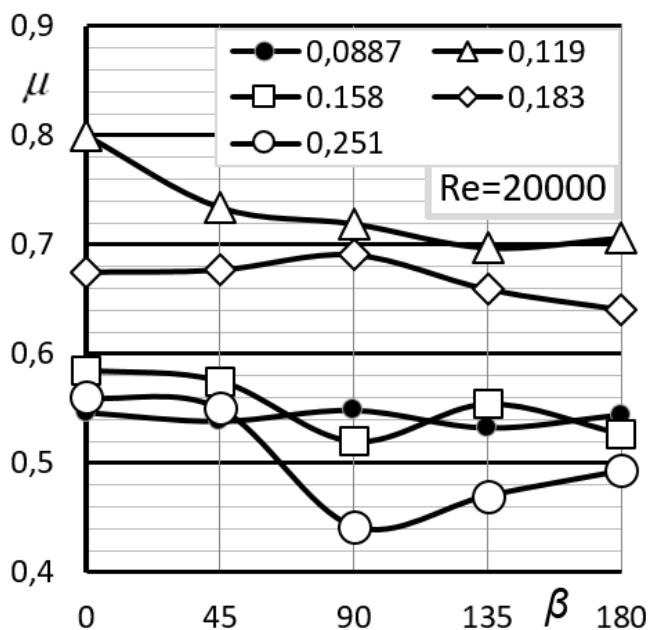


Рис. 4.6. Залежність коефіцієнта μ витрати вихідних насадок з бічним, ортогональним до їх осей, підведенням струменя від кута β та від відношення площ поперечних перерізів $(d/D)^2$ насадки та РТ для $Re_d = 20000$

Найменше значення коефіцієнта витрати μ і, відповідно, найменшу пропускну здатність вихідних насадок з $(d/D)^2 = 0,158$ та $0,251$ отримано при куті $\beta = 90^\circ$ (див. рис. 4.6). Пояснюється це тим, що при $\beta = 90^\circ$ відстань від стінки РТ до вхідного отвору вихідної насадки є найкоротшою (див. рис. 3.10,в). У стисненому проміжку між стінкою РТ і вхідним отвором вихідної насадки середня швидкість основного потоку в РТ вища, ніж перед і після вихідної насадки. Згідно з рівнянням Бернуллі у перерізі потоку з більшою швидкістю кінетична енергія потоку зростає, а потенційна енергія тиску спадає. Тому тиск у проміжку між стінкою РТ і вхідним отвором вихідної насадки є меншим, ніж тиск всередині вихідної насадки. Від'єднаний струмінь входить у вихідну насадку, у котрій тиск вищий, ніж в основному потоці в РТ. Таким

чином відгалужуваній струмінь переборює опір зустрічно направленої сили тиску.

Окрім того при $\beta = 90^\circ$ струмінь, який від'єднується, чотири рази змінює напрямок свого руху на 90° :

- а) пливе уздовж осі РТ;
- б) повертає на 90° вбік до стінки РТ;
- в) пливе уздовж стінки паралельно його осі РТ;
- г) повертає на 90° у напрямку до вхідного отвору вихідної насадки;

д) увійшовши у вихідну насадку повертає на 90° і пливе уздовж її осі, нормально до площини у котрій пливув до входу у вихідну насадку (див. рис. 3.10,в).

Чотирикратне змінювання напрямку течії спричинює додаткові гідравлічні втрати енергії струменя, котрий відгалужується, чим зумовлює додаткове збільшення значення коефіцієнта μ витрати вихідної насадки.

Коефіцієнт витрати μ насадки з $(d/D)^2 = 0,251$ зменшувався від 0,560 до 0,442 при зростанні кута β від 0° до 90° . Однак за подальшого збільшення кута β коефіцієнт витрати μ зростає і досяг значення 0,493 при $\beta = 180^\circ$ (див. рис. 4.6). Збільшення кута β від 90° до 180° супроводжується зменшенням середньої швидкості основного потоку в РТ, котрий розширюється (на ділянці між серединою насадки до її задньої, за потоком, частини) омиваючи бічні стінки циліндричної вихідної насадки (див. рис. 3.10,г,д). Відповідно зростає тиск в РТ. Він досягає найбільшого значення на задній стінці вихідної насадки (у створі її вхідного отвору при $\beta = 180^\circ$). Цей тиск підпирає струмінь у вхідний отвір вихідної насадки.

Струмінь, який відгалужується від РТ, при $\beta = 180^\circ$ робить на один поворот більше, ніж при $\beta = 90^\circ$. Проте, для розглядуваного випадку з $(d/D)^2 = 0,251$, при $\beta = 180^\circ$ значення коефіцієнта витрати μ менше, ніж при

$\beta = 90^\circ$. Це дає підставу вважати, що на значення коефіцієнта витрати μ істотніше впливає зростання тиску уздовж бічної поверхні циліндричної вихідної насадки, аніж деформація струменя, котрий від'єднується.

Відносну різницю ψ значень коефіцієнта μ витрати вихідних насадок при кутах $\beta = 0^\circ$ та $\beta = 90^\circ$ обчислювали за формулою

$$\psi = \frac{\mu_{0^\circ} - \mu_{90^\circ}}{\mu_{0^\circ}} 100^\circ, \quad (4.1)$$

де μ_{0° - коефіцієнт витрати вихідної насадки, кут β для котрої рівний 0° ;

μ_{90° - те саме, $\beta = 90^\circ$.

Значення відносної різниці ψ коефіцієнта μ при кутах $\beta = 0^\circ$ і $\beta = 90^\circ$ для різних значень відношення $(d/D)^2$ при $Re_d = 10^4$ наведено у табл. 4.1, а при $Re_d = 2 \cdot 10^4$ - в табл. 4.2.

Таблиця 4.1

Відносне змінювання ψ коефіцієнта μ при $Re_d = 10^4$ для кутів $\beta = 0^\circ$ і $\beta = 90^\circ$ при різних значеннях відношення $(d/D)^2$

Відношення площ поперечних перерізів насадок і РТ, $(d/D)^2$	Коефіцієнти μ витрати насадок при кутах β		Відносна зміна ψ коефіцієнта μ , %
	0°	90°	
0.0887	0.552	0.540	2.17
0.119	0.811	0.738	9.00
0.158	0.605	0.529	12.6
0.183	0.634	0.606	4,42
0.251	0.570	0.444	22.1

Відносне змінювання ψ коефіцієнта μ при $Re_d = 2 \cdot 10^4$ для кутів $\beta = 0^\circ$ і $\beta = 90^\circ$ при різних значеннях відношення $(d/D)^2$

Відношення площ поперечних перерізів насадок і РТ, $(d/D)^2$	Коефіцієнти μ витрати насадок при кутах β		Відносна зміна ψ коефіцієнта μ , %
	0°	90°	
0.0887	0,541	0,530	2,03
0.119	0,794	0,697	12,2
0.158	0,585	0,521	10,9
0.183	0,654	0,619	5,35
0.251	0,558	0,434	22,2

Значення коефіцієнта μ витрати вихідної циліндричної насадки з бічним, ортогональним до її поздовжньої осі, входом струменя практично однакові в межах критерію Рейнольдса $Re_d = (1...2) \cdot 10^4$. Найбільше відносне змінювання ψ значення коефіцієнта μ виявлено для насадки з $(d/D)^2 = 0,251$. Повертанням цієї насадки з вихідного положення $\beta = 0^\circ$ до $\beta = 90^\circ$ отримано $\psi = 22,1$ % при $Re_d = 10^4$ (див. табл. 4.1) та 22,2 % при $Re_d = 2 \cdot 10^4$ (див. табл. 4.2).

Такий ефект отримано на одиночній насадці. На розподільному трубопроводі встановлюють від кількох штук до декількох десятків насадок. Варто очікувати, що при одночасній роботі низки насадок, встановлених на РТ, ефект регулювання роздачі рідини з РТ, за рахунок змінювання кута β обертанням насадок навколо їхніх поздовжніх осей, істотно посилиться. Отож, змінюванням уздовж поздовжньої осі РТ значень кутів β між напрямком течії потоку води в розподільному трубопроводі та напрямком плинущих струменів, котрі від'єднується від нього, можна досягти вагомому регулювання

нерівномірності шляхової роздачі рідини з РТ, зокрема зменшення нерівномірності останньої.

4.1.3. Ступінь стиснення струменя при вході у вихідну насадку

Відношення $(d/D)^2$ площ поперечного перерізу вихідної насадки та розподільного трубопроводу виражає ступінь стиснення струменя, котрий входить з РТ у вихідну насадку. У дослідженому діапазоні значень $0,0887 \leq (d/D)^2 \leq 0,251$ залежність $\mu = f(d/D)^2$ має один абсолютний максимум і по одному локальному максимуму та мінімуму (рис. 4.7). Нам не вдалося виявити причину “двогорбої” форми функції $\mu = f(d/D)^2$.

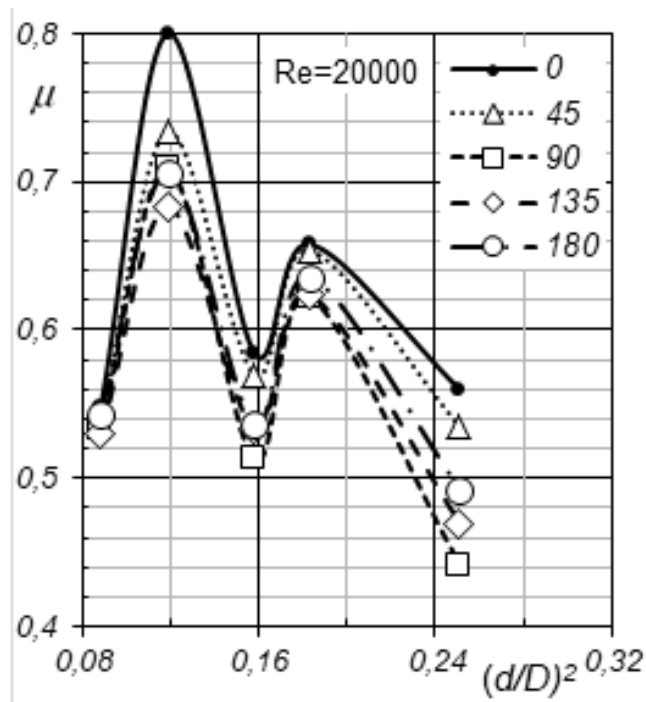


Рис. 4.7. Коефіцієнт μ витрати вихідних насадок з бічним, ортогональним до їх осей, входом струменя, залежно відношень $(d/D)^2$ при критерії Рейнольдса $Re_d = 20000$ та різних значеннях кута β

При $(d/D)^2 = 0,119$ та $0,183$ отримано найбільші значення коефіцієнта μ витрати води крізь вихідні насадки (див. рис. 4.7). Як було відзначено у пункті 4.1.2 найвищі значення коефіцієнта μ отримано при $\beta = 0^\circ$, а найнижчі – при $\beta = 90^\circ$. При цьому криві $\mu = f(d/D)^2$ для різних значень кута β

розташовуються одна під одною у такому порядку (від верху до низу): 0° ; 45° ; 180° ; 135° ; 90° . Причиною найменшого значення коефіцієнта μ при $\beta = 90^\circ$ є зростання тиску в напрямку від стінки РТ до вхідного отвору у вихідній насадці, про що докладніше описано в пункті 4.1.2. Зі збільшенням відношення $(d/D)^2$ різниці між найбільшим і найменшим значеннями коефіцієнта μ , відповідно при $\beta = 0^\circ$ і $\beta = 90^\circ$, зростають для кожного дослідженого значення $(d/D)^2$ (див. рис. 4.7).

4.1.4. Критерій Рейнольдса

Вага коефіцієнта μ витрати вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до їхньої поздовжньої осі, входом струменів рідини при різних значеннях кута β і неоднакових відношеннях площ $(d/D)^2$ істотно залежить від критерія Рейнольдса $Re_d = vd/\nu$ (див. залежності $\mu = f(Re, \beta)$ на рис. 4.1-рис. 4.5). Залежності $\mu = f[(d/D)^2, \beta]$ для значень критерію Рейнольдса, рівних $5 \cdot 10^3$, 10^4 , $2 \cdot 10^4$ і $4 \cdot 10^4$ представлено на рис. 4.8-рис. 4.10.

