Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Мисак Павло Васильович
(прізвище, ім’я, по батькові)

УДК 628.27
(індекс)

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ТОЧКОВИХ ДОЩОПРИЙМАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

(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

П. В. Мисак
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Жук Володимир Михайлович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Львів – 2024

АНОТАЦІЯ

Мисак П.В. Методи гідравлічного розрахунку точкових дощоприймальних елементів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія (19 – Архітектура та будівництво). Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2024.

У світі зберігається тенденція щодо урбанізації територій, що супроводжується інтенсивним збільшенням площ водонепроникних поверхонь. У 2023 році майже 56 % населення Землі проживало в містах, порівняно з 15% у 1900 році, 25% у 1950-му та близько 50% у 2020 році. Неперервна урбанізація спільно з глобальними змінами клімату призводять як до погіршення забезпеченості водними ресурсами, так і до збільшення частоти і масштабів затоплень територій, спричиняючи цілий ряд соціально-економічних проблем. Реагуючи на ці виклики, під егідою ООН у 2018–2028 роках проводиться Міжнародне десятиліття дій "Вода для сталого розвитку", де основний акцент робиться на раціональне використання водних ресурсів, включаючи управління дощовими водами.

Критично важливим компонентом міської інженерної інфраструктури є системи дощового водовідведення. Від ефективності їх функціонування систем залежить рівень благоустрою забудованих територій, безпека на транспортних шляхах та екологічний стан прилеглих поверхневих водойм. Загальна довжина вулиць з твердими покриттями в цілому по Україні становить близько 143 тис. км, з яких мережі дощового водовідведення влаштовані лише приблизно на 9 тис. км, і ще близько на 5 тис. км обладнані мережі централізованого водовідведення, в які надходить поверхневий стік.

Водоприймальні пристрої різних типів і конструкцій є важливим елементом мереж дощового водовідведення, вони забезпечують приймання всіх видів поверхневих стічних вод (дощових, талих та поливо-мийних) безпосередньо з прилеглих поверхонь. У зв’язку з цим важливою задачею є

забезпечення належних гідравлічних характеристик дощоприймачів, які дозволяють ефективно збирати поверхневий стік, запобігаючи підтопленню урбанізованої території.

Проектування дощоприймачів різних типів в Україні регламентується рядом нормативних документів, зокрема ДБН В.2.5-75:2013, ДБН Б.2.2-12:2019, ДБН В.2.3-5:2018, а також ДСТУ Б В.2.5-26-2005, ДСТУ Б В.2.6-106:2010, ДСТУ Б EN 1433:2016, ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012. У країнах ЄС реалізується стратегія з оцінки та управління ризиками підтоплення Directive 2007/60/EC, а проектування систем дощового водовідведення та їх елементів регламентується BS EN 124:1994. У США проектування систем дощового водовідведення та їх елементів регламентується HEC-12, HEC-21, HEC-22 та ін.

За конфігурацією та протяжністю дощоприймачі поділяють на точкові та лінійні. Точкові дощоприймачі характеризуються компактним розташуванням у пониженій частині підбасейна стоку. Лінійні дощоприймальні елементи, до яких належать лотки різних видів, є лінійними інженерними мережами, які закінчуються зазвичай приєднанням до дощоприймальних колодязів. Точкові дощоприймачі призначені в основному для розташування на проїжджих частинах вулиць та на інших удосконалених водонепроникних покриттях, та повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.5-26:2005.

Внаслідок наявності великої кількості вхідних факторів та часткових умов, моделювання пропускної здатності дощоприймачів є складною гідравлічною задачею. Українські та закордонні нормативні документи в галузі дощового водовідведення, зокрема ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 та HEC-22 US FHWA, рекомендують до використання максимально спрощені методи гідравлічного розрахунку дощоприймачів. Ці методи передбачають наявність двох характерних режимів роботи дощоприймача, а саме режиму водозливу з широким порогом (ВШП) та режиму отвору, а також сталість значень безрозмірних коефіцієнтів витрат для обох цих режимів. Проте, ряд нових експериментальних досліджень водоприймачів у натурних умовах

переконливо вказують на наявність трьох режимів роботи, з проміжним, комбінованим режимом.

Враховуючи розбіжності існуючих методик гідравлічного розрахунку водоприймальних пристроїв точкового типу, а також математичну складність і багатофакторність відповідних явищ, у дисертаційній роботі виконано теоретичне та експериментальне дослідження гідравлічних характеристик дощоприймачів зі стрижневими решітками у різних режимах їх роботи.

Дослідна установка для експериментального визначення гідравлічних параметрів дощоприймачів точкового типу відповідає вимогам європейського стандарту EN 1253-2:2003. Конструкція та розміри дослідної установки дозволяють виконувати гідравлічні випробування водоприймачів з номінальним діаметром відвідного трубопроводу до 200 мм включно, що дозволяє моделювати гідравлічні режими роботи більшості типових водоприймачів у натурному масштабі (1:1).

Розроблено методику виконання експериментальних досліджень водоприймачів та методику математичної обробки їх гідравлічних характеристик з отриманням пропускної здатності за напору 20 мм, значення транзитних напорів та витрат, що відповідають переходам між режимами ВШП, комбінованим режимом та режимом отвору, а також коефіцієнтів витрати в різних режимах роботи. Гранична, максимально допустима відносна похибка визначення об'ємної витрати не перевищувала 2,4%, водозливного периметра – 0,10%, сумарної площі водоприймальних отворів – 0,24%. Граничні значення відносних похибок за коефіцієнтом витрати в режимі ВШП становили у межах від 4,7% до 17,0%, а в режимі отвору – не перевищували 3,5%.

Обґрунтовано критерії наявності непідтопленого та підтопленого типів течії крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід". Отримано критерії встановлення режиму ВШП, комбінованого режиму та режиму отвору для непідтоплених течій.

Розроблено математичну модель, що описує гідравлічні явища при затопленій течії крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід", та

запропоновано метод чисельного вирішення системи рівнянь для знаходження граничної витрати та відповідної граничної глибини підтоплення водоприймача. Отримано залежності граничної витрати та граничної глибини для дощоприймача малого типу Д(А15) від довжини водовідвідного трубопроводу, прокладеного з пластикових труб з номінальним діаметром 200 мм за поздовжнього похилу 0,02. Отримано степеневі лінії тренду (3.11)–(3.14) для граничної витрати Q_{lim} і глибини підтоплення h_{lim} за трьох типових значень гідравлічної глибини дощоприймальних колодязів: 0,97 м, 1,27 м та 1,57 м для відвідних трубопроводів довжиною 2–40 м. Отримано узагальнену залежність (3.16) для визначення безрозмірного коефіцієнта витрати C_{tot} системи "водоприймач − відвідний трубопровід" від довжини відвідного трубопроводу діаметром DN=200 мм.

Отримано аналітичну залежність (3.34) між коефіцієнтом витрати дощоприймача в режимі ВШП C_w та критерієм Фруда Fr_w для потоку безпосередньо на перепаді водприймального отвору. За умови рівномірного розподілу швидкостей на перепаді, а також нехтуючи втратами напору потоку на підході до водоприймача, отримано функціональні залежності коефіцієнтів витрати m_w та C_w від числа Фруда Fr_w (рівняння (3.40) та (3.41) відповідно).

