

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Фасуляк Вадим Євгенійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 532.559.3:532.542
(індекс)

ДИСЕРТАЦІЯ

ГІДРАВЛІЧНІ РОЗРАХУНКИ НАПІРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ-ЗБИРАЧІВ З ДИСКРЕТНИМ ВХОДОМ РІДИНИ


(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


В. Є. Фасуляк
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Чернюк Володимир Васильович, д. т. н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Львів – 2024

АНОТАЦІЯ

Фасуляк В. Є. Гідравлічні розрахунки напірних трубопроводів-збирачів з дискретним входом рідини – 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, 2024.

Напірні ТЗ знайшли широке застосування в різних галузях техніки: водопостачанні (водозабірні споруди з трубчастими оголовками, інфільтраційні водозабори, променеві водозабори, водопровідні очисні споруди (швидкі фільтри); осушувальні системи меліорації, водопониженні (будівельні майданчики та забудовані території; водовідведенні (водовідвідні мережі, каналізаційні очисні споруди (біофільтри для біологічного очищення, піщані фільтри; теплопостачанні (сонячні колектори); вентиляції (витяжні системи); енергетиці (паропроводи-збирачі, градирні); машинобудуванні (дослідні стенди, ін.)

Потік рідини у трубопроводі-збирачі формується за рахунок притоку струменів крізь отвори у його стінках. Витрата рідини уздовж ТЗ збільшується. Відповідно зростають гідравлічні втрати напору і затрата енергії на створення швидкісного напору потоку Літературний аналіз свідчить, що при гідравлічних розрахунках напірних трубопроводів-збирачів усі автори беруть постійне значення гідравлічного коефіцієнта тертя λ по усій довжині ТЗ. Однак неповне врахування конструктивних параметрів ТЗ і гідродинамічних характеристик потоку зі змінною шляховою витратою спричиняє серйозні прорахунки при проектуванні ТЗ, що в свою чергу послаблює ефективність їх роботи.

Метою даного дослідження є зменшення нерівномірності притоку рідини до напірного трубопроводу-збирача з врахуванням втрат напору на тертя.

Об'ємна витрата рідини вздовж течії в ТЗ, внаслідок притоку струменів збільшується. Відповідно до цього відбувається зростання гідравлічних втрат

напору уздовж ТЗ. Нехтування змінністю коефіцієнта гідравлічного тертя призводить до серйозних помилок при розрахунку ТЗ.

Диференціал втрат напору на подолання тертя вздовж трубопроводу-збирача нами виражено через дві змінних загальний робочий напір і незалежну змінну відстань. Отримано залежності для гідравлічного коефіцієнта тертя для ламінарного режиму течії рідини, який реалізується на початковій ділянці, а також для трьох ділянок турбулентного режиму течії: гідравлічно гладких труб, перехідного та гідравлічно шорстких труб, котрі розташовані одна за одною.

Опираючись на диференціальне рівняння напірного руху рідини зі змінною витратою уздовж потоку, отримано рівняння для обчислення притоку рідини в трубопровід-збирач крізь отвори у його стінці для ламінарних потоків при змінному значенні коефіцієнта Дарсі. Також, за цих умов, виведено математичну залежність для розрахунку повного робочого напору потоку рідини в трубопроводі-збирачі.

Змонтовано та описано експериментальний стенд за допомогою якого проводиться дослідження шляхового надходження рідини в напірний ТЗ, котрий змонтований у футлярі, Робота стенду можлива при режимах наявності та відсутності транзитного потоку води в трубопровід-збирач. Описано методику проведення дослідів та обробки отриманих результатів.

Розрахунки та побудова графіків проводились з використанням програми Microsoft Excel на персональному комп'ютері

Проведено розрахунок сумарної похибки вимірювань при проведенні досліджень на експериментальному стенді. Встановлено, що вона не перевищує 7,45%, що знаходиться в нормативних межах.

Проведено аналіз відповідності отриманих теоретичних залежностей до даних експериментальних досліджень.

Виявлено, що у певних інтервалах значень критерію Рейнольдса, нерівномірність притоку води вздовж шляху до напірного ТЗ зменшувалась зі збільшенням показників критерію Re_D . При наявності транзитної витрати рідини в ТЗ на його початку, може відбуватись роздача рідини.

Дисертаційна робота має економічний та екологічний ефекти, соціальне значення та технічні переваги в порівнянні з відомим розв'язанням задачі оптимізації роботи трубопроводів-збирачів.

Винайдено «Спосіб регулювання припливу рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації» (Патент №128075 Україна МПК G05D 7/00, F17D 1/02, F17D 1/08, заявлено 16.05.2022, опубліковано 28.03.2024. Бюлетень №13. Інститут інтелектуальної власності). Технічні перевагою даного способу є усунення роздачі рідини з напірного ТЗ за наявності транзитного потоку на вході в трубопровід-збирач, та забезпечення притоку рідини в ТЗ по усій його довжині.

Матеріали дисертаційних досліджень впроваджено в навчальний процес кафедри гідротехніки та водної інженерії, передано та впроваджено ТОВ «ТЕО ІНЖИНІРИНГ» (м. Львів) при проведенні проектних робіт.

Ключові слова: напірний трубопровід-збирач; режими руху рідини; коефіцієнт гідравлічного тертя; нерівномірність шляхового притоку рідини.

Основні положення дисертаційної роботи апробовано на семи міжнародних науково-практичних конференціях.

Список праць, опублікованих за темою дисертації

Статті

1. Zhuk V. Dependency Between the Total and Effective Imperviousness for Residential Quarters of the Lviv City / Zhuk V., Vovk L., Matlai I., Popadiuk I., Mysak I., Fasuliak V. // Journal of Ecological Engineering. – 2020. - 21(5). - P.56-62. (<https://doi.org/10.12911/22998993/122191>) (Фасуляк В. Є.: робота з даними, обробка даних; Жук В. М.: концептуалізація, написання статті, формулювання висновків; Вовк Л. І.: аналіз результатів попередніх досліджень; Матлай І. І.: візуалізація, аналіз та інтерпретація даних; Попадюк І. Ю.: нагляд, проведення досліджень; Мисак І. В.: рецензування та редагування статті) (*SCOPUS*)
2. Cherniuk V. V. Variability of Darcy Friction Factor in Differential Equation for Enforced Flow in Collector-pipeline / V. V. Cherniuk, V. Ye. Fasuliak, I. V. Bihun, M. V. Cherniuk // Proceedings of CEE 2023. Civil and Environmental Engineering and Architecture. – Springer. Nature Switzerland AG 2023. – P. 58-69 (https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_7) (Фасуляк В. Є.: аналіз результатів попередніх досліджень, концептуалізація, візуалізація; Чернюк В. В.: аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Бігун І. В.: формулювання висновків; Чернюк М. В.: рецензування та редагування статті. У даній праці описані особливості розрахунку напірних трубопроводів-збирачів відповідно до теми дисертаційної роботи) (*SCOPUS*)
3. Жук В. М. Експериментальне дослідження стоку з водопроникного бетонного покриття для високоінтенсивних дощів малої тривалості./ Жук В. М., Качмар І. З., Фасуляк В. Є. // Науковий вісник НЛТУ України, – 2019. - 29(9), - С. 132-135. (<https://doi.org/10.36930/40290923>) (Фасуляк В. Є.: проведення досліджень, робота з матеріалами; Жук В. М.: концептуалізація, написання статті, методологія, формулювання висновків; Качмар І. З.: аналіз результатів попередніх досліджень, обробка даних, візуалізація) (*Фахова*)
4. Босак, М. П. Дослідження експлуатаційного режиму свердловин водозабору та водогону./ Босак М. П., Одуха М. С., Гвоздецький О. Г., Фасуляк

В. Є. // Науковий вісник НЛТУ України, – 2019. - 29(9), - С. 126-131. (<https://doi.org/10.36930/40290922>) (Фасуляк В. Є.: візуалізація, рецензування та редагування статті; Босак М. П.: концептуалізація, написання статті, формулювання висновків; Гвоздецький О. Г.: аналіз результатів попередніх досліджень, аналіз та інтерпретація даних; Одуха М. С.: нагляд, перевірка достовірності). (Фахова)

Матеріали конференцій

5. 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.

6. Жук В. М. Використання полідиметилсилоксанів для зниження випаровування із водної поверхні / Жук В.М., Гриців О.Б., Регуш А.Я., Фасуляк В.Є. // “Ресурси природних вод карпатського регіону” Матеріали ХХ міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів 26-27 травня 2022 р): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2022. - С. 90-92.

7. Чернюк В. В. Змінність коефіцієнта тертя у диференціальному рівнянні для напірних потоків рідин у трубопроводах-збирачах. / В. В. Чернюк, В. Є. Фасуляк, І. В. Бігун, М. В. Чернюк // “Ресурси природних вод карпатського регіону” / Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали ХХІ міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 25-26 травня 2023 р.): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2023. - С. 80-85.

8. Жук В. М. Екологічні аспекти використання полідиметилсилоксанів для зниження VI випаровування із водної поверхні / В. М. Жук, А. Я. Регуш, О.

Б. Гриців, В. Є. Фасуляк.// «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції (м. Дубляни 8-9 червня 2023 р.): Збірник тез доповідей. – Дубляни: ЛНУП, 2023. - С. 79-81.

9. Cherniuk V. V. Variability of Darcy Friction Factor in Differential Equation for Enforced Flow in Collector-pipeline / V. V. Cherniuk, V. Ye. Fasuliak, I. V. Bihun, M. V. Cherniuk // Proceedings of the XVIII International Scientific Conference “Rzeszów – Lviv – Košice” Current Issues of Civil and Environmental Engineering and Architecture, 6-8 September 2023, Rzeszów (Poland). P. 16.

10. Фасуляк В.Є. Дощові сади як елемент сталого управління водними ресурсами в населених пунктах / Фасуляк В.Є., Жук В.М., Регуш А.Я., Гриців О.Б., Регуш В.А.// Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference “Problems of creating scientific ideas about world development”, 3-6 October 2023) Ottawa (Canada) International Science Group. P. 16-17

11. Чернюк В. В. Урахування змінності коефіцієнта тертя у диференціальному рівнянні для напірних трубопроводів-збирачів / В. В. Чернюк, В. Є. Фасуляк, І. В. Бігун, М. П. Кулик // Збірник матеріалів V Міжнародної науково-технічної конференції “Водопостачання і водовідведення, проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг”, 18-20 жовтня 2023 року, м. Львів, Національний Університет “Львівська політехніка”. С. 26-27.

Патент на винахід

12. Патент №128075 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”. – № а202201571. – заяв. 16.05.2022. – опубл. 28.03.2024. – Бюл. № 13. Інститут інтелектуальної власності.

ANNOTATION

Fasuliak V. Ye. Hydraulic calculations of pressure collector-pipelines with a discrete liquid inlet - 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, 2024.

Pressure collector-pipelines have found wide application in various fields of technology: water supply (water intake facilities with tubular heads, infiltration water intakes, radial water intakes, water purification facilities (quick filters); drainage systems of reclamation, water lowering (construction sites and built-up areas); water drainage (water drainage networks, sewage wastewater treatment facilities (biofilters for biological treatment, sand filters); heat supply (solar collectors); ventilation (exhaust systems); power engineering (steam pipelines-collectors, cooling towers); mechanical engineering (research stands, etc.)

The flow of liquid in the collector-pipeline is formed due to the inflow of jets through the holes in its walls. Fluid consumption along the CP increases. Accordingly, the hydraulic head loss and energy consumption to create a high-speed flow head increase. The literature analysis shows that in the hydraulic calculations of pressure collector-pipelines, all authors take a constant value of the hydraulic coefficient of friction λ along the entire length of the CP. However, incomplete consideration of the design parameters of the CP and the hydrodynamic characteristics of the flow with variable path flow causes serious miscalculations in the design of the CP, which in turn weakens the efficiency of their operation.

The purpose of this study is to reduce the unevenness of the flow of liquid to the pressure collector-pipeline, taking into account frictional pressure losses.

The volume flow of liquid along the flow in the CP increases as a result of the inflow of jets. Accordingly, there is an increase in hydraulic pressure losses along the collector-pipeline. Neglecting the variability of the coefficient of hydraulic friction leads to serious errors in the calculation of CP.

The differential pressure loss to overcome friction along the collector pipeline is expressed by us in terms of two variables - the total working pressure and the independent variable distance. Dependencies were obtained for the hydraulic coefficient of friction for the laminar flow regime of the liquid, which is implemented in the initial section, as well as for three sections of the turbulent flow regime: hydraulically smooth pipes, transitional and hydraulically rough pipes, which are located one after the other.

Based on the differential equation of pressure movement of liquid with variable flow rate along the flow, an equation is obtained for calculating the inflow of liquid into the collector-pipeline through the holes in its wall for laminar flows with a variable value of the Darcy coefficient. Also, under these conditions, a mathematical dependence was derived for calculating the full working pressure of the liquid flow in the collector-pipeline.

An experimental stand has been assembled and described, with the help of which a study of the inflow of liquid into the pressure tank, which is mounted in a case, is carried out. The method of conducting experiments and processing the obtained results is described.

Calculations and graphing were carried out using the Microsoft Excel program on a personal computer

The calculation of the total measurement error during the research on the experimental stand was carried out. It was established that it is 7.454%, which is within the regulatory limits.

An analysis of the correspondence of the obtained theoretical dependences to the data of experimental studies was carried out.

It was found that in certain intervals of the values of the Reynolds criterion, the unevenness of the water inflow along the path to the pressure collector-pipeline decreased with an increase in the parameters of the Re_D criterion. If there is a transit flow of liquid in the CP at its beginning, liquid distribution may occur.

The dissertation work is characterized by economic and ecological effects, has social significance and technical advantages in comparison with the known solution to the problem of optimization of the work of collecting pipelines.

Invented "A method of regulating the flow of liquid into a pressure collector-pipeline and a device for its implementation" (Patent No. 128075 Ukraine IPC G05D 7/00, F17D 1/02, F17D 1/08, declared on 05/16/2022, published on 03/28/2024). The technical advantage of this method is the elimination of liquid distribution from the pressure tank in the presence of a transit flow at the entrance to the collector pipeline, and ensuring the inflow of liquid into the tank along its entire length.

The materials of dissertation studies were introduced into the educational process of the Department of Hydraulic Engineering and Water Engineering, transferred to "TEO ENGINEERING" LLC (Lviv) and implemented during design work.

Keywords: pressure collector-pipeline; fluid movement modes; coefficient of hydraulic friction along the path; non-uniformity of the inflow of fluid.

The main provisions of the dissertation work received proper approval at seven international scientific and practical conferences.

Articles

1. Zhuk V. Dependency Between the Total and Effective Imperviousness for Residential Quarters of the Lviv City / Zhuk V., Vovk L., Matlai I., Popadiuk I., Mysak I., Fasuliak V. // Journal of Ecological Engineering. – 2020. - 21(5). - P.56-62. (<https://doi.org/10.12911/22998993/122191>) (Fasuliak V. Ye.: contributed data, data curation; Zhuk V. M.: conceptualization, conclusions, writing – original draft; Vovk L. I.: analysis of the results of previous studies; Matlai I. I.: visualization, analyzed and interpreted the data; Popadiuk I. Yu.: supervision, performed the experiments; Mysak I. V.: writing – review & editing) (*SCOPUS*)
2. Cherniuk V. V. Variability of Darcy Friction Factor in Differential Equation for Enforced Flow in Collector-pipeline / V. V. Cherniuk, V. Ye. Fasuliak, I. V. Bihun, M. V. Cherniuk // Proceedings of CEE 2023. Civil and Environmental Engineering and Architecture. – Springer. Nature Switzerland AG 2023. – P. 58-69 (https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_7) (Fasuliak V. Ye.: analysis of the results of previous studies, conceptualization, visualization; Cherniuk V. V.: analyzed and interpreted the data, writing – original draft, methodology; Bihun I. V.: conclusions; Cherniuk M. V.: methodology.) (*SCOPUS*)
3. Zhuk V. M. Experimental study of runoff from a waterproof concrete coating for high-intensity rains of short duration / Zhuk V. M., Kachmar I. Z., Fasuliak V. Ye. // Scientific Bulletin of UNFU– 2019. - 29(9), - P. 132-135. (<https://doi.org/10.36930/40290923>) (Fasuliak V. Ye.: performed the experiments, contributed data; Zhuk V. M.: conceptualization, writing – original draft, methodology, conclusions; Kachmar I. Z.: analysis of the results of previous studies, data curation, visualization) (Professional)
4. Bosak, M. P. Study of the operational regime of water intake and water delivery wells./ Bosak M. P., Odukha M. S., Gvozdetskyi O. G., Fasuliak V. Ye.// Scientific Bulletin of UNFU, – 2019. - 29(9), - P. 126-131. (<https://doi.org/10.36930/40290922>) (Fasuliak V. Ye.: visualization, writing – review & editing; Bosak M. P.: conceptualization, writing – original draft,

conclusions; Gvozdetskyi O. G.: analysis of the results of previous studies, analyzed and interpreted the data; Odukh M. S.: validation, visualization) (Professional)

Conference materials

5. V. V. Cherniuk. Throughput capacity of the output cylindrical nozzle with a side inlet depending on the angle of the jet introduction / V. V. Cherniuk, S. V. Andreyuk, I. V. Bigun, V. Ye. Fasuliak // Resources of natural waters of the Carpathian of the region / Problems of protection and rational use. Materials of the Nineteenth International Scientific and Practical Conference (Lviv, October 8-9, 2020): Collection of scientific articles. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2020. P. 151-156.

6. Zhuk, V.M. The use of polydimethylsiloxanes to reduce evaporation from the water surface / Zhuk, V.M., Hrytsiv, O.B., Regush, A.Ya., Fasuliak, V.E. // "Natural water resources of the Carpathian region" Materials of the 20th international scientific and practical conference (Lviv, May 26-27, 2022): Collection of scientific articles. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2022. P. 90-92.

7. Cherniuk V.V. Variability of the coefficient of friction in the differential equation for pressure flows of liquids in collecting pipelines. / V. V. Cherniuk, V. E. Fasuliak, I. V. Bigun, M. V. Cherniuk // "Natural water resources of the Carpathian region" / Problems of protection and rational use. Materials of the 21st international scientific and practical conference (Lviv, May 25-26, 2023): Collection of scientific articles. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2023. P. 80-85.

8. V. M. Zhuk. Ecological aspects of the use of polydimethylsiloxanes to reduce VI evaporation from the water surface / V. M. Zhuk, A. Ya. Regush, O. B. Hrytsiv, V. E. Fasuliak. // "Effective technologies and designs in construction and village architecture" Materials of the 6th international scientific and technical conference (Dubliany, June 8-9, 2023): Collection of abstracts of reports. – Dublyany: LNUP, 2023. P. 79-81.

9. Cherniuk V. V. Variability of Darci Friction Factor in Differential Equation for Enforced Flow in Collector-pipeline / V. V. Cherniuk, V. Ye. Fasuliak, I. V. Bihun, M. V. Cherniuk // Proceedings of the XVIII International Scientific

Conference “Rzeszów – Lviv – Košice” Current Issues of Civil and Environmental Engineering and Architecture, 6-8 September 2023, Rzeszów (Poland). P. 16.

10. Fasuliak V.E. Rain gardens as an element of sustainable management of water resources in settlements / Fasuliak V.E., Zhuk V.M., Regush A.Ya., Hrytsiv O.B., Regush V.A.// Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference “Problems of creating scientific ideas about world development”, 3-6 October 2023) Ottawa (Canada) International Science Group. P. 16-17

11. V. V. Cherniuk Taking into account the variability of the friction coefficient in the differential equation for pressure pipelines-collectors / V. V. Cherniuk, V. E. Fasuliak, I. V. Bighun, M. P. Kulyk // Collected materials of the V International Scientific - technical conference "Water supply and drainage, design, construction, operation, monitoring", October 18-20, 2023, Lviv, Lviv Polytechnic National University. P. 26-27.

Patent for the invention

12. Patent No. 128075 Ukraine IPC G05D 7/00, F17D 1/02, F17D 1/08. The method of regulating the flow of liquid into the pressure pipeline-collector and the device for its implementation / V. V. Chernyuk, V. V. Ivaniv, I. V. Bigun, V. E. Fasulyak, M. V. Chernyuk (Ukraine)// National Lviv Polytechnic University. – No. a202201571. - statement 05/16/2022. - publ. 28.03.2024. - Bull. No. 13. Institute of Intellectual Property.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	17
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ НАПІРНИХ ТРУБОПОВОДІВ-ЗБИРАЧІВ (ТЗ).....	24
1.1. Поширення напірних потоків зі шляховим приєднанням маси	24
1.2. Проблеми гідравлічного розрахунку напірних ТЗ	35
1.3. Експериментальні дослідження	35
1.4. Аналітичні рівняння	40
1.5. Диференціальні рівняння	43
1.6. Підсумки розділу 1.....	46
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІРНОГО РУХУ РІДИНИ ЗІ ШЛЯХОВИМ ПРИЄДНАННЯМ МАСИ	47
2.1. Постановка проблеми	47
2.2. Виведення диференційного рівняння	49
2.3. Приведення рівняння до двох змінних	51
2.4. Виведення формул для диференціала втрат напору в ТЗ	54
2.4.1. Ламінарний режим течії	54
2.4.2. Турбулентний режим течії	55
2.4.2.1. Ділянка гладкостінних труб	55
2.4.2.2. Ділянка доквадратичного опору	56
2.4.2.3. Ділянки квадратичного опору	57
2.5. Розв'язування рівняння для ламінарного режиму течії	57
2.6. Методика розрахунку трубопроводів-збирачів	65
2.7. Підсумки розділу 2	66

РОЗДІЛ 3. ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	67
3.1. Обґрунтування геометричних параметрів і гідродинамічних характеристик досліджуваних ТЗ	67
3.2. Планування експериментів	67
3.3. Стенд для дослідження шляхового притоку води до напірних трубопроводів-збирачів	69
3.4. Методика проведення дослідів	76
3.5. Математична обробка експериментальних даних	77
3.6. Оцінка точності вимірів	78
3.7. Підсумки розділу 3.....	80
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	81
4.1. Обґрунтування параметрів ТЗ, які досліджуються	81
4.1.1. Коефіцієнт витрати вхідної насадки.....	81
4.1.2. Критерій Рейнольдса	82
4.1.3. Коефіцієнт гідравлічного тертя	83
4.2. Зміна робочого напору уздовж трубопроводу-збирача	84
4.3. Зміна витрати струменів крізь насадки	86
4.4. Зміна витрати потоку уздовж трубопроводу-збирача.....	88
4.5. Підсумки розділу 4.....	90
РОЗДІЛ 5. ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	91
5.1. Технічні переваги	91
5.2. Економічний ефект	96
5.3. Соціальне значення	96
5.4. Екологічний ефект	97
5.5. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами	98

5.6. Упровадження результатів роботи	98
5.7. Перспективи подальших досліджень	99
5.8. Підсумки розділу 5.....	99
ВИСНОВКИ	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	102
ДОДАТКИ	115
Додаток А. Акт впровадження у ТОВ ТЕО ІНЖИНІРИНГ	116
Додаток Б. Акт впровадження у навчальний процес НУЛП	117
Додаток В. Список публікацій	118

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

- ДРРРЗВ – диференціальне рівняння руху рідини змінної витрати;
- РТ – розподільний трубопровід;
- ТЗ – трубопровід-збирач;
- D – внутрішній діаметр трубопроводу, [м];
- d – внутрішній діаметр входної циліндричної насадки, [м];
- $(d/D)^2$ – відношення площ поперечних перерізів вихідної насадки і 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, [м];
- H_{out} – фактичний напір зовні трубопроводу, [м];
- $p_i/\rho g$ – п'єзометричний напір на i -ій насадці, [м];
- Q_{tr} – транзитна витрата на початку трубопроводу-збирача, [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-збирача, [0];
- V – середня швидкість основного потоку в трубопроводі-збирачі, [м/с];
- v – середня швидкість струменя у входній насадці, [м/с];
- $(\alpha V^2/2g)_i$ – швидкісний напір потоку всередині трубопроводу-збирача 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 входній насадці трубопроводу-збирача, [м];
- $Z_{(0)}$ – глибина занурення ТЗ під рівень зовнішнього потоку рідини [м].
- η_H – нерівномірність розподілу робочих напорів у трубопроводі-збирачі, [0];

η_Q – нерівномірність притоку води до трубопроводів-збирачів, [0];

λ – гідравлічний коефіцієнт тертя, [0];

μ – коефіцієнт витрати вхідної циліндричної насадки, [0];

ψ – кут нахилу поздовжньої осі ТЗ до обрїю, [град];

Ω – площа поперечного перерїзу трубопроводу-збирача, [м²];

ω - площа поперечного перерїзу вхідної насадки, [м²];

ВСТУП

Трубопроводи-збирачі (ТЗ), в яких реалізуються напірні потоки зі шляховим приєднанням маси застосовуються в багатьох галузях техніки, наприклад: водопостачанні (водозабірні споруди, очисні споруди на водопроводі); теплопостачанні (сонячні колектори, системи опалення); вентиляції (витяжні системи); водовідведенні (водовідвідні мережі, каналізаційні очисні споруди); водопониженні (дренаж та меліорація) та інших напрямках техніки. Проте попри досить поширене застосування, потоки зі змінною шляховою витратою вивчені недостатньо. Вивчення способів керування напірними потоками рідин, зокрема зі змінною витратою вздовж шляху, є досить перспективним напрямком.

Дослідження руху рідини зі змінною витратою проводили вчені різних наукових шкіл: І.В. Макавєєв, Я.Т. Ненько, А.Н. Патрашев, М.М. Андріяшев, І.М. Коновалов, А.І. Єгоров, Г.А. Петров, Ю.М. Константинов, В.В. Смыслов, Н.О. Єзерский, О.А. Василенко, М.М. Хлапук, М.М. Пивовар, І.І. Науменко, В.А. Волощук, А.М. Кравчук, В.В. Чернюк, В.В. Іванів та ін.

Найдосконалішими методиками розрахунку ТЗ є ті, котрі передбачають розв'язання диференціального рівняння руху рідини змінної витрати (ДРРРЗВ). Виходячи з аналізу літературних джерел та розглянутих у них методик зроблено висновок, що на даний час відсутні надійні методики для розрахунку напірних трубопроводів-збирачів.

Існуючі методики базуються на низці спрощень. При розв'язанні рівняння ДРРРЗВ, Ю.М.Константинов і В.В.Смыслов, О.А.Василенко, А.М.Кравчук, В.А.Волощук та І.І.Науменко приймали, що: вхідні струмені приєднуються перпендикулярно до основного потоку в ТЗ; притік є постійним вздовж ТЗ, гідравлічний коефіцієнт тертя та середня швидкість основного потоку в ТЗ є сталими вздовж трубопроводу, тощо. Проте ці параметри є змінними. Відомо, що неврахування геометричних параметрів трубопроводу-збирача і кінематичних характеристик течії рідини в ньому, може призвести до критичних помилок при проектуванні ТЗ.

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 21.12.2023 р. № 3534-IX). Праця тісно пов'язана з держбюджетною тематикою кафедри гідротехніки та водної інженерії (ГВІ) Національного університету "Львівська політехніка". Дослідження проводились на замовлення Міністерства освіти і науки України в складі науково-дослідної роботи: "Зменшення нерівномірності шляхової витрати напірних потоків в перфорованих трубопроводах "

Мета роботи і завдання дослідження

Метою даного дослідження є удосконалення існуючих методик розрахунку трубопроводів-збирачів та зменшення нерівномірності притоку рідини до них з врахуванням втрат напору на тертя.

Об'єкт дослідження – напірний трубопровід-збирач з дискретним входом рідини.

Предмет дослідження – змінний коефіцієнт гідравлічного тертя вздовж осі трубопроводу-збирача.

Завдання дослідження:

- проаналізувати й експериментально перевірити відомі теоретичні методи розрахунку напірних трубопроводів-збирачів;
- дослідити закономірності шляхового притоку рідини до напірних трубопроводів-збирачів;
- отримати розрахункові залежності для гідравлічного розрахунку напірних трубопроводів-збирачів;
- на основі аналізу теоретичних та експериментальних досліджень уточнити методики гідравлічних розрахунків напірних трубопроводів-збирачів з врахуванням змінності коефіцієнта гідравлічного тертя вздовж осі трубопроводу, а також розробити рекомендації для їх проектування.

Методи досліджень

У роботі застосовано фізичне й математичне моделювання притоку рідини крізь вхідні циліндричні насадки з бічним входом струменя до напірних трубопроводів-збирачів. 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 критичний аналіз відомих методик та визначено основні проблеми при розрахунку ТЗ зі шляховим приєднанням маси вздовж шляху.
- виведено розрахункові залежності для коефіцієнта гідравлічного тертя (Дарсі) та втрат напору для ламінарного режиму та трьох ділянок турбулентного режиму течії згідно з методикою, запропонованою В. В. Чернюком;
- для ламінарного режиму отримано рівняння для обчислення притоку рідини в ТЗ крізь отвори у стінці для змінного значенні коефіцієнта Дарсі;
- отримано залежність для визначення повного робочого напору в напірному трубопроводі-збирачі;
- отримано залежність для визначення витрати в напірному трубопроводі-збирачі.

Практичне значення отриманих результатів:

- винайдено спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровод-збирач, згідно з яким, за наявності транзитного потоку на вході у трубопровод-збирач, усувають роздачу рідини на початковій його ділянці та забезпечують збирання її по усій довжині трубопроводу-збирача;
- результати досліджень впроваджено при проектуванні та розрахунку дренажних трубопроводів системи дощових садів.

Особистий внесок у наукових працях здобувача

Виконано аналіз сучасних методів гідравлічного розрахунку напірних трубопроводів-збирачів. Змонтовано експериментальний стенд та проведено дослід. Зроблено математичну обробку й аналіз результатів експериментальних досліджень. Побудовано графічні експериментальні залежності. Описано та отримано патент на 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:

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

- Двадцята міжнародна науково-практична конференція “Ресурси природних вод карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання”. м. Львів, 26-27 травня, 2022 р.;

- Двадцять перша міжнародна науково-практична конференція “Ресурси природних вод карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання”. м. Львів, 25-26 травня, 2023 р.;

- VI міжнародна науково-технічна конференція «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села». м. Дубляни, 8-9 червня, 2023 р.

- International Conference «Current Issues of Civil and Environmental Engineering» Lviv - Košice – Rzeszów. Rzeszów (Poland), 6-8 September 2023;

- 3rd International scientific and practical conference “Problems of creating scientific ideas about world development”. Ottawa (Canada), 3-6 October 2023;

- 5-а міжнародна науково-практична конференція “Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг”, м. Львів, 18-20 жовтня, 2023 р.;

Публікації

Результати дисертаційної роботи опубліковані у 12 наукових працях. Із них: 2 у науково-метричних виданнях, які індексуються базою даних SCOPUS; 2 у наукових фахових виданнях України; 7 у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій. Отримано 1 патент на винахід.