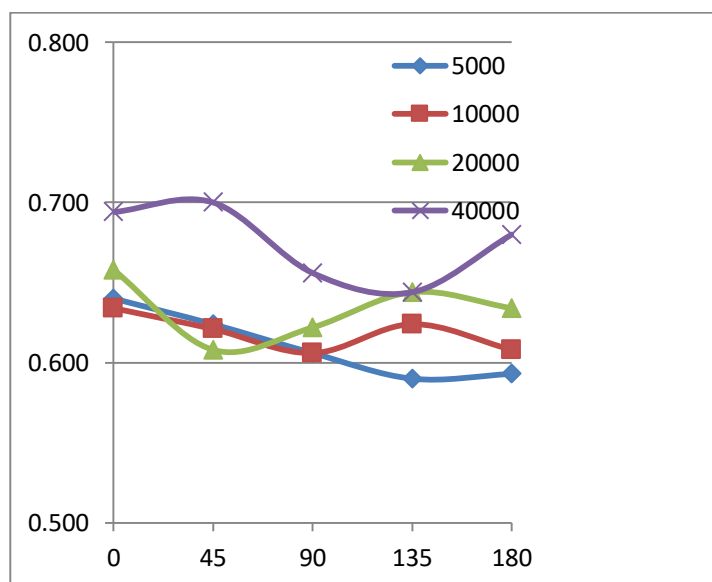


Рис. 4.8. Коефіцієнт μ витрати вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до їх осі, входом струменя, при відношенні $(d/D)^2 = 0,183$, залежно від кута β при різних значеннях критерію Рейнольдса Re_d

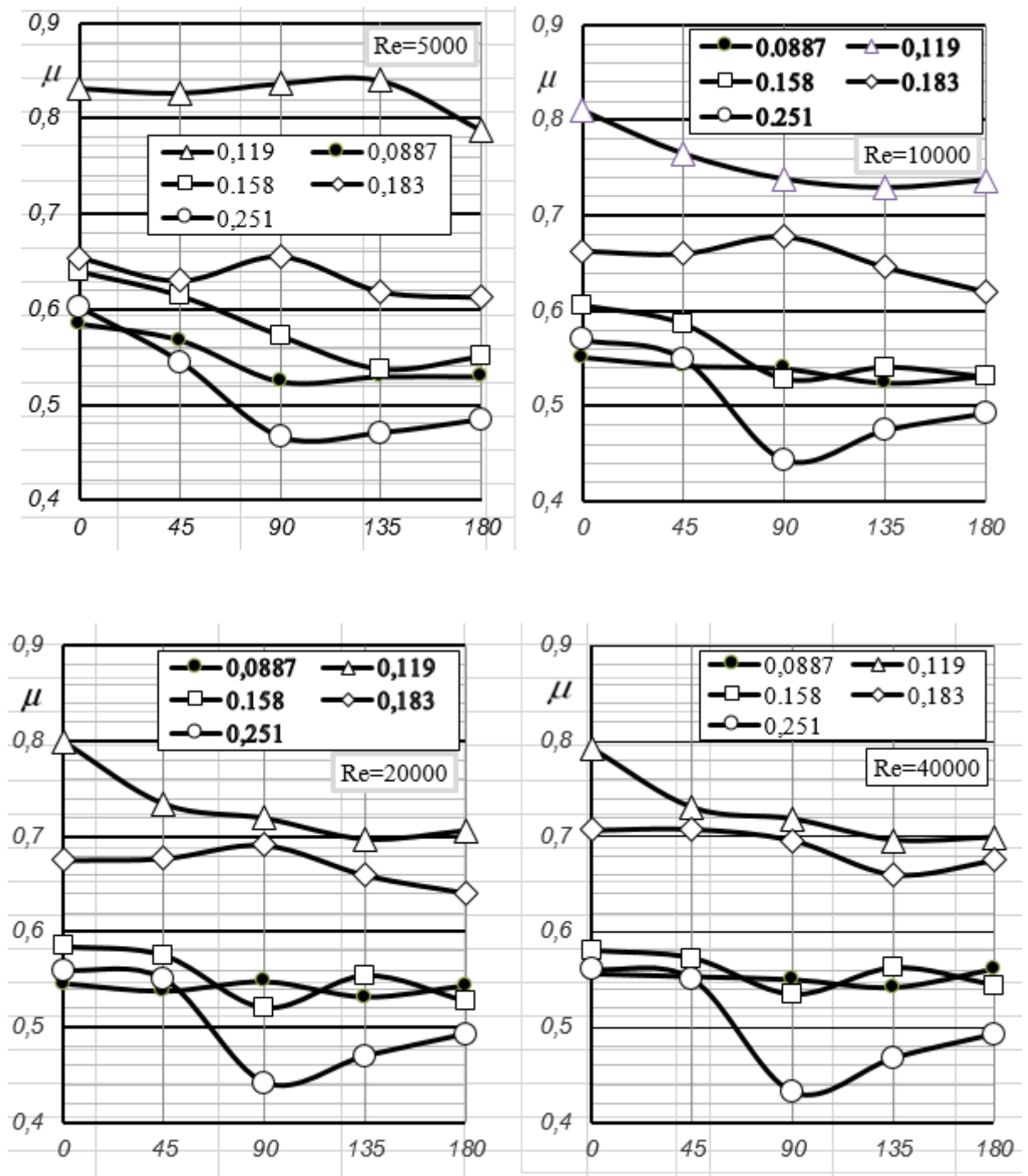


Рис. 4.9. Коефіцієнт μ витрати вихідних насадок з бічним, ортогональним до їх осі, входом струменя, залежно від кута β та від відношення площ поперечних перерізів $(d/D)^2$ насадки та РТ для різних значень критерію Рейнольдса Re_d : а – 5000; б – 10000; в – 20000; г - 40000

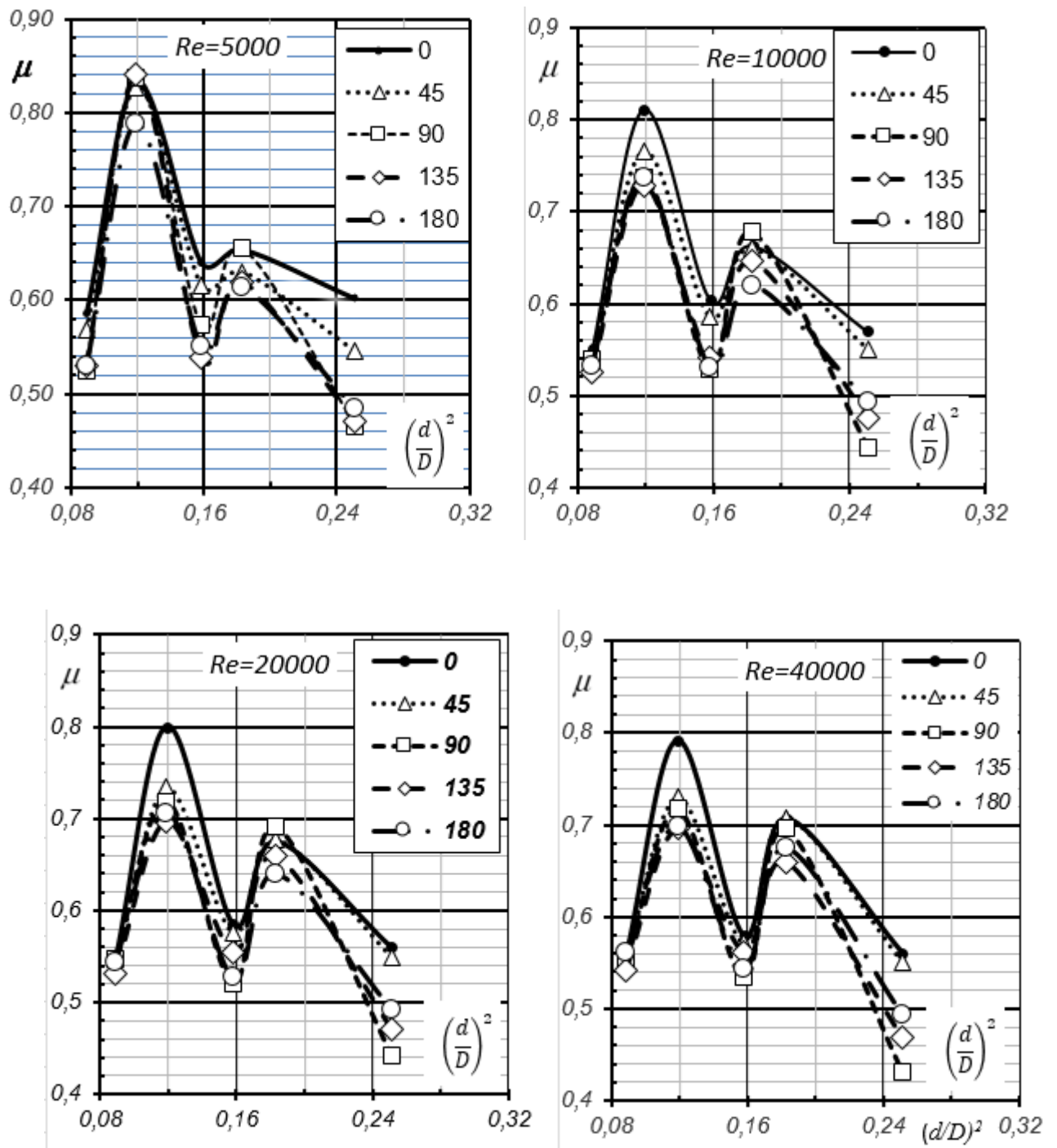


Рис. 4.10. Коефіцієнт μ витрати вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до їх осі, входом струменя залежно від відношення площ поперечних перерізів $(d/D)^2$ насадки та РТ і від кута β для різних значень критерію Рейнольдса Re_d : а – 5000; б – 10000; в – 20000; г – 40000

Найбільший діапазон змінювання коефіцієнта μ , до 22.2 %, отримано для насадки із $d = 8.08$ мм, встановленої у РТ з $D = 16.13$ мм, коли $(d/D)^2 = 0.251$ (див. рис.4.5, рис. 4.6 і табл. 4.2).

4.2. Нерівномірність шляхової роздачі рідини з напірного РТ залежно від впливу різних факторів

Експериментально досліджено напірний розподільний трубопровід з внутрішнім діаметром $D = 11,28$ мм. Внутрішні діаметри d вихідних циліндричних насадок, з бічним ортогональним до осі насадки входом струменя, були рівними 4.83 мм. Проведено п'ять серій дослідів РТ з кутами β між напрямком руху потоку в РТ і напрямком входу струменя у вхідний отвір вихідної насадки відповідно рівними: 0° ; 45° ; 90° ; 135° і 180° . У кожній серії дослідів усі насадки, закріплювались у стінці РТ з однаковим кутом β . Результати експериментів представлено на рис. 4.11-рис. 4.14.

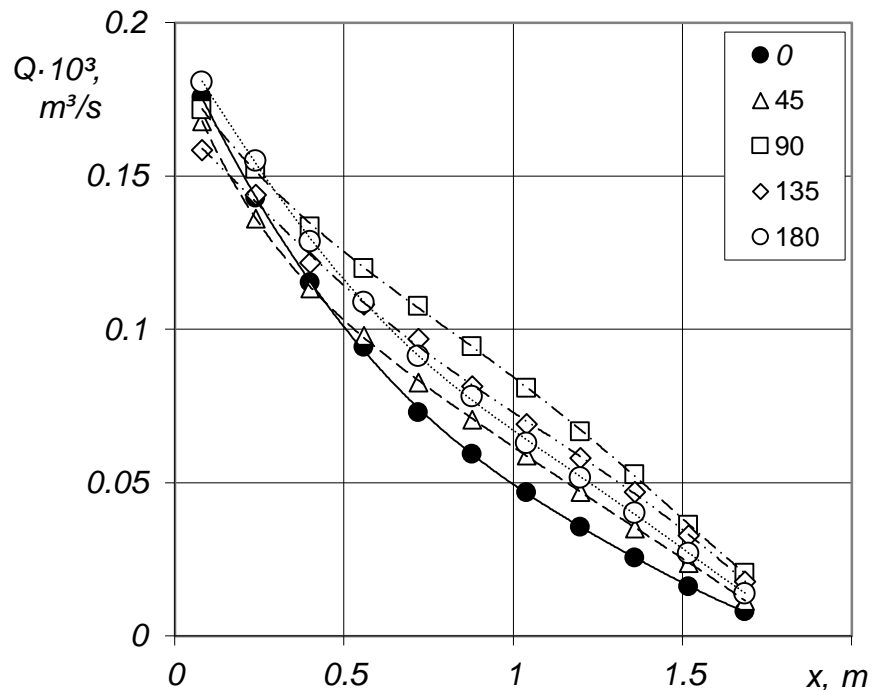


Рис. 4.11. Зміна по довжині розподільного трубопроводу витрати потоку води, котрий тече усередині РТ: при кутах β відгалуження струменів, рівних 0° ; 45° ; 90° ; 135° і 180° (див. легенду у правому верхньому куті рисунку)