Для трьохзонної моделі течії крізь непідтоплений водоприймач отримано аналітичні залежності (3.47) і (3.50) для обчислення першого та другого транзитних напорів $h_{tr.1}$ та $h_{tr.2}$, що відповідають переходу з режиму ВШП до комбінованого режиму та з комбінованого режиму в режим отвору відповідно. З використанням теорії розмірностей обґрунтовано структуру розрахункової залежності (3.60) для визначення пропускної здатності точкових водоприймачів у комбінованому режимі, як функції водозливного периметра, сумарної площі отворів та геометричного напору перед водоприймачем.

У експериментальній частині роботи виконано натурну перевірку відповідних теоретичних результатів, а також уточнення числових значень коефіцієнтів витрати точкових водоприймачів у режимах ВШП, комбінованому режимі та в режимі отвору. Отримано експериментальні витратно-напірні

характеристики дощоприймача Basic 400 з діаметром відвідного трубопроводу 200 мм, а також водовідвідних трапів з горизонтальними відводами діаметрами 100 мм та 200 мм і гідрозатвором пластинчастого типу за різних типів і розмірів водоприймальних решіток.

Запропоновано критерій виділення на гідравлічних характеристиках діапазонів, що відповідають режиму ВШП, комбінованому режиму та режиму отвору, а саме чисельні значення показників степеня в степеневих лініях трендів за максимальних значень коефіцієнта детермінованості R^2, що для вказаних вище режимів дорівнюють відповідно 1,5; 1 та 0,5.

Експериментальні значення коефіцієнта витрати в режимі ВШП C_w для дощоприймача Basic 400 зі стрижневими решітками №1–№8 з розмірами в плані від 365×365 мм до 65×65 мм становлять $C_w = 0{,}858 \pm 6\%$. Отриманий середній коефіцієнт витрати на 5,6% менший за значення C_w=0,909, рекомендоване ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012, і на 11,9% менший за C_w=0,974 за HEC-22. Експериментальні значення коефіцієнта витрати дощоприймачів зі стрижневими решітками в комбінованому режимі C_{mix} описані степеневою функцією периметру водоприймального отвору L_w (4.23), що дозволяє поширювати цю залежність також на інші решітки стрижневого типу. Експериментальні значення коефіцієнта витрати в режимі отвору C_o для дощоприймачів зі стрижневими решітками представлені як степенева функція (4.25) від сумарної площі водоприймальних отворів ω_o.

Досліджено зміну картини течії крізь дощоприймач зі стрижневою решіткою по мірі збільшення об’ємної витрати притоку. Описано основні патерни картин течії, характерних для режиму ВШП, комбінованого режиму та режиму отвору.

На підставі отриманих теоретичних та експериментальних результатів розроблено удосконалений метод гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу, що враховує тип потоку крізь дощоприймач та режим течії крізь водоприймальну решітку для непідтоплених потоків. Алгоритм гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу включає визначення

транзитних напорів і витрат, а також застосування структури витратно-напірних характеристик та відповідних коефіцієнтів витрати для режиму ВШП, комбінованого режиму та режиму отвору.

Отримано розрахункові напірно-витратні характеристики типових дощоприймачів для випадків одно-, дво- та чотирьохстороннього притоку до них поверхневого стоку. Виконані натурні обстеження дощоприймачів у м. Львові під час випадання сильних злив дозволили окреслити вплив окремих факторів на ступінь забиття водоприймальних решіток, що є однією з найбільш поширених причин затоплення урбанізованих територій.

Розроблено удосконалену конструкцію дощоприймального колодязя з гідрозатвором, захищену Патентом України на корисну модель UA 153379 U. Конструкція дощоприймального колодязя забезпечує надійне приймання та відведення поверхневих стічних вод з урбанізованих територій, одночасно з частковим очищенням поверхневого стоку від грубодисперсних забруднень і нафтопродуктів, зменшуючи тим самим скид відповідних забруднень у водовідвідну мережу та на каналізаційні очисні споруди, а також запобігає потраплянню каналізаційних газів із загальносплавної мережі водовідведення на прилеглу до дощоприймального колодязя забудовану територію.

Таким чином, у дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання удосконалення існуючих методик гідравлічного розрахунку водоприймальних пристроїв точкового типу з врахуванням змінних гідравлічних режимів роботи. Отримані результати роботи дозволяють краще розуміти гідравлічні властивості водоприймачів, які мають важливий вплив на надійність та ефективність роботи мережі дощового водовідведення. Особливо в умовах постійного зростання урбанізації та з урахуванням глобальних кліматичних змін.

Ключові слова: водоприймальна решітка, гідравлічна характеристика, коефіцієнт витрати, комбінований режим, критерій Фруда, периметр водоприймального отвору, площа водоприймальних отворів, пропускна здатність, точковий дощоприймач, транзитний напір.

Список публікацій здобувача:

– у наукових періодичних виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз:

1. Zhuk V., Matlai I., Zavoyko B., Popadiuk I., Pavlyshyn V., Mysak I., Mysak P. Experimental hydraulic parameters of drainage grate inlets with a horizontal outflow in the broad-crested weir mode. Water Science & Technology. 2023, Vol. 88, Iss. 3, P. 738–750. https://doi.org/10.2166/wst.2023.234. (Scopus, квартиль Q2, Web of Science).

2. Mysak I., Mysak P. Modern methods of hydraulic calculation of linear and point rain-receiving elements. Journal of the Balkan Tribological Association. 2023, Vol. 29, Iss. 4, P. 499–511. (Scopus, квартиль Q3).

– у науковому фаховому видані України:

3. Zhuk V., Vovk L., Mysak P. Estimation of daily runoff coefficient of the pervious surfaces for the climate conditions of the city of Lviv. Environmental Problems = Екологічні проблеми. 2020. Vol. 5, №3. P. 136–142. https://doi.org/10.23939/ep2020.03.136.

– розділи в колективних монографіях, виданих за кордоном:

4. Mysak P., Mysak I. Modeling of runoff hydrographs from the impervious subcatchments by using CFD. Improvement of Scientific Approaches to the Development of Engineering: Collective Monograph / International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2022. P. 92–102. https://doi.org/10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.4.1.7.

5. Mysak P. Classification and calculation of discharge capacity of broad-crested weirs. Technical and Agricultural Sciences in Modern Realities: Problems, Prospects and Solutions: Collective Monograph / International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2023. P. 68–76. https://doi.org/10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.2.1.5.

– які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Патент № 153379. Дощоприймальний колодязь / В.М. Жук, О.В. Вербовський, В.І. Орел, П. В. Мисак; заявн. Національний університет

"Львівська політехніка". – u202202739; заявл. 29.07.2022; опубл. 28.06.2023; Бюл. 26.

7. Жук В.М., Мисак І.В., Мисак П.В. Гідрографи дощового стоку за модифікованим тривимірним секторним методом для кліматичних умов міста Львова. Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути [зб. наук. пр.]: матеріали V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. Київ, 2020. С. 332−338.

8. Жук В.М., Мальований М.С., Тимчук І.С., Мисак І.В., Мисак П.В. Проблеми експлуатації дощоприймачів у загальносплавних системах водовідведення. І Міжнародна науково-практична конференція «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022»: тези доп., 26–27 травня 2022 р. / Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. С. 251–254.