Структура та обсяг дисертаційної роботи

Дисертацію викладено на 120 сторінках. Вона включає зміст, перелік умовних позначень, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел зі 101 найменування на 13 сторінках, 3 додатки. Робота містить 46 рисунків та 2 таблиці.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ НАПІРНИХ ТРУБОПОВОДІВ-ЗБИРАЧІВ (ТЗ)

1.1. Поширення напірних потоків зі шляховим приєднанням маси

Напірні ТЗ знайшли широке застосування в різних галузях техніки: водопостачання (водозабірні споруди з трубчастими оголовками, інфільтраційні водозабори, променеві водозабори, водопровідні очисні споруди (швидкі фільтри); осушувальні системи, гідромеліорація, водопониження (будівельні майданчики та забудовані території; водовідведення (водовідвідні мережі, каналізаційні очисні споруди (біофільтри для біологічного очищення, піщані фільтри; тепlopостачання (сонячні колектори); вентиляції (витяжні системи); енергетиці (паропроводи-збирачі, градирні); машинобудування (дослідні стенди, ін.) [66].

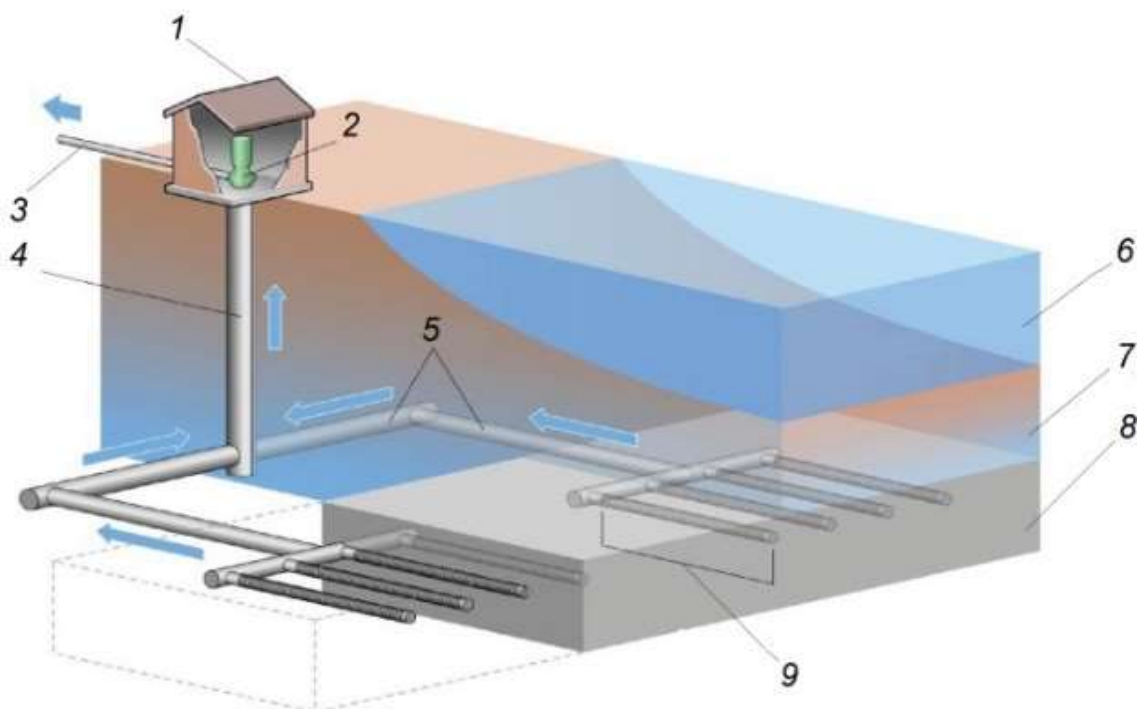


Рис. 1.1. Інфільтраційний водозабір: 1 – помпова станція; 2 – двигун помпи; 3 – напірний трубопровід; 4 – шахта; 5 – підвідні трубопроводи; 6 – шар води; 7 – те саме, піску; 8 – те саме, гравію; 9 – трубопровід-збирач

ТЗ найчастіше прокладаються в пористому середовищі. Вода, фільтруючись крізь останнє, проходить попереднє очищення. Для покращення припливу води

до ТЗ навколо нього укладають зворотній фільтр. Розміри зерен шарів фільтра зростають у напрямку течії води, тобто з наближенням до стінок ТЗ. Такий інфільтраційний водозабір збудовано на узбережжі Тихого океану у м. Лонг-Біч, що близько Лос-Анджелеса у Каліфорнії (рис. 1.1).

Променеві водозабори застосовують при неглибоких ріках, які в період повеней і паводків несуть багато намулу, піску й більших за розмірами частин твердих ґрунтів, які перекочуються потоком води по річищу. Променеві водозабори застосовуються для водопостачання таких міст: Варшави, Кракова, Перемишля (Польща), Туріна (Італія), Ейленбурга (Німеччина), Принс Джорджі (Канада) й ін.

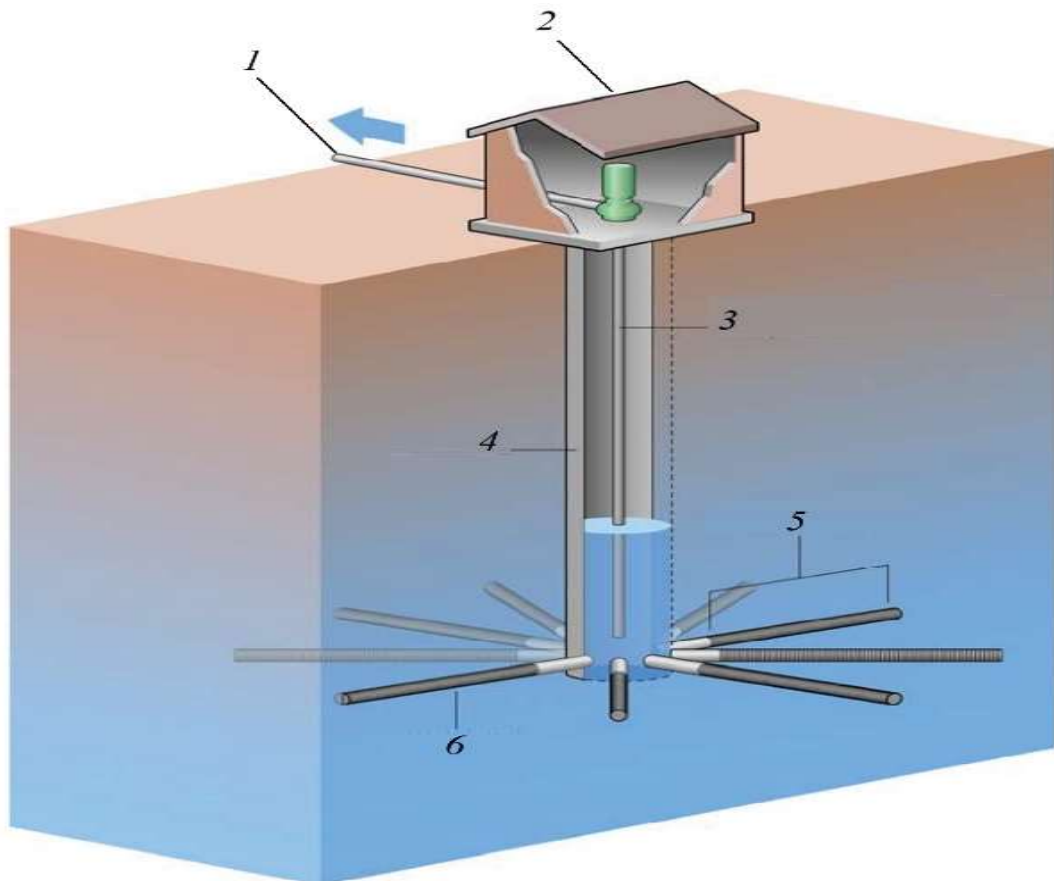


Рис. 1.2. Променевий водозабір: 1 – напірний трубопровід; 2 – помпова станція; 3 – водопіднімальна труба; 4 – шахта; 5 – перфорована частина променя (трубопровід-збирач); 6 – один з променів

В сучасних водоочисних станціях воду, після процесу коагуляції та седиментації забруднювальних частинок, для подальшого поглибленого очищення направляють на швидкі фільтри. Вода, пройшовши три шари засипки фільтра, збирається в нижньому шарі великозернистого гравію. У його товщі покладено системи трубопроводів-збирачів (рис. 1.3). Через надійність роботи ці фільтри найчастіше використовується у господарсько-питному водопостачанні (рис. 1.3).

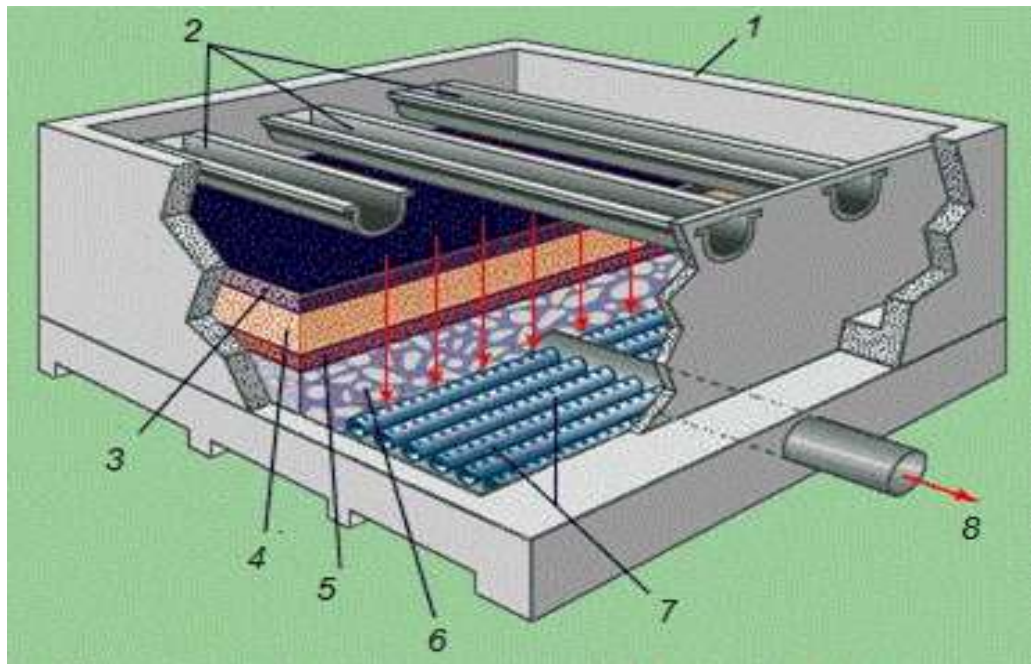


Рис. 1.3. Швидкий фільтр на водопровідних очисних спорудах:

1 – корпус; 2 – лотки для відведення промивної води; 3 – подрібнене вугілля; 4 – пісок, 5 – гранули твердих червонуватих мінеральних пісків з високою щільністю; 6 – великозернистий гравій; 7 – система ТЗ; 8 – відведення очищеної води

При водопониженні на будівельних майданчиках або на забудованих територіях використовують перфоровані пластмасові труби. Їх при укладці у ґрунт такі ТЗ обгортають мінеральною тканиною та влаштовують навколо дрени щебеневу засипку (рис. 1.4).

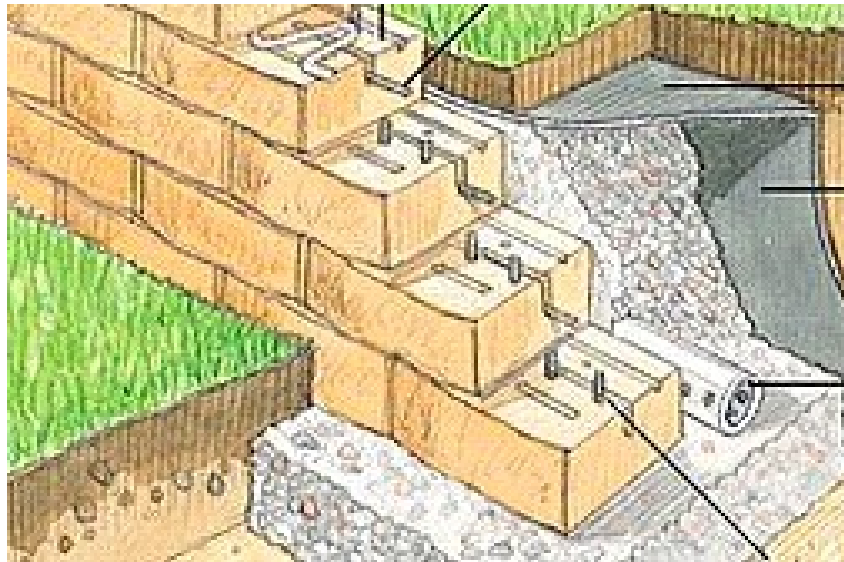


Рис. 1.4. Влаштування пристінного дренажу

Дрени та дренажні колектори в осушувальних меліораціях також є трубопроводами-збирачами для пониження рівня ґрунтових вод на перезволожених сільсько-господарських угіддях (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Схема осушувальної системи з закритим дренажем: 1 – дрени; 2, 3 – закриті колектори; 4 – відкритий колектор (ріка); 5 – ділянки з високим рівнем ґрунтових вод (світлина взято з сайту

https://twitter.com/Apus_Systems/status/969611876626812928)

Дедалі більшої популярності серед ландшафтних дизайнерів набувають системи дощових садів (рис. 1.6). Вони допомагають зменшити пікові навантаження на систему дощового водовідведення та утримувати воду в

посушливі періоди за допомогою вологолюбивих рослин. Це створює зелені оази серед міст та житлових кварталів. Проте необхідно ефективно та рівномірно відводити надлишок води для попередження загнивання коренів рослин. Для цього у дренажному шарі влаштовується трубопровід-збирач [29].

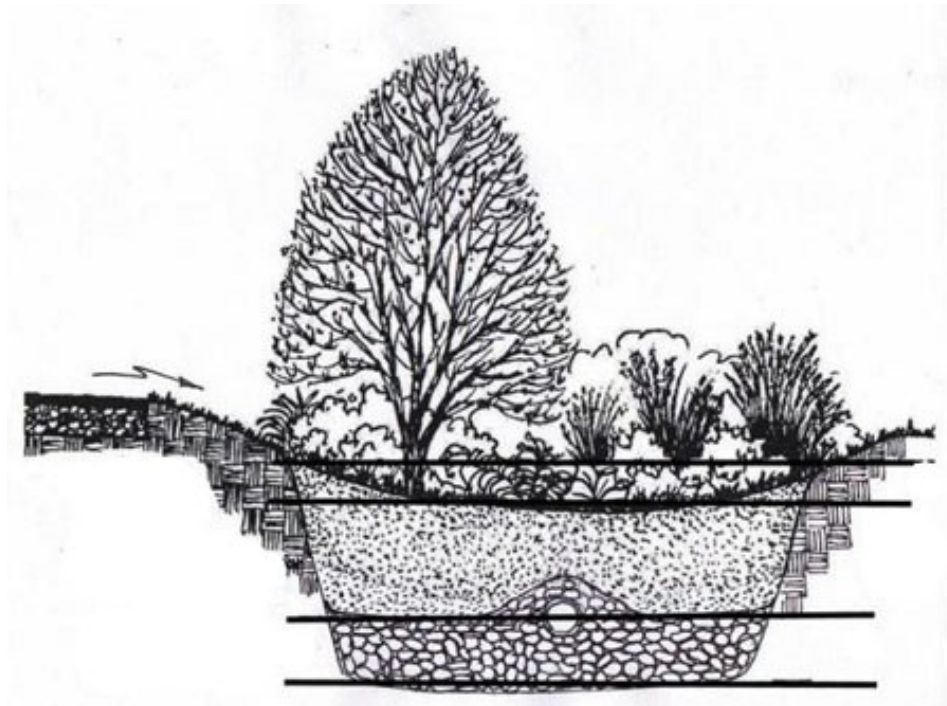
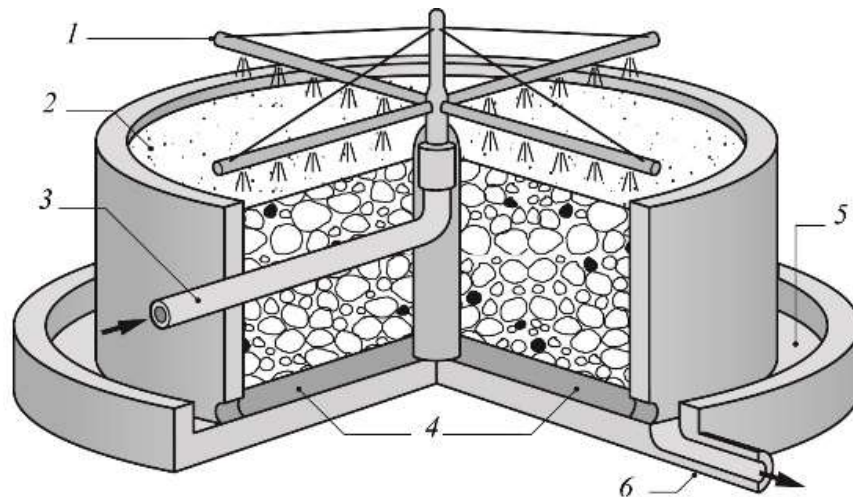


Рис. 1.6. Поперечний розріз дощового саду (світлину взято з сайту <https://rainwater.blog/tag/rain-garden/>)

У системах водовідведення, на каналізаційних очисних спорудах, механічним очищенням стічної води видаляють біля 30...35 % забруднень. Решту забруднювальних частинок усувають на спорудах біологічного очищення, наприклад, на біофільтрах (рис. 1.7). Ефективність очищення ними стоків вважається високою і сягає 85 % і більше.



*Рис. 1.7. Біофільтр: 1 – розподільний трубопровід; 2 – фільтрувальна засипка;
3 – подавальний трубопровід; 4 – трубопровід-збирач; 5 – збиральний канал;
6 – відвідний трубопровід*

Стічні води від індивідуальних житлових будинків знезаражуються на піщаних фільтрах (септиках) (рис. 1.8).

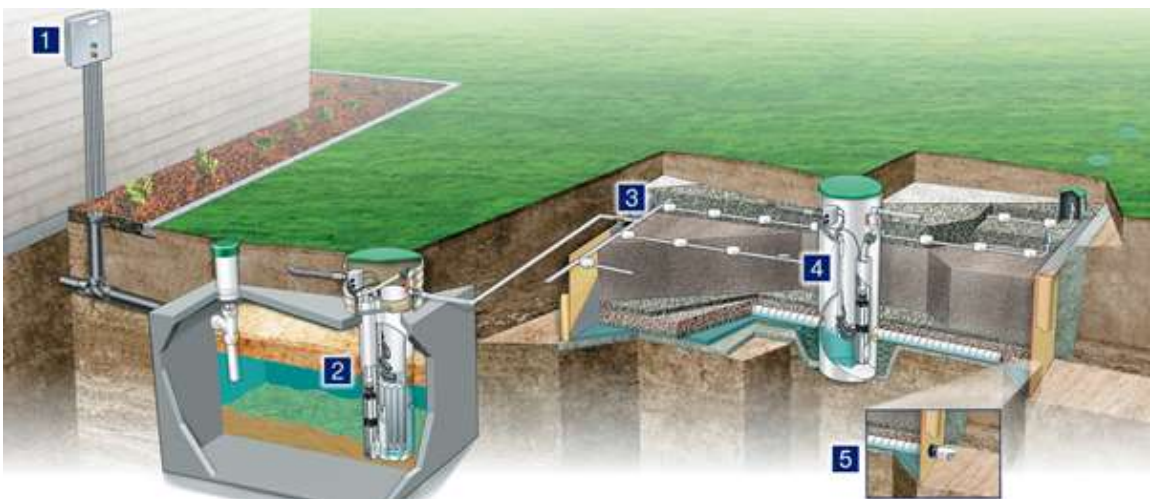


Рис. 1.8. Рециркулювальний піщаний фільтр: 1 – панель керування; 2 – комплект помп; 3 – розподільні трубопроводи; 4 – шахта; 5 – трубопровід-збирач

Трубопроводи-збирачі в поєднанні з розподільними трубопроводами становлять основну частину сонячних колекторів (рис. 1.9), які останнім часом знаходять все ширше застосування для побутового та промислового нагрівання води.

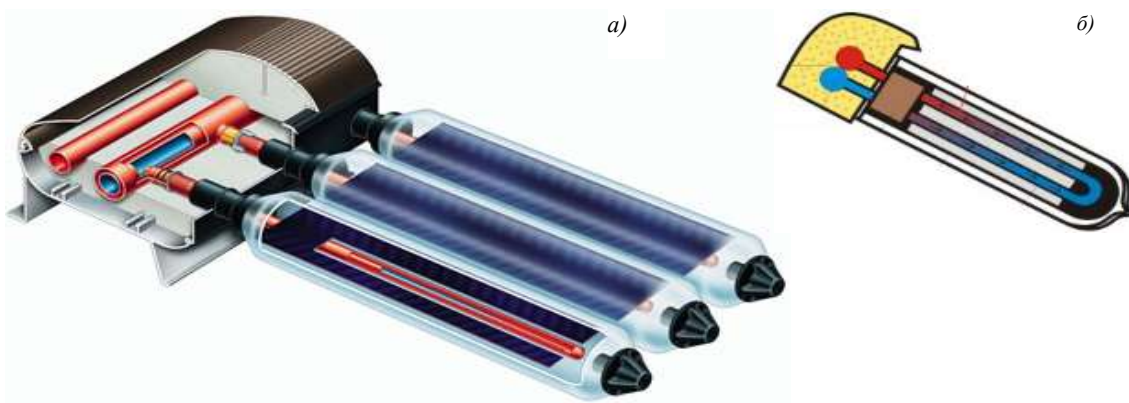


Рис. 1.9. Розподільний трубопровід і трубопровід-збирач у сонячному колекторі: а – загальний вигляд; б – поздовжній розріз нагрівального елемента

Окрім того, в системах опалення важливими елементами є розподільча та збірні гребінки (рис. 1.10), які дають можливість регулювати надходження теплоносія, відповідно до потреб споживачів.

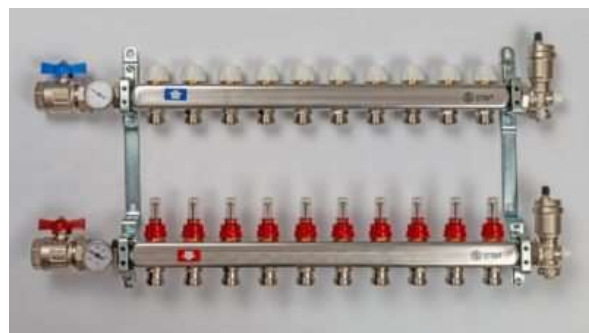


Рис. 1.10. Розподільчі та збірні гребінки системи опалення: а) у тепловому пункті; б) в індивідуальній системі опалення.

У паралельно-поточкових теплообмінниках напірні трубопроводи-збирачі (ТЗ) працюють у комплексі з напірними розподільними трубопроводами (РТ). Теплообмінники, залежно від траєкторії руху струменів рідини в них, поділяються на U-тип (рис. 1.11, а) і Z-тип (рис. 1.11, б). У цих пристроях розподільний трубопровід (РТ) приймає рідину крізь один вхідний отвір і розподіляє її між багатьма паралельними трубами. Із останніх рідина поступає у трубопровід-збирач (ТЗ) і випливає з теплообмінника крізь один вихідний отвір [25]. На рис. 1.12 це показано на прикладі теплообмінника Z-типу.

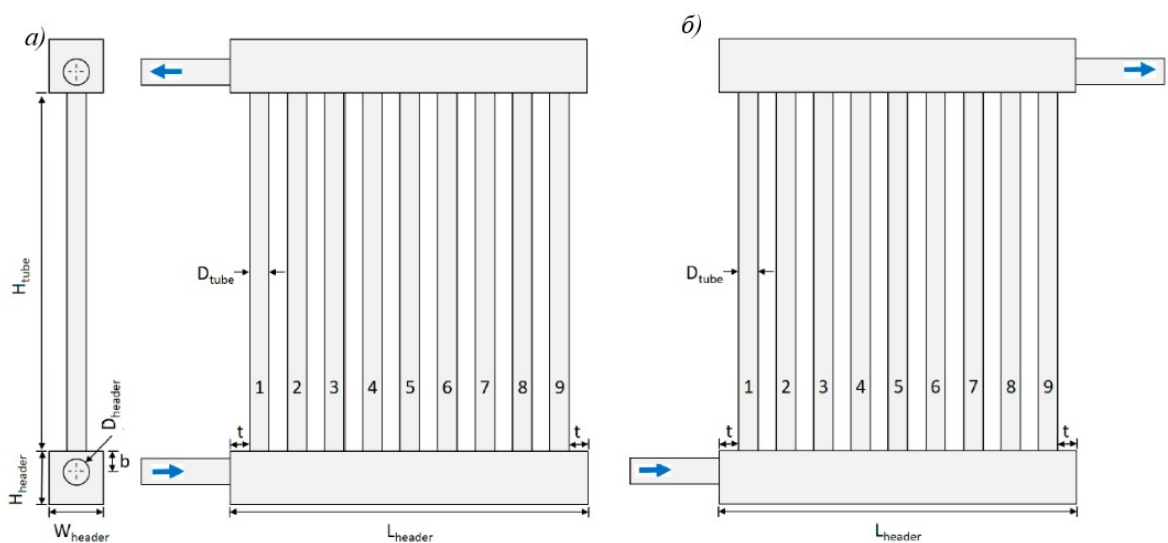


Рис. 1.11. Схема паралельних теплообмінників: а) U-типу; б) Z-типу [25].

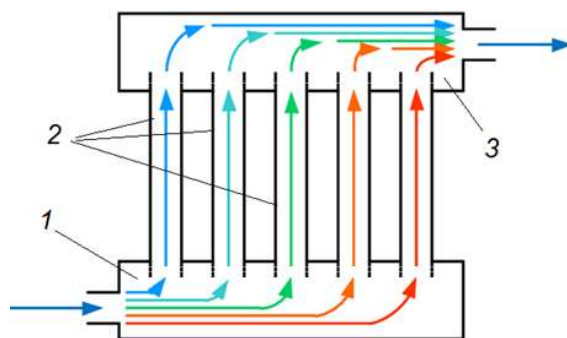


Рис. 1.12. Схема протікання паралельних ламінарних струменів рідини крізь теплообмінник Z-типу: 1 – розподільний трубопровід; 2 – з'єднувальні труби; 3 – трубопровід-збирач

Трубопроводи-збирачі є незамінними елементами у витяжній вентиляції (рис. 1.13), яка широко застосовується у побуті, громадських будівлях і на виробництві.



Рис. 1.13. Трубопровід-збирач у витяжній вентиляції промислового підприємства

Трубчасті водоприймальні оголовки водозабірних споруд у системах циркуляційного водопостачання теплових й атомних електростанцій з водоймами-охолодниками являють собою звичайні трубопроводи-збирачі (рис. 1.14). З метою зменшення нерівномірності шляхового притоку води в них, уздовж потоку площа водоприймальних вікон зменшуються, а відстань між вікнами збільшується.

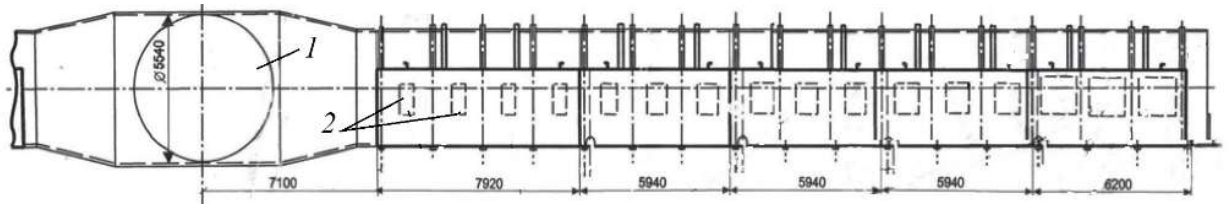


Рис. 1.14. Конструкція трубчастого оголовка однієї з ТЕС в Україні; 1 – підвідний трубопровід до ТЕС; 2 – трубчастий оголовок (ТЗ) [66]

У системах оборотного водопостачання хімічної та нафтохімічної промисловості використовують вентиляторні градирні (рис. 1.15). У їх склад включено трубопроводи-збирачі для відведення охолодженої та освітленої води, а також ТЗ для відведення осадів.

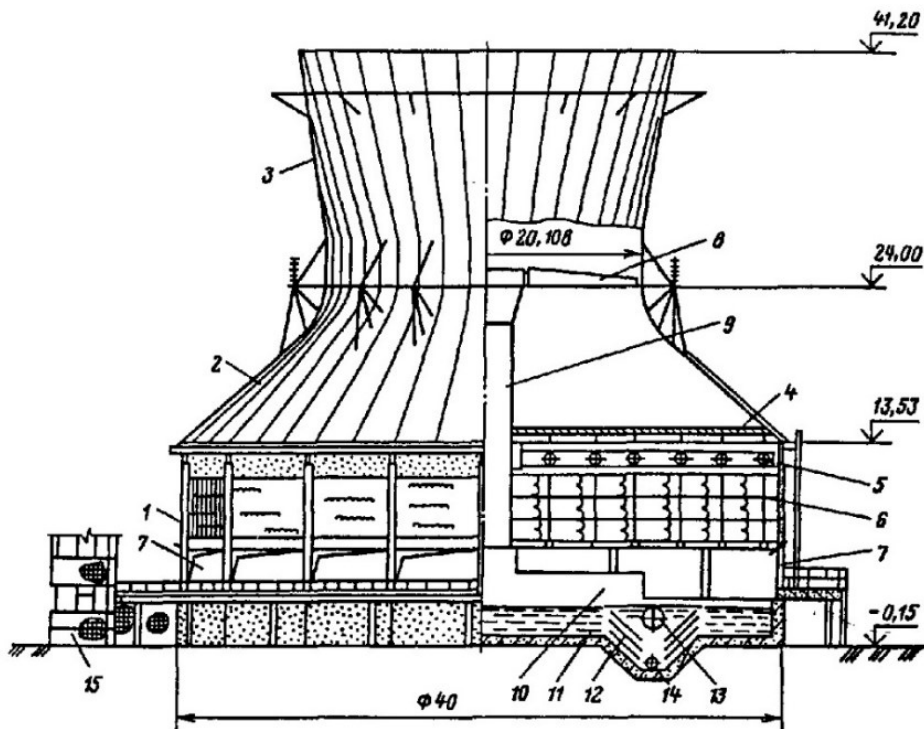


Рис. 1.15. Вентиляторна градирня: 1 – несучий каркас; 2 – конфузор; 3 – дифузор; 4 – водовловлювач; 5 – розподільні трубопроводи; 6 – зрошувач; 7 – вікна; 8 – вентилятор; 9 – трансмісійна шахта; 10 – машинне відділення; 11 – водозбірний басейн; 12 – відстійник; 13 – трубопровід-збирач для відведення охолодженої та освітленої рідини; 14 – те саме, для відведення осадів; 15 – помпова станція [53] (розміри подано в мм)

Відпрацьовані гази досліджуваних реактивних двигунів відводяться з випробувальних камер трубопроводами-збирачами, розміщеними на її поверхні. У стінках камери влаштовані входні вікна до ТЗ (рис. 1.16).