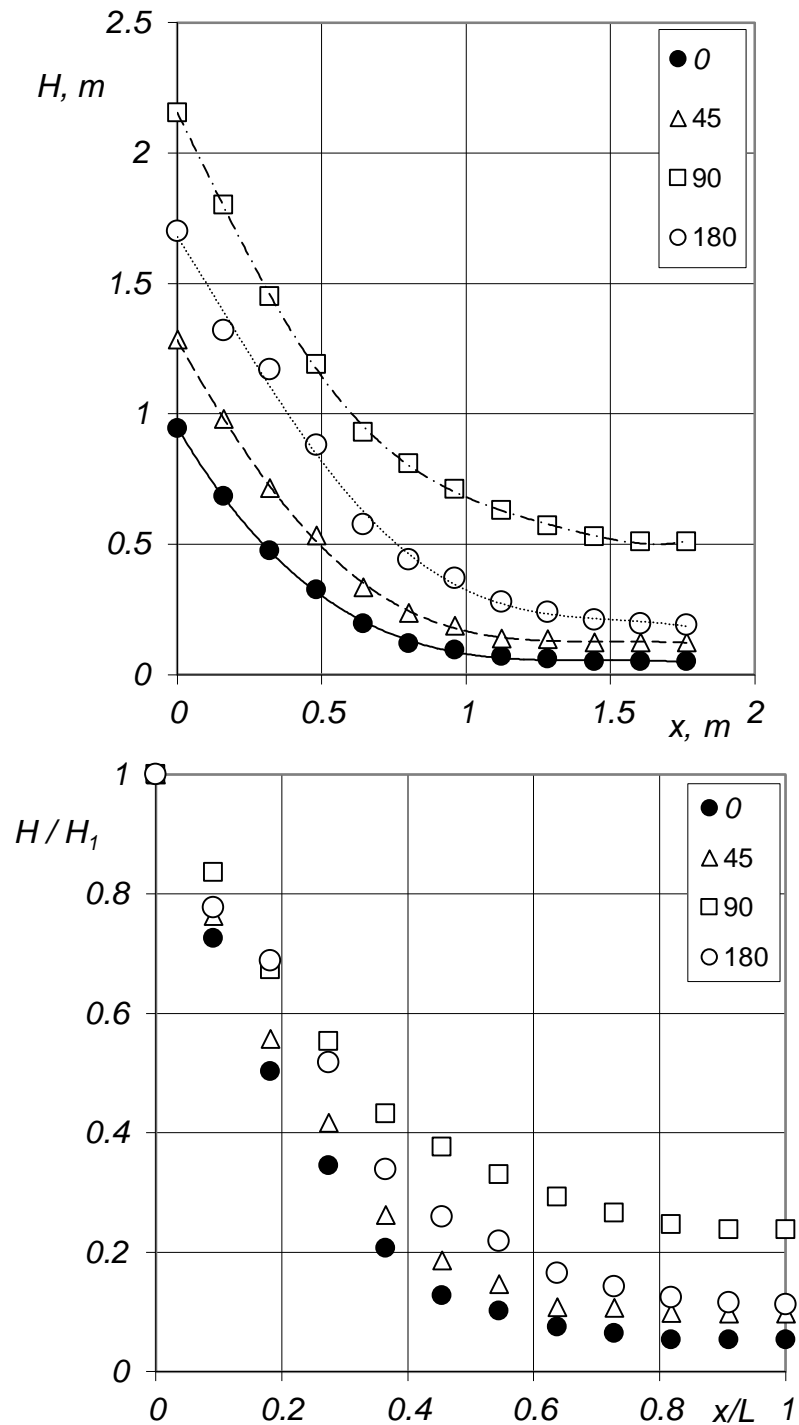


Рис. 4.12. Розподіл п'єзометричних напорів води по довжині РТ при кутах β відгалуження струменів, рівних 0° ; 45° ; 90° і 180° (див. легенду на рисунку): а – графік в абсолютних координатах; б – у відносних координатах (значення критерію Рейнольдса для потоків на вході в РТ були такими: для $\beta = 0^\circ$ $Re = 19212$; $45^\circ - 18114$; $90^\circ - 18516$; $135^\circ - 15883$; $180^\circ - 18725$)

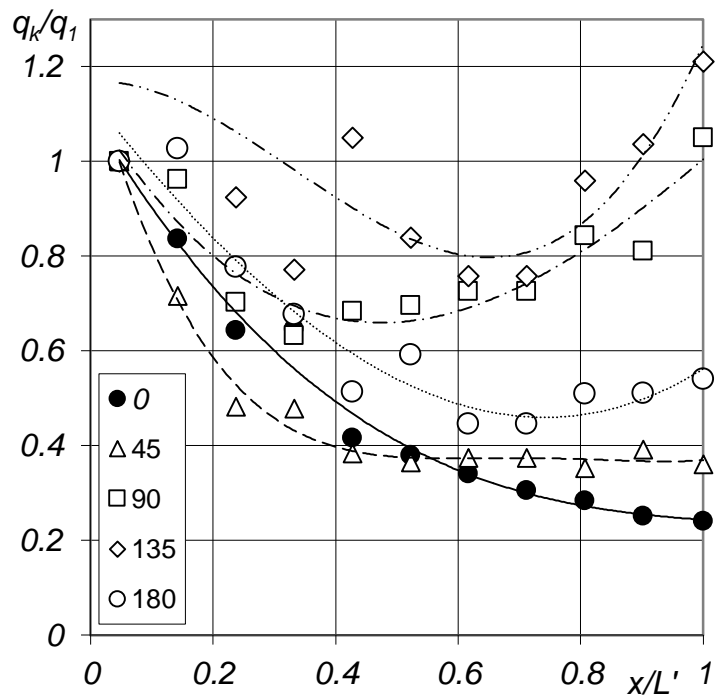
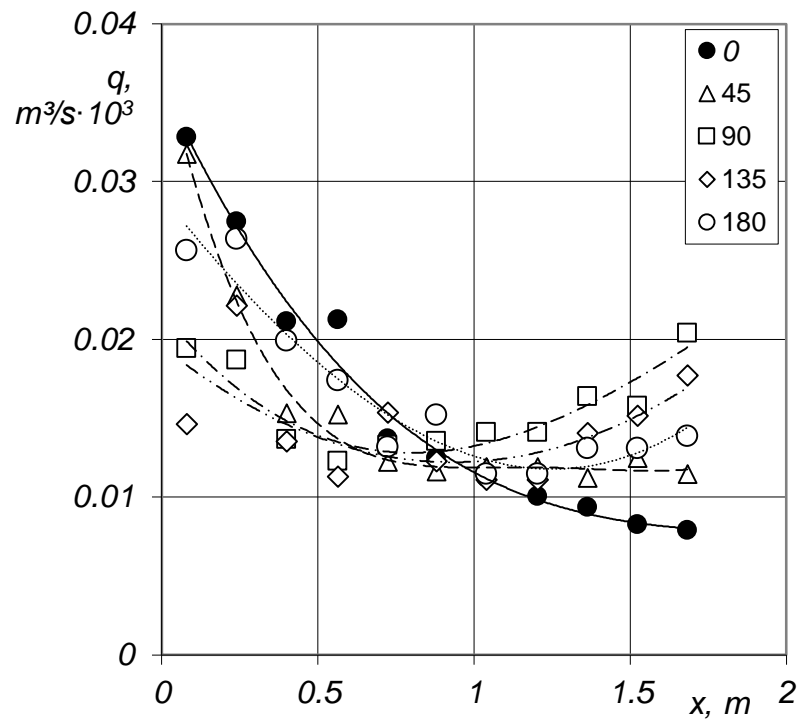


Рис. 4.13. Зміна, уздовж PT , витрати води крізь вихідні насадки при кутах β відгалуження струменів, рівних 0° ; 45° ; 90° ; 135° і 180° (див. легенду на рисунку): а – графік в абсолютних координатах; б – у відносних координатах (значення критерію Рейнольдса для потоків на вході в PT були такими: для $\beta = 0^\circ$ $Re = 19212$; $45^\circ - 18114$; $90^\circ - 18516$; $135^\circ - 15883$; $180^\circ - 18725$)

Для кожного розподільного трубопроводу з кутами β відповідно рівними 0° ; 45° ; 90° ; 135° і 180° було проведено по дев'ять дослідів. Витрату води, котру подавали на вхід у РТ, зменшували від більшої до меншої. Максимальна витрата Q , котру отримували на вході в РТ при напорі на осі РТ, рівному 3.4 м та повністю відкритій засувці на підвідній трубі до РТ, залежала від пропускної здатності вихідних насадок і була неоднаковою для різних значень кута β , тобто визначалась коефіцієнтом витрати вихідних насадок. Досягались такі максимальні значення критерію Рейнольдса для потоку води на вході в РТ: 22646 при $\beta = 0^\circ$; 20146 при $\beta = 45^\circ$; 18516 при $\beta = 90^\circ$; 15883 при $\beta = 135^\circ$; 18725 при $\beta = 180^\circ$. Звісно, вищому значенню критерію Рейнольдса відповідала більша витрата води на вході в РТ. Ця витрата Q рівна сумарній роздачі води крізь усі вихідні насадки, що встановлені уздовж РТ.

П'єзометричні напори H у потоці води в РТ зменшувались уздовж РТ (рис. 4.12). Напори H вимірювали у проміжку між сусідніми вихідними насадками. Вихідні насадки звужували потік. Швидкість потоку у створі кожної насадки зростала, тобто потенційна енергія потоку трансформувалась у кінетичну. Відповідно п'єзометричний напір зменшувався. Після звуженого перерізу, створюваного насадкою, п'єзометричний напір потоку відновлювався.

На рис. 4.11 представлено експериментальні залежності $Q = f(x)$ для РТ з різними кутами β , однак при близьких значеннях критерію Рейнольдса ($Re = 15883-19212$). Тому за цими кривими, можна порівнювати лише закон змінювання витрати потоку уздовж РТ. Найстрімкішою є крива $Q = f(x)$ потоку в РТ при $\beta = 0^\circ$, найпологішою - при $\beta = 135^\circ$. Наприклад, при $\beta = 0^\circ$ витрата Q найінтенсивніше змінювалась на початковій ділянці РТ, і найповільніше – у кінцевій. Крізь перші від початку РТ насадки витікала найбільша кількість води, а крізь останні – найменша. Більшому куту нахилу кривих $Q = f(x)$ до горизонтальної осі відповідає більший нерівномірність роздачі води з розподільного трубопроводу.

Потрібно зауважити, що значення витрати потоку води Q в РТ на кожній його ділянці, після чергової вихідної насадки, зменшується на витрату q , котра витікає крізь цю насадку. Значення витрат води q крізь кожен з вихідних насадок і розподіл цих витрат уздовж РТ представлено на рис. 4.13.

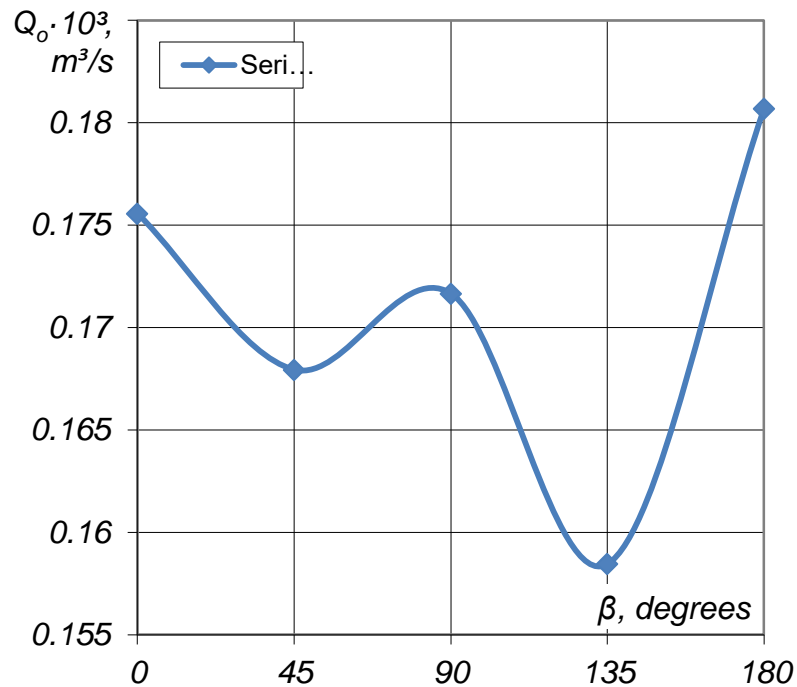


Рис. 4.14. Сумарна витрата води крізь вихідні насадки на РТ залежно від кута β відгалуження струменів, за однакового напору $H_{max} = 3,4$ м на вході в РТ (значення критерію Рейнольдса Re_D для потоків на вході в РТ були такими: для $\beta = 0^\circ$ $Re = 19212$; $45^\circ - 18114$; $90^\circ - 18516$; $135^\circ - 15883$; $180^\circ - 18725$)

Як видно з рис. 4.14 сумарна шляхова роздача води з РТ істотно залежить від кута β , під яким струмені входили в насадки. Найбільшу роздачу води отримано при $\beta = 180^\circ$, найменшу - при $\beta = 135^\circ$. Найменшу нерівномірність шляхової роздачі води отримано при кутах β , рівних 135° та 180° (див. рис. 4.13). Оскільки при орієнтації вихідних насадок під кутом $\beta = 180^\circ$ отримано найбільшу пропускну здатність вихідних насадок і найменшу

нерівномірність шляхової роздачі рідини, значення кута $\beta=180^\circ$ можна вважати оптимальним для роботи напірних розподільних трубопроводів.