9. Мисак П.В., Жук В.М. Водопропускні гідравлічні характеристики водоприймальних елементів горизонтального типу. XX Міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону»: тези доп., 26–27 травня 2022 р. / Національний університет «Львівська політехніка», 2022. С. 265–267.

10. Mysak P., Zhuk V. Discharge hydraulic characteristics of horizontal grate inlets. III Міжнародна науково-практична конференція «Theories, Methods and Practices of the Latest Technologies», Tokyo, Japan, 2022. P. 17–19.

11. Мисак П.В., Маковський Є.С., Жук В.М. Транзитні напори та витрати при переході дощоприймачів з режиму водозливу у режим витікання крізь отвір. XXI Міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону»: тези доп., 25–26 травня 2023 р. / Національний університет «Львівська політехніка», 2023. С. 74–76.

12. Mysak P., Mysak I. The influence of the grate inlet on interception efficiency flow. Abstracts of XX International Scientific and Practical Conference. Munich, Germany, 2023. P. 24–25.

ABSTRACT

Mysak P.V. Methods of hydraulic calculation of point-type stormwater inlets – Manuscript.

Dissertation for academic degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 – Building and Civil Engineering (19 – Architecture and Construction). Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Lviv, 2024.

In the world, there is a trend towards urbanization of territories, accompanied by intensive expansion of impermeable areas. In 2023, almost 56% of the Earth's population lived in cities, compared to 15% in 1900, 25% in 1950, and about 50% in 2020. Continuous urbanization, along with global climate change, leads to both deterioration of water resource availability and increased frequency and scale of flooding, resulting in a range of socio-economic problems. In response to these challenges, under the auspices of the UN, the International Decade for Action "Water for Sustainable Development" is being held from 2018 to 2028, with a primary focus on rational water resource use, including stormwater management.

Stormwater drainage systems are the critical component of urban engineer infrastructure. The level of wellbeing in developed areas, safety on transportation routes, and the ecological state of adjacent surface water bodies depend on the efficiency of their operation. The total length of streets with solid coverings in Ukraine is approximately 143 thousand kilometers, of which stormwater drainage networks are installed on only about 9 thousand kilometers, and another approximately 5 thousand kilometers have combined sewerage equipped to handle surface runoff.

Inlet devices of various types and designs are essential elements of stormwater drainage networks, they ensure the collection of all types of surface runoff (stormwater, meltwater, and street washing runoff) directly from adjacent surfaces. Therefore, an important task is to provide proper hydraulic characteristics of inlet

structures, which allow for the effective collection of surface runoff, thus preventing urbanized areas from flooding.

The design of various types of inlet structures in Ukraine is regulated by a number of regulatory documents, including DBN V.2.5-75:2013, DBN B.2.2-12:2019, DBN V.2.3-5:2018, as well as DSTU B V.2.5-26-2005, DSTU B V.2.6-106:2010, DSTU B EN 1433:2016, DSTU-N B V.2.5-61:2012. In EU countries, the strategy for assessing and managing flood risks is implemented through the Floods Directive 2007/60/EC, and the design of stormwater drainage systems and their elements is regulated by BS EN 124:1994. In the United States, the design of stormwater drainage systems and their elements is regulated by HEC-12, HEC-21, HEC-22, and others.

According to their configuration and length, stormwater inlets are divided into point-type and linear ones. Point-type stormwater inlets are characterized by compact placement in the low part of the stormwater subcatchment. Linear stormwater inlets, including channels of various types, are linear engineering networks that typically end by connecting to stormwater manholes. Point-type stormwater inlets are mainly designed to be located on roadway surfaces and other improved impervious surfaces and should comply with the requirements of DSTU B V.2.5-26:2005.

Due to the presence of numerous input factors and partial conditions, modelling the capacity of stormwater inlets is a complex hydraulic task. Ukrainian and international regulatory documents in the field of stormwater drainage, including DSTU-N B V.2.5-61:2012 and HEC-22 US FHWA, recommend using simplified methods for hydraulic calculation of stormwater inlets. These methods involve the presence of two characteristic operating modes of the stormwater inlet, namely the broad-crested weir (BCW) mode and the orifice mode, as well as the constancy of the dimensionless discharge coefficients for both of these modes. However, a number of new experimental studies of stormwater inlets under natural conditions convincingly indicate the presence of three operating modes, including an intermediate, combined mode.

Taking into account the discrepancies in existing methodologies for hydraulic calculation of point-type stormwater inlets, as well as the mathematical complexity and multifactorial nature of the relevant phenomena, the dissertation includes theoretical and experimental studies of the hydraulic parameters of stormwater inlets with bar grates in various operating modes.

The experimental setup for the study of hydraulic parameters of point-type stormwater inlets complies with the requirements of the European standard EN 1253-2:2003. The design and dimensions of the experimental setup allow hydraulic testing of inlets with a nominal outflow pipe diameter up to 200 mm, enabling the modeling of hydraulic operating conditions for most typical inlets on a full scale (1:1).

A methodology for conducting experimental studies of stormwater inlets and a methodology for mathematical processing of their hydraulic characteristics to obtain capacity at a head of 20 mm, values of transition heads and flow rates corresponding to transitions between the BCW mode, combined mode, and orifice mode, as well as discharge coefficients in different operating modes, has been developed. The maximum permissible relative error in determining the volumetric flow rate did not exceed 2.4%, the weir perimeter – 0.10%, and the total area of inlet openings – 0.24%. The maximum relative error values for the discharge coefficient in the BCW mode ranged from 4.7% to 17.0%, and in the orifice mode they did not exceed 3.5%.

Criteria for the presence of free and surcharged flow types through the 'inlet – outlet pipe' system have been substantiated. Criteria for determining the BCW mode, combined mode, and orifice mode for non-surcharged flows have been established.

A mathematical model has been developed to describe hydraulic phenomena during surcharged flow through the 'inlet – outlet pipe' system, and a numerical solution method for the system of equations has been proposed to find the maximum flow rate and the corresponding maximum submersion depth of the inlet. Dependencies of the maximum flow rate and the maximum depth for the small type D(A15) inlet have been obtained based on the length of the outlet pipeline made of plastic pipes with a nominal diameter of 200 mm with a longitudinal slope of 0.02. Trend power lines (3.11)–(3.14) have been obtained for the limiting flow rate Q_{lim}

and the submersion depth h_{lim} for three typical values of hydraulic depth of the inlet manholes: 0.97 m, 1.27 m, and 1.57 m for outlet pipelines ranging from 2 to 40 m in length. A generalized dependency (3.16) has been derived to determine the dimensionless flow rate coefficient C_{tot} of the 'inlet – outlet pipe' system based on the length of the outlet pipe with a diameter DN=200 mm.

An analytical relationship (3.34) has been derived between the discharge coefficient of the inlet in the BCW mode C_w and the Froude number Fr_w for flow directly at the inlet's drop. Assuming a uniform velocity distribution at the drop and neglecting flow head losses at the inlet approach, functional dependencies of the discharge coefficients m_w and C_w on the Froude number Fr_w have been obtained (equations (3.40) and (3.41) respectively).