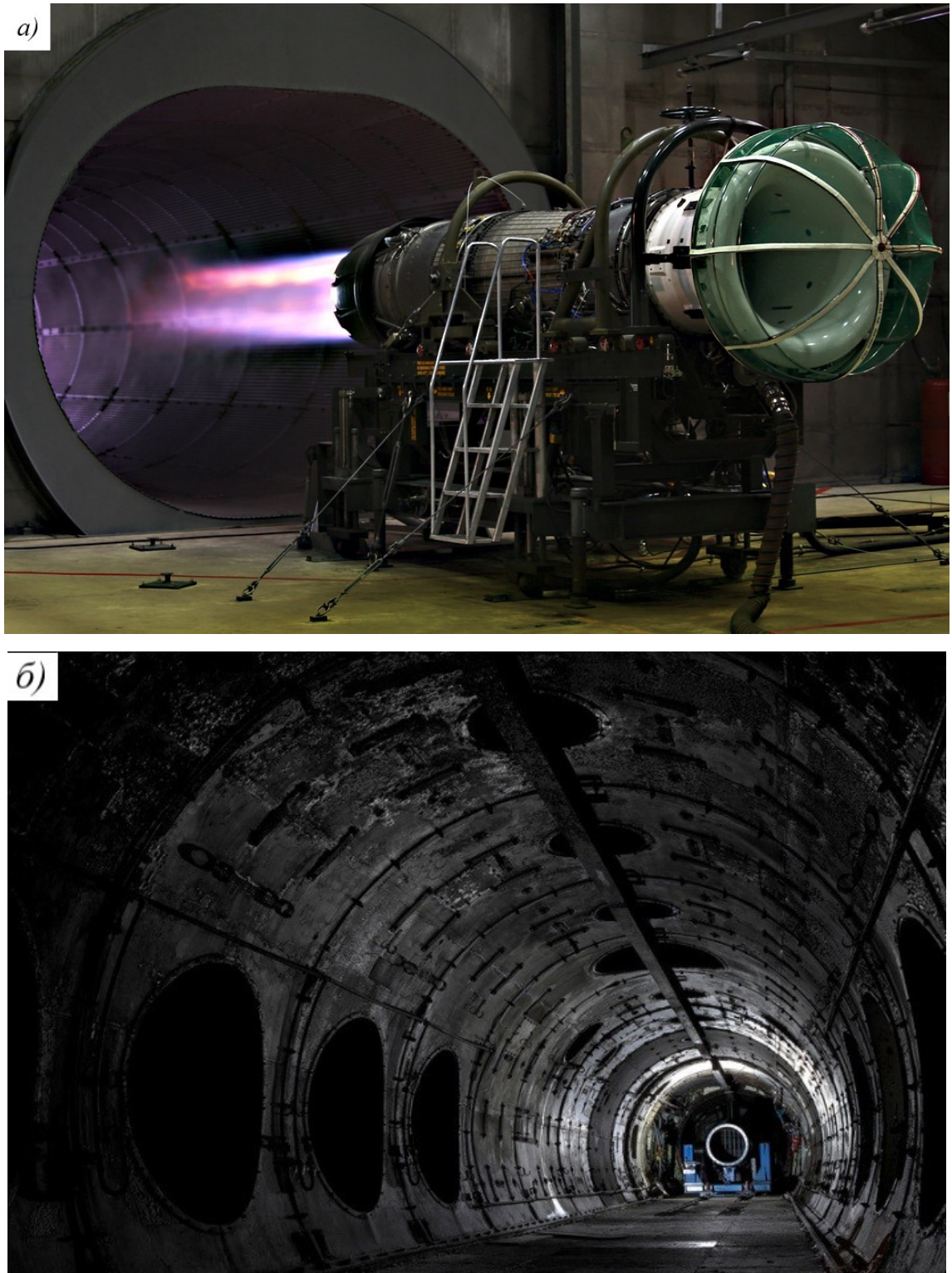


Рис. 1.16. а) - Стенд для випробування реактивних двигунів; б) - ТЗ у ньому

1.2. Проблеми гідравлічного розрахунку напірних ТЗ

Потік рідини у трубопроводі-збирачі формується за рахунок притоку струменів крізь отвори у його стінках. Витрата рідини уздовж ТЗ збільшується. Відповідно зростають гідравлічні втрати напору і затрата енергії на створення швидкісного напору потоку. Літературний аналіз свідчить, що при гідравлічних розрахунках напірних трубопроводів-збирачів усі автори беруть постійне значення гідравлічного коефіцієнта тертя λ по усій довжині ТЗ. Однак неповне врахування конструктивних параметрів ТЗ і гідродинамічних характеристик потоку зі змінною шляховою витратою спричиняє серйозні прорахунки при проектуванні ТЗ, що в свою чергу послаблює ефективність їх роботи [11].

1.3. Експериментальні дослідження

Науковці прагнуть пояснити фізичний закон надходження рідини в напірні трубопроводи. Так, Wang, Y., Zhou, L., & Feng, D. [38] чисельно досліджували надходження ґрунтової води з пористих однорідних середовищ у ТЗ, а Chen, Y., Zheng, H., Yin, B., & Li, W. [7] досліджували її приплив з гетерогенних пористих ґрунтів. Вивчаючи забір сирої нафти з пористих середовищ Cleo T. [15] створив математичну модель притоку однофазної рідини в ТЗ. Результати теоретичних досліджень порівнювали з даними експериментальних досліджень надходження повітря та води в перфоровану трубу.

Murphy, P., Kaye, N. B., Khan, A. A. [29] експериментально досліджували роботу тиску ТЗ, покладеного в піщаний ґрунт. Вони повідомляють, що втрати енергії потоку на входження струменя в ТЗ через малі отвори є домінуючими, а втрати на тертя вздовж ТЗ незначні. Отримані результати пропонується застосовувати для гідравлічного розрахунку надходження зливових стоків у напірні ТЗ, прокладені у фільтраційних траншеях та під тротуарами з гідроізоляційним покриттям.

Підземний дренаж на зрошуваних територіях у регіонах із сухим кліматом є ефективним методом збільшення глибини залягання ґрунтових вод і зменшення

солей у ґрунті. Ghorbani, K., Wayayok, A., Abbaszadeh, M., & Fikri, A. [18] в ході лабораторних досліджень встановили, що 76% надлишкових ґрунтових вод відводиться через дренажні труби, а 24% - через колектори, до яких приєднані труби. Перфоровані колектори транспортують воду, що забирається з дренажних труб, і при цьому працюють в режимі трубопроводу-збирача.

Tong, J. C., Sparrow, E. M., і Abraham, J. P. [33] за допомогою чисельного моделювання досліджували потік рідини через паралельні трубчасті канали, які з'єднують між собою розподільні трубопроводи та ТЗ. Такі потоки виникають, наприклад, у сонячних колекторах. Метою досліджень було досягнення рівних витрат рідини через кожен канал. Регулювання витрати здійснювалося шиберами, встановленими на вводах трубопроводу-збирача.

Moldovanu, D., Csato, A., & Bagameri, N. [28] чисельно змоделиували зменшення нерівномірності розподілу швидкостей повітря в поперечному перерізі ТЗ за допомогою штучної шорсткості. Останній був утворений напівсферичними углибленнями у внутрішній стінці трубопроводу-збирача.

Puran S. Mahar and Rajesh P. Singh вивели вирази для обчислення коефіцієнта K , щоб встановити залежність загальної втрати напору на тертя із середнім робочим тиском на виході та напором на вході багатовихідного трубопроводу. У даних виразах коефіцієнт K є функцією кількості вихідних отворів на різних діаметрах труб, комбінації діаметрів і положення першого випуску від входу. Отримані значення коефіцієнта K порівнюються з постійними значеннями, прийнятими згідно з існуючою практикою.

Як видно з наведеного аналізу, авторами робіт різними методами встановлено закономірності надходження ґрунтових вод із пористих середовищ у ТЗ. Досліджено окремі геометричні параметри напірних трубопроводів-збирачів та індивідуальні гідравлічні характеристики потоків ТЗ. Також досліджувався внесок місцевих опорів у загальну енергію потоку в ТЗ або в розподіл швидкостей потоку в поперечному перерізі ТЗ. Проведені експерименти були переважно чисельними.

Такі ж досягнення є в дослідженні роботи розподільних трубопроводів. Лю Х., Цзун К., Льв Х. та Цзінь Дж. [27] створили диференціальне рівняння імпульсу сил, які діють на локальний струмінь під кутом $\beta=90^\circ$ до потоку в напірних розподільних трубопроводах. Автори припустили, що коефіцієнт гідравлічного тертя λ незмінний (фіксоване значення) вздовж розподільного трубопроводу. У цій роботі також застосовано ряд інших спрощень. Базуючись на таких припущеннях, запропонована математична модель потоку [27] не відображає реальних характеристик потоку.

Притік рідини у напірні ТЗ залежить від характеристик середовища, у якому їх прокладено. У системах охолодження оборотної води на атомних й теплових електричних станціях вода поступає у водоприймальні вікна оголовків водозабірних споруд із ставу-охолодника [66]. Водоприймальні оголовки цих водозабірних споруд являють собою ТЗ з внутрішніми діаметрами, котрі сягають 4 м. Нерівномірність притоку води у напірні ТЗ, прокладених у масиві води, зменшують так: а) збільшують відстані між водоприймальними вікнами при однакових площах водоприймальних вікон; б) зменшують площі водоприймальних вікон уздовж потоку в ТЗ за умови, що відстані між вікнами однакові; в) збільшують діаметр ТЗ уздовж потоку рідини в ньому [70, 72].

У сонячних колекторах і в хімічних реакторах [16, 44] рідину підводить до отворів у стінці ТЗ паралельними трубками. Застосовують похилі, вертикальні й горизонтальні підвідні трубки. При вертикальних мікротрубках нерівномірність притоку до ТЗ менша, ніж при горизонтальних [44]. Автори [33] поставили за мету досягти рівномірності витрати рідини в паралельних трубках, які з'єднують розподільний трубопровід і ТЗ. Методом чисельного моделювання вони підбирали геометричні параметри шиберів, встановлених в місцях сполучення паралельних трубок з ТЗ, які би забезпечували поставлену умову. Окрім того, автори [62] проводили електросепарацію гасу через трубопровід з перфорованою сіткою.

Теплообмінники застосовують для передачі енергії від одного плинного середовища до іншого, наприклад, у енергетиці, хімічному машинобудуванні,

електронній техніці [25]. У теплообмінниках, так само як і в дренажних трубах, важливою задачею є зменшення нерівномірності розподілу струменів рідини між паралельними трубами, котрі сполучають розподільний трубопровід і трубопровід-збирач. Цю задачу вирішують переважно змінюванням геометричних параметрів труб теплообмінників [25, 17]. Прийняття однакового діаметра для РТ і ТЗ у великих теплообмінниках зменшує нерівномірність розподілу струменів рідини між паралельними трубами. Занадто малий крок між останніми негативно впливає на розподіл потоку [40]. Нерівномірність розподілу струменів між паралельними трубами у теплообміннику Z-типу зменшувалась до 62,6 % змінюванням довжини кінців паралельних труб, уведених усередину РТ і ТЗ (див. рис. 1.12). Однак модифікована структура РТ і ТЗ призводить до більшої втрати тиску рідини у них [42].

Коефіцієнт витрати вхідних насадок в ТЗ [35] (так само як для вихідних насадок у розподільних трубопроводах [6, 9]) істотно залежить від кута приєднання вхідних струменів до потоку, котрий формується усередині ТЗ. Тому нерівномірність притоку рідини у напірний ТЗ регулюють змінюванням кута приєднання вхідних струменів до потоку в ТЗ [35, 66]. Притік рідини в ТЗ зростає зі збільшенням значення критерію Рейнольдса, обчисленого для вхідних струменів. [22].

При експериментальних дослідженнях роботи ТЗ, прокладених у масиві пористих ґрунтів, вивчались різні аспекти роботи ТЗ, залежно від їх цільового призначення. Теоретично, лабораторними та фізичними експериментами досліджувалась робота дренажу при будівництві тунелів для метро, залізничного й автомобільного транспорту [37]. Враховуючи актуальність проблеми автори роботи [41] проаналізували 27 публікацій, у яких представлено результати дослідження методів зменшення тиску ґрунтових вод на стіни тунелів при їх будівництві у піщаних доломітових гірських породах. Виявлено, що влаштування великої кількості дренажних отворів у стінах тунелю негативно впливає на ефективність будівництва та стійкість тунелю. Пониження рівня ґрунтових вод за допомогою горизонтальних дренажних колекторів,

влаштованих уздовж зовнішньої поверхні стін тунелю, порушує рівновагу навколишнього ґрунту й може викликати стихійні лиха, котрі є звичними явищами при будівництві тунелів. Дослідження показали, що доцільніше зменшувати тиск ґрунтової води, котрий діє на стіни тунелю, а не понижувати рівень води. Найефективніше понижують тиск ґрунтової води дрени, котрі радіально сходяться у вертикальній площині до стін тунелю [38].

Експериментально встановлено, що при влаштуванні сифонного випуску у кінці напірного ТЗ меліоративного дренажу, швидкість потоку і витрата води в ТЗ збільшується на 27.1 – 89.8 %, залежно від значення вакуумного тиску на сифоні [32].

Аналіз даних фізичного експерименту й аналітичного рівняння балансу енергії потоку в напірному ТЗ, показали наступне. Втрати енергії струменів на їх вхід із сипучого ґрунту всередину ТЗ крізь отвори в його стінці істотно перевищують втрати енергії на подолання сил тертя потоком в ТЗ [29].

Автори [15] чисельним експериментом знаходили втрати напору в напірному трубопроводі-збирачі для збору нафти з пористих ґрунтів. Запропонований метод враховує збільшення витрати нафти уздовж ТЗ за рахунок її притоку крізь отвори у стінках ТЗ. Результати обчислень за цією моделлю порівнювались з даними трьох фізичних експериментів: одного для течії повітря та двох для потоків води. Запропонована модель не повністю узгоджується з даними фізичних експериментів. Автор методу вважає, що причиною цього є недостовірні результати окремих фізичних експериментів.

Результати фізичних експериментів дають об'єктивну інформацію про притік рідини в трубопровід-збирач з конкретними умовами роботи. Однак для проектування ТЗ потрібні математичні моделі, котрі враховують усі геометричні параметри ТЗ і гідравлічні характеристики струменів, які вливаються в ТЗ крізь отвори у його стінках, і потоку рідини, котрий формується в ТЗ. Докладається багато зусиль, щоб створити адекватні математичні моделі для опису притоку рідини до ТЗ. Проте відомо, що високої точності проектування ТЗ можна досягти опираючись на методи диференціального обчислення [75].

Диференціальне рівняння руху рідини зі змінною шляховою витратою для напірного потоку рідини вперше отримав проф. Ненько Я. Т. у 1937 р. [81]. При його інтегруванні вводились різні спрощення. Розглядаючи напірні циліндричні ТЗ з дискретним приєднанням рідини. [68, 71, 83] застосовували допущення, що коефіцієнт гідравлічного тертя λ є постійним уздовж ТЗ. В дійсності коефіцієнт λ змінний, оскільки витрата рідини уздовж потоку в ТЗ зростає.

До сьогодні не запропоновано розв'язування ДРРРЗВ з урахуванням змінного значення коефіцієнта гідравлічного тертя λ для потоку рідини в напірному ТЗ. Досвід свідчить, що неповне врахування геометричних параметрів напірних ТЗ і гідродинамічних характеристик потоку в ньому спричиняє серйозні прорахунки при проектуванні ТЗ. З цієї причини послаблюється надійність й ефективність роботи ТЗ [58].

1.4. Аналітичні рівняння

Точний гідравлічний розрахунок для напірних трубопроводів-збирачів можна виконати тільки за допомогою теорії гідравліки змінної витрати рідини [69]. Її основи заклав І. В. Мещерський [73]. У 1897 р. Він опублікував свою першу роботу, присвячену цій темі. У даній роботі детально розглядалися різні випадки руху тіла змінної маси. Також приводилися випадки застосування диференціального рівняння руху рідини змінної витрати (ДРРРЗВ). Свої дослідження І. В. Мещерський детально дослідив у роботі [74] у 1904 р.

У 1928 р. І. В. Маккавеев провів виведення загального ДРРРЗВ. У 1937 р. Я. Т. Ненько отримав ДРРРЗВ для повного потоку і використав його для розв'язку задач з розрахунку дірчастих ТЗ. Окрім того, І. М. Коновалов, виходячи із закону зміни кількості руху, у тому ж році отримав рівняння залежності для потоку рідини зі змінною витратою. Він застосував його при розрахунках для течії рідини у трубопроводах та каналах [67]. На основі цього було запропоновано кілька підходів до розв'язання диференційного рівняння руху рідини змінної витрати.

П'єзометричний напір у ТЗ зменшується уздовж потоку, проте при цьому

збільшується робочий напір. Для розрахунку втрат напору в трубопроводах-збирачах М. М. Андріяшев запропонував формулу [91]:

$$h_i = [1 + \lambda l / (3d)] \cdot v_{n.k}^2 / 2g \quad (1.1)$$

де, $v_{n.k}^2$ – середня швидкість потоку в кінці трубопроводу-збирача;

l, d – розрахункові довжина та діаметр ТЗ відповідно;

λ – коефіцієнт гідравлічного тертя.

Сумарні втрати напору, при цьому враховуючи місцеві втрати на приєднання струменів М. М. Андріяшев отримував з рівняння [91]:

$$H = [1 + \lambda l / (3d) + \zeta_2 k_c^2] \cdot v_{n.k}^2 / 2g \quad (1.2)$$

де, ζ_2 – коефіцієнт опору, викликаний входом струменів через отвори у трубопроводі;

k_c – коефіцієнт, котрий залежить від співвідношення середньої швидкості струменя, який приєднується та основного потоку в ТЗ.

І. М. Коновалов [67] вивчав більш загальний випадок руху рідини з рівномірним приєднанням витрати. Він враховував, що приєднувані струмені входять у трубопровід-збирач під прямим кутом та запропонував формулу для визначення втрат напору:

$$h_i = Q_k^2 S_c / (3K^2) + Q_k^2 / (2g\omega^2), \quad (1.3)$$

де, Q_k^2 – витрата води в кінцевій точці ТЗ;

S_c – втрати напору, які створені стінкою трубопроводу;

K – модуль витрати;

ω – площа перерізу ТЗ.

Враховуючи конструктивні особливості входження струменів у ТЗ і завихрень, які створюються перемішуванням потоків, А. І. Єгоров [58] у 1950 р запропонував розраховувати втрати напору з використанням залежності:

$$h_i = K_h [2\alpha_k + k\lambda / (e_k d) - \beta] \cdot v_{n,k}^2 / 2g, \quad (1.4)$$

де, K_h – параметр, що враховує втрати напору, спричинені завихренням;

e_k – параметр, що враховує загальний характер збирання води по всій довжині трубопроводу;

β – параметр, що передбачає врахування конструктивних особливостей входу струменів крізь отвори у стінках трубопроводу;

α_k – коефіцієнт Коріоліса;

$$k = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left(2 + \frac{1}{n}\right),$$

де, n – кількість отворів вздовж розрахункової ділянки ТЗ.

М. М. Хлапук [85] проводить визначення загальних втрат напору у трубопроводі-збирачі за такою залежністю:

$$\sum h = h_{ex} + h_{i-k} + h_{m-k} + h_{вих}, \quad (1.5)$$

де, h_{ex} – втрати напору на початку ТЗ, які розраховуються за формулою Вайсбаха:

$$h_{ex} = \zeta_{ex} \frac{Q_{tr}^2}{2gS^2},$$

де, ζ_{ex} – коефіцієнт опору на початку ТЗ;

Q_{tr} – витрата транзитного потоку на початку трубопроводу-збирача;

S – площа у поперечному перерізі ТЗ;

h_{i-k} – втрати напору вздовж трубопроводу на ділянках $i-k$, котрі обчислюються за формулою Дарсі-Вайсбаха:

$$h_{i-k} = \lambda \frac{l_{i-k}}{D} \frac{Q_{tr}^2}{2gS^2},$$

де l_{i-k} , D – розрахункові довжина та діаметр ТЗ відповідно;

h_{i-k} – місцеві втрати напору відповідних ділянок:

$$h_{m-k} = \zeta_{m-k} \frac{Q_{tr}^2}{2gS^2},$$

h_{ex} – втрати напору в кінці ТЗ:

$$h_{ex} = \zeta_{ex} \frac{Q_{tr}^2}{2gS^2}$$

1.5. Диференціальні рівняння

Вихідним для розрахунку ТЗ є диференціальне рівняння руху рідини змінної витрати (ДРРРЗВ), котре було запропоноване Г. А. Петровим [81]:

$$\frac{\alpha_o(2V - v \cos \beta)dV}{g} + d\left(\frac{p}{\rho g}\right) + \sin \psi \cdot dx + dh_x = 0 \quad (1.6)$$

де β – кут між напрямками швидкостей основного потоку \vec{V} в трубопроводі-збирачі та струменя, який приєднується до ТЗ \vec{v} ; $\sin \psi \cdot dx = dz$ – рівень живого перерізу потоку відносно площини порівняння; ψ – кут нахилу осі ТЗ до горизонтальної площини; $dh_x = i_f dx$ – втрати напору на тертя по довжині трубопроводу-збирача.

Ю. М. Константинов [68] та В. В. Смыслов [83] при вивченні ДРРРЗВ (1.6) кут приєднання струменів до основного потоку приймали $\beta = 90^\circ$, а вісь ТЗ – горизонтальною ($\psi = 0^\circ$). П'ятим доданком у рівнянні (1.6) нехтували. Тоді ДРРРЗВ (1.6) скорочувалось до вигляду:

$$-dh + \frac{2vdv}{g} + dh_f = 0. \quad (1.7)$$

Рівняння (1.7) можна використовувати для розрахунку ТЗ, в яких відстань між отворами є меншою десяти діаметрів трубопроводу. О. А. Василенко та В. В. Смыслов [47] продовжили досліджувати рівняння (1.7) та звели його до

безрозмірної форми (1.8):

$$-\frac{d^2 \bar{Q}}{d\bar{x}^2} \cdot \frac{d\bar{Q}}{d\bar{x}} - A\bar{Q} \frac{d\bar{Q}}{d\bar{x}} + B\bar{Q}^2 = 0, \quad (1.8)$$

де, $A = \alpha_0 (2 - m)$; $m = v \cos \beta / V$ – коефіцієнт приєднання маси;

$Q / Q_\kappa = \bar{Q}$, $\bar{x} = x / l$, Q_κ – витрата рідини у кінцевій точці трубопроводу-збирача.

Закон приєднання витрати приймався згідно праці Datei Claudio [14]: $Q = k \cdot sh \alpha x$, де k й α незмінні значення, що залежать від характеристики ТЗ.

У ДРРРЗВ (1.6) А. М. Кравчук [69] вважає, що $m = (v \cos \beta) / V = 0$. Він також приймає коефіцієнт гідравлічного тертя λ сталим і нехтує другим і третім членами у рівнянні (1.6). Тоді залежності для розрахунку відносних витрати рідини та зміни напорів А. М. Кравчук записує в такому вигляді:

$$\bar{Q} = \frac{l \cdot sh(k\bar{x})}{k \cdot ch(kf)}, \quad \bar{z} = \frac{ch(k\bar{x})}{sh(kf)}. \quad (1.9)$$

Коефіцієнт k А. М. Кравчук виводить як дійсний додатній корінь з виразу $k^3 - 2k - \zeta_{l_{ТЗ}} / 2fth(k\bar{x}) = 0$, або за графіком, котрий йому відповідає.

В. А. Волощук і І. І. Науменко [76] додали у ДРРРЗВ (1.6) отриманий експериментально еквівалентний гідравлічний коефіцієнт тертя. Він залежить від відстаней між вхідними отворами. Розв'язок отримано тільки для випадку, коли кут приєднання стаовить $\beta = 90^\circ$.

$$dH + \frac{2\alpha_0 Q dQ}{g\Omega^2} + \frac{\lambda_e dx Q^2}{2Dg\omega^2} = 0, \quad (1.10)$$

де, H – ордината п'єзометричного напору; α_0 – коефіцієнт кількості руху; Q – витрата вздовж ТЗ (змінна); Ω – площа поперечного перерізу трубопроводу-збирача; D – діаметр трубопроводу-збирача; x – координата п довжині трубопроводу.

В. В. Чернюк [92] провів розв'язування рівняння (1.6) врахувавши умови, що $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$, $\psi \neq 0^\circ$ та $\lambda \neq const$, та отримав формулу, за якою обчислюється витрати рідини, що приєднується до основної течії в напірному трубопроводі-

збирачі на ділянці зі значенням довжини x_{i-k} (1.11):

$$b_{(i-k)} \int_{x_i}^{x_k} Z_{(x)}^{1/2} dx = b_{(i-k)} x_{(i-k)} \left\{ Z_{(x_i)}^{1/2} + \frac{b_{(i-k)} x_{(i-k)}}{4g\Omega_{(x_i)}} \left[(2\alpha_o - \alpha) \cdot V_{(x_i)} - \alpha_o v_{(x_i)} \cos \beta_{(x_i)} \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{4Z_{(x_i)}^{1/2}} \left(\lambda_{(x_i)} \frac{x_{(i-k)} V_{(x_i)}^2}{D_{(x_i)} 2g} + 2x_{(i-k)} \sin \psi_{(x_i)} \right) \right\}. \quad (1.11)$$

Повний робочий напір $Z_{(x_k)}$, який спричиняє проникнення струменя в середину трубопроводу-збирача у перерізі x_k , розраховується за виразом (1.12), який отримується внаслідок диференціювання рівняння (1.11):

$$Z_{(x_k)} = \left\{ Z_{(x_i)}^{1/2} + \frac{\kappa \cdot b_{(i-k)} x_{i-k}}{2g\Omega_{(x_i)}} \left[(2\alpha_o - \alpha) \cdot V_{(x_i)} - \alpha_o v_{(x_i)} \cos \beta_{(x_i)} \right] + \right. \\ \left. + \frac{\kappa}{2Z_{(x_i)}^{1/2}} \left(\lambda_{(x_i)} \frac{x_{(i-k)} V_{(x_i)}^2}{D_{(x_i)} 2g} + 2x_{(i-k)} \sin \psi_{(x_i)} \right) \right\}^2, \quad (1.12)$$

де, у рівняннях (1.11) і (1.12), $x_{(i-k)}$ - довжина ділянки $i-k$, котра розглядається; b_{i-k} - коефіцієнт, незмінний на розрахунковій ділянці $i-k$, $b = n\mu\omega_{hole}\sqrt{2g} = const$; $n_{(x_i)}$ - кількість насадок на одиницю довжини ТЗ; $\mu_{(x_i)}$ - коефіцієнт витрати рідини через вхідну насадку; $D_{(x_i)}$ - внутрішній діаметр трубопроводу-збирача; $d_{(x_i)}$ - те ж, для вхідної насадки; $\Omega_{(x_i)}$ - площа поперечного перерізу ТЗ ділянці $i-k$, котра розраховується; $\omega_{(x_i)}$ - те ж, для вхідної насадки; $V_{(x_i)}$ - значення середньої швидкості основного потоку в ТЗ, $V_{(x)} = Q_{(x)}/\Omega_{(x_i)}$; $v_{(x_i)}$ - швидкість струменя, який приєднується крізь насадку до ТЗ $v_{(x_i)} = \phi_{(x_i)}\sqrt{2gZ_{(x_i)}}$; $\beta_{(x_i)}$ - кут між поздовжньою віссю ТЗ та напрямком струменя, який приєднується; $\psi_{(x_i)}$ - кут між горизонтальною площиною та поздовжньою віссю трубопроводу-збирача; a - коефіцієнт кінетичної енергії (коефіцієнт Коріоліуса), який приймає значення $a \approx 1,10-1,15$; α_o - коефіцієнт кількості руху (коефіцієнт Буссінеска), який приймає значення $\alpha_o = 1,03-1,05$; κ

– емпіричний коефіцієнт; $\lambda_{(x)}$ – гідравлічний коефіцієнт тертя, що залежить від режиму течії та ділянок гідравлічного опору.

При $Re_{(x_i)} \leq 2320$ (ламінальний режим течії) $\lambda_{(x_i)} = 64/Re_{(x_i)}$. Для $Re_{(x_i)} (\Delta_{(x_i)}/D_{(x_i)}) < 10$ (ділянка гідравлічно гладких труб турбулентного режиму течії), $\lambda_{(x_i)} = 0,3164/Re_{(x_i)}^{0,25}$. При $10 \leq Re_{(x_i)} (\Delta_{(x_i)}/D_{(x_i)}) \leq 500$ (ділянка доквадратичного опору турбулентного режиму течії), $\lambda_{(x_i)} = 0,11 \left[\Delta_{(x_i)}/D_{(x_i)} + 68/Re_{(x_i)} \right]^{0,25}$. Для $Re_{(x_i)} (\Delta_{(x_i)}/D_{(x_i)}) > 500$ (ділянка квадратичного опору турбулентного режиму течії), $\lambda_{(x_i)} = 0,11 (\Delta_{(x_i)}/D_{(x_i)})^{0,25}$. Показник критерію Рейнольдса $Re_{(x_i)} = Q_{(x_i)} D_{(x_i)} / \omega_{(x_i)} \nu_{(x_i)}$.

Іванів В.В [64, 66] проводив експериментальні дослідження та перевірку розв'язків диференціального рівняння, запропонованих В.В. Чернюком [92-96]. Він встановив, що експериментальні значення повних робочих напорів та притоку води до ТЗ при відсутності транзитної витрати добре узгоджуються з теоретичними розрахунками згідно цієї методики.

1.6. Підсумки розділу 1

Напірні потоки рідини зі змінною витратою вздовж шляху рідини, котрі реалізовані у ТЗ досить поширені у різних галузях діяльності людей: промисловості, сільському господарстві, цивільному будівництві, щоденному побуті.