4.3. Підсумок до розділу 4

Експериментально встановлено залежність значення коефіцієнта μ витрати циліндричних насадок з бічним, ортогональним до поздовжньої осі насадки, входом струменя, від кута β між напрямками руху потоку води в розподільному трубопроводі та струменя, котрий входить у насадку та від'єднується від РТ. Досліди проведено при різних значеннях відношення площ поперечного перерізу насадки і патрубку, у якому її монтували. Регулюванням значення кута β отримано змінювання значення коефіцієнта μ до 22.2 % лише для однієї насадки. Найбільшу пропускну здатність вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до осі насадки входом струменя води, отримано при куті $\beta = 0^\circ$. Найменше значення μ , тобто найменшу її пропускну здатність насадок, отримано при $\beta=90^\circ$ і $\beta=135^\circ$.

Показано, що змінюванням кута β між напрямом течії потоку рідини в розподільному трубопроводі і напрямом руху струменя, котрий від'єднується від нього, можна істотно регулювати значення коефіцієнта витрати циліндричних насадок з бічним входом рідини та нерівномірність роздачі рідини уздовж напірних розподільних трубопроводів. Отримані результати матимуть істотне практичне значення.

Розділ 5

ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Керування напірним потоком рідини зі змінною витратою

Нами винайдено “Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації” [92]. Цей винахід стосується гідромеханіки, а саме способів регулювання шляхового притоку рідини в напірні трубопроводи-збирачі та може застосовуватись, наприклад, у дренажних системах осушення перезволожених ґрунтів і для пониження рівня ґрунтових вод на будівельних майданчиках і на забудованих територіях.

За наявності транзитної витрати рідини на його вході у трубопровід-збирач початкова його ділянка працює у режимі напірного розподільного трубопроводу, реалізуючи роздачу, а не збирання рідини (рис. 5.1). Причиною роздачі рідини є те, що тиск усередині перфорованого трубопроводу більший, ніж у рідині, котра зовні трубопроводу.

На рис. 5.1 і рис. 5.4 уведено такі позначення: H_{en} – робочий напір на вході у напірний трубопровід-збирач; H_{ex} – те саме, на виході; Q_{tr} – транзитна витрата рідини на вході у трубопровід-збирач; Q_{ex} – витрата рідини на виході з трубопроводу-збирача; q_{distr} – витрата рідини крізь одну насадку на ділянці роздачі рідини; q_{in} – витрата рідини крізь одну насадку на ділянці збирання рідини; $v_{en}^2/2g$ – швидкісний напір транзитного потоку на вході у трубопровід-збирач; $v_{ex}^2/2g$ – швидкісний напір потоку на виході з трубопроводу-збирача.

Мета винаходу запобігати роздачі рідини з напірного трубопроводу-збирача за наявності транзитної витрати рідини на його вході та забезпечувати притік рідини у трубопровід-збирач.

В основу винаходу поставлено задачу створити такий спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач, у якому енергію потоку, котрий тече у напірному трубопроводі-збирачі, використовують для локального змінювання геометричних характеристик і гідродинамічних параметрів цього потоку у створах вхідних насадок, а у секціях замкненого простору між стінкою трубопроводу-збирача і внутрішньою локальною еластичною вставкою, розміщених на ділянках вхідних насадок, створюють напір більший, ніж у потоці рідини у створі еластичної вставки.

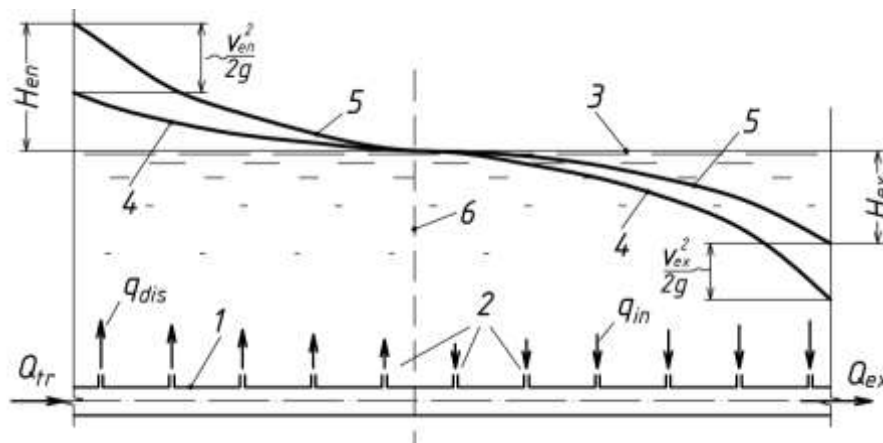


Рис. 5.1. Схема роботи напірного трубопроводу-збирача, за наявності транзитного потоку рідини на його вході: 1 – стінка напірного трубопроводу-збирача; 2 – вхідні насадки; 3 – рівень рідини зовні трубопроводу-збирача; 4 – лінія неметричного напору потоку всередині трубопроводу-збирача; 5 – те саме, лінія повного напору; 6 – межа ділянок роздачі та збирання рідини трубопроводом-збирачем за наявності транзитного потоку на вході у трубопровід-збирач [92]

Поставлена задача вирішена тим, що в “Способі регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрої для його реалізації” за наявності транзитного потоку рідини на вході у напірний трубопровід-

збирач, площу змінного живого перерізу потоку, генерованого у створах вхідних насадок, регулюють за допомогою тиску, наявного у потоці перед попередньою вхідною насадкою, котрий скеровують у замкнений простір між стінками трубопроводу-збирача і внутрішньої локальної еластичної вставки, що її встановлено у створі наступної вхідної насадки (рис. 5.2-рис. 5.4).

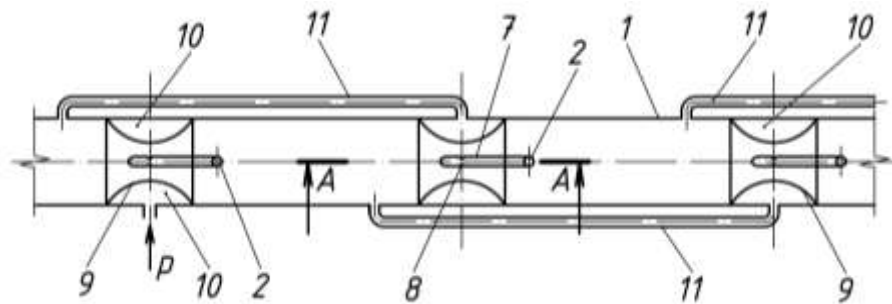


Рис. 5.2. Загальний вигляд фрагменту трубопроводу-збирача: 1 – стінка напірного трубопроводу-збирача; 2 – вхідні насадки з відвідною трубкою 7; 8 – вихідний отвір перед заглишеним кінцем відвідної трубки 7; 9 – еластична вставка; 10 - замкнений простір між внутрішньою стінкою напірного трубопроводу-збирача та стінкою еластичної вставки 9; 11 – з'єднувальна трубка (на рис. 5.1-5.2 цифрові позначення однакові; переріз А-А див. на рис. 5.3) [92]

Поставлена задача вирішується також тим, що напірний трубопровід-збирач містить внутрішні локальні еластичні вставки, котрі закріплені на ділянках вхідних насадок з утворенням замкненого простору між внутрішньою стінкою напірного трубопроводу-збирача та стінкою еластичної вставки так, що генерують у створі вхідної насадки локальне звуження напірного трубопроводу-збирача. При цьому замкнений простір, який утворено між внутрішньою стінкою напірного трубопроводу-збирача та стінкою еластичної вставки, гідравлічно сполучено за допомогою трубки з потоком рідини у створі трубопроводу-збирача перед попередньою вхідною насадкою.

За наявності транзитного потоку рідини Q_{tr} на вході в напірний трубопровід-збирач повний напір рідини у ньому більший, ніж напір рідини зовні. За таких умов початкова ділянка трубопроводу-збирача працює у режимі напірного розподільного трубопроводу (фіг. 1). Однак, рідина, котра є зовні трубопроводу-збирача, буде входити у трубопровід-збирач за умови, коли напір рідини у трубопроводі-збирачі у створі кожної вхідної насадки буде меншим, ніж напір у рідині зовні трубопроводу-збирача.

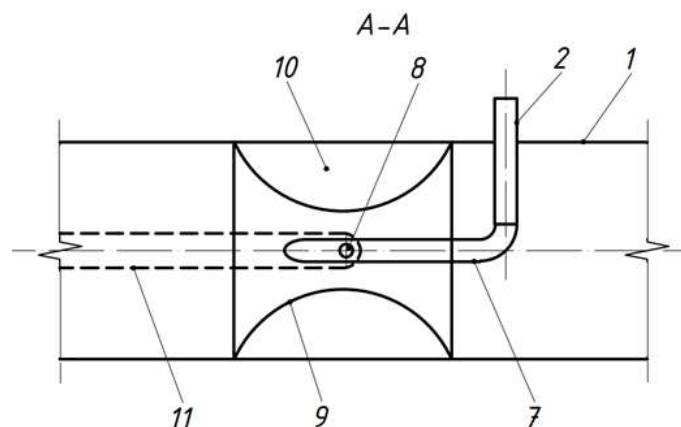


Рис. 5.3. Переріз А-А вузла з еластичною вставкою та вхідною насадкою (читати разом з рис. 5.2; цифрові позначення подано у підписуваних підписах до рис. 5.1 і рис. 5.2) [92]

Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач полягає в тому, що за наявності транзитного потоку рідини Q_{tr} на його вході, змінюють площу живого перерізу потоку у створах вхідних насадок за допомогою тиску рідини, наявного у створі потоку вище попередньої вхідної насадки.

Напірний трубопровід-збирач включає вхідні насадки 2, закріплені у його стінці 1. До вхідної насадки 2 приєднана відповідна трубка 7, яка має вихідні отвори 8 і заглушений кінець. У створі вихідних отворів 8 напірний трубопровід-збирач оснащений внутрішньою еластичною вставкою 9, яка утворює замкнений простір 10 між нею та внутрішньою стінкою напірного трубопроводу-збирача. Замкнений простір 10

сполучено трубкою 11 з потоком у створі трубопроводу-збирача перед попередньою вхідною насадкою.

У замкнений простір 10 еластичної вставки 9, розміщеної у створі першої вхідної насадки, подають тиск, більший, ніж у трубопроводі-збирачі. Стінка еластичної вставки 9 під дією сили тиску розтягнеться і відійде від стінки трубопроводу-збирача у радіальному напрямі до його осі. Живий переріз потоку звужиться. Швидкість потоку у звуженому перерізі зросте. Тоді, за рівнянням Даниїла Бернуллі, п'єзометричний напір у звуженому перерізі потоку зменшиться. Об'єм замкненого простору 10 зросте, а площа звуженого перерізу потоку зменшиться. У результаті тиск потоку у звуженому перерізі трубопроводу-збирача стане меншим, ніж зовні трубопроводу-збирача. Тоді рідина не витискатиметься назовні, а буде всмоктуватись у трубопровід-збирач.