For the three-mode flow model through the non-submerged inlet, analytical equations (3.47) and (3.50) have been obtained for calculating the first and second transitional heads $h_{tr.1}$ and $h_{tr.2}$, corresponding to the transition from the BCW mode to the combined mode and from the combined mode to the orifice mode respectively. Using dimensional analysis theory, the structure of the dependency (3.60) has been justified for calculating the discharge capacity of point-type inlets in the combined mode as a function of the inlet perimeter, total openings area, and geometric head upstream of the inlet.

The experimental part of the study involved a full-scale verification of the corresponding theoretical results and refinement of the numerical values of discharge coefficients for point-type inlets in the BCW mode, as well as in combined mode, and orifice mode. Experimental discharge-head characteristics of the Basic 400 inlet with a 200 mm diameter outlet pipe were obtained, as well as of the wastewater gullies with horizontal outlets of 100 mm and 200 mm diameters and a plate-type hydraulic siphon for the grates of various types and sizes.

A criterion for identifying ranges on the hydraulic characteristics corresponding to the BCW mode, combined mode, and orifice mode has been proposed. Specifically, numerical values of the power indicators in trend power lines for

maximum values of the coefficient of determination R^2 are suggested, which for the above-mentioned modes should be respectively equal to 1.5, 1, and 0.5.

The experimental values of the discharge coefficient in the BCW mode for the Basic 400 stormwater inlet with bar grates No.1–No.8, ranging in plan dimensions from 365×365 mm to 65×65 mm, are equal to C_w= 0.858 ± 6%. The obtained average discharge coefficient is 5.6% lower than the recommended value C_w=0.909, according to DSTU-N B V.2.5-61:2012, and 11.9% lower comparing C_w=0.974 due to HEC-22. The experimental values of the discharge coefficient for bar-grated stormwater inlets in the combined mode are described by a power-law function of the water inlet perimeter L_w (4.23), allowing for the extension of this dependency to other bar grate inlets. The experimental values of the discharge coefficient in the orifice mode for stormwater inlets with bar grates are presented as a power-law function (4.25) of the total area of the water inlet openings ω_o.

The change in the flow pattern through the stormwater inlet with bar gratings was studied as the inflow discharge increased. The main flow patterns characteristic of the BCW mode, combined mode, and orifice mode are described.

Based on the obtained theoretical and experimental results, an improved method for hydraulic calculation of point-type stormwater inlets has been developed, taking into account the flow type through the stormwater inlets and the flow mode through the grating for non-submerged flows. The algorithm for hydraulic calculation of point-type stormwater inlets includes the determination of transit heads and discharges, as well as the application of the flow-head characteristics structure and corresponding discharge coefficients for the BCW mode, combined mode, and orifice mode.

The calculated head-flow characteristics of typical stormwater inlets have been obtained for the cases of single-sided, two-sided, and four-sided inflow of surface runoff. Field inspections of stormwater inlets in Lviv city during heavy rainfall allowed delineating the influence of individual factors on the degree of clogging of water inlet grates, which is one of the most common causes of flooding in urbanized areas.

An improved design of a stormwater inlet manhole with a hydraulic syphon has been developed, and protected by the Utility Model Patent of Ukraine UA 153379 U. The design of the stormwater inlet manhole ensures reliable collection and drainage of surface runoff from urbanized areas, simultaneously with partial pre-treatment of surface runoff from coarse-dispersed pollutants and petroleum products, thereby reducing the discharge of corresponding pollutants into the drainage network and to the wastewater treatment plants. It also prevents sewage gases from the combined sewerage network from entering the urbanized area adjacent to the stormwater inlet manhole.

Thus, the dissertation has addressed the important scientific and practical task of improving existing methodologies for hydraulic calculations of point-type stormwater inlets, taking into account variable hydraulic operating conditions. The obtained results of the study provide a better understanding of the hydraulic parameters of stormwater inlets, which have a significant impact on the reliability and effectiveness of stormwater drainage networks. This is especially important given the constant increase in urbanization and considering global climate changes.

Key words: grate inlet, hydraulic characteristics, discharge coefficient, combined mode, Froude number, water inlet perimeter, area of water inlet openings, discharge capacity, point-type stormwater inlet, transit head.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ 2
ABSTRACT 10
ЗМІСТ 16
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ 19
ВСТУП 21
РОЗДІЛ 1. ГІДРАВЛІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОЩОПРИЙМАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ 27
1.1. Огляд та класифікація дощоприймальних елементів 27
1.2. Конструктивні особливості точкових дощоприймачів 31
1.2.1. Решітки дощоприймачів 31
1.2.2. Решітки водоприймальних трапів 36
1.2.3. Бордюрні та комбіновані дощоприймачі 38
1.3. Гідравлічний розрахунок точкових дощоприймачів 40
1.3.2. Експериментальні дослідження гідравлічних параметрів точкових водоприймачів 41
1.3.3. Режим водозливу з широким порогом 44
1.3.4. Режим отвору 57
1.3.5. Комбінований (змішаний) режим 59
1.3.6. Гідравлічний режим підтопленого водоприймача 62
1.4. Мета роботи та задачі досліджень 63
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ 67
2.1. Загальна методика виконання дисертаційного дослідження 67
2.2. Установка для гідравлічного дослідження водоприймачів 67
2.3. Досліджувані водоприймачі 74
2.4. Методика дослідження гідравлічних параметрів водоприймачів 77
2.5. Математична обробка та похибки експериментальних результатів 78
2.6. Висновки 83

РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ДОЩОПРИЙМАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ 85
3.1 Типи течії та режими роботи водоприймачів 85
3.2 Моделювання затопленої течії крізь систему дощоприймач – відвідний трубопровід 89
3.3 Моделювання непідтопленої течії крізь водоприймачі 101
3.3.1. Взаємозв'язок між критерієм Фруда та коефіцієнтом витрати водоприймача в режимі ВШП. 101
3.3.2. Перехідний напір у двохзонній моделі між режимом ВШП та режимом отвору. 103
3.3.3. Перехідні напори у трьохзонній моделі. 105
3.3.4. Пропускна здатність водоприймачів у комбінованому режимі 106
3.4 Висновки 108
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ 110
4.1 Гідравлічні характеристики точкових дощоприймачів 110
4.2 Коефіцієнти витрати решітчастих дощоприймачів 124
4.2.1. Режим ВШП 124
4.2.2. Комбінований режим 132
4.2.3. Режим отвору 138
4.3 Візуалізація картин течії в різних режимах роботи водоприймача. 141
4.4 Перехідні напори та витрати 145
4.5 Гідравлічні характеристики водоприймальних трапів 146
4.6 Висновки 151
РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ 153
5.1. Удосконалений метод гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу 153
5.1.1. Тип течії крізь систему "дощоприймач – відвідний трубопровід". 153

5.1.2. Затоплена течія крізь систему "дощоприймач – відвідний трубопровід". 154

5.1.3. Непідтоплені течії крізь систему "дощоприймач – відвідний трубопровід". 155

5.1.4. Рекомендовані залежності для коефіцієнтів витрати для непідтоплених дощоприймачів зі стрижневими решітками..... 156

5.1.5. Розрахункові гідравлічні характеристики типових дощоприймачів зі стрижневими решітками...... 158