Проведено аналіз основних методик розрахунку трубопроводів-збирачів. Виявлено, що найточнішим є методики, що ґрунтуються на диференціальному рівнянні руху рідини зі змінною витратою. Проте у проаналізованих методиках застосовують низку спрощень. Це у свою чергу значно знижує точність гідравлічних розрахунків ТЗ. Виходячи з аналізу літературних даних, і враховуючи актуальність теми, сформовані мета й завдання дисертаційних досліджень, які наведено на с. 19.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІРНОГО РУХУ РІДИНИ ЗІ ШЛЯХОВИМ ПРИЄДНАННЯМ МАСИ

2.1. Постановка проблеми

Формування потоку рідини у трубопроводі-збирачі відбувається за рахунок притоку струменів крізь отвори у його стінках. Витрата рідини уздовж потоку в ТЗ поступово зростає. Відповідно зростають гідравлічні втрати напору уздовж ТЗ і затрата енергії на створення швидкісного напору потоку $V^2/2g$. Саме тому п'єзометрична лінія 3 та лінія повного напору 4 в напрямку потоку в ТЗ знижуються (рис. 2.1). Різниця рівнів рідини T_0 зовні ТЗ та повного напору потоку усередині ТЗ – це робочий напір Z , який спричиняє вливання струменів рідини у ТЗ:

$$Z_{(x)} = A_0 - \left(\frac{p_{(x)}}{\rho g} + \frac{V_{(x)}^2}{2g} \right). \quad (2.1)$$

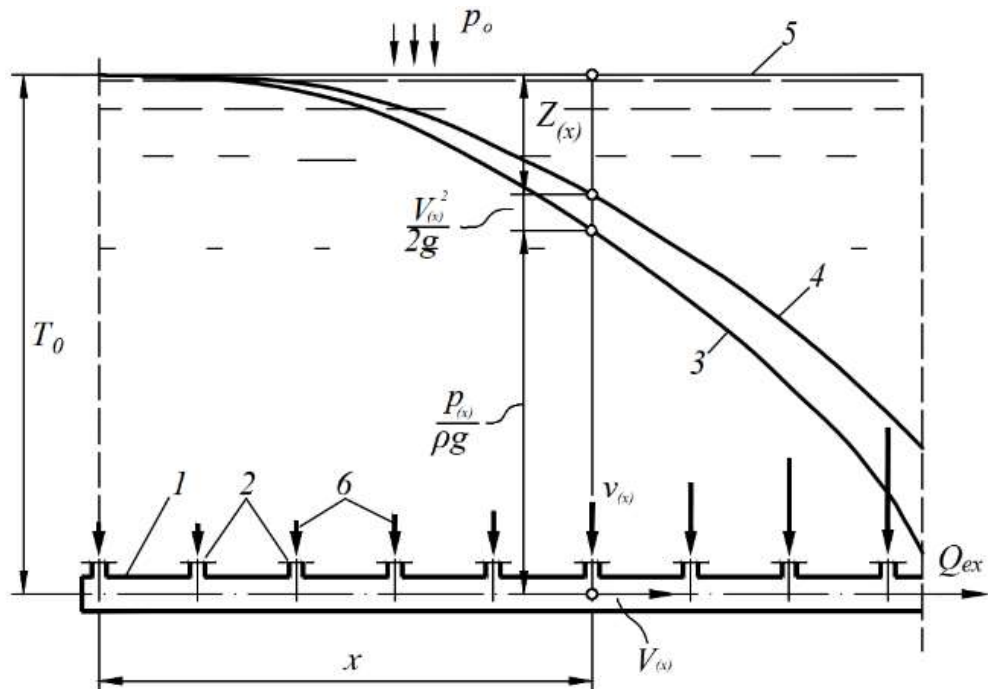


Рис. 2.1. Схема формування потоку рідини в напірному ТЗ: 1 – трубопровод-збирач; 2 – вхідні отвори; 3 – п'єзометрична лінія для потоку, в ТЗ; 4 – п'єзометрична лінія повного напору; 5 – рівень рідини зовні трубопроводу-збирача; 6 – притікання струменів у ТЗ [11]

Оскільки робочий напір Z збільшується в напрямку потоку, то зростає шляховий притік струменів до трубопроводу-збирача, тому він є нерівномірним по довжині. На практиці виникає завдання зменшити дану нерівномірність. Для правильного розв'язання цієї задачі необхідно у диференціальному рівнянні руху рідини зі змінною витратою (1.6) врахувати змінність значення гідравлічного коефіцієнта тертя λ . Також потрібно враховувати те, що кут β приєднання струменів до потоку рідини в ТЗ, може відрізнятись від прямого.

Розглянемо такі варіанти приєднання струменя до розрахункової ділянки потоку в трубопроводі-збирачі з довжиною dx : а) в кінці ділянки (рис. 2.2, а); б) у середній її частині (рис. 2.2, б); в) на початку (рис. 2.2, в).

Схема приєднання струменя в кінці розрахункової ділянки (рис. 2.2,а) є малоінформативною, оскільки приєднання струменя у кінці не має впливу на гідравлічне тертя потоку уздовж ділянки dx . При приєднанні струменя у середній частині розрахункової ділянки dx (рис. 2.2,б) виникає складність обчислення гідравлічного коефіцієнта тертя λ , оскільки у першій її частині потік має витрату Q , а у решті цієї ділянки витрату $Q+dQ$. У випадку, коли струмінь приєднується на початку розрахункової ділянки (рис. 2.2,в) ураховуються витрати потоку Q та струменя dQ у вхідних перерізах 1-1 та 2-2, відповідно, та постійна витрата $Q+dQ$ уздовж усієї ділянки ТЗ з довжиною dx . Тому приймаємо за основу схему з приєднанням струменя на початку розрахункової ділянки ТЗ (рис. 2.2,в).

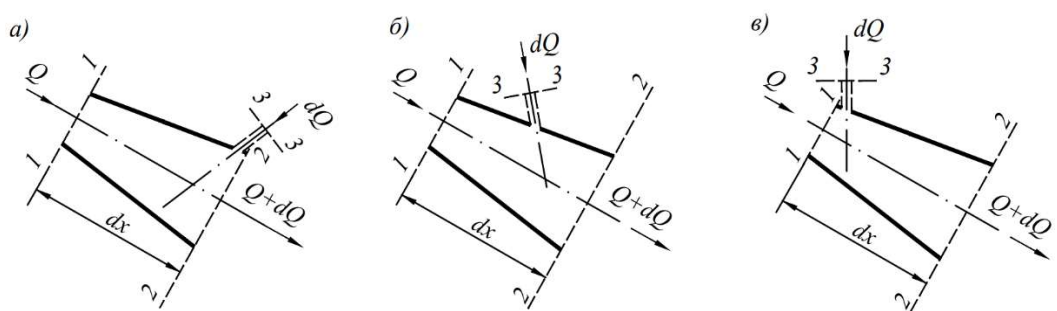


Рис. 2.2. Варіанти приєднання струменя до ТЗ на ділянці з довжиною dx [11]

$\alpha_0 \rho dQ \cdot v \cos \beta$ – кількість руху потоку рідини струменя, що приєднується у перерізі 3-3;

$\alpha_0 \rho QV$ – кількість руху потоку рідини потоку рідини у розрахунковому перерізі 1-1;

V – середня швидкість потоку в перерізі 1-1;

Q – його витрата;

v – середня швидкість струменя, який приєднується в перерізі 3-3;

dQ – його витрата;

β – кут між векторами середньої швидкості \vec{V} основного потоку рідини у ТЗ і струменя \vec{v} , що приєднується до нього;

$\rho \Omega$ – імпульс сили гідродинамічного тиску у перерізі 1-1;

$(p + dp)(\Omega + d\Omega)$ – те саме, у перерізі 2-2;

p – тиск у перерізі 1-1;

Ω – площа поперечного перерізу ТЗ в перерізі 1-1;

$(p + dp / 2) d\Omega$ – поздовжня складова імпульсу сили реакції R стінок труби, що розширяється на ділянці потоку між перерізами 1-1 і 2-2;

$\rho g(\Omega + d\Omega/2) \sin \psi \cdot dx$ – імпульс сили власної ваги G частини потоку рідини довжиною dx ;

$\rho g(\Omega + d\Omega/2) dh_x$ – імпульс сили тертя;

$T = \tau_o(\chi + (d\chi/2)dx)$, де τ_o – середнє напруження тертя на стінці ТЗ,
 $\tau_o = \rho g R (dh_x / dx)$ [26];

R – гідравлічний радіус потоку;

$\chi = \Omega / R$ – змочений периметр потоку.

Кути β , та ψ відраховуються проти годинникової стрілки (див. рис. 2.3), а їхні значення змінюються у межах від 0° до 360° .

Врахувавши, що для циліндричного трубопроводу-збирача $Q = \Omega \cdot V$, після проведення алгебраїчних дій і знехтувавши нескінченно малими величинами

Під час розв'язування диференційного рівняння (2.4) представимо його змінні через повний робочий напір $Z_{(x)}$ і відстань x , котра є незалежною (рис. 2.4). Враховуємо, що формування потоку в трубопроводі-збирачі відбувається дискретним приєднанням до нього струменів, які вливаються до нього під дією повного напору $Z_{(x)}$.

Звідси, витрата струменя, який вливається крізь отвір у ТЗ:

$$q_{(x)} = \mu\omega\sqrt{2gZ_{(x)}} = aZ_{(x)}^{1/2} \quad (2.5)$$

Диференціал витрати рідини, яка входить в трубопровод-збирач на ділянці довжиною dx :

$$dQ_{(x)} = n\mu\omega\sqrt{2gZ_{(x)}}dx = bZ_{(x)}^{1/2}dx, \quad (2.6)$$

де n – кількість вхідних отворів, які розташовані на одиниці довжини ТЗ, m^{-1} ;

ω – площа перерізу вхідного отвору;

μ - коефіцієнт його витрати;

b - сталий множник, який виражається:

$$b = n\mu\omega\sqrt{2g} = const, m^{1.5}/s. \quad (2.7)$$

Витрата рідини, котра протікає в трубопроводі-збирачі:

$$Q_{(x)} = Q_{tr} + b\int_0^x Z_{(x)}^{1/2}dx, \quad (2.8)$$

де Q_{tr} - транзитна витрата рідини на початку розрахункової ділянки ТЗ.

Середня швидкість потоку в ТЗ:

$$V_{(x)} = \frac{Q_{(x)}}{\Omega} = \frac{Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx}{\Omega}. \quad (2.9)$$

Її диференціал визначимо з (2.9):

$$dV_{(x)} = d\left(\frac{Q_{(x)}}{\Omega}\right) = \frac{bZ_{(x)}^{1/2} dx}{\Omega}. \quad (2.10)$$

Диференціал втрат напору $dh_{(x)}$ на нескінченно короткій ділянці довжиною dx циліндричного ТЗ, розміщеній між сусідніми входними отворами у стінці ТЗ, з достатнім ступенем точності можна визначити так само, як при рівномірному русі рідини з формули Дарсі-Вайсбаха [26]. З урахуванням формули (2.10) запишемо:

$$dh_{(x)} = d\left(\lambda_{(x)} \frac{x V_{(x)}^2}{D 2g}\right) = \frac{1}{2g\Omega^2 D} d\left[\lambda_{(x)} \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx\right)^2 x\right], \quad (2.11)$$

де D – внутрішній діаметр ТЗ.

Коефіцієнт Дарсі - це функція від кількох змінних: $\lambda_{(x)} = f(\bar{\Delta}; \text{Re}_{(x)})$, де: $\bar{\Delta} = \Delta/D$ – відносна еквівалентна шорсткість стінок труби; $\text{Re}_{(x)} = f(V_{(x)}, D, \nu)$ – критерій Рейнольдса:

$$\text{Re}_{(x)} = \frac{V_{(x)} D}{\nu} = \frac{(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx) D}{\Omega \nu}, \quad (2.12)$$

де ν – кінематична в'язкість.

При протіканні рідини по довжині трубопроводу-збирача, витрата рідини зростає, зарахунок наповнення ТЗ струменями, що притікають (рис. 2.1). Тобто уздовж потоку спочатку спостерігається ламінарний режим течії. Далі він

почергово переходить у три ділянки опору турбулентного режиму течії: гідравлічно гладких труб; перехідну; гідравлічно шорстких труб. Коефіцієнт Дарсі, залежно від критерія Рейнольдса $Re_{(x)}$ та шорсткості $\bar{\Delta} = \Delta/D$ внутрішніх стінок ТЗ та приймає відмінні значення на кожній з них (рис. 2.5).

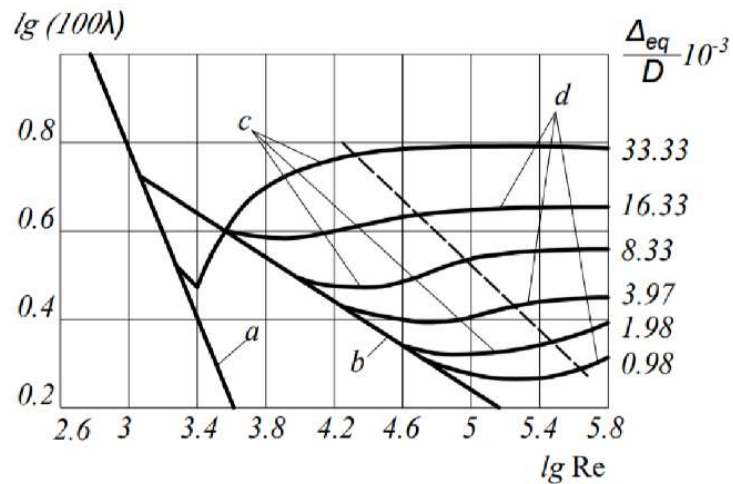


Рис. 2.5. Залежність $\lambda_{(x)} = f(\bar{\Delta}; Re_{(x)})$: *a* – зона ламінарного режиму течії; *b, c, d* – зона турбулентного режиму течії, зокрема ділянки: *b* – гідравлічно гладких труб; *c* – перехідна; *d* – гідравлічно шорстких труб [69]

2.4. Виведення формул для диференціала втрат напору в ТЗ

2.4.1. Ламінарний режим течії

Для ламінарного режиму течії рідини, що спостерігається при $Re_{(x)} \leq 2320$, обчислення коефіцієнта Дарсі проводиться за формулою Пуазейля $\lambda_{(x)} = 64/Re_{(x)}$ та після врахування залежності (2.12) записується так:

$$\lambda_{(x)} = \frac{64}{Re_{(x)}} = \frac{64\Omega \cdot \nu}{\left(Q_{(tr)} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) D} \quad (2.13)$$

Підстановка виразу (2.13) у формулу (2.11) дозволяє отримати диференціал втрат напору для ламінарного режиму течії рідини в ТЗ:

$$d\lambda_{(x)} = \frac{-64\Omega \nu b Z_{(x)}^{1/2} dx}{\left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right)^2 D} \quad (2.14)$$

2.4.2. Турбулентний режим течії

2.4.2.1. Ділянка гладкостінних труб

На ділянці опору гідравлічно гладких труб турбулентного режиму течії (крива b на рис. 2.5), яка спостерігається при $Re_{(x_i)}(\Delta_{(x_i)}/D_{(x_i)}) < 10$, коефіцієнт Дарсі розраховується відповідно до формули Блазіуса $\lambda_{(x)} = 0.3164/Re_{(x)}^{0.25}$ і з урахуванням виразу (2.12) виражається так:

$$\lambda_{(x)} = \frac{0,3164}{Re_{(x)}^{0.25}} = \frac{0.3164(\omega\nu)^{0.25}}{\left[\left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) D \right]^{0.25}} \quad (2.15)$$

Диференціал коефіцієнта Дарсі виглядає так:

$$d\lambda_{(x)} = \frac{-0.3164(\omega\nu)^{0.25} \cdot b Z_{(x)}^{1/2} dx}{4 \left[\left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) D \right]^{1.25}} \quad (2.16)$$

Провівши підстановку виразів (2.15) і (2.16) у (2.11) отримали диференціал втрат напору $dh_{(x)}$ для ділянки гідравлічно гладких труб турбулентного режиму течії рідини в трубопроводі-збирачі у такому вигляді:

$$dh_{(x)} = \frac{0.1582\nu^{0.25}}{g\Omega^{1.75}D^{1.25}} \left[\left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right)^{1.75} + 1.75 \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right)^{0.75} Z_{(x)}^{1/2} x \right] dx. \quad (2.17)$$

2.4.2.2. Ділянка доквадратичного опору

На ділянці доквадратичного опору турбулентного режиму течії рідини (криві c на рис. 2.5), яка спостерігається при $10 < Re_{(x)} (\Delta_{(x)}/D_{(x)}) < 500$, коефіцієнт Дарсі розраховують за формулою Альтшуля, яка з урахуванням виразу (2.12) виражається так:

$$\lambda_{(x)} = 0.11 \left[\frac{\bar{\Delta}}{D} + \frac{68}{Re_{(x)}} \right]^{0.25} = 0.11 \left[\bar{\Delta} + \frac{68\omega\nu}{\left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) D} \right]^{0.25} \quad (2.18)$$

Після підстановки виразу (2.18) у (2.11) отримали диференціал втрат напору $dh_{(x)}$ для ділянки доквадратичного опору турбулентного режиму течії рідини в трубопроводі-збирачі:

$$dh_{(x)} = \frac{0.11}{2g\omega^2 D} \left[\frac{\Delta_{eq}}{D} + \frac{68\Omega\nu}{\left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) D} \right]^{0.25} \left\{ \frac{0.25 \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right)^2 x}{\left[\frac{\Delta_{eq}}{D} + \frac{68\Omega\nu}{\left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) D} \right]} + \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right)^2 dx + 2x \cdot \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) \cdot bZ_{(x)}^{1/2} dx \right\}. \quad (2.19)$$

2.4.2.3. Ділянка квадратичного опору

Для ділянки квадратичного опору турбулентного режиму течії рідини (криві d на рис. 2.5), яка спостерігається при $Re_{(x)}(\Delta_{eq(x)} / D_{(x)}) \geq 500$, коефіцієнт Дарсі обчислюють за формулою Шифрінсона:

$$\lambda_{(x)} = 0.11 \left(\frac{\Delta_{eq(x)}}{D_{(x)}} \right)^{0.25}. \quad (2.20)$$

Для постійного значення шорсткості Δ_{eq} та діаметра D на розрахунковій ділянці ТЗ, коефіцієнт $\lambda_{(x)}$ є незмінним, і відповідно його диференціал дорівнює нулю:

$$d\lambda_{(x)} = 0. \quad (2.21)$$

Тоді диференціал втрат напору $dh_{(x)}$ для ділянки квадратичного опору турбулентного режиму течії рідини в ТЗ:

$$dh_{(x)} = \frac{0.11}{2g\omega^2 D} \left(\frac{\Delta_{eq}}{D} \right)^{0.25} \left[\left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right)^2 dx + 2x \cdot \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) \cdot b Z_{(x)}^{1/2} dx \right] \quad (2.22)$$

Розв'язування рівняння для повного робочого напору потоку рідини $Z_{(x)}$ та витрати для турбулентного режиму течії є перспективою для подальших досліджень.

2.5. Розв'язування рівняння для ламінарного режиму течії

Для розв'язання диференціального рівняння (2.3) для ламінарного режиму течії (пряма - а на рис. 2.5) виражаємо усі його змінні величини через робочий напір $Z_{(x)}$ (рис. 2.1), під дією котрого струмені вливаються в ТЗ крізь отвори у

його стінці, та через незалежну змінну відстань dx , вимірювану здовж осі ТЗ у напрямку руху потоку.

Витрата струменя рідини, котрий входить у ТЗ крізь отвір, розташований у перерізі x :

$$q_{(x)} = \mu\omega\sqrt{2gZ_{(x)}} = aZ_{(x)}^{1/2}, \quad (2.23)$$

де μ - коефіцієнт витрати вхідного отвору, *безрозмірний*;

ω – площа одного вхідного отвору, m^2 ;

$$a - \text{сталий множник, } a = \mu\omega\sqrt{2g} = \text{const, } m^{2.5}/s. \quad (2.24)$$

Середню швидкість v_x входження струменя в трубопровід-збирач отримуємо з формули (2.23):

$$v_{(x)} = \frac{q_{(x)}}{\omega} = \frac{aZ_{(x)}^{1/2}}{\omega}. \quad (2.25)$$

Диференціал витрати, в m^3/s , рідини, котра вливається в ТЗ крізь низку отворів, зроблених у його стінці на ділянці довжиною dx [53]:

$$dQ_{(x)} = nq_{(x)}dx = n\mu\omega\sqrt{2gZ_{(x)}}dx = bZ_{(x)}^{1/2}dx \quad (2.26)$$

$$\text{де } b - \text{сталий множник, } b = n\mu\omega\sqrt{2g} = \text{const, } m^{1.5}/s; \quad (2.27)$$

n – кількість вхідних отворів, влаштованих на одиниці довжини ТЗ, m^{-1} .

Витрату рідини, що транспортується в перерізі x ТЗ, в m^3/s , отримуємо інтегруванням математичного виразу (2.26):

$$Q_{(x)} = Q_{ir} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx, \quad (2.28)$$

де Q_{tr} - транзитна витрата рідини на вході на розглядувану розрахункову ділянку ТЗ довжиною x , m^3/s .

Середню швидкість потоку рідини в перерізі x ТЗ отримуємо із формули (2.28):

$$V_{(x)} = \frac{Q_{(x)}}{\Omega} = \frac{Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx}{\Omega}, \quad (2.29)$$

де Ω - площа поперечного перерізу ТЗ, m^2 .

Диференціал середньої швидкості потоку рідини в перерізі x ТЗ отримуємо диференціюванням математичного виразу (2.29):

$$dV_{(x)} = d\left(\frac{Q_{(x)}}{\Omega}\right) = \frac{bZ_{(x)}^{1/2} dx}{\Omega}. \quad (2.30)$$

Тиск потоку рідини всередині ТЗ, прокладеного горизонтально (рис. 2.1):

$$\frac{p_{(x)}}{\rho g} = T_{(0)} - Z_{(x)} - \frac{\alpha V_{(x)}^2}{2g}, \quad (2.31)$$

де $T_{(0)}$ - глибина занурення під рівень рідини вхідного перерізу розрахункової ділянки ТЗ;

Диференціал тиску для потоку рідини в горизонтальному ТЗ отримали із формули (2.31) підставивши в неї залежність (2.30) для швидкості $V_{(x)}$:

$$d\left(\frac{p_{(x)}}{\rho g}\right) = d\left(T_{(0)} - Z_{(x)} - \frac{\alpha V_{(x)}^2}{2g}\right) = -dZ_{(x)} - \frac{\alpha \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx\right)^2}{g\Omega^2} bZ_{(x)}^{1/2} dx. \quad (2.32)$$

Доданок $\sin\psi \cdot x$ у рівнянні (2.3) урахує нахил поздовжньої осі ТЗ до обрію (рис. 2.6).

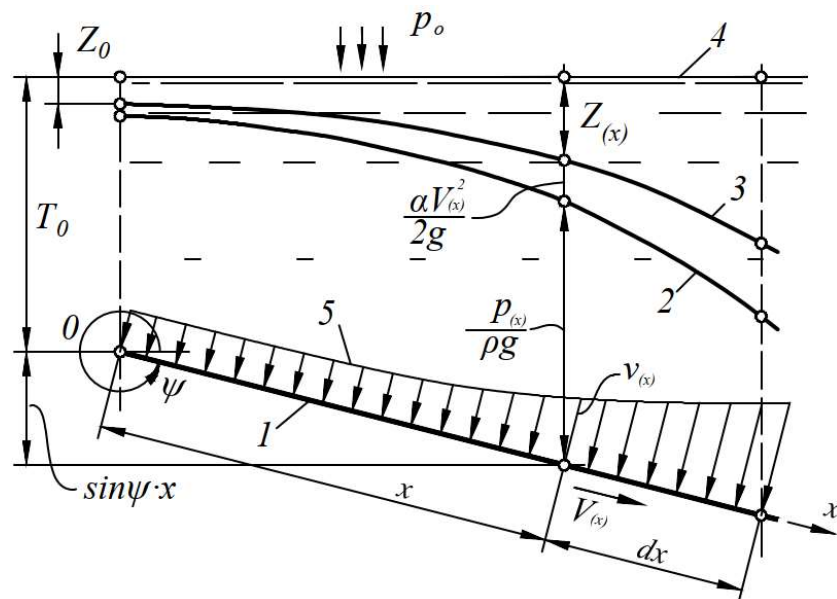


Рис. 2.6. Напори, що діють на трубопровід-збирач: 1 – ТЗ; 2 – п'єзометрична лінія для потоку рідини усередині ТЗ; 3 – те саме, лінія повного напору; 4 – рівень рідини зовні ТЗ; 5 – етюра швидкостей струменів, які входять у ТЗ; V – середня швидкість потоку рідини в ТЗ; v – те саме, струменя, що впливає в ТЗ

Останній доданок рівняння (2.3) є диференціалом втрат напору на тертя dh_x по довжині ТЗ. Його обчислюємо за формулою Дарсі-Вайсбаха:

$$dh_{(x)} = d\left(\lambda_{(x)} \frac{x V_{(x)}^2}{D 2g}\right) = \frac{1}{2g\Omega^2 D} d\left[\lambda_{(x)} \left(Q_{(tr)} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx\right)^2 x\right], \quad (2.33)$$

де D – внутрішній діаметр ТЗ, m . Для циліндричного ТЗ $D = const$. Тому його винесено перед знак диференціалу.

Для ламінарного режиму напірної течії рідини безрозмірний коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі) λ_x обчислюють за формулою Пуазейля:

$$\lambda_{(x)} = \frac{64}{\text{Re}_{(x)}} = \frac{64\Omega \cdot \nu}{\left(Q_{(tr)} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) D}, \quad (2.34)$$

де $\text{Re}_{(x)}$ - критерій Рейнольдса, безрозмірний:

$$\text{Re}_{(x)} = \frac{V_{(x)} D}{\nu} = \frac{(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx) D}{\Omega \nu}, \quad (2.35)$$

де ν – кінематична в'язкість, m^2/s .

Після підставлення математичних виразів (2.34) і (2.35) у формулу (2.33) отримали залежність для диференціалу втрат напору за ламінарного потоку в ТЗ [11]:

$$dh_{(x)} = \frac{32 \cdot \nu}{g\Omega \cdot D^2} \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx + bZ_{(x)}^{1/2} x \right) dx. \quad (2.36)$$

Підставивши математичні залежності для: $V_{(x)}$ (2.29); $\nu_{(x)}$ (2.25); $dV_{(x)}$ (2.30); $d(p_{(x)}/\rho g)$ (2.32); $dh_{(x)}$ (2.36) у диференціальне рівняння (2.3) отримали нове диференціальне рівняння руху рідини зі змінною витратою з однією невідомою змінною величиною $Z_{(x)}$, яка є робочим напором, під дією котрого струмені вливаються в ТЗ крізь отвори у його стінці:

$$\frac{(2\alpha_0 - \alpha)b}{g\Omega^2} \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) Z_{(x)}^{1/2} dx + \frac{32\nu}{g\Omega D^2} \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) dx - \frac{\alpha_0 ab \cos \beta}{g\Omega \omega} Z_{(x)} dx + \frac{32b\nu}{g\Omega D^2} Z_{(x)}^{1/2} x dx - dZ_{(x)} + \sin \psi \cdot dx = 0. \quad (2.37)$$

Для спрощення запису рівняння (2.37) його постійні величини позначимо такими коефіцієнтами:

$$a_1 = \frac{(2\alpha_0 - \alpha) \cdot b}{g\Omega^2}; a_2 = \frac{32\nu}{g\Omega D^2}; a_3 = \frac{\alpha_0 ab \cos \beta}{g\Omega \omega}; a_4 = \frac{32b\nu}{g\Omega D^2}. \quad (2.38)$$

Записуємо рівняння (2.37) з урахуванням позначень (2.38):

$$2a_1 \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) Z_{(x)}^{1/2} dx + a_2 \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) dx - a_3 Z_{(x)} dx + a_4 Z_{(x)}^{1/2} x dx - dZ_{(x)} + \sin \psi \cdot dx = 0. \quad (2.39)$$

У рівняння (2.39) уводимо таку заміну:

$$y = \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right). \quad (2.40)$$

Перша похідна від математичної залежності (2.40) така:

$$y' = bZ_{(x)}^{1/2}. \quad (2.41)$$

Із математичного виразу (2.41), піднісши його праву та ліву частини до квадрату, знаходимо першу похідну від повного напору $Z_{(x)}$:

$$Z_{(x)} = \left(\frac{y'}{b} \right)^2; \frac{dZ_{(x)}}{dx} = \frac{2y'y''}{b^2}, \quad (2.42)$$

де y'' - друга похідна функції y по незалежній змінній відстані x .

Записуємо рівняння (2.39) з урахуванням позначень (2.40)-(2.42), поділивши усі його доданки на dx :

$$\frac{a_1}{b} yy' + a_2 y - \frac{a_3}{b^2} (y')^2 + \frac{a_4}{b} y' x - \frac{2y'y''}{b^2} + \sin \psi = 0. \quad (2.43)$$

Рівняння (2.39) і (2.43) є нелінійними - квадратичними. Тому їх представляємо квадратною параболою. Тому у рівнянні (2.43) раніше прийняте позначення (2.40), $y = \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right)$, замінюємо на таке:

$$y = Ax + Bx^2. \quad (2.44)$$

Тоді:

$$y' = A + 2Bx. \quad (2.45)$$

$$y'' = 2B. \quad (2.46)$$

Записуємо рівняння (2.43) з урахуванням заміни (2.44) та математичних залежностей (2.45) і (2.46):

$$\begin{aligned} & \frac{a_1}{b}(Ax + Bx^2) \cdot (A + 2Bx) + a_2(Ax + Bx^2) - \frac{a_3}{b^2}(A + 2Bx)^2 + \\ & 4 + \frac{a_4}{b}(A + 2Bx)x - \frac{4}{b^2}(A + 2Bx)B + \sin \psi = 0. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Виконавши алгебраїчні дії у рівнянні (2.47) надали йому такого вигляду:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{a_1}{b}x - \frac{a_3}{b^2} \right) A^2 + \left(\frac{2a_1}{b}x^2 - \frac{4a_3}{b^2}x - \frac{8}{b^2} \right) B^2x + \left(\frac{3a_1}{b}x^2 - \frac{4a_3}{b^2}x - \frac{4}{b^2} \right) AB + \\ & + \left(a_2 + \frac{a_4}{b} \right) Ax + \left(a_2 + \frac{2a_4}{b} \right) Bx^2 + \sin \psi = 0. \end{aligned} \quad (2.48)$$

У рівнянні (2.48) невідомими є змінні коефіцієнти A і B при незалежній змінній відстані x . Для знаходження значень A і B застосуємо граничну умову. На початку ділянки:

$$x = 0. \quad (2.49)$$

Підставивши умову (2.47) у рівняння (2.48) отримали:

$$\frac{a_3}{b^2} A^2 + \frac{4}{b^2} AB + \sin \psi = 0. \quad (2.50)$$

Прирівнюємо праві частини рівнянь (2.41) та (2.45):

$$bZ_{(x)}^{1/2} = A + 2Bx. \quad (2.51)$$

Із рівняння (2.51) одержали:

$$A = bZ_{(x)}^{1/2} - 2Bx. \quad (2.52)$$

При $x=0$ із рівняння (2.52) маємо:

$$A = bZ_{(x)}^{1/2}. \quad (2.53)$$

За умови, що $x = 0$, з урахуванням $A = bZ_{(x)}^{1/2}$ із (2.53) рівняння (2.50) приймає такий вигляд:

$$a_3 Z_{(0)} + \frac{4}{b} Z_{(0)}^{1/2} B + \sin \psi = 0. \quad (2.54)$$

Із рівняння (2.54) маємо:

$$B = \frac{b(a_3 Z_{(0)} + \sin \psi)}{4Z_{(0)}^{1/2}}. \quad (2.55)$$

Уводимо значення коефіцієнтів А із (2.53) та В із (2.55) у рівняння (2.54), яке тотожне рівнянню (2.40):

$$y = \left(Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx \right) = Ax + Bx^2 = bZ_{(0)}^{1/2}x + \left(\frac{\alpha_0 ab Z_{(0)} b \cos \beta}{g\omega 4Z_{(0)}^{1/2}} + \frac{b \sin \psi}{4Z_{(0)}^{1/2}} \right)^2. \quad (2.56)$$

Після виконання алгебраїчних дій у математичній залежності (2.56) отримали рівняння для обчислення витрати рідини, котра під дією зовнішнього напору вливається крізь отвори в трубопровід-збирач на ділянці довжиною x і транспортується в ТЗ крізь його переріз x :

$$Q_{tr} + b \int_0^x Z_{(x)}^{1/2} dx = \left(Z_{(0)}^{1/2} + \frac{\alpha_0 ab Z_{(0)}^{1/2} \cos \beta}{4g\omega\Omega} x + \frac{\sin \psi}{4Z_{(0)}^{1/2}} x \right) bx. \quad (2.57)$$

Формулу для обчислення повного робочого напору потоку рідини в перерізі x трубопроводу-збирача отримали диференціюванням рівняння (2.57):

$$Z_{(x)} = \left(Z_{(0)}^{1/2} + \frac{\alpha_0 ab Z_{(0)}^{1/2} \cos \beta}{2g\omega\Omega} x + \frac{x \sin \psi}{2Z_{(0)}^{1/2}} x \right)^2. \quad (2.58)$$

Математична модель, представлена рівняннями (2.57) і (2.58), описує ламінарні течії в напірних трубопроводах-збирачах.