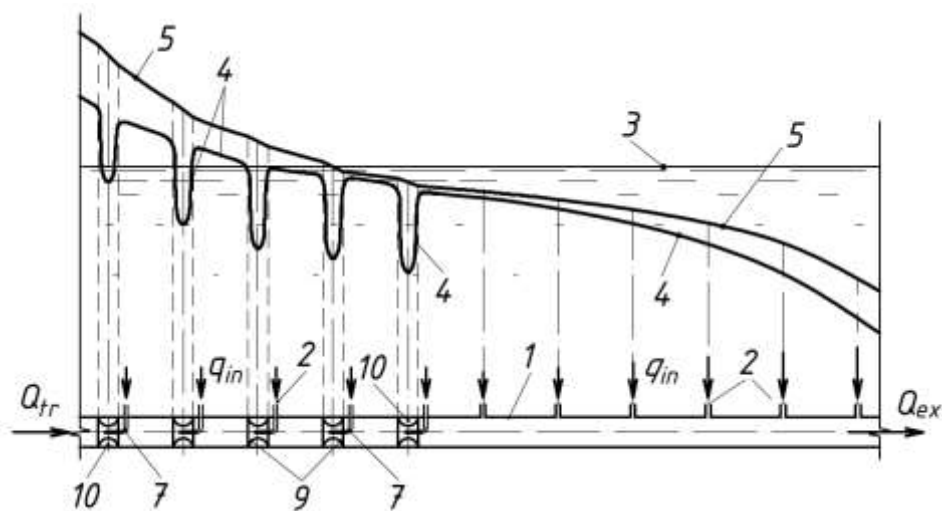


Рис. 5.4. П'єзометрична лінія та лінія повного напору потоку у напірному трубопроводі-збирачі, оснащеному локальними еластичними вставками, за наявності транзитного потоку Q_{tr} на вході у трубопровід-збирач (цифрові позначення див. у підписах до рис. 5.1 і рис. 5.2) [92]

Першу від початку трубопроводу-збирача еластичну вставку можна замінити на тверду вставку типу сопла. У цьому разі відпаде потреба у змінюванні діаметра першої еластичної вставки, а робота трубопроводу-

збирача на наступних його ділянках регулюватиметься автоматично з використанням енергії транзитного потоку Q_{tr} .

На ділянці потоку між першою та другою входними насадками потік втратить частину енергії на подолання гідравлічного опору звуження потоку, створюваного першою еластичною (або твердою) вставкою, та на подолання гідравлічного тертя циліндричної ділянки трубопроводу-збирача між першою та другою входними насадками. Напір потоку у створі другої входної насадки стане меншим, ніж перед першою входною насадкою. Ця різниця напорів спричиняє розширення у радіальному напрямку замкненого простору 10 у створі другої входної насадки. За таким самим принципом працюють наступні входні насадки. Трубопровід-збирач працюватиме на збирання рідини (див. рис. 5.4). Її роздача припиниться.

Застосування запропонованого «Способу регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрою для його реалізації» запобігає роздачі рідини з напірного трубопроводу-збирача при наявності транзитної витрати рідини на його вході та забезпечує притік рідини у трубопровід-збирач. У цьому полягає технічна й економічна ефективності роботи заявленого трубопроводу-збирача.

5.2. Ефективність результатів досліджень

5.2.1. Економічний ефект

Значний сумарний економічний ефект досягається за рахунок зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів у різних технологічних процесах.

Застосування в іригації напірних РТ без засобів зменшення нерівномірності шляхової роздачі води (див. рис. 1.1) супроводжується неоднорідним зволоженням ґрунту уздовж поливних трубопроводів. Рослини, котрі забезпечуються водою з середньої частини РТ, одержують нормальний для вегетації об'єм води. Повний робочий напір води

найбільший на початковій ділянці поливного трубопроводу (РТ), а найменший - у кінцевій його ділянці (рис. 5.5). Тому рослини, котрі приурочені до початкової ділянки РТ, мають надмір вологи, а ті, що живляться водою з кінцевої ділянки РТ, страдають від її нестачі. З цієї причини рослини в кінцевих ділянках напірних РТ не дадуть розрахункових урожаїв. Буде недобір плодів, котрий спричинює економічні втрати. Надмірна подача води на початкові ділянки напірних РТ супроводжуватиметься непродуктивною втратою води та енергії на її транспортування.

Якщо діаметр напірного РТ незмінний, то найбільші робочі напори утворюються у кінці РТ (див. рис. 1.2). Уздовж потоку в РТ витрата води, з причини її шляхової роздачі, зменшується, а за постійного значення діаметра РТ, швидкість потоку води в ньому також зменшується. Згідно з рівнянням Д. Бернуллі, зі зменшенням швидкості потоку, його кінетична енергія трансформується у потенційну енергію тиску. Отож найбільші напори та роздача рідини реалізуються у кінці РТ. У цьому випадку також досягається зменшення нерівномірності шляхової роздачі води з РТ за допомогою регулюванням кута β від'єднання струменів від потоку в РТ.



Рис. 5.5. Дощування за допомогою переносних поливних трубопроводів (найбільший радіус дії поливних струменів є на початку РТ)

Зменшення нерівномірності шляхової роздачі води уздовж поливних трубопроводів скорочує фінансові витрати та економічні втрати. Оскільки іригаційні системи в Україні займають тисячі гектарів, то сумарний економічний ефект від впровадження регулювання роботи РТ є значним.

5.2.2. Соціальне значення

Зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини уздовж напірних розподільних трубопроводів у спринклерних (автоматичних) і дренчерних (напівавтоматичних) системах пожежогасіння покращує розподіл пожежних струменів по площі, обслуговуваній протипожежними трубопроводами, і має соціальне значення. Автоматичні способи ліквідації вогню зберігають життя людей, які перебувають у виробничих і житлових приміщеннях, а також вберігають їхнє майно. Спринклерна система (рис. 5.6) усуває спалах відразу ж після його виникнення. Тому не доводиться чекати на приїзд пожежних команд і користуватися вогнегасниками.

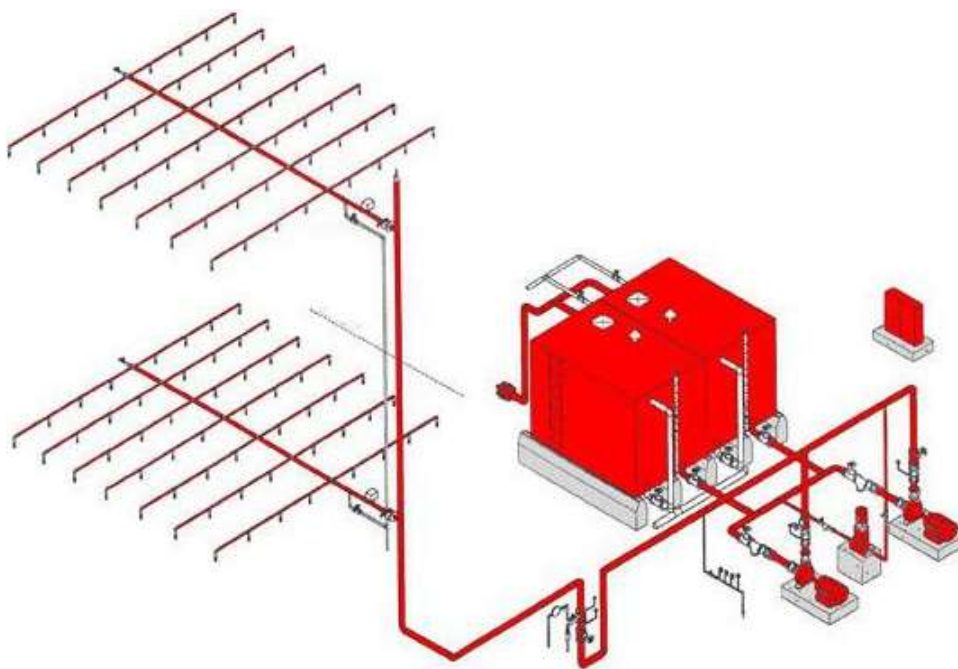


Рис. 5.6. Схема спринклерної (автоматичної) системи пожежогасіння (світлинку взято з сайту <https://90zavod.ru/raznoe/sprinklernaya-sistema-sprinklernaya-sistema-pozharotusheniya-cto-eto-takoe-princip-raboty-ustanovki.html>)

Соціальне спрямування має також запропонований нами “Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації” [92]. За цим винаходом усувається роздача рідини на вхідній ділянці напірного трубопроводу-збирача і створюються умови для її збирання. Заявлений спосіб рекомендується застосовувати у дренажних системах осушення перезволожених ґрунтів і для пониження рівня ґрунтових вод на будівельних майданчиках і забудованих територіях. Останнє направлено на покращення умов життя людей і має соціальне значення.

5.2.3. Екологічний ефект

На покращення екологічного стану довкілля направлено застосування таких результатів роботи здобувача:

- “спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації” [92] забезпечують зменшення нерівномірності збирання рідини напірними трубопроводами-збирачами, чим покращують роботу дренажних систем, оберігаючи території від підтоплень;

- зменшення нерівномірності роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів (поливних трубопроводів) оптимізує водні режими ґрунтів на іригаційних системах (рис. 5.7).

5.2.4. Технічні переваги

Винайдений “Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації” [92] має такі технічні переваги:

- працює без залучення додаткових джерел енергії, а за рахунок використання енергії транзитного потоку, котрий входить на початкову ділянку трубопроводу-збирача;

- функціонує автоматично;

- нескладний у реалізації й порівняно недорогий для реалізації.



Рис. 5.7. Система крапельного зрошення виноградника (горизонтальні поливні трубопроводи закріплено на вертикальних стержнях, які служать опорами для розвинених виноградних кущів; світлина взято з сайту <https://agrotimes.ua/article/rezhymna-terytoriya/>)

5.3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась згідно Закону України “Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки” від 11.07.2001 р. № 2623-III (зі змінами від 29.01.2021 р. № 1162-IX). Вона тісно пов'язана з планами держбюджетної тематики кафедри гідротехніки та водної інженерії (ГВІ) Національного університету “Львівська політехніка”.

Здобувачкою наукового ступеня зареєстровано науково-дослідну роботу “Зменшення нерівномірності шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів” (ГС-6). Ця робота виконується за участю дисертантки із 2018 року на замовлення Міністерства освіти і науки України. Номер державної реєстрації названої дослідницької роботи: 0118U007051.

Кожного календарного року кафедра ГВІ і дисертантка звітуються про виконану роботу, результатом якої повинен бути кінцевий науковий звіт і захист дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

5.4. Упровадження результатів роботи

Графічні залежності значення коефіцієнта витрати $\mu = f[\beta, (d/D)^2, Re]$ для циліндричних вихідних насадок з бічним, ортогональним до їхніх поздовжніх осей, входом струменя, одержані експериментально дисертанткою, передано Басейновому управлінню водних ресурсів річок Західного Бугу та Сяну з метою застосування їх при гідравлічних розрахунках усунення шляхової роздачі води з напірних трубопроводів-збирачів у меліоративних системах осушення перезволожених земель.

Отримані здобувачкою експериментальні дані зі встановлення значень коефіцієнта витрати циліндричних вихідних насадок, з бічним, ортогональним до їхніх поздовжніх осей, входом струменя, упроваджено в навчальний процес у Національному університеті “Львівська політехніка” при викладанні навчального предмету “Гідравліка та протипожежне водопостачання”.

5.5. Перспективи подальших досліджень

Уточнити наявні у літературі теоретичні методи розрахунку напірних розподільних трубопроводів. Поєднавши дані власних експериментів з результатами теоретичних досліджень створити методику розрахунків напірних РТ з урахуванням кута відведення струменів від них.

5.6. Підсумок

Винайдено “Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації” [92], згідно з яким, за наявності транзитного потоку на вході у трубопровід-збирач, усувають роздачу рідини на початковій його ділянці та забезпечують збирання

рідини по усій довжині трубопроводу-збирача. Регулювання притоку рідини здійснюється за рахунок використання енергії транзитного потоку.

Дисертаційна робота характеризується економічним й екологічним ефектами, має соціальне значення та технічні переваги в порівнянні з відомим розв'язанням задачі оптимізації роботи розподільних трубопроводів і трубопроводів-збирачів.

Проведені наукові дослідження пов'язані з науковими програмами України та Національного університету “Львівська політехніка”. Результати роботи передано Басейновому управлінню водних ресурсів річок Західного Бугу та Сяну з метою застосування їх при усуненні шляхової роздачі води з напірних трубопроводів-збирачів у системах осушення перезволожених земель (Додаток 1). Роздача води спричинюється наявністю транзитної витрати Q_{tr} на вході у трубопровід-збирач, внаслідок чого початкова його ділянка працює в режимі розподільного трубопроводу.

Отримані здобувачкою залежності $\mu = f[\beta, (d/D)^2, Re]$ упроваджено в навчальний процес у Національному університеті “Львівська політехніка” при викладанні навчального предмету “Гідравліка та протипожежне водопостачання”. “Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації” [92] застосовано при викладанні розділу “Рух рідини зі змінною витратою” у предметі “Засоби керування напірними потоками” (Додаток 2).

ВИСНОВКИ

Окреслено основні галузі техніки у котрих застосовуються напірні розподільні трубопроводи. Проведено літературний аналіз методів їх розрахунку. З урахуванням актуальності теми і господарських потреб країни, визначені мета й задачі дисертаційних досліджень.