5.2. Натурне обстеження забиття решіток дощоприймачів..... 160

5.3. Удосконалена конструкція дощоприймального колодязя..... 162

5.4. Висновки 166

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 167

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 170

ДОДАТКИ 185

ДОДАТОК А. Список опублікованих праць за темою дисертації 185

ДОДАТОК Б. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес НУ "Львівська політехніка" 188

ДОДАТОК В. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво..... 189

ДОДАТОК Г. Протоколи дослідження гідравлічних характеристик дощоприймачів 192

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ВШП	−	водозлив з широким порогом
A_e	–	загальна площа отворів, м^2
b_w	–	ширина водозливного отвору, м
C_{mix}	–	коефіцієнт витрати у комбінованому режимі
C_o	–	коефіцієнт витрати у режимі отвору
C_w	–	коефіцієнт витрати у режимі ВШП
C_{tot}	–	коефіцієнт витрати системи "водоприймач − відвідний трубопровід"
Fr	–	критерій Фруда
g	–	прискорення вільного падіння, м/с^2
h	–	геометричний напір, м
h_{lim}	–	гранична глибина, м
h_{tr}	–	транзитний напір, м
h_{mid}	–	середнє значення геометричного напору, м
$h_{w.gr}$	–	втрати напору на водоприймальній решітці, м
$h_{p.l}$	–	втрати напору по довжині відвідного трубопроводу, м
$h_{p.loc}$	–	втрати напору на місцевих опорах відвідного трубопроводу, м
h_w	–	геометричний напір на перепаді, м
H	–	повний (гідродинамічний) напір, м
i_p	–	поздовжній похил відвідного трубопроводу
k	–	шорсткість поверхні водозливу, м
L_p	–	периметр водоприймальної решітки, м
L_w	–	периметр водоприймального отвору, м
N_L	–	коефіцієнт стиснення потоку в режимі ВШП
n	–	коефіцієнт шорсткості поверхні
P_V	−	загальна довжина периметру всіх отворів, м
P	–	період одноразового перевищення, роки

$P_в$ – висота порогу водозливу з боку верхнього б'єфу, м

q_{20} – інтенсивність випадання дощу тривалістю 20 хв., л/(с×га)

Q_{lim} – гранична витрата дощоприймача, м^3/с

Q_r – розрахункова об'ємна витрата, м^3/с

Q_{tr} – транзитна витрата, м^3/с

Q' – безрозмірна витрата

Re – критерій Рейнольдса

T – температура води, ^{o}C

V_w – середня швидкість потоку, м/с

V_p – середня швидкість потоку у водовідвідній трубі, м/с

We – критерій Вебера

z_1 – покази п'єзометра №1, м

z_2 – покази п'єзометра №2, м

$z_{1,0}$ – нульові значення показів п'єзометра №1, м

$z_{2,0}$ – нульові значення показів п'єзометра №2, м

α – коефіцієнт кінетичної енергії

α_o – коефіцієнт кінетичної енергії потоку в отворах решітки

ε_p – шпаруватість водоприймальної решітки

λ – коефіцієнт гідравлічного тертя

ν – кінематична в'язкість рідини, м^2/с

ρ – питома маса рідини, кг/м^3

σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м

ω_o – сумарна площа водоприймальних отворів, м^2

ω_p – площа-брутто водоприймальної решітки, м^2

ζ_o – коефіцієнт місцевого опору отворів решітки

ζ_{tot} – сумарний коефіцієнт гідравлічного опору системи "дощоприймач – відвідний трубопровід"

ВСТУП

Актуальність теми. У світі зберігається тенденція по урбанізації міст, що супроводжується інтенсивним збільшенням площ водонепроникних територій. Разом з глобальними кліматичними змінами це спричиняє все частіші та масштабніші підтоплення, які призводять до цілого ряду соціально-економічних проблем. Критично важливим компонентом міської інженерної інфраструктури є системи дощового водовідведення. Їх важливим елементом є дощоприймачі, якими здійснюється збір поверхневого стоку та його відведення у мережу дощової каналізації. Важливою задачею в зв'язку з цим є забезпечення належних гідравлічних характеристик дощоприймачів, які дозволяють ефективно збирати поверхневий стік, запобігаючи підтопленню урбанізованої території.

Внаслідок наявності великої кількості вхідних факторів та часткових умов, моделювання пропускної здатності дощоприймачів є складною гідравлічною задачею. Українські та закордонні нормативні документи в галузі дощового водовідведення, наприклад ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 та HEC-22 US FHWA, рекомендують до використання максимально спрощені методи гідравлічного розрахунку дощоприймачів. Ці методи передбачають наявність двох характерних режимів роботи дощоприймача, а саме режиму ВШП та режиму отвору, а також сталість значень безрозмірних коефіцієнтів витрат для обох цих режимів. Проте, ряд нових експериментальних досліджень водоприймачів у натурних умовах переконливо вказують на наявність трьох режимів роботи, з проміжним, комбінованим режимом.

Враховуючи наявні наукові пробіли в розумінні фізичної природи течій крізь водоприймальні елементи, а також розбіжності щодо числових значень основних кількісних параметрів, які ці течії описують, сформульовано мету та завдання дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи відповідає положенням 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), Закону України "Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року" від 28.02.2019 р. № 2697-VIII. Робота виконана у рамках наукового напряму кафедри гідротехніки та водної інженерії Національного університету "Львівська політехніка": "Гідравліка, інженерна гідрологія, енергоефективне та раціональне водокористування".

Мета роботи і завдання дослідження. *Метою дисертаційної роботи* є розроблення нових і удосконалення відомих гідравлічних методів моделювання роботи дощоприймальних елементів точкового типу для різних типів течії та режимів їх роботи.

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

– проаналізувати існуючі методи розрахунку гідравлічних характеристик дощоприймачів точкового типу у різних режимах їх роботи;

– запроектувати та змонтувати дослідну установку для експериментального визначення гідравлічних параметрів дощоприймачів точкового типу;

– розробити методику виконання експериментальних досліджень дощоприймачів, а також методику математичної обробки їх гідравлічних характеристик для характерних режимів роботи

– розробити математичну модель, що описує гідравлічні явища при затопленій течії крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід", та метод чисельного визначення граничної витрати Q_{lim} та відповідного граничного напору h_{lim}, що відповідають переходу до затопленої течії;

– виконати теоретичний аналіз залежності коефіцієнта витрати дощоприймача в режимі ВШП від значення критерію Фруда на перепаді водозливного отвору;

– з використанням теорії розмірностей обґрунтувати структуру розрахункової залежності для визначення пропускної здатності точкових водоприймачів у комбінованому режимі роботи;

– отримати експериментальні напірно-витратні характеристики дощоприймачів зі стрижневими решітками та відповідні емпіричні значення коефіцієнтів витрати в режимі ВШП, комбінованому режимі та в режимі отвору;

– розробити удосконалений метод гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу, що враховує тип потоку крізь дощоприймач та режим течії крізь водоприймальну решітку для непідтоплених потоків;

– розглянути науково-практичні аспекти застосування розробленого методу гідравлічного розрахунку точкових дощоприймачів, зокрема змоделювати напірно-витратні характеристики типових дощоприймачів для випадків одно-, дво- та чотирьохстороннього притоку до них поверхневого стоку;

– розробити удосконалену конструкцію дощоприймального колодязя.