2.6. Методика розрахунку трубопроводів-збирачів

Розрахунок ТЗ проводиться поступово короткими ділянками вздовж руху течії. Довжина цих ділянок рівна відстані між двома сусідніми вхідними насадками. Для початкового перерізу ТЗ ($x=0$) встановлюємо значення параметрів $Z_{(0)}$ і $V_{(0)}$.

При розрахунках напірних трубопроводів-збирачів у формулах (2.57) та (2.55) ураховуються значення таких параметрів ТЗ і характеристик внутрішнього

та зовнішнього потоків і приєднаних струменів на початку розрахункової ділянки x_{i-k} : повний робочий напір $Z_{(x_i)}^{1/2}$; швидкість $v_{(x_i)}$ і кут $\beta_{(x_i)}$ підведення струменів; середню швидкість $V_{(x_i)}$ потоку усередині ТЗ; гідравлічний коефіцієнт опору $\lambda_{(x_i)}$ та втрати напору на тертя $\lambda_{(x_i)}(x_{i-k}/D_{i-k})(V_{(x_i)}^2/2g)$ вздовж ділянки x_{i-k} ; кут ψ_{i-k} нахилу ТЗ до горизонтальної осі; глибину занурення ТЗ під рівень зовнішнього потоку рідини $T_{(0)}$; його швидкість V_{out} ; тиск p_{oout} на поверхні рідини, що омиває ТЗ зовні; густини рідин ρ та ρ_{out} , які заходяться усередині та зовні ТЗ відповідно; геометричні параметри ТЗ. Дані параметри можуть бути постійними по усій довжині ТЗ, або змінюватись на різних його ділянках.

2.7. Підсумки розділу 2

Течія рідини у ТЗ формується за рахунок притоку струмин крізь отвори у його стінках. Об'ємна витрата рідини вздовж течії в ТЗ збільшується. Відповідно до цього відбувається зростання гідравлічних втрат напору уздовж ТЗ. Нехтування змінністю коефіцієнта гідравлічного тертя призводить до серйозних прорахунків при проектуванні ТЗ.

Диференціал втрат напору на подолання тертя вздовж трубопроводу-збирача виражено через дві змінних величини загальний робочий напір і незалежну змінну відстань. Отримано диференціал втрат напору для ламінарного режиму течії рідини, який реалізується на початковій ділянці, а також для трьох ділянок турбулентного режиму течії: гідравлічно гладких труб, перехідного та гідравлічно шорстких труб, котрі розташовані одна за одною.

Опираючись на диференціальне рівняння напірного руху рідини зі змінною витратою уздовж потоку, отримано розрахункові залежності для обчислення притоку рідини в трубопровід-збирач крізь отвори у його стінці для ламінарних потоків при змінному значенні коефіцієнта Дарсі. Також, за цих умов, виведено математичну залежність для розрахунку повного робочого напору потоку рідини в трубопроводі-збирачі.

РОЗДІЛ 3. ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1. Обґрунтування геометричних параметрів і гідродинамічних характеристик досліджуваних ТЗ

Для виконання експериментальних досліджень, нами було обрано трубопроводи-збирачі (ТЗ) з набором різних геометричних параметрів. Для монтажу досліджуваного ТЗ використано мідну трубу з маркою EN 1057 за конструкційними міркуваннями. Вона виготовлена згідно стандарту DIN та підкислена фосфором, що дозволяє забезпечити високу стійкість до впливу води та в подальшому корозії.

Вибір матеріалу труби пояснюється тим, що у мідні труби порівняно легкі для обробки та спаювання. Внутрішній діаметр ТЗ становить $D=11,28$ мм. Діаметр бічного виходу із вхідної насадки був прийнятий таким ж, як і діаметр самої насадки – $d=4,83$ мм. Співвідношення d/D відповідно має значення: $0,428$.

3.2. Планування експериментів

При плануванні експерименту для дослідження ТЗ багато факторів впливають на його перебіг. Основними чинниками, котрі впливають на притік рідини до ТЗ є:

D – внутрішній діаметр ТЗ;

d – внутрішній діаметр вхідної насадки;

d/D – співвідношення внутрішніх діаметрів насадки та ТЗ;

$\beta_{ТЗ}$ – кут приєднання струменя відносно осі основної течії у ТЗ;

V , v – середня швидкість основної течії в ТЗ та струменя, котрий приєднується, відповідно;

Q_{tr} – транзитна витрата на початку ТЗ;

ν – кінематична в'язкість води.

Тобто маємо вісім основних початкових параметрів, які при взаємодії створюють дев'ятий, інтегральний коефіцієнт η - нерівномірність притоку рідини до трубопроводу-збирача. Значення перших семи параметрів задаються

при дослідженні, а значення в'язкості рідини є залежністю від її температури. Виходячи з цього можна зробити висновок, що достатньо важко отримати експериментальну залежність $\eta = f(d, D, \beta_{T3}, d/D, Q, V, \nu, \nu)$.

Схема планування експерименту для встановлення η для ТЗ для чотирьох факторів: $d/D, \beta_{T3}, Re, Q_{tr}$ при п'ятьох значеннях кожного з них

Таблиця 3.1

		d/D				
		0,298	0,347	0,398	0,428	0,455
β _{ТЗ} , град	Re ×10 ³					
	Q _{tr} см ³ /с	0,2	1,0	5,0	10,0	20,0
0	0,0					
	50,0					
	100,0					
	150,0					
	200,0					
45	0,0					
	50,0					
	100,0					
	150,0					
	200,0					
90	0,0					
	50,0					
	100,0					
	150,0					
	200,0					
135	0,0					
	50,0					
	100,0					
	150,0					
	200,0					
180	0,0					
	50,0					
	100,0					
	150,0					
	200,0					

Для спрощення задачі необхідно згрупувати параметри, а не зменшувати їх кількість. Об'єднання факторів проводимо за критерієм Рейнольдса:

$$\text{для трубопроводу } Re_D = \frac{VD}{\nu}, \quad (3.1, \text{ а})$$

$$\text{для насадки } Re_d = \frac{vd}{\nu}, \quad (3.1, \text{ б})$$

Для кожного з досліджуваних ТЗ проводиться послідовна зміна кута приєднання струменя $\beta_{ТЗ}$.

Виходячи з цього, отримуємо чотири вхідних фактори. Якщо, під час виконання експерименту, надавати кожному з них по п'ять значень, то для визначення функції $\eta = f(\beta_{ТЗ}, d/D, Q_r, Re)$ потрібно провести $5^4 = 625$ дослідів. Але попри це, їх число можна суттєво зменшити. Зобразимо це за допомогою планування експерименту з допомогою методу латинських квадратів (табл. 3.1).

При цьому кожний варіант вхідного параметра з'являється в одному із 25 рядків та кожній з 25 колонок тільки один раз. Це забезпечує комбінацію різних факторів так, щоб при найменшій кількості дослідів найрівномірніше охопити всю таблицю імовірних комбінацій факторів впливу. Відповідно до цього методу число необхідних дослідів зменшується з 625 до 25.

Нами було проведено експериментальне дослідження трубопроводу та насадки зі співвідношенням $d/D=0,428$. Для співвідношень $0,298, 0,347, 0,398$ залежності були отримані В. В. Іванівом [64-66].

3.3. Стенд для дослідження шляхового притоку води в напірні трубопроводи-збирачі

Описані в літературних джерелах експериментальні установки для дослідження напірних ТЗ склалися з прозорого відкритого лотка та змонтованого в ньому трубопроводу-збирача. ТЗ має штуцери для підключення імпульсних ліній до п'езометрів. Між цими штуцерами в стінці трубопроводу-збирача кріпляться вхідні насадки. Притік води до даних ТЗ відбувається за рахунок робочого напору, який обмежується глибиною лотка.

Для проведення експериментів було модернізовано експериментальний стенд (рис. 3.1) [97] для дослідження притікання рідини в напірний трубопровід-

збирач. Проведено регулювання геометричних параметрів ТЗ і кінематичних характеристик потоків рідини зовні та всередині трубопроводу-збирача.

Досліди на експериментальному стенді проводилися за таким алгоритмом. Вода із резервуара 1 надходить у напірний бачок 2 (поз. 4, рис. 3.4), де створюється статичний напір $H=3,5$ м. Із нього, подавальним трубопроводом 4, вода надходить власне у футляр, у якому встановлено досліджуваний трубопровід-збирач 8. Паралельним подавальним трубопроводом 5, поступає у безпосередньо у ТЗ для можливості дослідження транзитних витрат (рис. 3.2 та рис. 3.3). На трубах 4 і 5 встановлено лічильники 6 та 7 для обліку витрат. Вентилі, встановлені на вході в футляр і в ТЗ дозволяють проводити регулювання витрати притоку води до ТЗ через вхідні насадки. Для вимірювання п'єзометричних напорів всередині ТЗ на щиті 20 закріплені п'єзометри з ціною поділки шкали 1,0 мм. Перекачування води у ємності 1 проводилось за допомогою побутового відцентрового електронасоса "Кама-5", 19. Це дозволяє забезпечувати циркуляцію в дослідній установці та уникати надлишкових витрат води (рис. 3.1).

Для вимірювання витрати потоку, який надходить у футляр із ТЗ, використано одноструменеві лічильники води марки "NOVATOR" ЛХ-15Х № 5593475, для можливості вимірювання транзитного потоку в трубопроводі-збирачі, – NOVATOR" ЛХ-15Х № 5313821.

Паспортні характеристики лічильника "NOVATOR" ЛХ-15Х:

- діаметр умовного проходу (DN): – 15 мм;
- температура рідини: – 5-30 °С;
- діапазон вимірювання витрат води: $Q_{min} - 0,03$ м³/год.; $Q_{max} - 3,0$ м³/год.;
- ціна поділки – 0,0001 м³;
- діапазон допустимої відносної похибки, % : $Q_{min} = \pm 5$; $Q_{max} = \pm 2$
- мінімальний поріг чутливості – 0,015 м³/год.

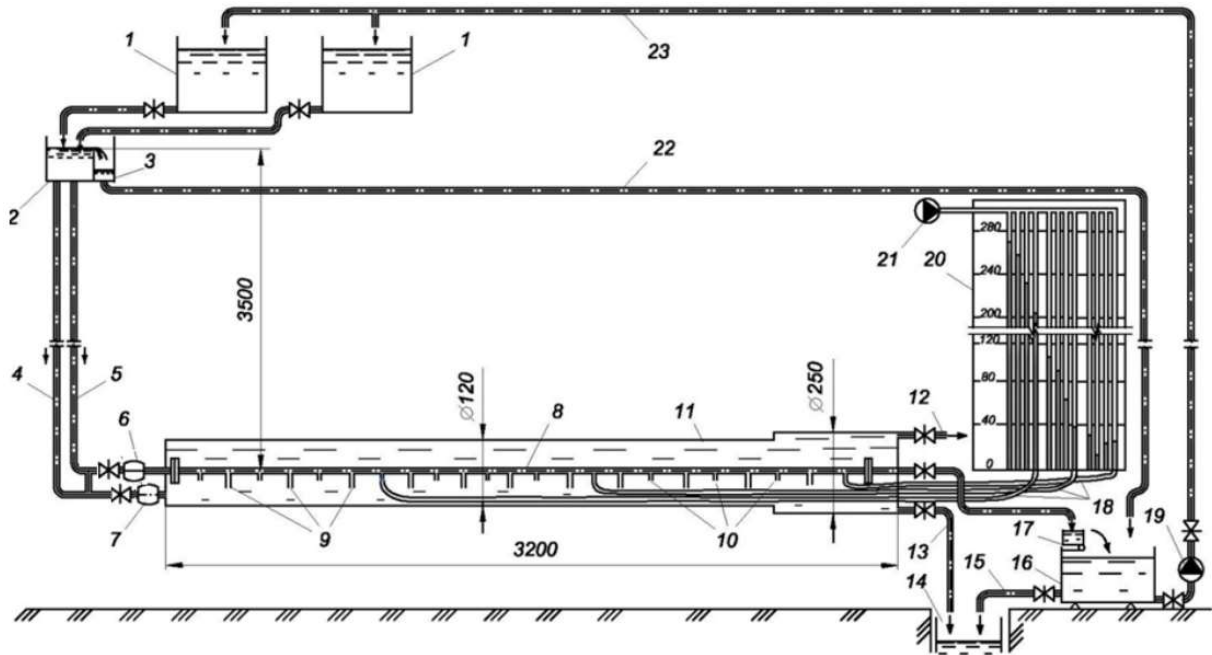


Рис. 3.1. Принципова схема дослідного стенду: 1 - резервуар для води;
 2 - напірний бак з переливною стінкою; 3 – скидний бак;
 4, 5 – подавальні трубопровідні лінії; 6, 7 – лічильники; 8 – досліджуваний експериментальний трубопровід; 9 – насадки; 10 – штуцери для підключення імпульсних ліній від п'єзометрів; 11 – футляр; 12 – патрубок для випускання повітря з футляра; 13 – спускна труба з футляра; 14 – водозбірний трап; 15 – скидна труба; 16 – приймальний бак; 17 – мірний бачок;
 18 – імпульсні лінії; 19 – циркуляційний насос; 20 – п'єзометричний щит; 21 – компресор; 22 – скидний трубопровід з ємності 2 ; 23 – зворотний трубопровід [97]

Для забезпечення регулювання робочого напору на вхідних насадках трубопроводу-збирача, експериментальний ТЗ розміщений у герметичному напірному футлярі.

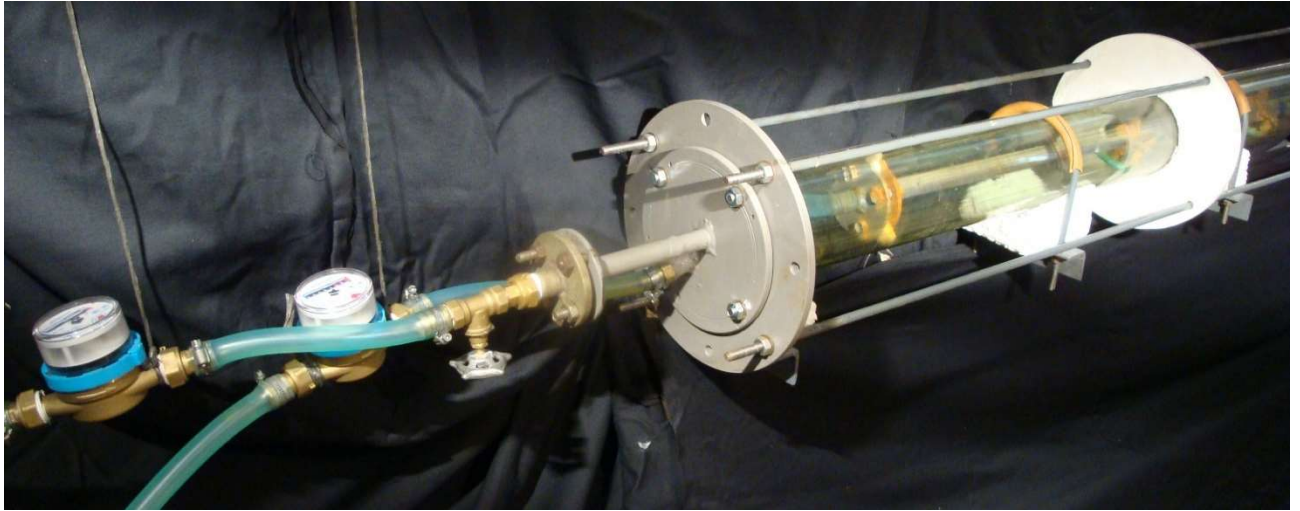


Рис. 3.2. Вхідна частина експериментального ТЗ у футлярі

Футляр має прозору ділянку з такими параметрами: діаметр - 108 мм і довжина - 2548 мм. Це дозволяє візуально спостерігати стан і роботу імпульсних ліній і насадок (рис. 3.6) Також у футлярі наявна непрозора частина довжиною 510 мм та діаметром 250 мм. Крізь торцеву кришку останньої виведено назвні імпульсні лінії, що їх приєднано до п'єзометрів (рис. 3.3).

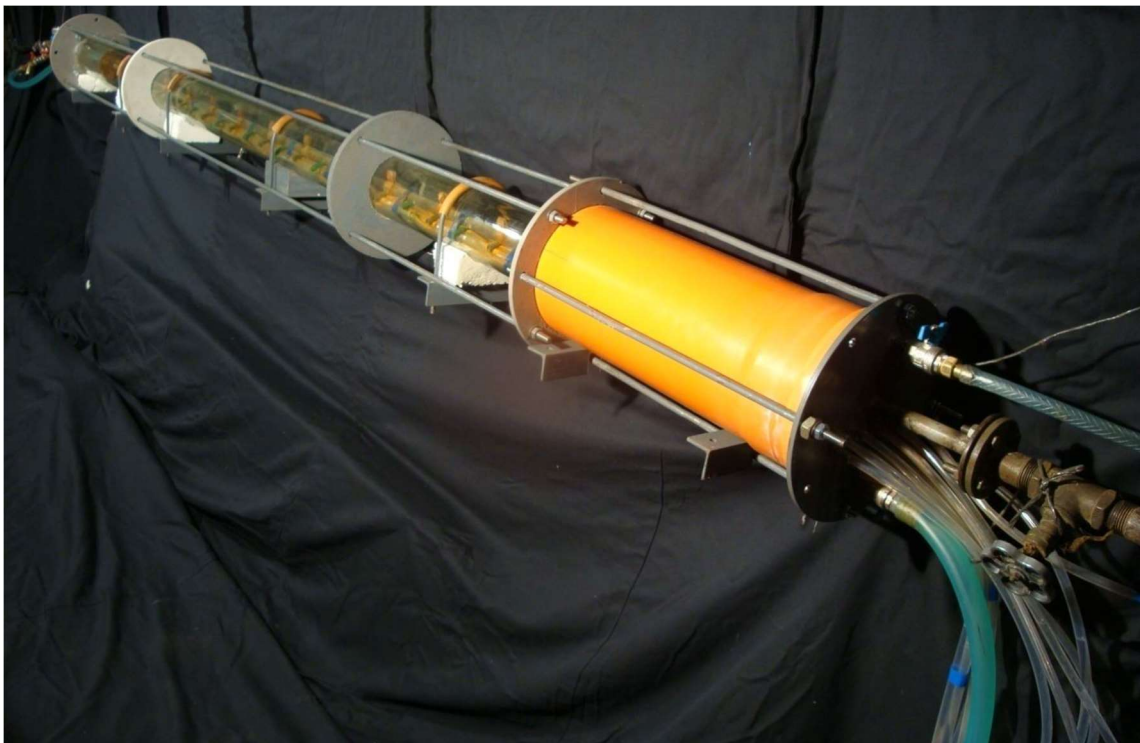


Рис. 3.3. Вихідна ділянка трубопроводу-збирача з футляром



Рис. 3.4. Ємності для води: 1-3 – ємності; 4 – напірний бачок з водозливною стінкою

На його вихідному торці міститься дванадцять патрубків 27 для переходу 12 імпульсних ліній з внутрішнього простору футляра назовні (рис. 3.5 та рис. 3.7) та далі на п'єзометричний щит (поз. 20 на рис. 3.1). Для зручності монтажу з'єднання труб виконані фланцевими. Вода надходить в трубопровід-збирач і відводиться від нього з допомогою гнучких армованих гумових шлангів, кріплення яких відбувається хомутами (рис. 3.2).

Трубопроводи-збирачі (рис. 3.7 та рис. 3.8) обладнані штуцерами для під'єднання імпульсних ліній від п'єзометрів. Між ними посередині вхідні циліндричні насадки у стінці трубопроводу.

Досліджуваний ТЗ закріплено всередині футляра, на розпорах 16 (рис. 3.5) На торцевій кришці на вході 18 передбачено патрубок 21 для подачі води усередину футляра трубопроводу-збирача. На фланці 12, розташовано дванадцять монтажних патрубків 27 для сполучення внутрішніх імпульсних гумових трубок із зовнішніми. Вони в подальшому підведені до п'єзометричного щита. На фланці 12 також передбачено патрубки 22, 23

відповідно для спуску води із футляра та випускання повітря (рис. 3.5).

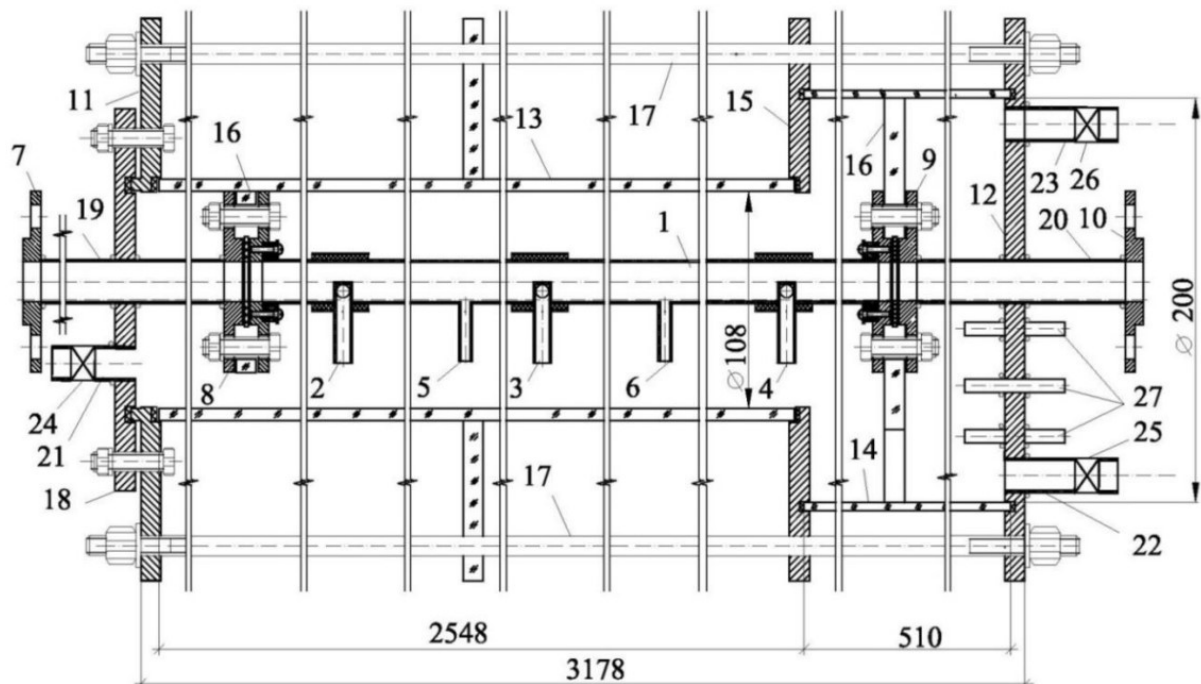


Рис. 3.5. Схема монтажу експериментального ТЗ: 1 – ТЗ; 2-4 – вхідні насадки; 5, 6 – штуцери для приєднання імпульсних ліній; 7-10 - фланці для з'єднання; 11, 12 - торцеві фланці; 13 – прозора ділянка футляра; 14 – те саме, непрозора; 15 - монтажна шайба; 16 – розпорка; 17 - тяги для монтажу; 18 - вхідна торцева кришка; 19, 20 - підвідна та відвідна труби; 21-23 – патрубки відповідно для наповнення й опорожнення футляра та для випуску повітря; 24-26 – вентиля; 27 – патрубки для імпульсних ліній [97]



Рис. 3.6. Ділянка прозорого футляра із встановленим у ньому ТЗ

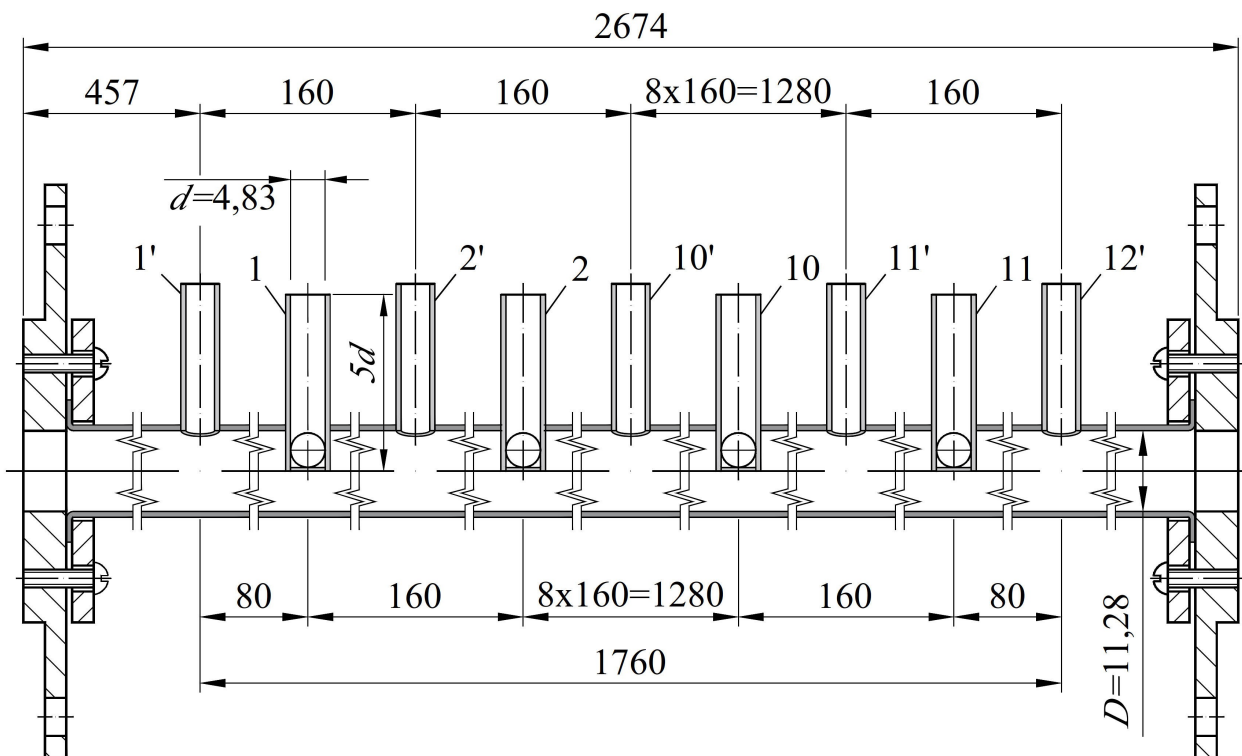


Рис. 3.7. Схема досліджуваного ТЗ: 1, 2, ... 11, 12 – штуцери для під'єднання імпульсних ліній від п'єзометрів; 1', 2', ... 10', 11' - циліндричні насадки



Рис. 3.8. Трубопроводи-збирачі для проведення експериментів

Внутрішній діаметр d насадки відповідає діаметру її бічного вихідного отвору d . Для забезпечення можливості регулювання значення кута приєднання

струменя β_{T3} забезпечено закріплення насадок у стінці ТЗ з можливістю обертання відносно їх поздовжніх осей.

3.4. Методика проведення дослідів

Перед проведенням досліду, вхідні циліндричні насадки встановлюються у ТЗ із заданим кутом притікання струменів β_{T3} відносно напрямку руху основної течії у ТЗ.

Проводимо перемішування води у резервуарах 1 (рис. 3.4), здійснюємо вимірювання її температури за допомогою ртутного термометра. Відкриваємо вентиль на трубопроводі від резервуара та налаштовуємо витрату так, щоб у напірній ємності з водозливною стінкою 4 (рис. 3.1, рис. 3.4), був постійний рівень. При закритому вентилі перед досліджуваним ТЗ, по одній із подавальних ліній 5 (рис. 3.1) проводимо заповнення об'єму футляра (рис. 3.2, рис. 3.3), таким чином створюючи напірну течію, котра омиває розміщений в ньому трубопровід-збирач. Патрубком 23 (рис. 3.5) проводимо випуск повітря, щоб досягти повного наповнення футляра водою. Також проводимо випуск повітря з імпульсних ліній 18 (рис. 3.1). Переконавшись, що вся система працює злагоджено, приступаємо до проведення дослідів.

Проводимо дослід, в режимі відсутності транзитної течії у трубопровід-збирач. Витрату встановлюємо різницею показів лічильника 7 (рис. 3.1), встановленого перед футляром за певний зафіксований проміжок часу. Окрім того, для перевірки точності витратоміра об'єм води, котра потрапила через насадки у ТЗ, визначаємо з допомогою мірного бачка 17. Напір рідини на насадках трубопроводу-збирача знаходимо за показами п'езометрів. За допомогою окремого п'езометра заміряємо напір води у футлярі. Забезпечуємо циркуляцію води у системі з допомогою побутовий відцентрового електронасоса. Фіксуємо у журналі наведені вище покази та переходимо до наступного досліду. Методика його проведення аналогічна першому випадку. Проводимо виміри для попередньо визначеної необхідної кількості точок. У

подальшому змінюємо кут приєднання струменя $\beta_{ТЗ}$ та за аналогічною методикою проводимо наступну серію дослідів.

3.5. Математична обробка результатів експерименту

Розрахунки та побудова графіків проводились з використанням програми Microsoft Excel на персональному комп'ютері.

Значення повного робочого напору на i -тій від початку трубопроводу-збирача вхідній насадці, під дією якого струмені вливаються в ТЗ, розраховуються за формулою:

$$Z_i = H_{out} - \frac{p_i}{\rho g} - \frac{\alpha_0 V_i^2}{2g}, \quad (3.2)$$

де H_{out} – фактичний напір ззовні ТЗ;

$p_i/\rho g$ – п'єзометричний напір на i -ої насадці;

$\alpha_0 V_i^2/2g$ – швидкісний напір у ТЗ перед нею.