Запроектовано та виготовлено дослідний стенд для експериментального встановлення значень коефіцієнта витрати вихідних циліндричних насадок з бічним, ортогональним до поздовжньої осі насадки, входом струменя в насадку, при різних значеннях: кута β відведення струменя від основного потоку в розподільному трубопроводі; відношень $(d/D)^2$ площі поперечного перерізу вихідних насадок і розподільного трубопроводу. Також запроектовано й змонтовано дослідний стенд для експериментального дослідження нерівномірності роботи напірних розподільних трубопроводів залежно від різних значень кута β і відношень площ $(d/D)^2$.

Експериментально отримано графічні залежності значення коефіцієнта витрати $\mu = f[\beta, (d/D)^2, Re]$ для циліндричних вихідних насадок з бічним, ортогональним до їхніх поздовжніх осей, входом струменя для п'яти значень кута β і п'яти значень відношень площ $(d/D)^2$.

Експериментально перевірено відомі теоретичні залежності для гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів. Виявлено, що ці залежності забезпечують достовірний гідравлічний розрахунок напірних РТ лише при прямих кутах β відведення струменів.

З метою отримання достовірних результатів гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів при кутах $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$ рекомендовано у вихідному диференціальному рівнянні руху рідини зі змінною витратою опустити силу зовнішнього тиску, направлену неортогонально до внутрішньої стінки РТ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дзюбенко Д. В. Капельное орошение в США / Гидротехника и мелиорация, 1975. - № 4, с. 97-109.
2. Левицкий Б. Ф., Чернюк В. В. Авторское свидетельство 1756483 СССР, МКИ Е 03F 1/00, 5/12. Устройство для выпуска сточных вод / № 4806326/29; Заявлено 30.03.90; Опубл. 23.08.92. Бюл. № 31, 4 с.
3. Яхно О. М. Напірні потоки зі змінними характеристиками: монографія / О. М. Яхно, В. В. Чернюк, Р. М. Гнатів. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 408 с.
4. Данилов Ю. М. Исследование турбулентного смешения двухкомпонентной смеси в трубе с периодически меняющимся сечением / Ю. М. Данилов, А. Г. Мухаметзянова, Е. И. Кульментьева, Е. А. Петровичева // Вестник Казанского технологического университета. – 2004. - № 1. С. 172-179.
5. Чернюк В. В. Напірні розподільні трубопроводи в енергетиці / В. В. Чернюк, В. В. Іванів, І. В. Бігун // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам в регіоні. Матеріали X-ої міжнародн. наук.-практичн. конференц. (4-5 квітня, 2019 р.): Збірник наукових праць. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2019. – С. 62-67.
6. Бігун І. В. Особливості застосування напірних розподільних трубопроводів у різних технічних системах / І. В. Бігун // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. – 2019. – № 1(2). – С. 14-20.
7. Cherniuk, V., Hnativ, R., Kravchuk, O., Orel, V., Bihun, I., Cherniuk, M. The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines / Eastern-European

Journal of Enterprise Technologies, 6/7 (114), 2021, 93-103. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852>.

8. Дергачёв Б. А. Движение жидкости в трубопроводе с дискретным изменением расхода по длине: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.09 “Гидравлика и инженерная гидрология” / Б. А. Дергачёв. – Л.: Ленингр. политехн. ин-т, 1974. – 20 с.

9. Чугаев Р. Р. Гидравлика: Ученик / Р. Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

10. Кузнецов Е. В. Гидравлические параметры трубопроводов закрытых оросительных систем и способы их расчёта: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.09 “Гидравлика и инженерная гидрология” / Е. В. Кузнецов. – М.: Моск. гидромелиорат. ин-т, 1985. – 21 с.

11. Навоян Х. А. Примеры гидравлических расчётов водопропускных сооружений / Х. А. Навоян. – Киев: Будівельник, 1975. – 148 с.

12. Петров Г. А. Гидравлика переменной массы (Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути) / Г. А. Петров. – Харьков: ХГУ. – 1964. – 224 с.

13. Смыслов В. В. Гидравлический расчет перфорированных цилиндрических трубопроводов с раздачей расхода / В. В. Смыслов, Н. О. Езерский // Гидравлика и гидротехника. – Выпуск 30. – 1980. – С. 52-59.

14. Указания по гидравлическому расчёту напорных трубчатых систем для распределения воды в водопроводных очистных сооружениях. – Москва: ВНИИ ВОДГЕО, 1988. – 95 с.

15. Claudio D. Icondotti emungenti da un serbatoio. Atti e men. Accad. patav. sci lettere ed arti / Claudio D. – 1961-1962. – 74, Parte 2.

16. Константинов Ю. М. Спеціальні питання гідравліки систем водопостачання та водовідведення / Ю. М. Константинов, А. М. Кравчук. – Київ: Київськ. держ. техн. ун-т буд-ва та архітектури, 1993. – 136 с.

17. Чернюк В. В. Порівняння розв'язків диференційного рівняння руху рідини змінної маси для напірних розподільчих трубопроводів / В. В. Чернюк, В. І. Орел // Вісн. нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. – Львів: НУ ЛП. – 2007. – № 602. – С. 190-200.

18. Чернюк В. В. Метод розрахунку напірних розподільчих трубопроводів / В. В. Чернюк // Прикладна гідромеханіка (Ін-т Гідромеханіки НАНУ). – 2008. – Т. 10 (82), № 3. – С. 65-76.

19. Чернюк В. В. Методи гідравлічного розрахунку напірних розподільних трубопроводів / В. В. Чернюк // Вісн. нац. ун-ту водн. госп. та природокористув: Збірн. наук. праць. Серія технічні науки. Випуск № 3(71). Частина 1. – Рівне: Нац. ун-т водн. госп. та природокористув. 2015. – С. 374-382.

20. Смыслов В.В. К расчёту дырчатых труб с раздачей расхода вдоль пути / В. В. Смыслов, Ю. М. Константинов // Гидравлика и гидротехника: Науч.-техн. сб.– Выпуск 12. – К.: Техника. – 1971. – С. 47-52.

21. Константинов Ю. М. Специальные вопросы гидравлики систем водоснабжения и водоотведения: Учебное пособие / Ю. М. Константинов. – К.: КИСИ, 1981. – 96 с.

22. Науменко И. И. Гидравлический расчет поливных трубопроводов капельного орошения / И. И. Науменко // Гидравлика и гидротехника. – Вып. 30. – 1980. – С. 70-77.

23. Коваленко В. Н. Об уравнении установившегося напорного движения жидкости в цилиндрической трубе с отделением расхода вдоль пути / В. Н. Коваленко, В. И. Бойко // Изв. вузов. – Строительство и архитектура. – 1989, № 4. – С. 84-87.

24. Кравчук А. М. Гідравліка змінної маси напірних трубопроводів технічних систем: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.16 / Київ. нац. ун-т будівництва і архітект. – К., 2004. – 35 с.

25. Чернишев Д. О. Вплив гідродинаміки потоку на характеристики роботи розподільчих трубопроводів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.16 / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітект. – К., 2005. – 20 с.

26. Василенко А. А. Анализ уравнения движения жидкости в горизонтальном цилиндрическом трубопроводе с присоединением расхода вдоль пути / А. А. Василенко, В. В. Смыслов // Гидравлика и гидротехника: Научно-техн. сб. – Вып. 17. – К.: Техника.– 1973. – С. 19-24.

27. Cherniuk V. Obliczenia hydrauliczne rozdzielczego rurociągu ciśnieniowego, położonego w strumieniu cieczy / V. Cherniuk // Zagrożenia jakości wód powierzchniowych i metody działań ochronnych. – Lublin: Wydawnictwo KUL, 2014. – s. 251-263.

28. Нетюхайло А. П. Прогноз качества воды в водотоках, водоёмах и морях как приёмниках сточных вод на основе методов математического моделирования: учебн. пособие / А. П. Нетюхайло, Г. Н. Смирнова, Л. Н. Ярошенко. – Киев: Ин-т системн. исслед. образования, 1993. – 188 с.

29. Чернюк Володимир. Водовипуск періодичної дії // IV naukowa konferencja Rzeszowsko-Lwowska "Problemy budownictwa i inzynierii srodowiska". Cz. II. Inzynieria Srodowiska. – Rzeszow, 1995. - S. 9-14.

30. Константинов Ю. М. Гидравлика: Ученик / Ю. М. Константинов. – К.: Вища шк., 1988. – 398 с.

31. Cherniuk V. Obliczenia hydrauliczne rozdzielczego rurociągu ciśnieniowego, położonego w strumieniu cieczy / V. Cherniuk // Zagrożenia jakości wód powierzchniowych i metody działań ochronnych. – Lublin: Wydawnictwo KUL, 2014. – s. 251-263.

32. Чернюк В. В. Розрахунок напірних розподільних трубопроводів, які прокладено у потоці рідини / В. В. Чернюк // Промислова гідравліка і пневматика. – 2011. – № 3(33). – С. 80-86.

33. Чернюк В. В. Зведення до двох змінних диференціального рівняння для напірних розподільних трубопроводів, прокладених у потоці рідини /

В. В. Чернюк // Вісник нац. ун-ту водн. госп та природокорист.: Збірник наук. праць. Серія технічні науки. Вип. № 3(55). – Рівне: Нац. ун-т водн. госп. та природокорист., 2011.– С. 44-52.

34. Cherniuk Volodymyr V. Taking into Account Outer Hydrodynamic Pressure in Differential Equation of Variable Flow Rate Fluid Flow for Distributive Pressure Pipelines. / Volodymyr V. Cherniuk. – SSP - Journal of Civil Engineering. Selected Scientific Papers (Technical University of Košice) ISSN 1334-9024 (printed edition), e-ISSN 1338-7278 (online), ISBN: 978-80-553-0721-3. – 2012. – Vol. 7, Issue 1. – S. 13-22.

35. Cherniuk Volodymyr V. Derivation of Formulae for Calculation of Pressure Distributive Pipelines Laid in Fluid Stream. / Volodymyr V. Cherniuk // Proceedings of the IX International Scientific Conference of Faculty of Civil Engineering Technical University of Košice – Košice, Slovakia, May 22-25, 2012. - ISBN 978-80-553-0905-7. – CS 2. Building Services - 8 s.

36. Чернюк В. В. Гідравлічний розрахунок водорозподільних трубопроводів в градирнях електростанцій / В. В. Чернюк, М. П. Босак // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – Львів: НУ ЛП.– 2011. – № 712. – С. 55-62.

37. Степанов М. П. Справочник по гидравлике для мелиораторов / М. П. Степанов, И. Х. Овчаренко, Ю. А. Скобельцын. – М.: Колос, 1984.– 207 с.

38. Володимир Чернюк. Порівняння розв’язків диференційного рівняння руху рідини змінної маси для напірних розподільчих трубопроводів / Чернюк Володимир, Орел Вадим // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. – Львів: НУ ЛП. – 2007. – № 602. – С. 190-200.

39. Chernyuk Volodymyr V. Experimental Verification of a New Method of Calculation for Pressure Distributive Pipelines / Volodymyr V. Chernyuk, Vadym I. Orel // Zeszyty Naukowy Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska – Rzeszów, Poland: Politechnika Rzeszowska, 2009. – Nr 266, z. 54. – S. 27-34.

40. Чернюк В. В. Вплив додатків поліакриламідру на нерівномірність дискретної шляхової роздачі води з напірного трубопроводу / В. В.Чернюк, В. І. Орел // Промислова гідраліка і пневматика. – 2006. – № 4(14). – С. 37-40.

41. Chernyuk Volodymyr V. A method of calculation for pressure collecting-pipelines / Volodymyr V. Chernyuk // Zeszyty Naukowy Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. – Rzeszów, Poland: Politechnika Rzeszowska, 2009. – Nr 266, z. 54. - S. 19-25.

42. Чернюк В. В. Метод розрахунку напірних трубопроводів-збирачів / В. В. Чернюк // Промислова гідраліка і пневматика (Вінницьк. держ. аграрн. ун-т, м. Вінниця). – 2017. – № 1(55). – С. 3-15.

43. Андрій Кравчук. Приклади гідралічного розрахунку напірних збірних і розподільчих трубопроводів / Кравчук Андрій, Кравчук Ольга // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. Наук.-техн. збірник. Випуск 30. - К.: Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури, 2018. – С. 31-35. (DOI: 10.32347/2524-0021.2018.30.31-35).

44. Андрій Кравчук. Проектування трубопроводів для рівномірного збору води вздовж шляху / Кравчук Андрій, Кочетов Геннадій, Кравчук Олександр // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. Наук.-техн. збірник. Випуск 33. - К.: Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури, 2020. – С. 34-40. (DOI: 10.32347/2524-0021.2020.33.34-40).