Об’єктом досліджень у роботі є потоки дощових стічних вод крізь точкові дощоприймачі та відвідні трубопроводи.

Предмет досліджень – методи гідравлічного розрахунку витратно-напірних характеристик точкових дощоприймачів для різних типів течії та режимів їх роботи.

Методи досліджень. У роботі використано комплексний метод наукового дослідження, який включає поєднання теоретичних, чисельних та експериментальних методів гідравлічних досліджень. Використано методи математичного аналізу, математичної статистики та чисельні методи. Експериментальні дослідження виконано на дослідному стенді, що відповідає вимогам міжнародного стандарту EN 1253, з використанням сучасних технологій збору та обробки експериментальних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

– розроблено математичну модель роботи системи "дощоприймач – відвідний трубопровід" для затопленого типу течії;

– з використанням теорії розмірностей обґрунтовано структуру залежності

для визначення пропускної здатності точкових водоприймачів у комбінованому режимі роботи;

– для дощоприймачів зі стрижневими решітками отримано нові систематичні натурні експериментальні результати щодо коефіцієнтів витрати у режимі ВШП, комбінованому режимі та в режимі отвору;

– розроблено удосконалений метод гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу з врахуванням типу та режиму течії крізь дощоприймач.

Практичне значення одержаних результатів:

– удосконалено методику гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу;

– для дощоприймачів зі стрижневими решітками отримано емпіричні залежності коефіцієнтів витрати у комбінованому режимі та в режимі отвору від довжини водозливного периметра та сумарної площі отворів дощоприймача;

– отримано розрахункові напірно-витратні характеристики типових дощоприймачів для випадків одно-, дво- та чотирьохстороннього притоку до них поверхневого стоку;

– розроблено удосконалену конструкцію дощоприймального колодязя з гідрозатвором, захищену Патентом України на корисну модель UA 153379 U.

Особистий внесок здобувача. Виконано аналіз сучасних методів обчислення гідравлічних характеристик дощоприймачів зі стрижневими решітками у різних режимах їх роботи. Виконано математичне планування фізичного експерименту. Спроектовано та змонтовано лабораторну установку для експериментального визначення гідравлічних параметрів дощоприймачів точкового типу. Реалізовано експериментальні дослідження в режимі реального часу, а також виконано математичну обробку та узагальнення отриманих результатів.

Розроблено удосконалений метод гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу, що враховує тип потоку крізь дощоприймач та режим течії крізь водоприймальну решітку для непідтоплених потоків.

Усі наукові результати дослідження дисертаційної роботи отримані автором особисто. У роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить: [1] – отримано залежності коефіцієнта витрати водоприймачів у режимі ВШП від числа Фруда; [2] – виконано огляд аналітичних методів гідравлічного розрахунку дощоприймачів у різних режимах роботи; [3] – виконано розрахунки значень коефіцієнтів стоку з водопроникних поверхонь різних типів; [4] – проведено моделювання гідрографів дощового стоку, використовуючи обчислювальну гідродинаміку; [6] – здійснено пошук прототипу, оформлення опису корисної моделі; [7] – аналіз розрахункових гідрографів дощового стоку, отриманих для кліматичних умов м. Львова; [8] – проведено аналіз конструкційних особливостей дощоприймачів та розглянуто типові проблеми, які виникають при їх експлуатації; [9] – виконано математичну обробку експериментальних даних та аналіз отриманих напірно-витратних характеристик; [10] – проведено аналіз гідравлічних характеристик стрижневих дощоприймальних решіток; [11] – виконано розрахунок транзитних напорів і витрат за умов двостороннього притоку поверхневого стоку для трьох типових дощоприймачів за нормативними методиками; [12] – виконано аналіз ефективності перехоплення поверхневого стоку дощоприймачами з решітками стрижневого типу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних теоретичних та експериментальних досліджень доповідалися та обговорювались на: XX–XXI Міжнародній науково-практичній конференції «Ресурси природних вод Карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання», Львів (2022–2023); I Міжнародній науково-практичній конференції «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022», Полтава, 2022; V Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Сучасні виклики і актуальні

проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути», Київ, 2020; III Міжнародній науково-практичній конференції «Theories, methods and practices of the latest technologies», Tokyo, Japan, 2022; XX Міжнародній науково-практичній конференції «Ways of distance learning development in current conditions», Munich, Germany, 2023.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес на кафедрі гідротехніки та водної інженерії НУ "Львівська політехніка", зокрема в курсі "Керування поверхневим стоком", що викладається для студентів спеціальності 194 "Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології". Розроблені в дисертації методи гідравлічного розрахунку точкових дощоприймачів передано ФОП "STI" для впровадження при проектуванні системи дощового водовідведення готельного комплексу в с. Поляниця Івано-Франківської обл.

Публікації. Основні наукові положення, методи і результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковано у 12 наукових публікаціях, у тому числі: 2 статті у наукових виданнях, що входить до бази Scopus, 1 стаття у науковому виданні України, 2 розділи колективної монографії з них одна у одноосібному авторстві, 1 патент на корисну модель та 6 публікацій у матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації 198 сторінок, включаючи 93 рисунки, 15 таблиць, список використаних джерел із 139 назв на 15 сторінках та 4 додатки на 14 сторінках.

РОЗДІЛ 1. ГІДРАВЛІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОЩОПРИЙМАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

1.1. Огляд та класифікація дощоприймальних елементів

У світі продовжується тенденція по урбанізації, що призводить до збільшення водонепроникних територій. У 2021 році близько 56% населення Землі проживало в містах, порівняно з 15% у 1900 році, 25% у 1950-му та близько 50% у 2020 році [77]. Динаміка урбанізації дещо сповільнюється в найрозвиненіших країнах світу, у той самий час наростає в країнах Азії та Африки, при цьому в загальному до 2050 року очікується збільшення частки міських мешканців до 68% [77]. У 2010 році загальна площа міст у світі становила близько 3% від площі суходолу Землі, причому площа урбанізованих забудованих територій становила близько 0,65%, а глобальна площа водонепроникних поверхонь – 0,45% загальної площі землі (за винятком Антарктиди та Гренландії) [69, 94].

Неперервна урбанізація спільно з глобальними змінами клімату призводять як до погіршення забезпеченості водними ресурсами, так і до збільшення частоти і масштабів затоплень територій. Реагуючи на ці виклики, ООН оголосила 2005–2015 роки Міжнародним десятиліттям дій "Вода для життя" та реалізувала протягом цього десятиліття комплекс заходів, спрямованих на забезпечення наявності безпечних водних ресурсів у всіх регіонах світу [73]. У 2018–2028 роках під егідою ООН, проводиться Міжнародне десятиліття дій "Вода для сталого розвитку" [78], де основний акцент вже робиться на раціональне використання водних ресурсів.

Важливим компонентом інженерної інфраструктури на забудованих територіях є системи дощового водовідведення. Від ефективності їх функціонування систем залежить рівень благоустрою забудованих територій [62, 106, 112, 114], безпека на транспортних шляхах [109] та екологічний стан прилеглих поверхневих водойм [71].