Притікання води до трубопроводу-збирача через i -ту насадку розраховували за теоретичною залежністю, за повним робочим напором на ній:

$$q_i = \mu_i \omega \cdot \sqrt{2gZ_i}, \quad (3.3)$$

де μ_i – коефіцієнт витрати насадки, який $\mu = f(\text{Re}_d)$ для насадок було встановлено експериментально [65];

ω – площа поперечного перерізу для насадки;

g – коефіцієнт прискорення вільного падіння;

Z_i – робочий напір на насадці, яка розглядається.

Обчислення витрати води в трубопроводі-збирачі в створі i -ої насадки обчислювали за виразом, виходячи з (3.2) та (3.3):

$$q_k = \sum_{i=1}^k q_i + m_k W \times \sqrt{\left[2gH_{out} - \frac{2p_k}{r} - a_0 \left(\sum_{i=1}^{k-1} \frac{q_i}{W} \right)^2 \right]} \quad (3.4)$$

де, $\sum_{i=1}^k q_i$ - витрата води в трубопроводі-збирачі перед k -ою насадкою;

μ_k – коефіцієнт витрати для відповідної входної насадки;

ω – площа поперечного перерізу насадки;

H_{out} – напір води ззовні ТЗ фактичний;

$p_k / \rho g$ – п'єзометричний напір на k -ій насадці;

a_0 - коефіцієнт Коріоліса, $a_0 = 1.05$;

Ω - площа в поперечного перерізу ТЗ.

Значення середньої швидкості рідини в перерізі трубопроводу обраховували за формулою:

$$v_i = \frac{4Q_i}{\pi D^2}, \quad (3.5)$$

де, Q_i - витрата води в перерізі ТЗ

D – його діаметр.

Кінематичну в'язкість розраховували в залежності від температури води:

$$\nu = \frac{177,5 \times 10^{-8}}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2} / 10000, \quad (3.6)$$

де, T – температура води в момент проведення дослідів, °С.

Критерій Re в i -ому перерізі трубопроводу розраховували із виразу:

$$Re_i = \frac{v_i D}{\nu}, \quad (3.7)$$

3.6. Оцінка точності вимірів

Визначення показів п'єзометрів H_0 та H_{1-12} мм, (для зовнішньої течії у футлярі та насадок, відповідно) здійснювалось способом прямого вимірювання на п'єзометричному щиті з абсолютним значенням похибки 0,5 мм. Максимальний досліджений перепад напору між показами H_0 та H_{1-12} становив $\Delta h_{0-12} = 59$ мм. Звідси $\Delta h_i / h_i = \Delta h_k / h_k = 0.5 / 59 = 0,0085$.

Об'єм рідини W лічильників "NOVATOR" ЛХ-15Х вимірювали з точністю поділки до $0,0001 \text{ м}^3$. Відносна похибка вимірювання при визначенні мірним бачком складала № 5593475 - $1,59\% = 0,0159$; № 5313821 - $1,55\% = 0,0155$.

Час T рахувався за секундоміром із затримкою в $0,2 \text{ с}$, що і є абсолютною похибкою. Максимальна похибка вимірювання складає $\Delta T / T = 0.2 / 105,48 = 0,0019$.

Вимірювання температури води проводилось з допомогою ртутного термометра з абсолютною похибкою $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Відповідно значення похибки складає $\Delta t / t = 0.5 / 18,0 = 0,00277$. Довжину трубопроводу-збирача виміряно лінійкою з абсолютною похибкою $0,5 \text{ мм}$. При довжині трубопроводу-збирача - 2674 мм значення відносної похибки - $\Delta L / L = 0.5 / 2674 = 0,002$.

Визначення внутрішнього діаметра насадок d та трубопроводу-збирача D було проведено об'ємним способом.

Трубу довжиною $l = 1200 \text{ мм}$, з відрізків якої виготовлені корпуси насадок, наповнювали водою у вертикальному положенні. Проводили зважування зливої води її та за густиною ρ визначали об'єм V , за яким проведено обчислення діаметра: $d = \sqrt{4V / \pi L}$. За такою ж методикою розраховано діаметр трубопроводу-збирача. Звідси значення відносних похибок для визначення діаметра:

$$\Delta d / d = \pm \sqrt{(\Delta W_d / 2W_d)^2 + (\Delta l / 2l_d)^2} \quad (3.2)$$

$$\Delta D / D = \pm \sqrt{(\Delta W_D / 2W_D)^2 + (\Delta L / 2L_D)^2} \quad (3.3)$$

Для параметрів насадки: діаметра $d = 4,93 \text{ мм}$ та довжини $l = 1200 \text{ мм}$ похибка складає:

$$\Delta d / d = \pm \sqrt{(10 / 2 \times 2010)^2 + (0,5 / 2 \times 1200)^2} = 0,00250$$

Для діаметра трубопроводу-збирача $D = 11,28 \text{ мм}$ та його довжини

$L=2674\text{мм}$:

$$\Delta D / D = \pm \sqrt{(10 / 2 \times 947570)^2 + (0,5 / 2 \times 2674)^2} = 0,0001$$

Сумарне значення похибки для проведеного дослідження складає:

$$\begin{aligned} \Delta = & (\Delta h_k / h_k + \Delta T / T + \Delta t / t + \Delta L / L + \Delta d / d + \Delta D / D) \cdot 100\% + \\ & + 1,65\% + 1,52\% = (0,0085 + 0,0019 + 0,0277 + 0,0002 + \\ & + 0,0025 + 0,0001) \times 100\% + 1,59\% + 1,55\% = 7,45\%. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Отже, найбільша сумарна відносна похибка при визначенні притоку рідини у ТЗ (на змонтованому експериментальному стенді) становить 7,45%, що не перевищує нормативних 10%, які є допустимими для інженерних розрахунків.

3.7. Підсумки розділу 3

Застосовано методику планування багатофакторного експерименту за допомогою методу латинських квадратів, для чотирьох факторів впливу при п'яти значеннях кожного з них.

Змонтовано та описано експериментальний стенд з допомогою якого проводилось дослідження шляхового надходження рідини в напірний ТЗ, котрий змонтований у футлярі.

Описано методику проведення дослідів на експериментальному стенді.

Наведено методику обробки результатів отриманих результатів.

Проведено розрахунок сумарної похибки вимірювань при проведенні досліджень на експериментальному стенді. Встановлено, що вона не перевищує 7,45%, що знаходиться в нормативних межах інженерних розрахунків.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Обґрунтування параметрів ТЗ, які перевіряються

Експериментальну перевірку теоретичних залежностей для ТЗ було проведено за допомогою розрахунків та побудови графіків у програмі Microsoft Excel. За основу розрахунків прийнято результати дослідів, проведених на експериментальному стенді. Окрім того проведено порівняння результатів з експериментальними дослідженнями В. А. Волощука [53-57], які найповніше описують досліджуваний нами трубопровід збирач. Було проаналізовано залежності критерію Рейнольдса та коефіцієнта гідравлічного тертя по довжині ТЗ, коефіцієнта витрати вхідної насадки. Проведено порівняння експериментальних даних з результатами досліджень для витрати на насадках, всередині трубопроводу-збирача та повного робочого напору вздовж ТЗ.

4.1.1. Коефіцієнт витрати вхідної насадки

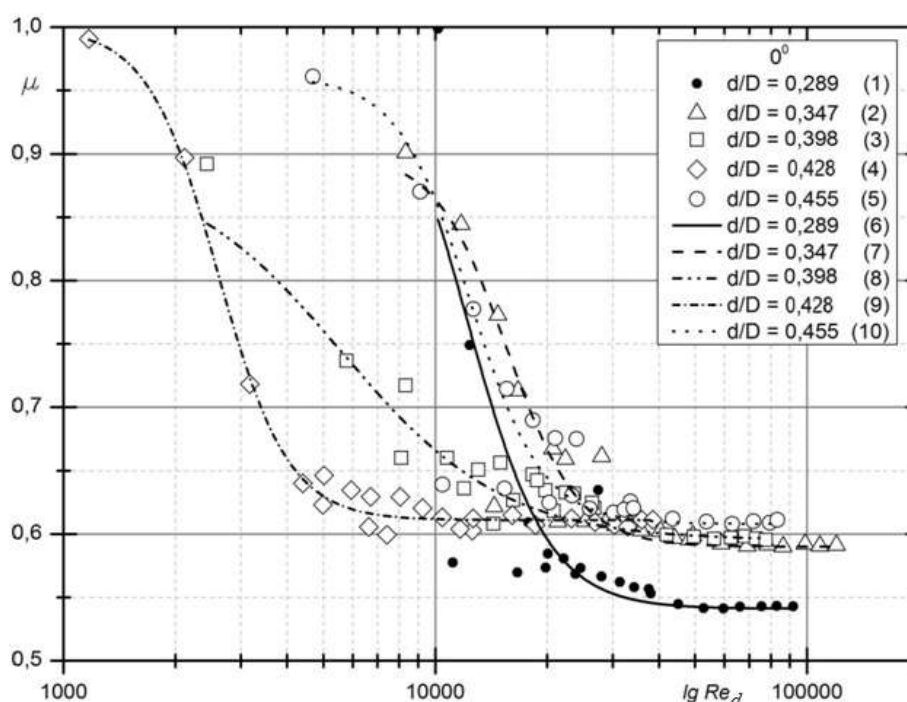


Рис. 4.1. Залежність коефіцієнта витрати $\mu = f(Re_d)$ для кута приєднання струменя $\beta_{ТЗ} = 0^\circ$ при різних значеннях співвідношень d/D : (1, 6) – 0,289; (2, 7) – 0,347; (3, 8) – 0,398; (4, 9) – 0,428; (5, 10) – 0,455 [69]

Для розрахунку притоку рідини крізь вхідну насадку необхідно експериментально визначити коефіцієнт витрати. За результатами дослідів [69, 103] при розрахункових параметрах: внутрішній діаметр ТЗ $D = 11,28 \text{ мм}$, вхідних насадок - $d = 4,83 \text{ мм}$, $d / D = 0.428$ та куті приєднання струменя $\beta_{ТЗ} = 0^\circ$ отримано графіки для визначення коефіцієнта μ .

4.1.2. Критерій Рейнольдса

При надходженні рідини вздовж шляху до напірного ТЗ витрата поступово збільшується. Відповідно при незмінній площі живого перерізу трубопроводу збільшується критерій Рейнольдса. На рис. 4.2 представлено зміну критерію Re вздовж ТЗ.

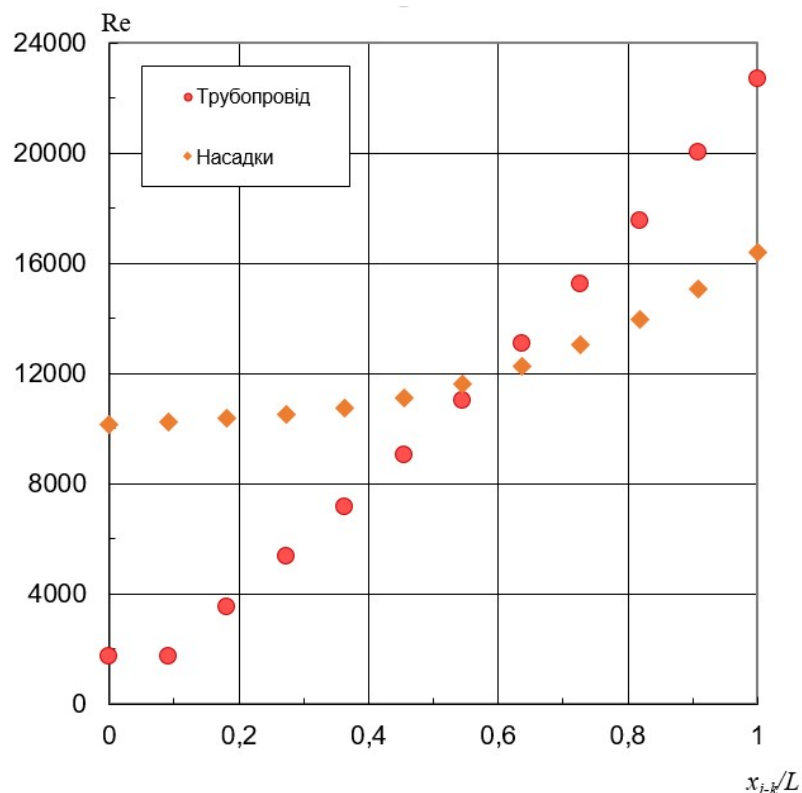


Рис. 4.2. Зміна значень критерію Рейнольдса по довжині ТЗ $Re=f(x_{i-k}/L)$ при $q_k=0.426 \text{ л/с}$ для: 1 – для струменів, які вливаються крізь окремі вхідні насадки, 2 – для потоку в ТЗ

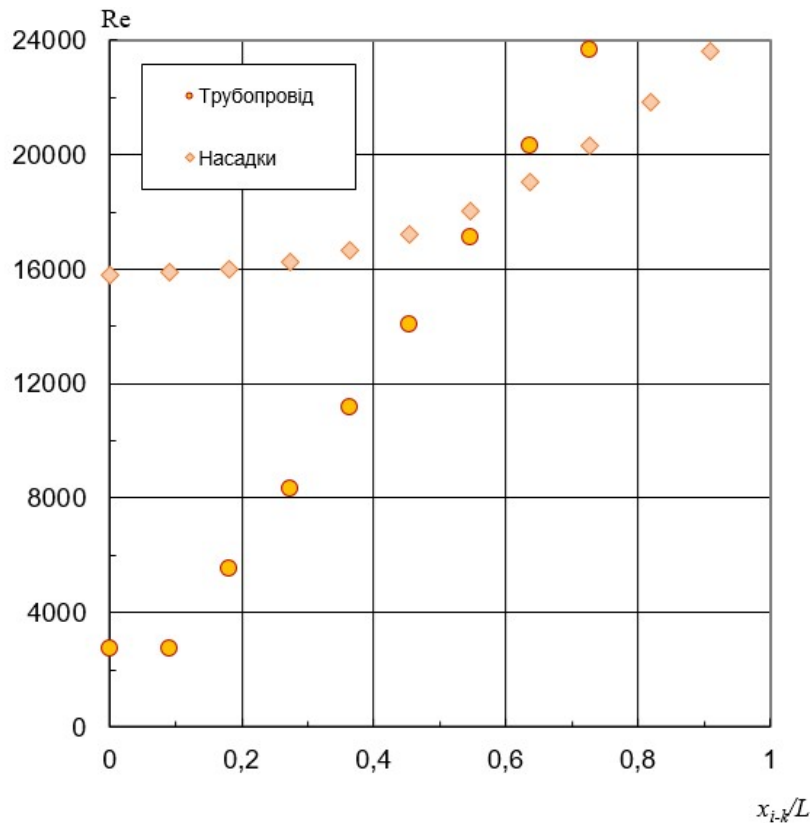


Рис. 4.3. Зміна значень критерію Рейнольдса по довжині ТЗ $Re=f(x_{i-k}/L)$ при $q_k=0,72\text{л/с}$ для: 1 – для струменів, які вливаються крізь окремі входні насадки, 2 – для потоку в ТЗ

Як видно з графіку на початковій ділянці трубопроводу реалізується ламінарний режим руху рідини.

4.1.3. Коефіцієнт гідравлічного тертя

Теоретично обґрунтовано змінність коефіцієнта гідравлічного тертя вздовж трубопроводу збирача та отримано залежності для його розрахунку для кожного з режимів течії. На рис. 4.5 відображено зміну коефіцієнта Дарсі уздовж ТЗ.

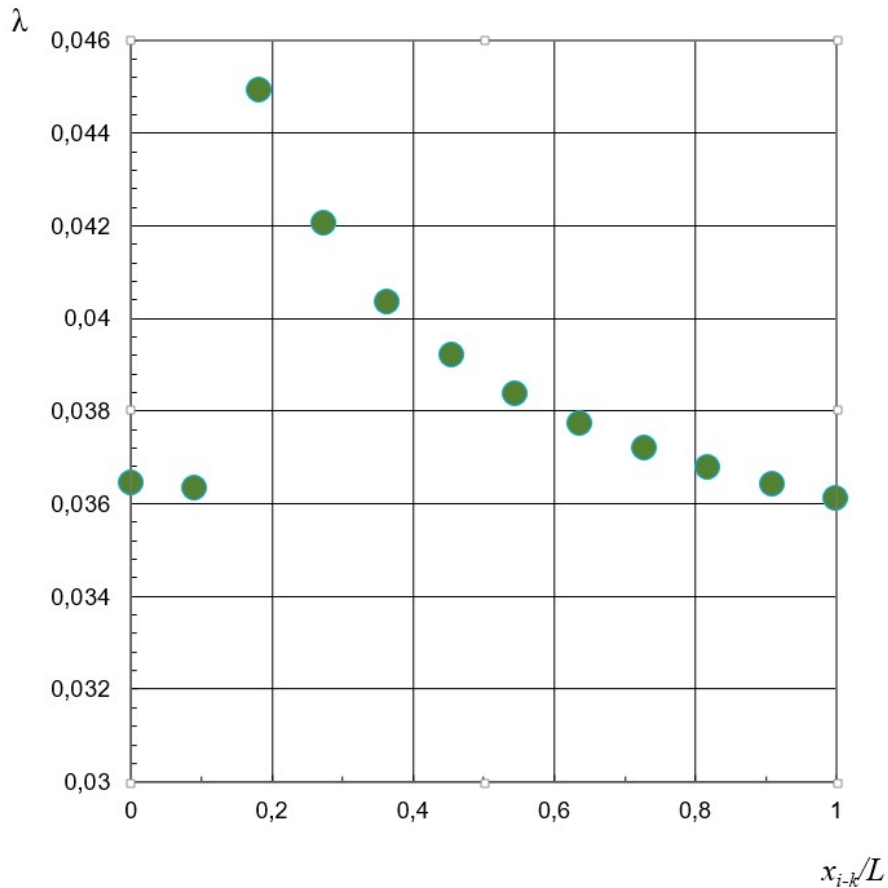


Рис. 4.4. Зміна коефіцієнта гідравлічного тертя по довжині трубопроводу-збирача $\lambda=f(x_{i-k}/L)$ при $q_k=1,02\text{л/с}$

Виходячи з даного графіку, бачимо, що коефіцієнт гідравлічного тертя не є постійним вздовж шляху, тому необхідно враховувати його змінність при розрахунку ГЗ.

4.2. Зміна робочого напору вздовж трубопроводу-збирача

Зміну повного робочого напору вздовж трубопроводу відображено на графіках (рис. 4.4 – рис 4.5) для витрати $q_k=0,0133\text{л/с}$, на якій реалізується ламінарний режим та $q_k=0,0722\text{л/с}$, де спостерігається зміна режимів вздовжтрубопроводу. Окрім того на рис 4.6 проведено порівняння з експериментальним даними В. А. Волощука [53-57] при $q_k=1,02\text{л/с}$ та $d/D=0,216$.

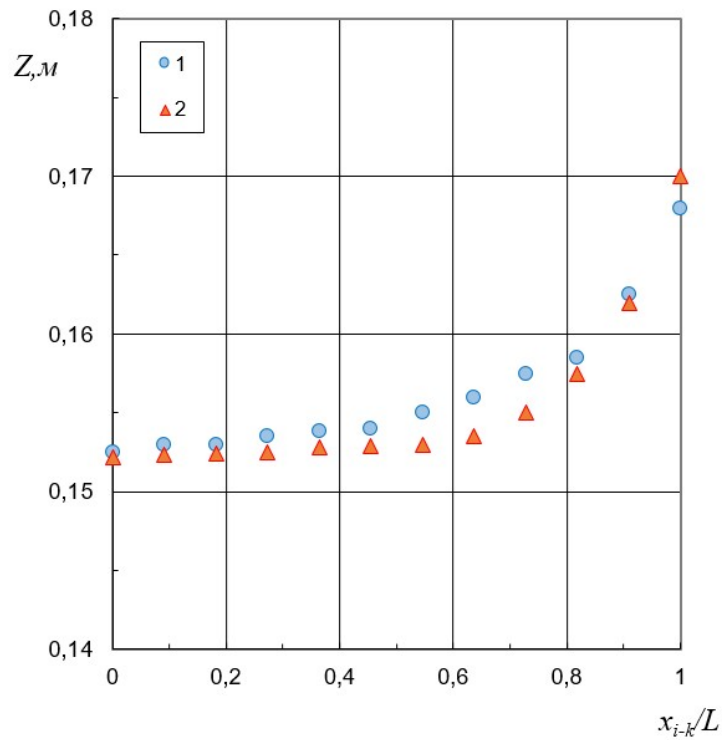


Рис. 4.5. Залежність повного робочого напору від довжини трубопроводу-збирача $Z=f(x_{i-k}/L)$ для ділянки ламінарного режиму течії при $q_k=0,0133\text{л/с}$: 1 – встановлена експериментально, 2 – за теоретичною залежністю (2.58)

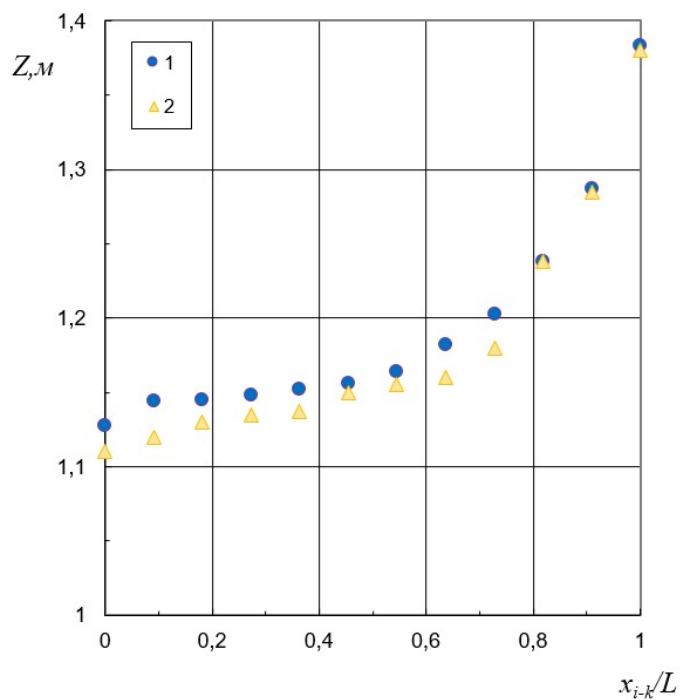


Рис. 4.6. Залежність повного робочого напору від довжини трубопроводу-збирача $Z=f(x_{i-k}/L)$ при $q_k=0,0722\text{л/с}$: 1 – встановлена експериментально, 2 – за теоретичною залежністю (2.58)

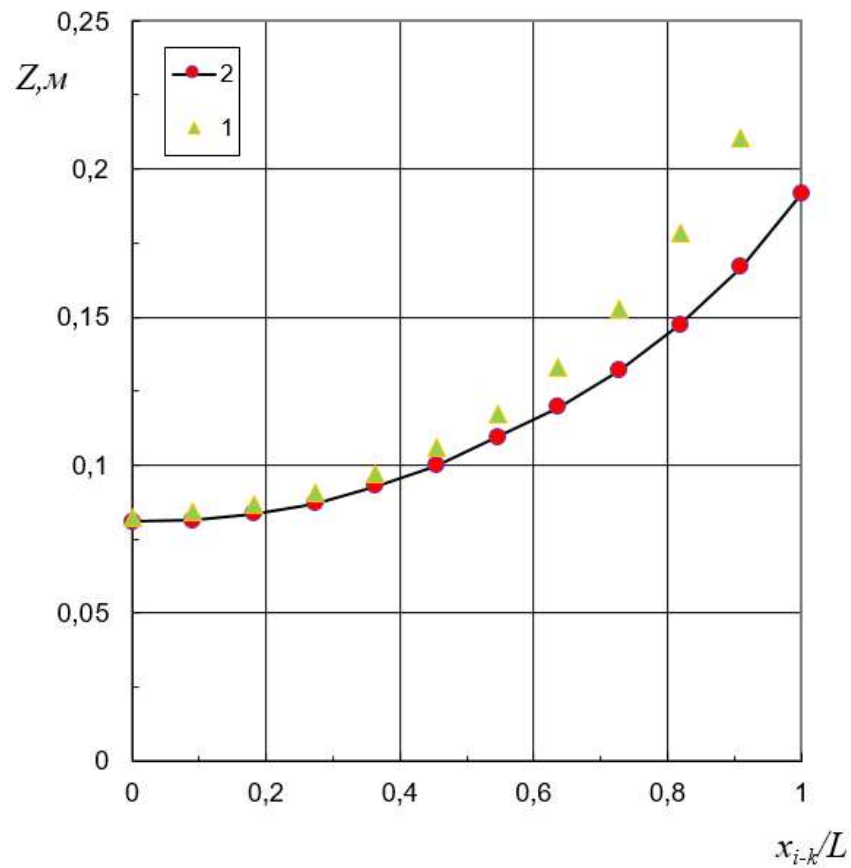


Рис. 4.7. Залежність повного робочого напору від довжини трубопроводу-збирача $Z=f(x_{i-k}/L)$ за даними В. А. Волощука [53] при $q_k=1,02\text{л/с}$ та $d/D=0,216$: 1 – встановлена експериментально [53], 2 – за теоретичною залежністю (2.57)

4.3. Зміна витрати струменів крізь насадки

Витрату води крізь насадки обчислено залежно від напору та коефіцієнта витрати. На рис 4.8 – рис. 4-10 відображено зростання витрати струменів крізь насадки при куті приєднання струменя $\beta_{ТЗ} = 0^\circ$.

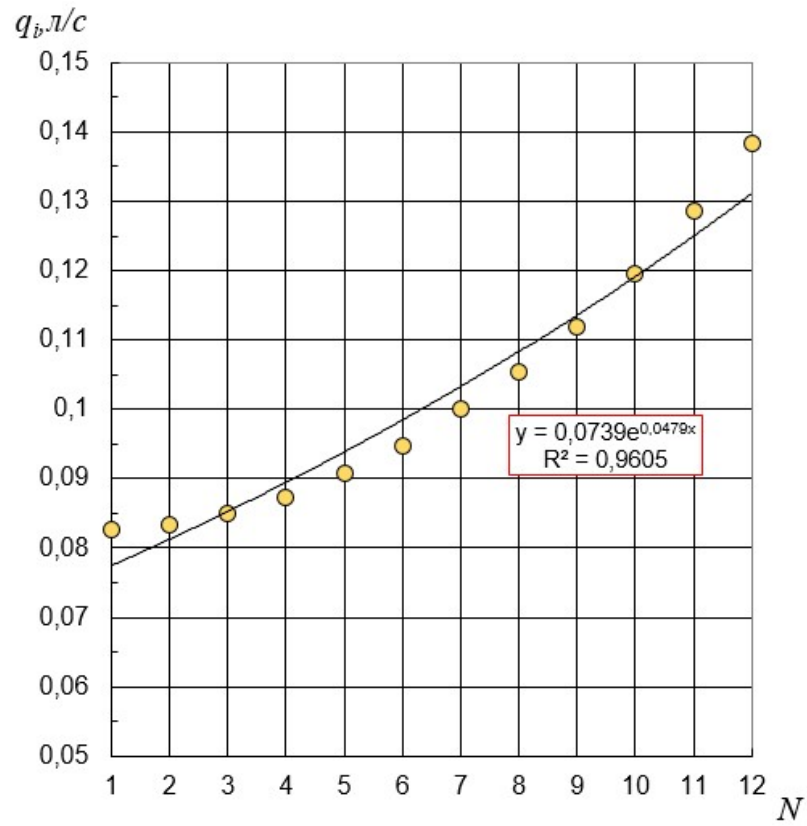


Рис. 4.8. Зростання витрати струменя крізь насадку $q=f(N)$ при $q_k=1,02l/s$

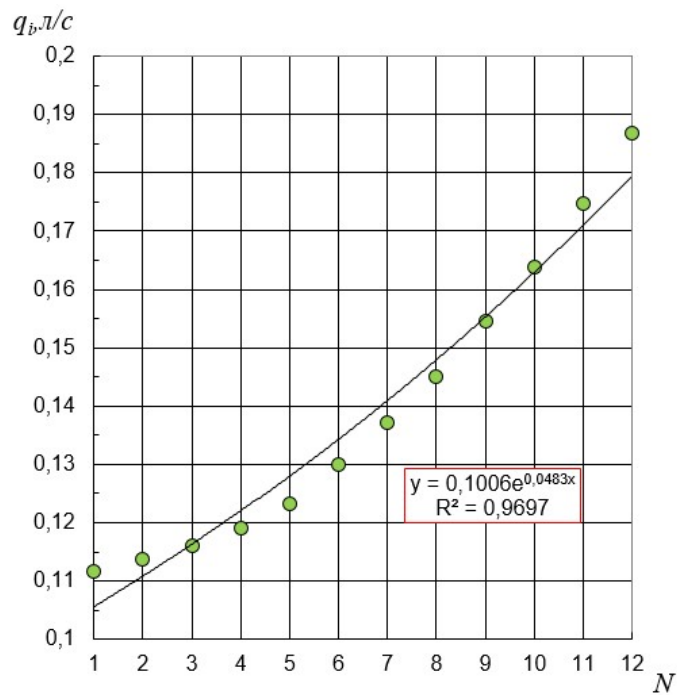


Рис. 4.9. Зростання витрати струменя крізь насадку $q=f(N)$ при $q_k=1,38l/s$

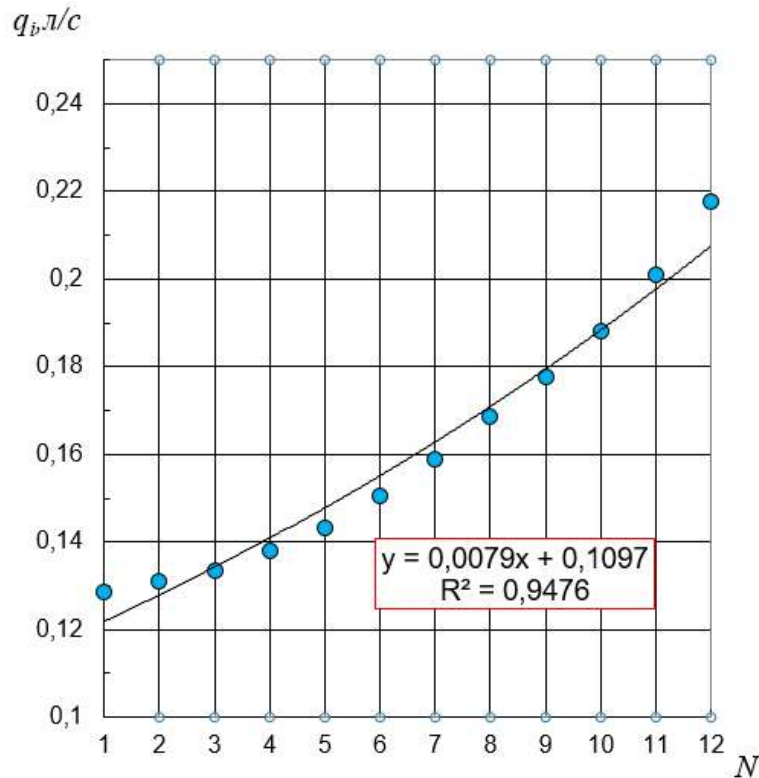


Рис. 4.10. Зростання витрати струменя крізь насадки $q=f(N)$ при $q_{\kappa}=1,59\text{л/с}$

4.4. Зміна витрати потоку уздовж трубопроводу-збирача

За графіками можна чітко прослідкувати, що на ділянці ламінарного режиму течії спостерігається майже повна відповідність результатів експерименту із теоретичними залежностями. Однак зі збільшенням числа Рейнольдса спостерігаються певні розбіжності. Для зменшення невідповідності у залежність (2.57) для визначення повного напору вводиться коефіцієнт κ . Чернюком В. В. [88-89] встановлено, що при збільшенні відстаней l_{hole} між вхідними отворами по напрямку трубопроводу-збирача значення для коефіцієнта κ зростає.