45. Andriy Kravchuk. Improving the calculation of collecting perforated pipelines for water treatment structures / Kravchuk Andriy, Gennadii Kochetov, Oleksandr Kravchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. - № 6/10(108). - P. 23-28. (DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216366).

46. Олександр Кравчук. Оцінка впливу різного роду втрат напору на характеристики роботи збірних трубопроводів / Кравчук Олександр, Кравчук Ольга // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. Наук.-техн. збірник. Випуск 34. - К.: Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури, 2020. – С. 19-24. (DOI: 10.32347/2524-0021.2020.34.19-24).

47. Chen, Andrew W., and Sparrow, Ephraim M. Turbulence modeling for flow in a distribution manifold. *Intern. / J. of Heat and Mass Transfer*, 2009. – Vol. 5-6, p. 1573-1581.
48. Chen, Andrew W., and Sparrow, Ephraim M. Effect of exit-port geometry on the performance of a flow distribution manifold. / *Applied Thermal Engineering*, 2009. – Vol. 13, p. 2689-2692.
49. Jafar M. Hassan, Thamer A. Mohamed, Wahid S. Mohammed, Wissam H. Alawee. Modeling the Uniformity of Manifold with Various Configurations. *Journal of Fluids Volume*, 2014. - Article ID 325259, 8 p. (<http://dx.doi.org/10.1155/2014/325259>).
50. Sangkyoo Lee, Namsoo Moon, Jeekeum Lee. A study on the exit flow characteristics by the orifice configuration of multi-perforated tubes. / *J. Mechanical Science and Technology*, 2012. – Vol. 26(9). - P. 2751-2758.
51. Wang, C. C., Yang, K. S., Tsai, J. S. and Chen, I. Y. Characteristics of flow distribution in compact parallel flow heat exchangers, part II: modified inlet header. / *Applied Thermal Engineering*, 2011. - Vol. 31, № 16. - P. 3235-3242.
52. Zeng, D., Pan, M., and Tang, Y. Qualitative investigation on effects of manifold shape on methanol steam reforming for hydrogen production. / *Renewable Energy*, 2012. - Vol. 39, № 1. - P. 313-322,
53. Kim, N., and Byun, H. Effect of inlet configuration on upward branching of two-phase refrigerant in a parallel flow heat exchanger. / *International Journal of Refrigeration*, 2013. - Vol. 36, № 3. - P. 1062-1077.
54. Salihu Sintalma Abubakar. Factors Affecting orifice Discharge in a Multi-outlet irrigation pipe / A Master's Thesis. Manhattan, Kansas, 1977. – 84 p.
55. Zemlyanaya, N. V., and Gulyakin, A. V. (2017). Analysis of Causes of Non-Uniform Flow Distribution in Manifold Systems with Variable Flow Rate along Length. / *International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety*. Held at the Far Eastern Federal University, September 22-23, 2017.

Vladivostok, Far Eastern Federal University. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017. - Vol. 262. - P. 1-7.

56. Земляная Н. В., Гулякин А. В. Параметризация процесса распределения воды в перфорированных трубопроводах / Вестник инженерной школы ДВФУ. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2018. - № 2(35). – С. 77-85. (www.dvfu.ru/vestnikis).

57. Левицкий Б. Ф. Местные гидравлические сопротивления движению воды с добавками, снижающими сопротивление трения / Б. Ф. Левицкий, В. В. Чернюк // Тезисы докладов Республ. н.-т. конф. “Актуальные проблемы водохозяйственного строительства”. Секция “Гидравлические исследования гидротехнических сооружений и гидрология”. 22-24 октября 1980 г. - г. Ровно: Укр. ин-т инж. водн. хозяйства, 1980. - С. 59.

58. Повх И. Л. Экспериментальное исследование влияния добавок полиакриламида на сопротивление диффузоров / И. Л. Повх, В. В. Чернюк // Инженерно-физический журнал – 1986. – Т. 51, № 3. – С. 357-361.

59. Повх И. Л. Сопротивление конфузоров при турбулентном течении воды с добавками полиакриламида / И. Л. Повх, В. В. Чернюк // Инженерно-физический журнал. – 1989. – Т. 57, № 5. – С. 709-712.

60. Chernyuk V. V., Pitsishin B. S., Orel V. I., Zhuk V. M. Influence of Polyacrylamide Additions on the Head Loss in Abrupt Contractions and Expansions of Pipes / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – July-August, 2002. – Vol. 75, Issue 4. – P. 910-919.

61. Чернюк В. В. Уменьшение неравномерности путевой раздачи воды из напорного трубопровода с помощью добавок полиакриламида / В. В. Чернюк, В. И. Орел // Труды Седьмого международн. конгресса “Вода: экология и технология”. Экватэк-2006: – Москва, 30 мая – 2 июня 2006 г. – 2 с.

62. Чернюк В. В. Вплив додатків поліакриламід у на нерівномірність дискретної шляхової роздачі води з напірного трубопроводу / В. В. Чернюк, В. І. Орел // Промислова гідраліка і пневматика. 2006, № 4(14). С. 37-40.

63. Патент на винахід № 115840 Україна, МПК G05D 7/00, F17D 1/02, F17D 1/08. Спосіб регулювання шляхової витрати рідини в трубопроводах з насадками / В. В. Чернюк, В. В. Іванів (Україна); Національний університет “Львівська політехніка”. – № а 2016 11498; Заявлено 14.11.2016; Опубліковано 26.12.2017, Бюлетень № 24, Український інститут інтелектуальної власності. – 5 с.

64. Penghui Wang, Weitong Pan, Gance Dai (2019). A CFD-based design scheme for the perforated distributor with the control of radial flow. *AIChE Journal*, 21 December 2019, Volume 66, Issue 5, e16901.

65. Juan M. García-Guendulain, José M. Riesco-Ávila, Martín Picón-Núñez (2020). Reducing thermal imbalances and flow nonuniformity in solar collectors through the selection of free flow area ratio. *Energy*, 2020, 1 March, [Volume 194](#), 116897.

66. Kumar Singh R., Rama Rao A. (2011). Fluid flow behavior and distribution in perforated tubes / *Transactions, SMiRT*, №21. P. 6–11.

67. Bosak N., Cherniuk V., Matlai I., Bihun I. (2019). Studying the mutual interaction of hydraulic characteristics of water distributing pipelines and their spraying devices in the coolers at energy units / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 3/8 (99). P. 23-29. (DOI: [10.15587/1729-4061.2019.166309](#)).

68. Кравчук А. М. Чернишев Д. О., Кравчук О. А. Гідравліка напірних перфорованих трубопроводів очисних споруд систем водопостачання та водовідведення: монографія / Київ: Київський національний університет будівництва й архітектури, 2021. 207 с.

69. Liu H., Zong Q., Lv H., Jin J. Analytical equation for outflow along the flow in a perforated fluid distribution pipe / *PLoS ONE*. 2017, №12(10).

70. Кравчук А. М., Кравчук О. Я. (2015). До методики гідравлічного розрахунку напірних перфорованих розподільчих трубопроводів систем водопостачання та водовідведення // *Проблеми водопостачання*,

водовідведення та гідравліки. Київ: Київський національний університет будівництва й архітектури. №25. С. 118–124.

71. Volodymyr V. Chernyuk, Vadym I. Orel. Experimental Verification of a New Method of Calculation for Pressure Distributive Pipelines / Zeszyty Naukowy Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Rzeszów, Poland: Politechnika Rzeszowska, 2009, Nr 266, z. 54. S. 27-34.

72. Чернюк В. В. Вплив похилу напірного розподільчого трубопроводу на нерівномірність роздачі рідини / В. В. Чернюк, В. І. Орел // Вода в харчовій промисловості: Збірник тез доповідей наук.-практ. конф. з міжнародн. участю, 24-25.03.2010 / Одеська нац. акад. харч. технологій. – Одеса: ОНАХТ, 2010. – С. 113-115.

73. Чернюк В. Вплив кута відведення струменів на роботу напірного розподільчого трубопроводу / В. Чернюк, В. Орел, Ю. Калиняк // Геодезія, архітектура та будівництво 2010: Матеріали III Міжнародн. конф. молодих вчених GAC-2010, 25-27.11.2010 р. Львів: НУЛП. 2010. – С. 108-109.

74. Справочник по гидравлике / [Большаков В. А., Константинов Ю. М., Попов В. Н. и др.] / Под ред. В. А. Большакова. – К.: Вища шк., 1984. – 343 с.

75. Возняк О. Т. Планування експерименту та оптимізація вирішень у вентиляційній техніці: монографія / О. Т. Возняк. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 220 с.

76. Пинчук С. И. Организация эксперимента при моделировании и оптимизации технических систем: учебное пособие. / С. И. Пинчук. Днепропетровск: Дива, 2008. 48 с.

77. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976. 296 с.

78. Протодьяконов М. М., Тедер Р. И. Методика рационального планирования экспериментов / М.: Наука, 1970. 76 с.

79. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. Перевод с англ. М.: Мир, 1967. 406 с.

80. Flys I. Ya. Cylindric nozzles with lateral inlets installed in distributive pipeline. investigational bench for investigation of operation of nozzles / I. Ya. Flys, V. V. Ivaniv, I. V. Bihun. // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. – 2019. – № 912. – С. 187-192.

81. Чернюк В. В. Пропускна здатність вихідної циліндричної насадки з бічним входом залежно від кута підведення струменя / В. В. Чернюк, С. В. Андреюк, І. В. Бігун, В. Є. Фасуляк // Ресурси природних вод карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали Де'ятнадцятої міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 8-9 жовтня 2020 р.): Збірник наукових статей. Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2020. С. 151-156.

82. Степанов М. П. Справочник по гидравлике для мелиораторов / М. П. Степанов, И. Х. Овчаренко, Ю. А. Скобельцын. – М.: Колос, 1984. – 207 с.

83. Дикий Н. А. Основы научных исследований: Теплоэнергетика: Учебное пособие для вузов / Н. А. Дикий, А. А. Халатов // Под ред. Г. М. Доброва. – К.: Вища школа, 1985. – 223 с.

84. I. Bihun. Coefficient of flow rate for outlet cylindrical nozzles with lateral inflow installed in distributive pipelines / I. Bihun, V. Ivaniv, V. Cherniuk // In the monograph „Water Supply and Wastewater Disposal. Designing, Construction, Operation and Monitoring”. Edited by Henryk Sobczuk, Beata Kowalska. - Publishing house: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2020. – S. 23-32. (ISBN: 978-83-7947-409-7).

85. Bosak N. Studying the mutual interaction of hydraulic characteristics of water distributing pipelines and their spraying devices in the coolers at energy units / N. Bosak, V. Cherniuk, I. Matlai, I. Bihun // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. - № 3/8 (99). - P. 23-29. (DOI: 10.15587/1729-4061.2019.166309).

86. Cherniuk V. V. Coefficient of Flow Rate of Inlet Cylindrical Nozzles with Lateral Orthogonal Inflow / V. V. Cherniuk, V. V. Ivaniv, I. V. Bihun, and Ja. M. Wojtowicz // Proceedings of CEE 2019. Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering. – Springer. Nature Switzerland AG 2020. – P. 50-57 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_7).

87. Bihun I. V. Coefficients of flow rate of nozzles with lateral inlets installed in pressure distributive pipelines / I. V. Bihun, V. V. Ivaniv, V. V. Cherniuk // Proceedings of the 3rd International Scientific-Practical Conference Water Supply and Wastewater Disposal: designing, construction, operation and monitoring. October, 23th-25th, 2019, Lviv, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House 2019. - S. 256-258.

88. I. V. Bihun Coefficient of Flow Rate of a Nozzle with Lateral Inlet for Regulation of Fluid Dispensation from Distributive Pipelines / Bihun I. V., Ivaniv V. V., Cherniuk V. V. // 2nd Polish IWA Young Water Professionals Conference Polish IWA Young Water Professionals Conference “Emerging Technologies in Water and Wastewater Sector” Warsaw 12-14. 02.2020.

89. Чернюк В. В. Напірні трубопроводи-збирачі у водопостачанні та водовідведенні / В. В. Чернюк, В. В. Іванів, І. В. Бігун // Ресурси природних вод карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали Вісімнадцятої міжнародн. наук.-практичн. конференц. (м. Львів, 23-24 травня, 2019 р.): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2019. - С. 254-257.

90. Kulyk M. Determination of the procedure for elimination of polluting components from industrial and drainage sewage / M. Kulyk, I. Bihun // 3-я міжнародна науково-практична конференція Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг. (23-25 жовтня, 2019 р.): Матеріали конференції. - Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2019. - С. 55-56.

91. The influence of self-cleaning processes on the quality of drinking water of Stryi water intake wells. V. Snitynskyi, P. Khirivskyi, V. Cherniuk, I. Hnativ, R. Hnativ, I. Bihun. / Proceedings of the IV International Scientific-Practical Conference Water Supply and Wastewater Disposal: Designing, construction, operation and monitoring. 20-22 October, 2021, Lviv. P. 183-184.