Наймасштабніші затоплення відбуваються в тих частинах урбанізованих територій, де відсутні системи поверхневого водовідведення. На початок 2011 року загальна довжина вулиць з твердим покриттям по Україні становила 143,2 тис. км, з якої лише 8,7 тис. км (близько 6,1% від загальної протяжності) були обладнані системою дощового водовідведення, а 4,7 тис. км (3,3%) були обладнані мережею централізованого водовідведення, в яку надходив поверхневий стік. Решта вулиць з твердим покриттям (близько 130 тис. км, або 90,6% від загальної довжини) не були обладнані системами дощового водовідведення [25]. Виходячи з середньої нормативної відстані між дощоприймачами в 60–70 м ДБН В.2.5-75:2013 [7], загальна кількість дощоприймачів в Україні становить понад 200 тис. одиниць.

Водоприймальні пристрої різних типів і конструкцій є важливим елементом мереж дощового водовідведення, вони забезпечують приймання всіх видів поверхневих стічних вод (дощових, талих та поливо-мийних) безпосередньо з прилеглих поверхонь. Відтак гідравлічна характеристика водоприймального пристрою впливає на гідравлічні параметри водовідвідної мережі в цілому, а відтак – на умови підтоплення прилеглої урбанізованої території [41, 67, 116].

Проектування дощоприймачів різних типів в Україні регламентується рядом нормативних документів, зокрема ДБН В.2.5-75:2013 [7], ДБН Б.2.2-12:2019 [4], ДБН В.2.3-5:2018 [5], а також ДСТУ Б В.2.5-26-2005 [11], ДСТУ Б В.2.6-106:2010 [12], ДСТУ Б EN 1433:2016 [13], ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14]. Країнами ЄС була розроблена стратегія боротьби з підтопленням Directive 2007/60/ЕС з оцінки та управління ризиками підтоплення [57] а проектування систем дощового водовідведення та їх елементів регламентується за BS EN 124:1994 [49]. У США проектування систем дощового водовідведення та їх елементів нормується циркулярами HEC-12 [83], HEC-21 [130] та HEC-22 [48].

Відведення поверхневих стічних вод з довільного урбанізованого басейна стоку забезпечують шляхом комплексного вирішення питань організації рельєфу, влаштування відкритої та закритої мереж водовідведення, що

включають водостічні труби (водостоки), лотки, кювети, дощоприймальні колодязі, а також використання регулювальних, інфільтраційних та локальних очисних споруд поверхневого стоку [16, 41, 122].

Дощоприймальні колодязі згідно вимог [7] розташовують у понижених місцях житлових кварталів, внутрішніх дворах та зелених зонах; на виїздах із внутрішніх дворів та кварталів; на перехрестях і пішохідних переходах з боку притоку поверхневих вод; на міських площах, вулицях і проїздах; на затяжних ділянках та в кінці спусків; у знижених місцях при пилкоподібному профілі лотків вулиць та проїздів.

За конфігурацією та протяжністю дощоприймачі поділяють на точкові та лінійні. Точкові дощоприймачі характеризуються компактним розташуванням у пониженій частині підбасейна стоку. Лінійні дощоприймальні елементи, до яких належать лотки різних видів, є лінійними інженерними мережами, які закінчуються зазвичай приєднанням до дощоприймальних колодязів.

Точкові дощоприймачі призначені в основному для розташування на проїжджих частинах вулиць та на інших удосконалених водонепроникних покриттях, та повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.5-26:2005 [8]. Вимоги до лінійних дощоприймачів регламентуються в Україні адаптованим європейським нормативним документом ДСТУ Б EN 1433:2016 [13].

Загалом, від способу забору поверхневого стоку точкові дощоприймачі поділяють на решітчасті, бордюрні, комбіновані решітчасто-бордюрні та щілинні дощоприймачі (рис. 1.1).

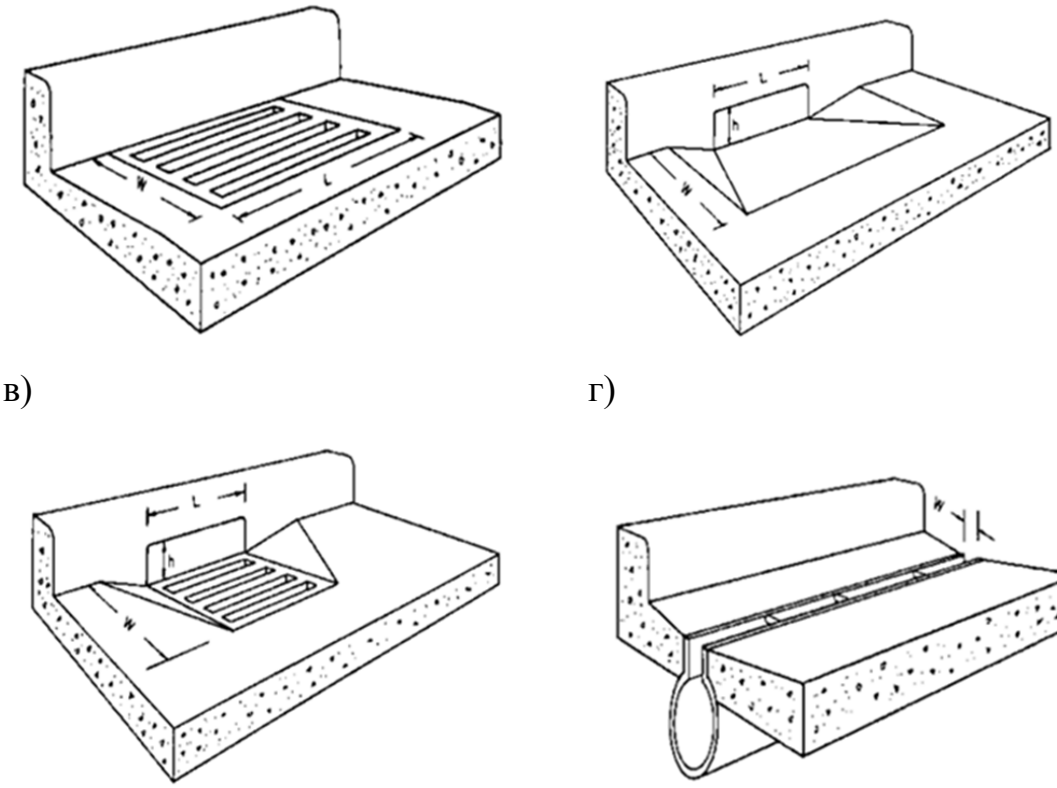
Основні переваги дощоприймачів точкового типу:

– дозволяють ефективно приймати великі витрати поверхневого стоку з локальних підбасейнів стоку;

– стійкі до забиття сміттям та до замулення;

– легко можуть бути обладнані гідрозатворами, осадовими приямками, корзинами для затримання крупного сміття, а також, за необхідності, механічними або сорбційними фільтрами, суттєво зменшуючи скид забруднювальних речовин у систему дощового водовідведення.

а) б)



в) г)

Рис. 1.1. Види точкових дощоприймачів за класифікацією HEC-22 [124]:
а – решітчастий; б – бордюрний; в – комбінований решітчасто-бордюрний;
г – щілинний

Основні недоліки точкових дощоприймачів:

– потребують великої протяжності поверхневого потоку, що спричиняє при зливах великої інтенсивності локальне затоплення частини урбанізованої території;

– потреба в регулярному технічному обслуговуванні;

– висока капітальна вартість, зумовлена необхідністю будівництва дощоприймальних колодязів.