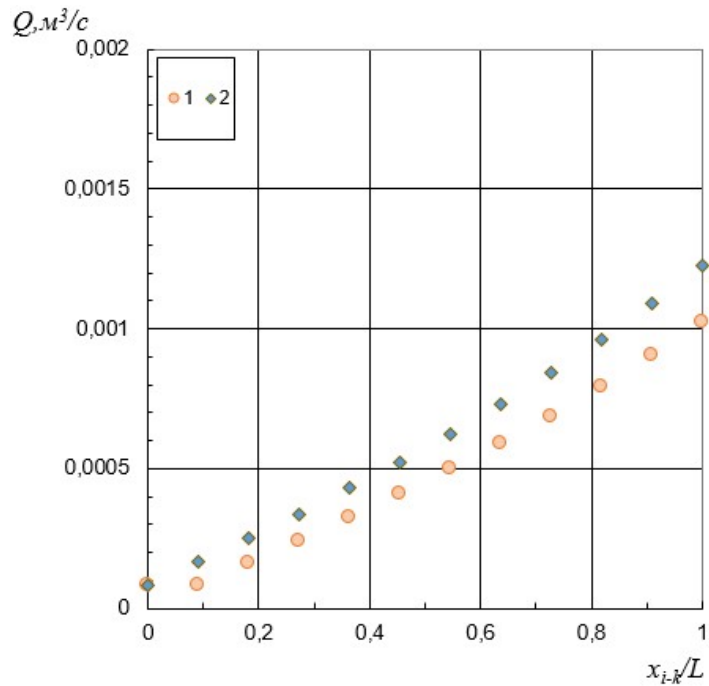


Рис. 4.11. Залежність витрати рідини вздовж трубопроводу-збирача залежно від довжини $Q=f(x_{i-k}/L)$ для $q_k=1,02\text{л/с}$: 1 – встановлена експериментально [53], 2 – за теоретичною залежністю (2.50)

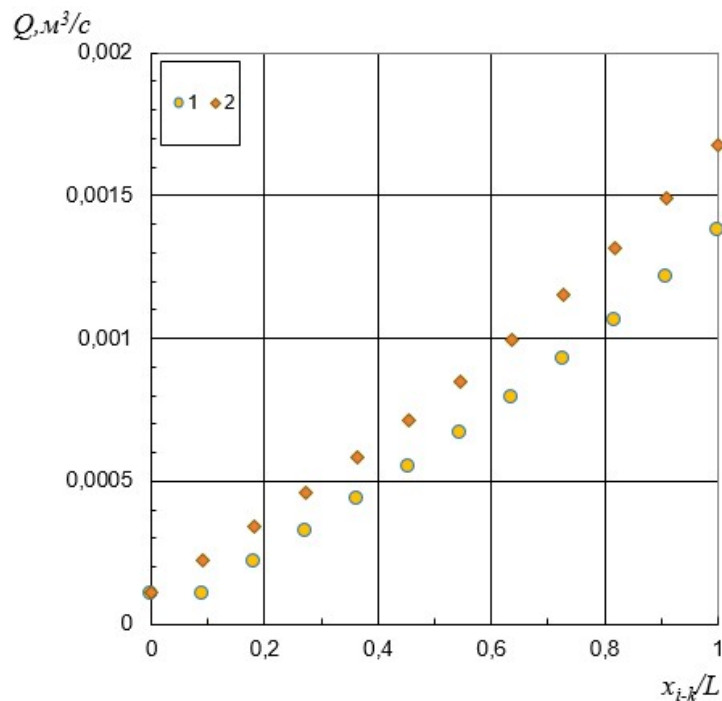


Рис. 4.12. Залежність витрати рідини вздовж трубопроводу-збирача залежно від довжини $Q=f(x_{i-k}/L)$ для $q_k=1,38\text{л/с}$: 1 – встановлена експериментально [53], 2 – за теоретичною залежністю (2.58)

До прикладу, при відносному кроці вхідних насадок $l_{hole}/D = 4.31 \div 12.96$ та при відсутності транзитного потоку ($Q_{tr} = 0$) коефіцієнт $\kappa = 1,65$. Для $l_{hole}/D = 12,95 \div 43.2$ та $Q_{tr} = 0$ коефіцієнта κ є значно вищими. З достовірністю апроксимації $R^2 = 0,9685$ їх можна обрахувати за такою лінійною залежністю (4.1):

$$\kappa = 0.029 \frac{l_{hole}}{D} + 1.2797 \quad (4.1)$$

Для визначення значень коефіцієнта κ було використано результати експериментальних досліджень ТЗ з $D = 11.28$ мм.

4.5. Підсумки розділу 4

Проаналізовано експериментальні дослідження напірних ТЗ. Побудовано графіки для теоретичних залежностей та експериментальних результатів. Встановлено, що на ділянках турбулентного режиму течії виникають певні розбіжності. Для їх зменшення у формулу для повного робочого напору вводиться коефіцієнт κ . За графіком залежності коефіцієнта гідравлічного тертя по довжині трубопроводу доведено, що він є величиною непостійною.

РОЗДІЛ 5. ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Технічні переваги

Використання уточненої методики для розрахунку трубопроводів-збирачів (ТЗ) сприяє забезпеченню зменшення нерівномірності надходження рідини до нього.

Врахування причин і закономірностей впливу транзитного потоку на роздачу води на початковій ділянці трубопроводу-збирача, а також оволодіння теоретичними знаннями для усунення цього явища забезпечує технічну перевагу для проектування ТЗ з використанням отриманих нами експериментальних даних, оскільки гарантує, що вкорочується або повністю усувається розподільна частина у трубопроводі-збирачі.

Виходячи з експериментальних даних можна покращити роботу, наприклад, перфорованих ТЗ у швидких фільтрах на водопровідних очисних станціях, та ін.

Нами зроблено винахід «Спосіб регулювання припливу рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації» (Патент №128075 Україна МПК G05D 7/00, F17D 1/02, F17D 1/08, заявлено 16.05.2022, опубліковано 28.03.2024) [80]. Винахід відноситься до гідромеханіки, а саме, до способів регулювання шляхового притоку рідини в трубопроводі-збирачі. Він може бути застосований, наприклад, у дренажних системах осушення перезволожених ґрунтів, для пониження рівня ґрунтових вод на будівельних майданчиках і на забудованих територіях.

За наявності транзитної витрати рідини на вході у трубопровід-збирач початкова його ділянка працює роздачу, а не збирання рідини. Тобто на початку ТЗ реалізуються умови роботи напірного розподільного трубопроводу (рис. 5.1). Причиною роздачі рідини є те, що тиск усередині ТЗ більший, ніж той, який створює рідина зовні ТЗ.

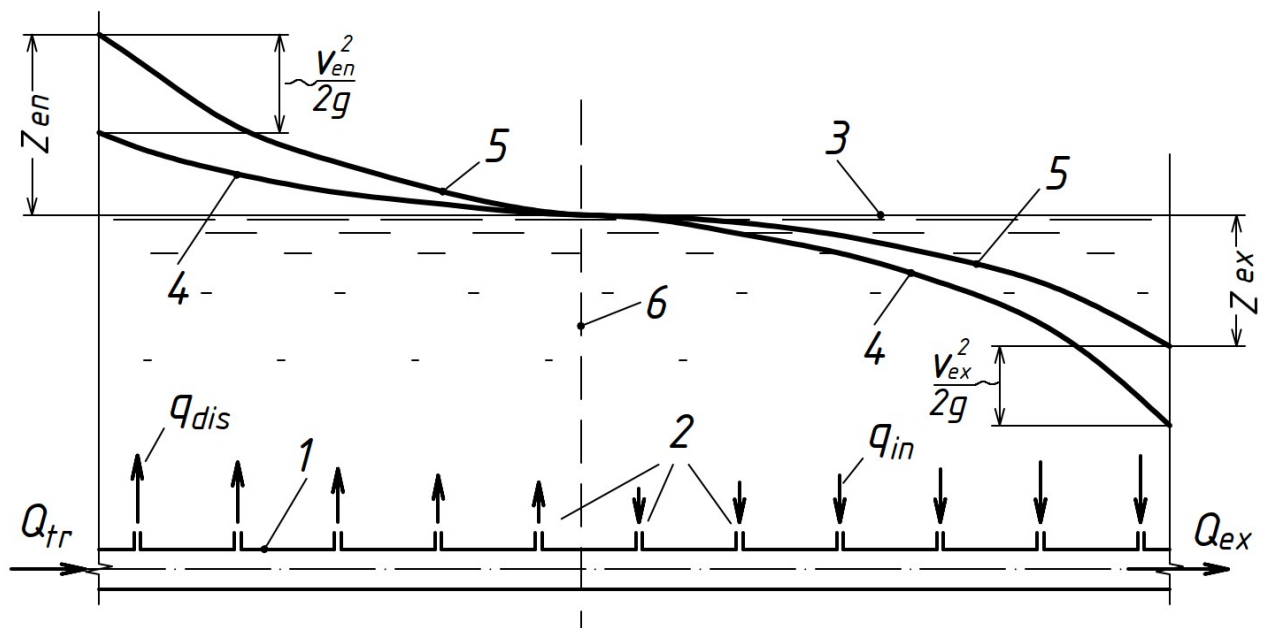


Рис. 5.1. Схема роботи напірного трубопроводу-збирача, за наявності транзитної витрати: 1 – стінка ТЗ; 2 – входні насадки; 3 – рівень рідини, котра розташована зовні ТЗ; 4 – п'єзометрична лінія для потоку, який тече всередині ТЗ; 5 – те саме, лінія повного напору; 6 – межа ділянок роздачі та збирання рідини у ТЗ: Z_{en} – робочий напір на вході у ТЗ; Z_{ex} – те саме, на виході; Q_{tr} – транзитна витрата рідини на вході у ТЗ; Q_{ex} – витрата рідини на виході з ТЗ; q_{distr} – витік рідини з ТЗ крізь одну насадку; q_{in} – притік рідини в ТЗ крізь одну насадку; $v_{en}^2/2g$ – швидкісний напір транзитного потоку на вході у ТЗ; $v_{ex}^2/2g$ – те саме, на виході з трубопроводу-збирача. [80]

Мета нашого винаходу - запобігання роздачі рідини з напірного ТЗ за наявності транзитної витрати рідини на його вході та забезпечення її притоку у ТЗ.

В основу винаходу поставлено задачу створити такий спосіб регулювання притоку рідини в напірний ТЗ, у якому енергію потоку, котрий тече у напірному ТЗ, використовують для локального змінювання геометричних характеристик і гідродинамічних параметрів цього потоку у створах входних насадок. Згідно винаходу у секціях замкненого простору між стінкою ТЗ і внутрішньою локальною еластичною вставкою, розміщених у створах входних насадок, створюють напір більший, ніж у потоці рідини у цьому самому створі.

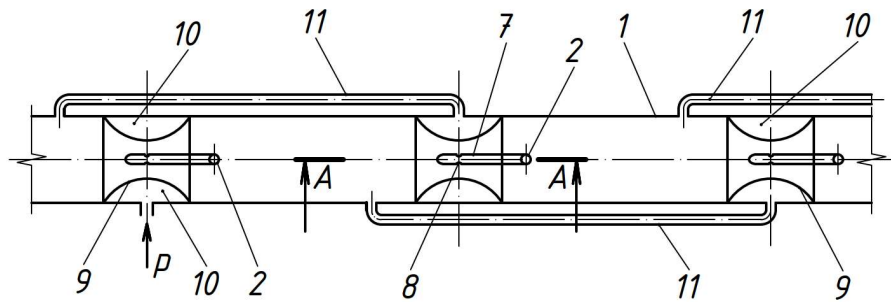


Рис. 5.2. Загальний вигляд фрагменту трубопроводу-збирача: 1 – стінка напірного трубопроводу-збирача; 2 – входні насадки з відвідною трубкою 7; 8 – вихідний отвір перед заглушеним кінцем відвідної трубки 7; 9 – еластична вставка; 10 - замкнений простір між внутрішньою стінкою напірного трубопроводу-збирача та стінкою еластичної вставки 9; 11 – з’єднувальна трубка [80]

Поставлена нами задача вирішена тим, що у винаході “Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації” за наявності транзитної витрати на вході у напірний ТЗ, площу змінного живого перерізу потоку, створюваного у створах входних насадок, регулюють використовуючи тиск, що його має потік перед сусідньою входною насадкою вище по течії. Цей тиск направляють у замкнений простір, утворений між стінками трубопроводу-збирача і внутрішньої локальної еластичної вставки, котру встановлено у створі розглядуваної насадки (рис. 5.2-рис. 5.4).

За наявності транзитної витрати рідини Q_{tr} на вході в напірний ТЗ повний напір потоку рідини у ньому більший, ніж напір рідини, що є зовні ТЗ. За вказаних умов початкова ділянка трубопроводу-збирача працює у режимі напірного розподільного трубопроводу (фіг. 1). Однак, рідина, котра є зовні ТЗ, буде проникати у ТЗ за умови, що напір рідини у ТЗ у створі кожної входної насадки буде меншим, ніж напір у рідині, наявної зовні ТЗ.

Спосіб регулювання притоку рідини в напірний ТЗ полягає в тому, що при наявності транзитної витрати рідини Q_{tr} , змінюють площу живого перерізу потоку у ТЗ у створах входних насадок. Це досягають методом використання тиску рідини, наявного в ТЗ у створі перед попередньою входною насадкою.

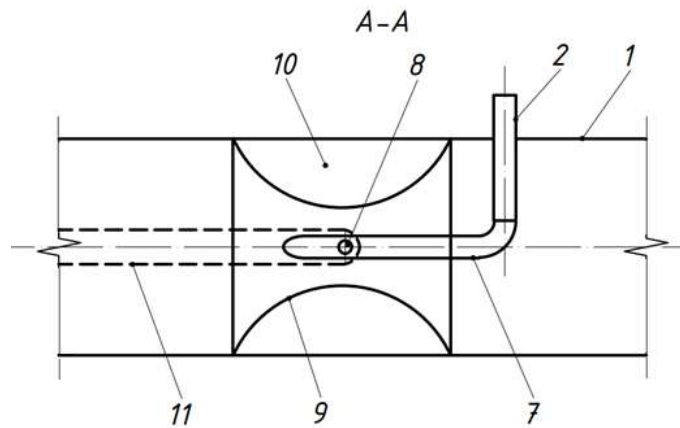


Рис. 5.3. Переріз А-А вузла вхідної насадки з еластичною (читати разом з рис. 5.1 і рис. 5.2) [80]

Напірний трубопровід-збирач містить вхідні насадки 2, закріплені у стінці 1 ТЗ. До вхідної насадки 2 приєднана відвідна трубка 7, яка має вихідні отвори 8 і заглушений торець. У створі вихідних отворів 8 напірний ТЗ оснащений внутрішньою еластичною тороподібною вставкою 9, яка утворює замкнений простір 10 між нею та внутрішньою стінкою ТЗ. Замкнений простір 10 сполучено трубкою 11 з потоком у створі ТЗ перед попередньою вхідною насадкою.

У замкнений простір 10 тороподібною еластичною вставкою 9, розміщеної у створі першої вхідної насадки, подають тиск, більший, ніж у ТЗ. Стінка тороподібною еластичною вставкою 9 під дією сили тиску розтягнеться і відійде від стінки ТЗ у радіальному напрямку до його осі. Площа живого перерізу потоку у створі вхідної насадки зменшиться. Відповідно швидкість потоку зросте. Тоді, згідно з рівнянням Д. Бернуллі, п'єзометричний напір у звуженому перерізі потоку зменшиться. Об'єм замкнутого простору 10 зросте. У результаті тиск потоку у звуженому перерізі ТЗ стане меншим, ніж зовні. Тоді рідина не витискатиметься з ТЗ назовні, а буде всмоктуватись у нього.

Для спрощення експлуатації ТЗ першу від його початку еластичну вставку можна замінити на твердим соплом. Цим буде усунуто необхідність змінювати діаметр першої еластичної вставки. Тоді робота вхідних насадок на наступних ділянках ТЗ регулюватиметься автоматично за рахунок використання енергії транзитного потоку Q_{tr} .

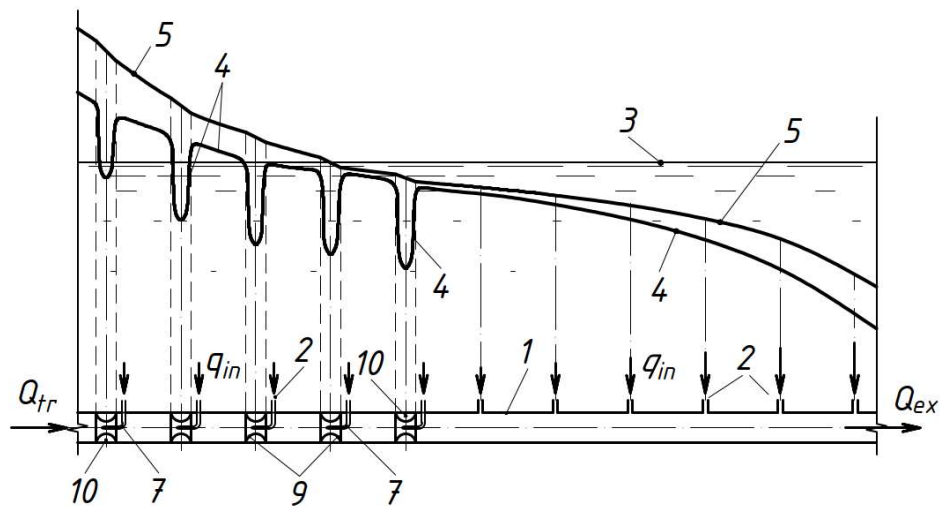


Рис. 5.4. Лінії п'єзометрична та повного напору потоку, що тече у напірному ТЗ з локальними еластичними вставками, за наявності транзитного потоку Q_{tr} на вході у ТЗ (цифрові та умовні позначення див. у підписах до рис. 5.1 і рис. 5.2) [80]

На ділянці потоку між першою та другою вхідними насадками потік затратить частину своєї енергії на подолання гідравлічного опору звуження потоку, у першій вставці, та на подолання гідравлічного тертя у ТЗ на ділянці між першою та другою вхідними насадками. Напір потоку у створі другої вхідної насадки стане меншим, ніж перед першою вхідною насадкою. Ця різниця напорів спричиняє розширення у радіальному напрямку замкненого простору 10 у створі другої вхідної насадки. За таким самим принципом працюють наступні вхідні насадки. ТЗ працюватиме на збирання рідини (див. рис. 5.4). Її роздача припиниться.

Застосування винайденого «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 ТЗ. У цьому полягає технічна й економічна ефективності роботи винайденого ТЗ.

5.2. Економічний ефект

Проведення точних розрахунків притоку рідини у напірний трубопровід-збирач, а також врахування усіх його геометричних параметрів дозволяє уникати похибок при проектуванні та забезпечувати, до прикладу, розрахунок точніших відстаней між дренами осушувальних систем. Це в свою чергу дозволяє скоротити витрати матеріалів і зменшити загальну вартість кошторису, а також дозволяє збільшити урожайність с/г рослини на осушуваній території. Аналогічну методику можна застосувати при проектуванні систем витяжної вентиляції паркінгів та складів.

Спільна робота свердловин та водогону на водозаборі [46] є одним із прикладів практичного застосування методики розрахунку трубопроводу-збирача. При врахуванні усіх параметрів їх роботи можна виконати точний підбір насосних агрегатів, а також досягти суттєвого зменшення їх потужності. Це в свою чергу дозволить скоротити затрати на електроенергію, яка є основою формування ціни на послуги водопостачання. Це очевидно підтверджує економічний ефект дослідження.

Запропонована методика регулювання нерівномірності шляхової витрати полягає у застосуванні насадок з різними кутами входження струменя у трубопровід-збирач. Це дозволяє швидко і ефективно налаштувати трубопровід під конкретні умови роботи без особливих затрат часу та коштів.

5.3. Соціальне значення

Застосування трубопроводів-збирачів у системах опалення та вентиляції передбачає врахування особливостей їх роботи для забезпечення оптимальних характеристик мікроклімату для комфортного проживання людей, а також забезпечення ефективної вентиляції робочих місць при роботі з матеріалами, які виділяють пил, що дозволяє дотримуватись безпечних умов праці.



Рис. 5.5. Система вентиляції житлового будинку (зображення взяте із сайту <https://exsys.com.ua/pryplyvno-vytyazhna-ventyliatsiia-perevahy-ta-osoblyvosti-montazhu>)

Використання ТЗ у сільському господарстві та водозабірних спорудах дозволяє збільшити ефективність використання земель та якість питної води.

5.4. Екологічний ефект

Врахування особливостей роботи трубопроводу-збирача при проектуванні дренажів та відповідних трубопроводів дощових садів дозволяють ефективно відводити надлишок ґрунтових вод та забезпечувати нормальний ріст рослин на ділянках, а також попереджувати руйнування шару ґрунту [84]. Для підвищення ефективності роботи ТЗ для функціонування дощового саду можна також регулювати ступінь випаровування з поверхні за допомогою плівок [59, 60]. Це в свою чергу дозволяє регулювати рівень води, а отже і її напір над трубопроводом-збирачем.

Правильне регулювання надходження стічних вод у збірних трубопроводах біофільтрів дозволяє забезпечити максимальну ефективність очищення, що сприяє значному екологічному ефекту.

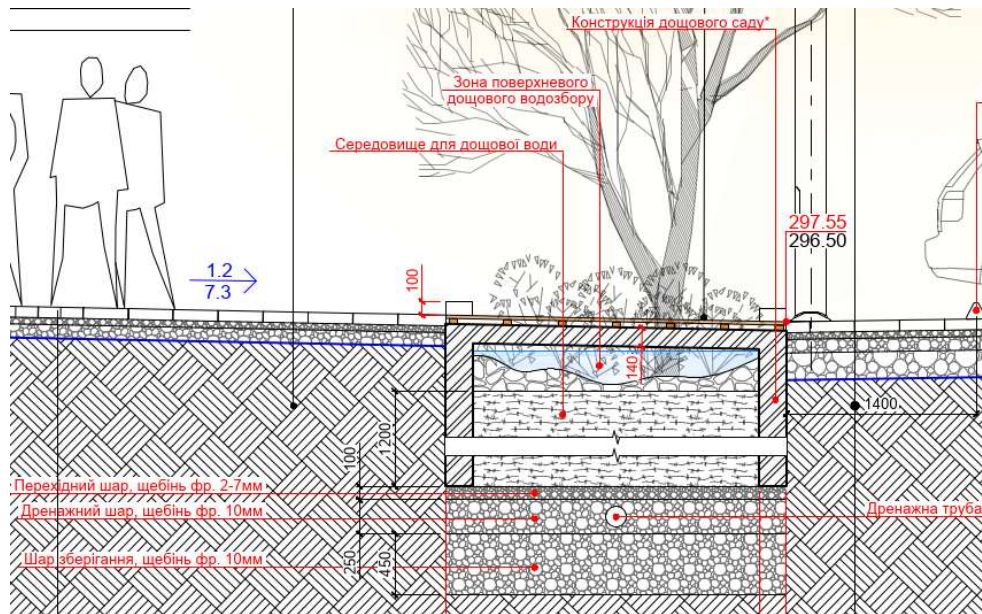


Рис. 5.6. Поперечний розріз дощового саду із закладанням дренажного трубопроводу (перпендикулярно до площини рисунка)

При дослідженні регулювання дощового стоку крізь пористий водопроникний бетон для високоінтенсивних дощів малої тривалості можна застосувати методики регулювання притоку у напірний ТЗ [61]. Шар водопроникного покриття виступає аналогією стінки з отворами. Тобто можна збільшити притік крізь дану поверхню та запобігти підтопленню території під час злив.

5.5. 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 21.12.2023 р. № 3534-IX). Робота нерозривно пов'язана з планами держбюджетної тематики кафедри гідротехніки та водної інженерії Національного університету "Львівська політехніка", що виконується на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0116U006721). Робота під назвою: "Зменшення нерівномірності шляхової витрати напірних потоків в перфорованих трубопроводах".

5.6. Упровадження результатів роботи

Матеріали дисертаційних досліджень передано та впроваджено ТОВ «ТЕО ІНЖИНІРИНГ» (м. Львів) для розрахунку діаметрів та кроку розташування трубопроводів при проектуванні системи дренажу дощових садів для кварталу житлової забудови у м. Пустомити Львівської області, що дозволило скоротити витрату матеріалів при будівництві. (Додаток 1).

Окрім того використання методики розрахунку напірних ТЗ використано та впроваджено в навчальний процес кафедри гідротехніки та водної інженерії для студентів спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології», а саме в лекційних та практичних заняттях з дисципліни «Будівельне водопониження та дренаж». Відповідно до робочої програми впровадження відбулось в таких темах: тема №3 «Способи водопониження. Схеми розташування водопонижувальних пристроїв», тема №11 «Методи підвищення ефективності водопонижувальних систем», практичне заняття №5 «Спільна робота свердловинного насоса і колекторного трубопроводу системи водопониження», що дозволить підвищувати ефективність підготовки фахівців. (Додаток 2).

5.7. Перспективи подальших досліджень

Розв'язати ДРРРЗВ для турбулентного режиму течії, вивчити роботу ТЗ у перехідному та трьох ділянках турбулентного режиму, а також зміною кута нахилу трубопроводу до горизонтальної площини, швидкості потоку, який надходить ззовні, та транзитних витрат основного потоку ТЗ.

5.8. Підсумок розділу 5

Винайдено «Спосіб регулювання припливу рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації» (Патент №128075 Україна МПК G05D 7/00, F17D 1/02, F17D 1/08, заявлено 16.05.2022, опубліковано 28.03.2024).

Проведено аналіз економічної ефективності при застосуванні методики розрахунку ТЗ для дослідження експлуатаційного режиму роботи водогону та

свердловин.

Досліджено застосування полідиметилсилоксанів для зниження випаровування з поверхонь дощових садів та регулювання рівня води над трубопроводом-збирачем, яким є невід'ємним елементом у ньому. Розглянуто можливість регулювання проходження дощового стоку крізь водопроникний бетон та екологічний ефект від цього.

Матеріали дисертаційних досліджень впроваджено в навчальний процес кафедри гідротехніки та водної інженерії, передано ТОВ «ТЕО ІНЖИНІРИНГ» (м. Львів) та впроваджено при проведенні проектних робіт.

ВИСНОВКИ

1. Представлено основні сфери застосування напірних трубопроводів-збирачів. Проаналізовано методики проектування та проблеми їх розрахунку. Вказано актуальність вивчення роботи напірних трубопроводів-збирачів. Визначені мета й задачі дисертаційних досліджень.

2. Для розв'язання диференціального рівняння руху рідини змінної витрати зі шляховим приєднанням маси отримано математичні залежності у диференціальній формі для коефіцієнта гідравлічного тертя та диференціалу втрат напору для ламінарного режиму руху та трьох ділянок гідравлічного опору турбулентного режиму течії.

3. На основі розв'язання диференціального рівняння руху рідини змінної витрати зі шляховим приєднанням маси, яке містить сім змінних величин, при ламінарному режимі руху, отримано розрахункові залежності для обчислення притоку рідини в трубопровід-збирач крізь отвори у його стінках та повного робочого напору потоку у ньому. Отримані розрахункові залежності містять по двоє змінних величин: незалежну змінну відстань x ; повний робочий напір потоку $Z_{(x)}$ у трубопроводі-збирачі.

4. Модернізовано експериментальний стенд для дослідження шляхового притікання рідини у напірний трубопровід-збирач. Цей стенд дозволяє досліджувати притік рідини в ТЗ при напорах зовні нього до 3.5 м.

5. Отримано експериментальні залежності розподілу робочих напорів та притоку води в трубопровід-збирач по його довжині. Результати експериментів підтверджують достовірність виведених розрахункових залежностей для проектування напірних трубопроводів-збирачів.

6. Опіраючись на отримані теоретичні та лабораторні дослідження винайдено «Спосіб регулювання припливу рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації». Запропоновані спосіб і пристрій дозволяють усувати роздачу рідини з напірного трубопроводу-збирача за наявності транзитної витрати у ньому та забезпечують притік у трубопровід-збирач по усій його довжині.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdullah J. Flow Characteristics in Perforated Subsurface Drain of Drainage System Application: Case Study of Gate Fully Open with Longitudinal Slope 1/500 / Abdullah J., Zainol M. R. R. M. A., Yusof M. F., Kasim M. Z. M., Alias M. N., Ayub K. R., & Ab Ghani A. // International Journal of Integrated Engineering. – 2023. – Vol. 15(2). – P. 194-200.
2. Abdullah J. Flow Characteristics in Subsurface Storm Water Perforated Pipe for Drainage System Application / Abdullah J., Zainol M. R. R. M. A., Aziz M. S. A., Yusof M. F., Azizan N. A., Juiani S. F., Ayub K. R. // In International Conference on Innovative Research. – Cham: Springer Nature Switzerland. 2023. – P. 22-30.
3. Afrin T. Parametric study of perforated pipe underdrains surrounded by loose aggregate / Afrin T., Kaye N. B., Khan A. A., Testik F. Y. // Journal of Hydraulic Engineering. – 2016. – Vol. 142(12). – 04016066.
4. Afrin T.. Numerical model for the hydraulic performance of perforated pipe underdrains surrounded by loose aggregate / Afrin T., Kaye N. B., Khan A. A., Testik F. Y. // Journal of Hydraulic Engineering. – 2016. – Vol. 142(8). – 04016018.
5. Amirgaliyev Y. Calculation and Selection of Flat-Plate Solar Collector Geometric Parameters with Thermosiphon Circulation / Amirgaliyev Y., Kunelbayev M., Wójcik W., Amirgaliyev B., Kalizhanova A., Auelbekov O., Kataev N., Kozbakova A. // Journal of Ecological Engineering. – 2018. – Vol. 19. Issue 6. – P. 176-181.
6. Bosak N. Studying the mutual interaction of hydraulic characteristics of water distributing pipelines and their spraying devices in the coolers at energy units / Bosak N., Cherniuk V., Matlai I., Bihun I. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. - № 3/8 (99). – P. 23-29.
7. Chen Y. The MLS-based numerical manifold method for Darcy flow in heterogeneous porous media / Chen Y., Zheng H., Yin B., and Li W. // Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2023. – №148. – P. 220-242.
8. Cherniuk V. V. Influence of the value of jet joining angle on non-uniformity of water inflow into pressure collector-pipeline along the path / V. V. Cherniuk, V. V.