92. Заявка на винахід № . Україна, МПК 7/00 G05D 7/00, F17D 1/02, F17D 1/08. Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації / В. В. Чернюк, В. В. Іванів, Бігун І.В., Фасуляк В. Є, Чернюк М. В. (Україна); Національний університет “Львівська політехніка”. – № а 2022 ; Заявлено . .2022. Український інститут інтелектуальної власності. – 5 с.

93. Іванів В. В. Застосування та методи гідравлічного розрахунку напірних трубопроводів-збирачів / В. В. Іванів, І. В. Бігун // Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Збірник наукових праць. Технічні науки. Випуск № 4(88). – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 2019. – С. 76-89. (<https://doi.org/10.31713/vt420190>)

94. Volodymyr Pohrebennyk. Evaluation of the Pollution Level of Surface and Waste Water / Volodymyr Pohrebennyk, Mykhailo Kulyk, Iryna Bihun // Journal of Ecological Engineering. Volume 21, Issue 5, July 2020. - Pages 180-188. (<https://doi.org/10.12911/22998993/122675>)

95. Volodymyr Snitynskyi. The Influence of Self-Cleaning Processes on the Quality of Drinking Water of Stryi Water Intake Wells / Volodymyr Snitynskyi, Petro Khirivskyi, Volodymyr Cherniuk, Ihor Hnativ, Roman Hnativ, Orest Verbovskiy, Irina Bihun. // Journal of Ecological Engineering (JEE), ISSN 2299-8993. 2022, No. 23(4), p. 25-32. <https://doi.org/10.12911/22998993/146335>.

96. Чернюк В. В. Вплив кута приєднання вхідних струменів на нерівномірність роботи напірного трубопроводу-збирача / В. В. Чернюк, В. В. Іванів // Промислова гідравліка і пневматика (Вінницьк. держ. аграрн. ун-т, м. Вінниця). – 2017. – № 2(56) – С. 21-25.

97. Чернюк В. В. Вплив значення кутів приєднання вхідних струменів на нерівномірність шляхового притоку води до напірного трубопроводу-збирача / В. В. Чернюк, В. В. Іванів // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. – 2017. – № 877. – С. 218–224.

98. Volodymyr Cherniuk. Influence of Values of Angle of Jet-joining on Non-uniformity of Water Inflow Along the Path in Pressure Collector-Pipeline / Volodymyr Cherniuk, Vasyl Ivaniv // “Environmental Engineering”, 10th International Conference. - Vilnius Gediminas Technical University Lithuania, 27-28 April 2017. – 7 s. (eISSN 2029-7092 / eISBN 978-609-476-044-0; Article ID: enviro.2017.073), (Scopus).

99. Cherniuk Volodymyr V. Wpływ wartości kątów przyłączenia strumieni na nierównomierność przepływu wody do rurociągu-zbieracza / Volodymyr V. Cherniuk., Vasyl V. Ivaniv. – Gaz, Woda i Technika Sanitarna (Polska). - 2018. - № 3. – S. 116-121.

100. Булах В. В. Исследование движения потока газозвоздушной смеси с переменным расходом вдоль пути / В. В. Булах // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – 2006. - с. 84-93.

101. Семененко Е. В. Определение критических параметров гидросмеси, содержащей гидродинамически активное вещество, в трубопроводе с выпусками / Е. В. Семененко, В. Б. Бобров, Н. А. Никифорова // Вісник КТУ, Випуск 23, 2009. – с. 56-59.

ДОДАТКИ

Додаток 1



А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи І. В. Бігун “Гідравлічні методи регулювання роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів”, яка виконана на кафедрі гідротехніки та водної інженерії Національного університету “Львівська політехніка”

Цим актом підтверджується, що результати наукової роботи Бігун І. В. з регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач (ТЗ) передано БУВР річок Західного Бугу та Сяну для впровадження у виробництво.

За наявності транзитної витрати рідини на вході у напірний трубопровід-збирач початкова його ділянка працює у режимі напірного розподільного трубопроводу, реалізуючи роздачу, а не збирання рідини. Причиною роздачі рідини є те, що тиск усередині перфорованого трубопроводу-збирача більший, ніж у рідині, котра омиває ТЗ зовні.

Запропоновано енергію потоку, котрий тече у напірному трубопроводі-збирачі, використовувати для локального змінювання геометричних характеристик і гідродинамічних параметрів цього потоку у створах вхідних насадок у ТЗ. Застосування винайденого “Способу регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрою для його реалізації” запобігає роздачі рідини з напірного ТЗ при наявності транзитної витрати рідини на вході в ТЗ та забезпечує притік рідини у трубопровід-збирач. У цьому полягає технічна й економічна ефективності роботи ТЗ, заявленого на видачу патенту на винахід.

Цей акт не є підставою для взаємних фінансових розрахунків.

Начальник відділу
з управління інфраструктурою

Надія Юр

Начальник технічного відділу

Олександр Антонюк



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

проректор з науково-педагогічної
роботи Національного університету
“Львівська політехніка”,

доцент Давидчак О. Р.
17.06.2022 р.

А К Т

впровадження результатів дисертаційного дослідження
Бігун Ірини Володимирівни

Матеріали наукових досліджень з дисертаційної роботи Бігун І. В. “Гідравлічні методи регулювання роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів”, представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії, використовуються на кафедрі гідротехніки та водної інженерії при викладанні студентам спеціальності 192 “Будівництво та інженерія довкілля”, другого рівня освіти, розділу “Напірні потоки зі змінною шляховою витратою” з навчального предмету “Засоби керування напірними потоками”. Зокрема студентів знайомлять зі “Способом регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристроєм для його реалізації”, котрий запобігає роздачі рідини з напірного трубопроводу-збирача (ТЗ) при наявності транзитної витрати рідини на вході в ТЗ та забезпечує притік рідини у ТЗ по усій його довжині.

Значення коефіцієнта витрати рідини крізь вихідні циліндричні насадки з бічним, ортогональним до осі насадки, входом струменя, залежно від кута відведення струменя від розподільного трубопроводу, отримані Бігун І. В., застосовуються при викладанні предмету “Гідравліка та протипожежне водопостачання” для студентів першого рівня освіти спеціальності 261 “Пожежна безпека”.

Директор Інституту будівництва

й інженерних систем, проф. д. т. н.

Бліхарський З. Я.

Завідувач кафедри гідротехніки

та водної інженерії, проф. д. т. н.

Чернюк В. В.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ

Розділ монографії

1. I. Bihun. Coefficient of flow rate for outlet cylindrical nozzles with lateral inflow installed in distributive pipelines / I. Bihun, V. Ivaniv, V. Cherniuk // In the monograph „Water Supply and Wastewater Disposal. Designing, Construction, Operation and Monitoring”. Edited by Henryk Sobczuk, Beata Kowalska. - Publishing house: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2020. – S. 23-32. (ISBN: 978-83-7947-409-7).

Статті

2. Bosak N. Studying the mutual interaction of hydraulic characteristics of water distributing pipelines and their spraying devices in the coolers at energy units / N. Bosak, V. Cherniuk, I. Matlai, I. Bihun // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. - № 3/8 (99). - P. 23-29. (DOI: 10.15587/1729-4061.2019.166309). (*SCOPUS*)

3. Cherniuk V. V. Coefficient of Flow Rate of Inlet Cylindrical Nozzles with Lateral Orthogonal Inflow / V. V. Cherniuk, V. V. Ivaniv, I. V. Bihun, and Ja. M. Wojtowicz // Proceedings of CEE 2019. Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering. – Springer. Nature Switzerland AG 2020. – P. 50-57 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_7). (*SCOPUS*)

4. Бігун І. В. Особливості застосування напірних розподільних трубопроводів у різних технічних системах / І. В. Бігун // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. – 2019. – № 1(2). – С. 14-20. (*Фахова, одиночне авторство*)

5. Flys I. Ya. Cylindric nozzles with lateral inlets installed in distributive pipeline. investigational bench for investigation of operation of nozzles / I. Ya. Flys, V. V. Ivaniv, I. V. Bihun. // Вісник Національного університету “Львівська

політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. – 2019. – № 912. – С. 187-192. (Фахова)

6. Іванів В. В. Застосування та методи гідравлічного розрахунку напірних трубопроводів-збирачів / В. В. Іванів, І. В. Бігун // Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Збірник наукових праць. Технічні науки. Випуск № 4(88). – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 2019. – С. 76-89. (<https://doi.org/10.31713/vt420190>), (Фахова)

7. Volodymyr Pohrebennyk. Evaluation of the Pollution Level of Surface and Waste Water / Volodymyr Pohrebennyk, Mykhailo Kulyk, Iryna Bihun // Journal of Ecological Engineering. Volume 21, Issue 5, July 2020. - Pages 180-188. (<https://doi.org/10.12911/22998993/122675>) (SKOPUS)

8. Cherniuk, V., Hnativ, R., Kravchuk, O., Orel, V., Bihun, I., Cherniuk, M. The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 6, No. 7 (114), 2021, p. 93-103. (doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852>), (SCOPUS).

9. Volodymyr Snitynskyi, Petro Khirivskyi, Volodymyr Cherniuk, Ihor Hnativ, Roman Hnativ, Orest Verbovskiy, Irina Bihun. The Influence of Self-Cleaning Processes on the Quality of Drinking Water of Stryi Water Intake Wells / Journal of Ecological Engineering (JEE), ISSN 2299-8993. 2022, No. 23(4), p. 25-32. (<https://doi.org/10.12911/22998993/146335>), (SCOPUS).

Матеріали конференцій

10. Чернюк В. В. Напірні розподільні трубопроводи в енергетиці / В. В. Чернюк, В. В. Іванів, І. В. Бігун // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам в регіоні. Матеріали X-ої міжнародної наук.-практичн. конференц. (4-5 квітня, 2019 р.): Збірник наукових праць. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2019. – С. 62-67. (Книга має 258 с.)

11. Чернюк В. В. Напірні трубопроводи-збирачі у водопостачанні та водовідведенні / В. В. Чернюк, В. В. Іванів, І. В. Бігун // Ресурси природних вод карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали Вісімнадцятої міжнародн. наук.-практичн. конференц. (м. Львів, 23-24 травня, 2019 р.): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2019. - С. 254-257. (Книга має 276 с.)

12. Bihun I. V. Coefficients of flow rate of nozzles with lateral inlets installed in pressure distributive pipelines / I. V. Bihun, V. V. Ivaniv, V. V. Cherniuk // Proceedings of the 3rd International Scientific-Practical Conference Water Supply and Wastewater Disposal: designing, construction, operation and monitoring. October, 23th-25th, 2019, Lviv, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House 2019. - S. 256-258. (The book has 265 pages).

13. Kulyk M. Determination of the procedure for elimination of polluting components from industrial and drainage sewage / M. Kulyk, I. Bihun // 3-я міжнародна науково-практична конференція Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг. (23-25 жовтня, 2019 р.): Матеріали конференції. - Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2019. - С. 55-56. (Книга має 265 с.)

14. I. V. Bihun Coefficient of Flow Rate of a Nozzle with Lateral Inlet for Regulation of Fluid Dispensation from Distributive Pipelines / Bihun I. V., Ivaniv V. V., Cherniuk V. V. // 2nd Polish IWA Young Water Professionals Conference “Emerging Technologies in Water and Wastewater Sector” Warsaw 12-14. 02.2020.

15. Чернюк В. В. Пропускна здатність вихідної циліндричної насадки з бічним входом залежно від кута підведення струменя / В. В. Чернюк, С. В. Андреюк, І. В. Бігун, В. Є. Фасуляк // Ресурси природних вод карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали Дев'ятнадцятої міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 8-9 жовтня 2020 р.): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2020. - С. 151-156. (Книга має 230 с.)

16. The influence of self-cleaning processes on the quality of drinking water of Stryi water intake wells. V. Snitynskyi, P. Khirivskyi, V. Cherniuk, I. Hnativ, R. Hnativ, I. Bihun. / Proceedings of the IV International Scientific-Practical Conference Water Supply and Wastewater Disposal: Designing, construction, operation and monitoring. 20-22 October, 2021, Lviv. P. 183-184.

Заявка на винахід

17. Заявка на винахід № а202201571. Україна, МПК G05D 7/00, F17D 1/02, F17D 1/08. Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації / В. В. Чернюк, В. В. Іванів, І. В. Бігун, В. Є. Фасуляк, М. В. Чернюк (Україна); Національний університет “Львівська політехніка”. Заявлено 16.05.2022. Український інститут інтелектуальної власності. – 9 с.