Ivaniv, N. M. Podibka // International scientific-practical conference of young scientists. "BUILD-MASTER-CLASS-2016" – Kyiv. KNUCA. 16-18 November 2016: Conference program and proceedings – Kyiv. – 2016. – S. 161.

9. Cherniuk V. V. Coefficient of Flow Rate of Inlet Cylindrical Nozzles with Lateral Orthogonal Inflow / Cherniuk V. V., Ivaniv V. V., Bihun I. V., Wojtowicz Ja. M. // Proceedings of CEE 2019. Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering. – Springer. Nature Switzerland AG. – 2020. – P. 50-57.

10. Cherniuk V. V. Variability of Darcy Friction Factor in Differential Equation for Enforced Flow in Collector-pipeline / V. V. Cherniuk, V. Ye. Fasuliak, I. V. Bihun, M. V. Cherniuk // Proceedings of CEE 2023. Civil and Environmental Engineering and Architecture. – Springer. Nature Switzerland AG 2023. – P. 58-69

11. Cherniuk V. V. Variability of Darcy Friction Factor in Differential Equation for Enforced Flow in Collector-pipeline / V. V. Cherniuk, V. Ye. Fasuliak, I. V. Bihun, M. V. Cherniuk // Proceedings of the XVIII International Scientific Conference "Rzeszów – Lviv – Košice" Current Issues of Civil and Environmental Engineering and Architecture. – 6-8 September 2023, Rzeszów (Poland). – P. 16.

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

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

14. Claudio D. Icondotti emyngenti da un serbatoio. Atti e men. Accad. patav. sci lettere ed arti. Parte 2. – S (1961-1962).

15. Clemo T. Flow in Perforated Pipes / Clemo T. // A Comparison of Models and Experiments. SPE Production and Operations. – 2006. – Vol. 21 (02). – P. 302–311.

16. Commenge J.-M. Optimal design for flow uniformity in microchannel reactors / Commenge J.-M., Falk L., Corriou J.-P., Matlosz M. // Optimal design for flow uniformity in microchannel reactors. *AIChE J.* – 2002. – Vol. 48. – P. 345-358.
17. Ekkad S. V. Recent advancements in single-phase liquid-based heat transfer in microchannels / Ekkad S. V., Singh P. // *Advances in Heat Transfer*. 2023. Vol. 55. P. 239–293.
18. Ghorbani K. The effect of pipe collectors in reducing the drainage coefficient rate / Ghorbani K., Wayayok A., Abbaszadeh M., Fikri A. // *Water Science and Technology: Water Supply*. – 2015. – Vol. 15(4), – P. 675-682.
19. Huang C. H. The study on the improvement of system uniformity flow rate for U-type compact heat exchangers / Huang C. H., Wang C. H. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013. – Vol. 63. – P. 1-8.
20. Ivaniv Vasyl. Influence of Jet-to-main stream Turning Angle in Fluid Flow from Cylindrical Nozzle of Collector-pipeline on Flow Coefficient / Ivaniv Vasyl, Cherniuk Volodymyr // *Book of abstracts // XVth International Scientific Conference “Current Issues of Civil and Environmental Engineering and Architecture, Rzeszów-Lviv-Košice. CD-DISC. 9-10 September 2015, Rzeszów, Poland – S. 114-115.*
21. Ivaniv Vasyl. Influence of Jet-to-main stream Turning Angle in Fluid Flow from Cylindrical Nozzle of Collector-pipeline on Flow Coefficient / Ivaniv Vasyl, Cherniuk Volodymyr // *XVth International Scientific Conference “Current Issues of Civil and Environmental Engineering and Architecture, Rzeszów-Lviv-Košice. Book of Abstracts. 9-10 September 2015, Rzeszów, Poland.*
22. Ivaniv V. Non-uniformity of Water Inflow into Pressure Collector-pipeline Depending on the Values of Reynolds Criterion and of Inflow Jets Angles / Ivaniv V., Cherniuk V., Kochkodan V. // *Proceedings of EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer Nature Switzerland AG 2021. – 2020. – P. 142-149.*
23. Józwiakowski K. The Influence of Household Wastewater Treatment Plants with Drainage System on the Quality of Groundwater in the Lublin Province, Poland / Józwiakowski K., Marzec M., Listosz A., Gizińska-Górna M., Micek A.,

Pytka A., Pochwatka P., Rybczyńska-Tkaczyk K. // Journal of Ecological Engineering. – 2021. – Volume 22. Issue 3. – P. 18-39.

24. Kale R. V. Optimal design of pressurized irrigation subunit / Kale R. V., Singh R. P., Mahar P. S. // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2008. – Vol. 134(2). – P. 137-146.

25. Kim B. Numerical Study on Novel Design for Compact Parallel-Flow Heat Exchanger with Manifolds to Improve Flow Characteristics / Kim B. Kim K., Kim S. // Energies. 2020. Vol. 13(23). 13 pages. URL: doi:10.3390/en13236330.

26. Kravchuk A.. Assessing the value of the hydraulic friction factor in pipelines working with a flow connection along the path / Kravchuk A., Cherniuk V., Kravchuk O., Airapetian T. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 5. No. 7 (119). P. 61-67.

27. Liu H. Analytical equation for outflow along the flow in a perforated fluid distribution pipe / Li H., Zong Q., Lv H., Jin J. // PloS one. 2017. Vol. 12(10). e0185842.

28. Moldovanu D. Flow studies on increasing the efficiency of the inlet manifold / Moldovanu D., Csato A., Bagameri N. // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 568/ No. 1. P. 012050.

29. Murphy P. Hydraulic Performance of Aggregate Beds with Perforated Pipe Underdrains Flowing Full / Murphy P., Kaye N. B., Khan A. A. // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2014. Vol. 140. Issue 8.

30. Nathanson J. A. Basic Environmental Technology: Water Supply, Waste Disposal, and Pollution Control // Encyclopedia Britannica, Inc. 2023. URL: <https://www.britannica.com/technology/water-supply-system/Coagulation-and-flocculation>

31. Operacz A. Untypical Draining Barriers Efficiency as a Method of Pollutants Limiting in the Groundwater Reservoir / Operacz A., Kurek K., Młyński D., Bugajski P. // Journal of Ecological Engineering. 2019. Vol. 20. Issue 3. P. 67-76.

32. Ren X. Experimental and modeling evaluation of siphon-type subsurface drainage performance in flooding and waterlogging removal / Ren X., Wang S., Yang P., Tao Y. // *Agricultural Water Management*. 2023. Vol. 275.
33. Tong J. C. K. Attainment of Flowrate Uniformity in the Channels That Link a Distribution Manifold to a Collection Manifold. / Tong J. C. K., Sparrow E. M., Abraham J. P. // *ASME. J. Fluids Eng.* September 2007. Vol. 129(9). P. 1186–1192.
34. Vasyl Ivaniv. Influence of Jet-To-Main Stream Turning Angle in Fluid Flow from Cylindrical Nozzle of Collector-Pipeline on Flow Coefficient / Ivaniv Vasyl, Cherniuk Volodymyr // *Czasopismo Inżynierii lądowej, środowiska i architektury. Journal of civil engineering, environment and architecture* (p-ISSN 2300-5130), (e-ISSN 2300-8903). JCEEA, tom XXXIII, z. 63 (4/2016), październik-grudzień 2016. – S. 229-238.
35. 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)
36. Voutchkov N. Overview of Desalination Plant Intake Alternatives / URL: DOI:10.13140/RG.2.1.3128.8726. Apr. 26, 2016. 17 p.
37. Wang X. Theoretical and experimental study of external water pressure on tunnel lining in controlled drainage under high water level / Wang X., Tan Zh., Wang M., Zhang M., Ming H. // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2008. Vol. 23. Issue 5. P. 552-560.
38. Wang Y. An Improved numerical manifold method model for groundwater flow problems / Wang Y., Zhou L., Feng D. // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2021. Vol. 125, P. 218-232.
39. Wang Y. Simulation of local head loss of drip-irrigation tape with integrated in-line emitters as a function of cross section / Wang Y., Ju X., Zhu S., Li M. // *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2020. Vol. 18(4). e0210-e0210.

40. Xiao J. Numerical analysis of flow distribution characteristics in large central-type heat exchangers / Xiao J., Sun Zh., Gao L., Chen X., Bian H. // Journal of Harbin Engineering University. 2023. Vol. 44(7). P. 1181–1187
41. Zhou F. Optimization of radial drainage design for Water-Rich tunnel in sandy dolomite stratum considering pressure relief effect / Zhou F., Li J., Jiang Y., Qi Y., Zhang H., Zhou P., Wang Zh., Chen Sh. // Structures. 2023. Vol. 53. Pages 861-881.
42. Zhou J. Improving the flow distribution in a Z-type heat exchanger having optimized tube structure / Zhou J., Ding M., Bian H., Zhang Y., Sun Z. // In The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE) 2019. Vol. 27. P. 1509.
43. Zhuk V. Dependency Between the Total and Effective Imperviousness for Residential Quarters of the Lviv City / Zhuk V., Vovk L., Matlai I., Popadiuk I., Mysak I., Fasuliak V. // Journal of Ecological Engineering. – 2020. – 21(5). – P.56-62.
44. Zoljalali M. A. Study of the flow distribution in parallel micro-channels with a triangular manifold. / Zoljalali M. A., Omidbakhsh A. E. // J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 2020. Vol. 42. P. 46.
45. Большаков В. А. Справочник по гидравлике / В. А. Большаков, Ю. М. Константинов, В. Н. Попов и др. // Под ред. В. А. Большакова. – К.: Вища шк. – 1984. – 343 с.
46. Босак М. П. Дослідження експлуатаційного режиму свердловин водозабору та водогону./ Босак М. П., Одуха М. С., Гвоздецький О. Г., Фасуляк В. Є. // Науковий вісник НЛТУ України, – 2019. - 29(9), – С. 126-131.
47. 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. – Науч.-техн. сб. – Вып. 17. – К.: Техника. – 1973. – С. 19-24.
48. Василенко А. А. Гидравлический расчет перфорированных сборных трубопроводов произвольной длины. / А. А. Василенко, А. М. Кравчук // Гидравлика и гидромеханика. – 1986. – Вып. 43. – С. 70-73.

49. Василенко А. А. Исследование движения жидкости в трубопроводах с присоединением расхода вдоль пути. / А. А. Василенко // Гидравлика и гидромеханика. – 1970. – Вып. 10. – С. 41-48.
50. Василенко А. А. К гидравлическому расчету сборных трубопроводов малой длины. / А. А. Василенко // Гидравлика и гидромеханика. – 1980 – Вып. 16. – С. 28-32.
51. Василенко А. А. К гидравлическому расчету трубопроводов для сбора жидкости вдоль пути. / А. А. Василенко // Гидравлика и гидромеханика. – 1973 – Вып. 16. – С. 28-32.
52. Василенко А. А. Уравнение движения жидкости в дырчатых трубопроводах с учетом закона присоединения расхода. / А. А. Василенко // Гидравлика и гидромеханика. – 1973. – Вып. 16. – С. 21-28.
53. Волощук В. А. Гідравлічні опори в трубопроводах з дискретним зростанням витрат. / В. А. Волощук // Водне господарство України. – Київ. Держводгосп України. – 2000. – № 5, 6.
54. Волощук В. А. Дослідження гідравлічних опорів в трубопроводах з дискретно–зростаючими витратами. / В. А. Волощук // Вісник Рівненського державного технічного університету. Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Збірник наукових праць. – Рівне. – 1999. – спецвипуск. – С. 101-105.
55. Волощук В. А. Дослідження гідравлічних опорів і гідравлічні розрахунки трубопроводів з дискретно змінними витратами уздовж потоку: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.16 “Гідравліка та інженерна гідрологія” / В. А. Волощук // – Рівне: Рівненськ. держ. техн. ун-т. – 2001. – 20 с.
56. Волощук В. А. Дослідження гідравлічних опорів і гідравлічні розрахунки трубопроводів з дискретно змінними витратами уздовж потоку: дис. канд. техн. наук: 05.23.16 / В. А. Волощук// – Рівне: Рівненськ. держ. техн. ун-т. – 2001. – 217 с.
57. Волощук В. А. Пропускная способность насадков и отверстий при

наличии транзитных скоростей. / В. А. Волощук // Проблемы мелиорации и водного хозяйства на современном этапе. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию высшего мелиоративного образования в республике Беларусь. – Горки. – 1999. – ч.2. – С. 146-149.

58. Егоров А. И. Гидравлика напорных трубчатых систем в водопроводных очистных сооружениях / Егоров А. И. // – Москва: Стройиздат. – 1984. – 95 с.

59. Жук В. М. Використання полідиметилсилоксанів для зниження випаровування із водної поверхні / Жук В.М., Гриців О.Б., Регуш А.Я., Фасуляк В.Є. // “Ресурси природних вод карпатського регіону” Матеріали ХХ міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів 26-27 травня 2022 р): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2022. - С. 90-92.

60. Жук В. М. Екологічні аспекти використання полідиметилсилоксанів для зниження VI випаровування із водної поверхні / В. М. Жук, А. Я. Регуш, О. Б. Гриців, В. Є. Фасуляк.// «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції (м. Дубляни 8-9 червня 2023 р.): Збірник тез доповідей. – Дубляни: ЛНУП, 2023. - С. 79-81.

61. Жук В. М. Експериментальне дослідження стоку з водопроникного бетонного покриття для високоінтенсивних дощів малої тривалості./ Жук В. М., Качмар І. З., Фасуляк В. Є. // Науковий вісник НЛТУ України, – 2019. – 29(9), – С. 132-135.

62. Зубченко О. М. Дослідження зневоднення рідин у сильному електричному полі. / Зубченко О. М., Жук А. П., Павлюк Л. І., Коваль О. Д. // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2011. – Вип. № 6. – С. 47-51.

63. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик // Под ред. М. О. Штейнберга. – М.: Машиностроение. – 1992. – 672 с.

64. Іванів В. В. Вплив кута приєднання струменів на нерівномірність притоку до напірного трубопроводу–збирача залежно від критерію Рейнольдса. / В. В. Іванів // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – Вип. № 63. – С. 286-292.

65. Іванів В. В. Вплив кута відведення струменів з циліндричної насадки у потік у трубопровод–збирач на коефіцієнт її витрати. / В. В. Іванів // XVI Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП "Промислова гідравліка і пневматика". Суми. 14-16 жовтня 2015 р. Матеріали конференції. – Вінниця: ГЛОБУС–ПРЕС. – 2015. – С. 184.

66. Іванів В.В. Застосування та методи гідравлічного розрахунку напірних трубопроводів-збирачів / Іванів В.В., Бігун І. В. // 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.

67. Коновалов И. М. Движение жидкости с переменным расходом / И. М. Коновалов // Труды Ленинградского института инженеров водного транспорта. – 1937. – Вып. 8. – С. 47 - 53.

68. Константинов Ю. М. К расчету дырчатых труб с присоединением расхода вдоль пути / Ю. М. Константинов, В. В Смыслов // Гидравлика и гидротехника: Научно-технический сборник. 1966. Выпуск 4. Киев: Тэхника. С. 118-127.

69. Константинов Ю. М. Гідравліка. Київ: Вища ,1988. 398 с.

70. Кравчук А. 2020. Проектування трубопроводів для рівномірного збору води вздовж шляху / Кравчук А., Кочетов Г., Кравчук О. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. Науково-технічний збірник. 2020. Випуск 33. Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури. С. 34-40.

71. Кравчук А. М. Определение коэффициента присоединяемой массы в перфорированных сборных трубопроводах / А. М. Кравчук // Гидравлика и

гидротехника: Научно-технический сборник. 1988. Выпуск 46. Киев: Техника. С. 7-9.

72. Кравчук А.М., Чернишев Д.О., Кравчук О.А. Гідравліка напірних перфорованих трубопроводів очисних споруд систем водопостачання та водовідведення: монографія. Київ: КНУБА, 2021. 203 с.

73. Мещерский И. В. Динамика точки переменной массы. / И. В. Мещерский // Петербург – 1897. – 160 с.

74. Мещерский И. В. Уравнения движения точки переменной массы в общем случае. / И. В. Мещерский // «Изв. Санктпетерб. политехн. ин-та» Изд-во политехн. ин-та. СПб. – 1904. – 159 с.

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

76. Науменко І. І. Гідравлічні розрахунки дренажних трубопроводів. / І. І. Науменко, В. А. Волощук // Водне господарство України. – 1997. спецвипуск. – С. 40-42.

77. Пат. 21829 Україна МКВ G 05D 7/00. Спосіб регулювання витрати рідини в трубопроводі та регулятор витрати / В. В. Чернюк, В. М. Жук (Україна) // Держ. ун-т “Львівська політехніка”. – № 96073053. – заяв. 30.07.96. – опубл. 30.04.98. – Бюл. № 2.

78. Патент № 23462 Україна, МПК E02B 9/06 Напірний колектор / М. Д. Швець, Ю П. Рогалевич, Р. М. Кравчук //– № 96124941. – заявл. 02.06.1998. – опубл. 31.08.1998. – Бюл. № 4.

79. Патент № 58655 Україна, МПК E02B 9/06, F04F5/12 Напірний колектор / Р. А. Захарчук, Ю П. Рогалевич // – № 2002010033. – заявл. 17.04.2006. – опубл.17.04.2006. – Бюл. №4.

80. Патент №128075 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”. – № a202201571. – заяв. 16.05.2022. – опубл. 28.03.2024. – Бюл. № 13.

81. Петров Г. А. Гидравлика переменной массы (Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути) – Харьков: ХГУ. – 1964. – 224 с.
82. Разумов Г. А. Проектирование и строительство горизонтальных водозаборов и дренажей / Разумов Г. А. // – Москва: Стройиздат. – 1988. – 241 с.
83. Смыслов В. В. К расчету сборных трубопроводов / В. В Смыслов // Гидравлика и гидротехника: Научно-технический сборник. 1980. Выпуск 30. Киев: Техника. С. 60–65.
84. Фасуляк В.Є. Дощові сади як елемент сталого управління водними ресурсами в населених пунктах / Фасуляк В.Є., Жук В.М., Регуш А.Я., Гриців О.Б., Регуш В. А. // Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference “Problems of creating scientific ideas about world development” – 3-6 October 2023) Ottawa (Canada) – International Science Group. – P. 16-17.
85. Хлапук М. М. Гідравлічні дослідження донного водоскиду з автоматичним регулюванням витрати. / М. М. Хлапук, О. В. Безусьак, С. С. Стельмах, О. В. Дупляк // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Збірник наукових праць. – Рівне. – 2007.– Вип.4 (40) ч 2.
86. Чернюк В. В. Вплив кута приєднання вхідного струменя на нерівномірність роботи напірного трубопроводу-збирача. / В. В. Чернюк, В. В. Іванів // XXI міжнародна науково-технічна конференція " Гідроаеромеханіка в інженерній практиці" – Київ, 24-27 травня 2016 р.: Матеріали конференції – Київ. – 2016. – С.46-47.
87. Чернюк В. В. Регулювання інтегральних параметрів напірних потоків рідин гідродинамічно активними додатками : Дис. д-ра наук: 05.23.16 / В. В. Чернюк // К. – 2010.
88. Чернюк В. В. Вплив значень кутів приєднання струменів на нерівномірність притоку до трубопроводу-збирача / В. В. Чернюк, В. В. Іванів // Ресурси природних вод Карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали П'ятнадцятої міжнародної науково-

практичної конференції (м. Львів, 26-27 травня, 2016р.): збірник наукових статей – Львів: Національний університет «Львівська політехніка» – 2016. – С. 230-233.

89. Чернюк В. В. Вплив транзитної витрати води на роздачу та притік крізь насадки в напірному трубопроводі / В. В. Чернюк, В. В. Іванів // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. – Львів: НУ “Львівська політехніка”. – 2016. – № 844. – С. 216-227.

90. Чернюк В. В. Гідравлічний розрахунок трубчастих водозабірних оголовків з бічними водоприймальними вікнами / В. В. Чернюк, М. П. Босак, О. Г. Гвоздецький // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. – Львів: НУ ЛП. – 2012. – № 737. – С. 213-225.

91. Андрияшев М.М. Гидравлические расчеты оборудования водоводов. Москва: Стройиздат. 1979. 104 с.

92. Чернюк В. В. Диференціальне рівняння руху рідини зі змінною масою з урахуванням реакції на зміну витрати / В. В. Чернюк // Вісн. Укр. держ. ун-ту водн. госп. та природокорист. – Вип. 5(18). – Рівне: УДУВГП. – 2002. – С. 196-201.

93. Чернюк В. В. Регулювання витрат середовищ у трубопроводах дією на потік / В. В. Чернюк // Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка". Проблеми економії енергії. – Львів: ДУ ЛП. – № 2. – 1999. – С. 180-185.

94. Чернюк В. В. Рівняння руху рідини змінної маси для циліндричних трубопроводів / В. В. Чернюк // Промислова гідравліка і пневматика. – 2003. – № 1 – С. 25-28.

95. Чернюк В. В. Способи регулювання витрат середовищ у трубопровідних системах / В. В. Чернюк // Праці Польсько-українського н.-т. симпозіуму “Виклик комунальним системам водопровідно-каналізаційного господарства на порозі XXI віку”. – Rzeszów (Poland): Politechnika Rzeszowska. – 1999. – S. 133-139.

96. Чернюк В. В. Способи регулювання витрат середовищ у трубопровідних системах / В. В. Чернюк // Праці Польсько-українського н.-т. симпозіуму “Виклик комунальним системам водопровідно-каналізаційного

господарства на порозі XXI віку”. – Rzeszów (Poland): Politechnika Rzeszowska. – 1999. – S. 133-139.

97. Чернюк В. В. Стенд для дослідження притоку в напірний трубопровід-збирач, прокладений у потоці рідини / В. В. Чернюк, В. В. Іванів // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. Робоча програма та тези доповіді. Друга міжнародна науково-практична конференція " Водокористування: технології; споруди; Менеджмент" м. Київ. КНУБ. 02-04.11.2015 – К.: Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури. – 2015. – С. 19.

98. Чернюк В. В. Змінність коефіцієнта тертя у диференціальному рівнянні для напірних потоків рідин у трубопроводах-збирачах. / В. В. Чернюк, В. Є. Фасуляк, І. В. Бігун, М. В. Чернюк // “Ресурси природних вод карпатського регіону” / Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 25-26 травня 2023 р.): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2023. - С. 80-85.

99. Чернюк В. В. Урахування змінності коефіцієнта тертя у диференціальному рівнянні для напірних трубопроводів-збирачів / В. В. Чернюк, В. Є. Фасуляк, І. В. Бігун, М. П. Кулик // Збірник матеріалів V Міжнародної науково-технічної конференції “Водопостачання і водовідведення, проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг”. – 18-20 жовтня 2023 року, м. Львів, Національний Університет “Львівська Політехніка”. – С. 26-27.

100. 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.

101. Чугаев Р. Р. Гидравлика: Учебник / Р. Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

ДОДАТКИ



ЗАТВЕРДЖУЮ
 проректор з науково-педагогічної роботи
 Національного університету «Львівська політехніка»
 доц. Олег ДАВИДЧАК
 «21» _____ 2024р.

АКТ

**про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
 Фасуляка Вадима Євгенійовича на тему «Гідравлічні розрахунки напірних
 трубопроводів-збирачів з дискретним входом рідини» на здобуття
 наукового ступеня доктора філософії**

Комісія у складі: голови науково-методичної ради Інституту будівництва та інженерних систем к. т. н., доц. Позняк О.Р., завідувача кафедрою гідротехніки та водної інженерії д. т. н., проф. Чернюка В.В., доцента кафедри гідротехніки та водної інженерії к. т. н., Жука В.М. склали акт про те, що результати дисертаційної роботи Фасуляка Вадима Євгенійовича на тему «Гідравлічні розрахунки напірних трубопроводів-збирачів з дискретним входом рідини», за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» використовуються та впровадження в навчальний процес кафедри гідротехніки та водної інженерії для студентів спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології». Результати дисертаційної роботи впроваджені в лекційних та практичних заняттях з дисципліни «Будівельне водопониження та дренаж». Відповідно до робочої програми впровадження відбулось в таких темах: тема №3 «Способи водопониження. Схеми розташування водопонижувальних пристроїв», тема №11 «Методи підвищення ефективності водопонижувальних систем», практичне заняття №5 «Спільна робота свердловинного насоса і колекторного трубопроводу системи водопониження». Загальний обсяг аудиторних годин для денної форми навчання – 45, у т. ч. лекційні заняття – 30, практичні заняття – 15. Використання результатів наукових досліджень Фасуляка В.Є. сприяє вдосконаленню підготовки фахівців.

Голова науково-методичної ради ІБІС  Оксана ПОЗНЯК

Завідувач кафедри ГВІ, д. т. н., проф.  Володимир ЧЕРНЮК

Доцент кафедри ГВІ, к. т. н., доц.  Володимир ЖУК

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ «ТЕО ІНЖИНІРИНГ»

Богдан РОМАНЧАК

2024р.



АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи Фасуляка Вадима Євгенійовича на тему «Гідравлічні розрахунки напірних трубопроводів-збирачів з дискретним входом рідини», виконаної на кафедрі гідротехніки та водної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

Цим актом підтверджується, що результати наукової роботи Фасуляка В.Є. з гідравлічних розрахунків напірних трубопроводів-збирачів передано ТОВ «ТЕО ІНЖИНІРИНГ» для впровадження при проектуванні системи дренажу дощових садів для кварталу житлової забудови у м. Пустомити.

Рівномірність притоку води у дренажний трубопровід по всій його довжині є важливою для повноцінного функціонування дощового саду. Правильний підбір геометричних характеристик трубопроводу та входних отворів дозволяє ефективно забирати надлишкову вологу. Проте при збільшенні витрат можливий перехід дренажного трубопроводу у режим роздачі через те, що тиск всередині більший ніж тиск рідини ззовні трубопроводу. Уникнення даних негативних явищ важливо передбачити на етапі проектування.

Запропоновано енергію потоку, який тече у напірному трубопроводі-збирачі, використовувати для локальної зміни гідродинамічних параметрів потоку у створах входних отворів у ТЗ. Застосування винайденого «Спосіб регулювання притоку рідини в напірний трубопровід-збирач і пристрій для його реалізації» дозволяє запобігати роздачі рідини при наявності транзитної витрати та забезпечує рівномірний притік рідини у трубопровід-збирач. У цьому полягає економічна, технічна та екологічна ефективність гідравлічного розрахунку напірного ТЗ.

Цей акт є підставою для взаємних фінансових розрахунків

Інженер

Директор



Юрій МИХАЛИНА

Богдан РОМАНЧАК

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ**Статті**

1. Zhuk V. Dependency Between the Total and Effective Imperviousness for Residential Quarters of the Lviv City / Zhuk V., Vovk L., Matlai I., Popadiuk I., Mysak I., Fasuliak V. // Journal of Ecological Engineering. – 2020. - 21(5). - P.56-62. (<https://doi.org/10.12911/22998993/122191>) (SCOPUS)
2. Cherniuk V. V. Variability of Darcy Friction Factor in Differential Equation for Enforced Flow in Collector-pipeline / V. V. Cherniuk, V. Ye. Fasuliak, I. V. Bihun, M. V. Cherniuk // Proceedings of CEE 2023. Civil and Environmental Engineering and Architecture. – Springer. Nature Switzerland AG 2023. – P. 58-69 (https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_7) (SCOPUS)
3. Жук В. М. Експериментальне дослідження стоку з водопроникного бетонного покриття для високоінтенсивних дощів малої тривалості./ Жук В. М., Качмар І. З., Фасуляк В. Є. // Науковий вісник НЛТУ України, – 2019. - 29(9), - С. 132-135. (<https://doi.org/10.36930/40290923>) (Фахова)
4. Босак, М. П. Дослідження експлуатаційного режиму свердловин водозабору та водогону./ Босак М. П., Одуха М. С., Гвоздецький О. Г., Фасуляк В. Є. // Науковий вісник НЛТУ України, – 2019. - 29(9), - С. 126-131. (<https://doi.org/10.36930/40290922>) (Фахова)

Матеріали конференцій

5. 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.

6. Жук В. М. Використання полідиметилсилоксанів для зниження випаровування із водної поверхні / Жук В.М., Гриців О.Б., Регуш А.Я., Фасуляк В.Є. // “Ресурси природних вод карпатського регіону” Матеріали ХХ міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів 26-27 травня 2022 р): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2022. - С. 90-92.

7. Чернюк В. В. Змінність коефіцієнта тертя у диференціальному рівнянні для напірних потоків рідин у трубопроводах-збирачах. / В. В. Чернюк, В. Є. Фасуляк, І. В. Бігун, М. В. Чернюк // “Ресурси природних вод карпатського регіону” / Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали ХХІ міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 25-26 травня 2023 р.): Збірник наукових статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2023. - С. 80-85.

8. Жук В. М. Екологічні аспекти використання полідиметилсилоксанів для зниження VI випаровування із водної поверхні / В. М. Жук, А. Я. Регуш, О. Б. Гриців, В. Є. Фасуляк.// «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції (м. Дубляни 8-9 червня 2023 р.): Збірник тез доповідей. – Дубляни: ЛНУП, 2023. - С. 79-81.

9. Cherniuk V. V. Variability of Darci Friction Factor in Differential Equation for Enforced Flow in Collector-pipeline / V. V. Cherniuk, V. Ye. Fasuliak, I. V. Bihun, M. V. Cherniuk // Proceedings of the XVIII International Scientific Conference “Rzeszów – Lviv – Košice” Current Issues of Civil and Environmental Engineering and Architecture, 6-8 September 2023, Rzeszów (Poland). P. 16.

10. Фасуляк В.Є. Дощові сади як елемент сталого управління водними ресурсами в населених пунктах / Фасуляк В.Є., Жук В.М., Регуш А.Я., Гриців О.Б., Регуш В.А.// Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference “Problems of creating scientific ideas about world development”, 3-6 October 2023) Ottawa (Canada) International Science Group. P. 16-17

11. Чернюк В. В. Урахування змінності коефіцієнта тертя у диференціальному рівнянні для напірних трубопроводів-збирачів / В. В. Чернюк, В. Є. Фасуляк, І. В. Бігун, М. П. Кулик // Збірник матеріалів V Міжнародної науково-технічної конференції “Водопостачання і водовідведення, проєктування, будівництво, експлуатація, моніторинг”, 18-20 жовтня 2023 року, м. Львів, Національний Університет “Львівська політехніка”. С. 26-27.

Патент на винахід

12. Патент №128075 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”. – № а202201571. – заяв. 16.05.2022. – опубл. 28.03.2024. – Бюл. № 13.