Ефективна робота точкових дощоприймачів вимагає обрання правильного місця розташування та обґрунтованого розрахунку пропускної здатності дощоприймача та відвідного трубопроводу з урахуванням гідрологічних характеристик відповідного урбанізованого підбасейна стоку.

1.2. Конструктивні особливості точкових дощоприймачів

1.2.1. Решітки дощоприймачів

Дощоприймачі, призначені для збору та ефективного відведення дощової води, можуть бути виготовлені із різноманітних матеріалів відповідно до їх функціонального призначення та технічних вимог до міцності та естетичних характеристик. Ці вироби також можуть варіювати за геометричними параметрами, щоб витримувати різні рівні навантажень, які встановлені у вимогах, передбачених в нормативному документі [11]. У разі потреби дощоприймачі можуть бути оснащені різноманітними додатковими елементами, такими як гідрозатвор, система для збору та видалення піску або контейнер для сміття, з метою запобігання забрудненню та засміченню мережі дощового водовідведення. Мінімальні розміри дощоприймальних колодязів у плані приймають згідно з ДБН В.2.3-5:2018 [6].

Залежно від габаритних розмірів та місця встановлення дощоприймачів, ДСТУ Б В.2.5-26:2005 [11] встановлює основні вимоги до конструкційних параметрів дощоприймачів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Типи, розміри та основні параметри дощоприймачів згідно ДСТУ Б В.2.5-26:2005 [11]

Тип	Найменування	Площа отворів, не менше, $м^2$	Номінальне навантаження, кН	Рекомендоване місце влаштування
Д(А15)	Дощоприймач малий	0,05	15	пішохідна зона
ДБ1* ДБ2* (В125)	Дощоприймач великий	0,075	125	автостоянка і проїжджа частина міських парків
ДМ1 ДМ2 (С250)	Дощоприймач магістральний	0,075	250	магістральні автомобільні дороги з інтенсивним рухом
ДС1 ДС2 (D400)	Дощоприймач над важкий	0,025	400	зони високих навантажень

У решітках дощоприймачів отвори мають бути розташовані рівномірно по всій площі решітки, забезпечуючи рівномірний розподіл води; при цьому площа отворів водоприймальної решітки повинна становити не менше 30% від її загальної площі-брутто. У решітках типу Д(А15) і ДБ (В125) розміри пазів мають відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.5-26-2005 [11]:

– за ширини пазів від 8 до 18 мм їх довжина не обмежується;

– за ширини пазів більше 18 до 25 мм довжина – не більше 170 мм.

У решітках типів ДМ(С250) і ДС(D400) розміри пазів залежать від орієнтації їх поздовжніх осей, в залежності від напрямку транспортного руху, та повинні відповідати до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Розміри пазів у решітках типів ДМ(С250) і ДС(D400) згідно вимог ДСТУ Б В.2.5-26-2005 [11]

Орієнтація паза відносно напрямку руху потоку	Тип	Ширина, мм	Довжина, мм
Від 0° до 45°	ДМ(С250), ДС(D400)	16–42	≤ 170
Від 45° до 135°	ДМ (С250)	16–42	без обмеження
Від 135° до 180°	ДС(D400)	20–42	без обмеження

Україна використовує різноманітні типи дощоприймачів, залежно від місця влаштування. Усі вони відповідають стандартам ДСТУ Б В.2.5-26-2005. У пішохідних зонах використовують дощоприймачі малі Д(А15) в поєднанні з лотками для ефективнішого перехоплення потоку. Для доріг з автомобільним рухом використовують дощоприймачі ДБ1, ДБ2, ДМ1, ДМ2. Зазвичай це чавунні решітки прямокутної форми. Додатково можуть бути обладнані замком. На розглянутих прикладах усі решітки мають отвори спеціальні для встановлення замка. Розташування стержнів в середині решітки може бути різного напрямку відносно бордюрного каменя або течії. Наприклад, на рис. 1.2 представлений дощоприймач типу ДМ (С250), в якого стержні решітки розташовані під кутом 45° відносно бордюрного каменю.

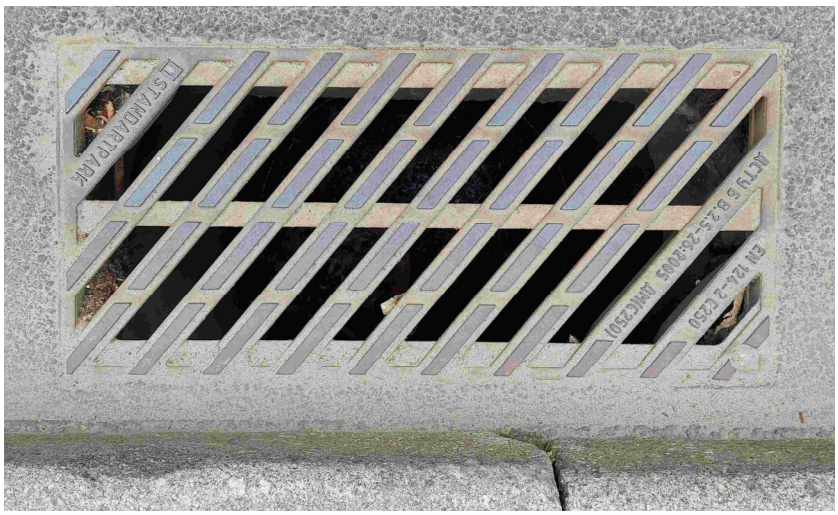


Рис. 1.2. Дощоприймальна решітка типу ДМ (С250) з габаритними розмірами 800×400 мм, периметром вхідного отвору 770×320 мм та поздовжніми отворами (шпаруватість ε=0,310)

Найпоширеніші дощоприймальні решітки мають отвори, які орієнтовані паралельно або поперек відносно бордюрного каменя (рис. 1.3–1.4 відповідно). Шпаруватість решіток визначають як відношення сумарної площі отворів ω_o до загальної площі водоприймальної решітки ω_{tot}:

$$\varepsilon = \omega_o / \omega_{tot} . \qquad (1.1)$$

Рис. 1.3. Дощоприймальна решітка типу ДБ2(В125) з габаритними розмірами 850×400 мм, периметром вхідного отвору 810×380 мм та поздовжніми отворами (шпаруватість ε=0,310)

На (рис. 1.4) зображено дощоприймальну решітку, у якій ширші сторони отворів розташовані перпендикулярно до бордюрного каменю.

Рис. 1.4. Дощоприймальна решітка типу ДБ2(В125) з габаритними розмірами 800×400 мм, периметром вхідного отвору 778×378 мм та поперечними отворами (шпаруватість ε=0,310)

У США було проведено цілий ряд досліджень для визначення пропускної здатності дощоприймальних решіток (Brown et al., 1992; Burgi et al., 1977; Burgi, 1978a; Burgi, 1978b; FHWA, 1977; Pugh, 1980) [48, 50, 51, 52, 63, 108]. Параметри найтиповіших дощоприймальних решіток, які використовуються в США, наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні параметри решіток дощоприймачів, що застосовуються в США [48, 50, 51, 52, 63, 108]

Тип	Опис решітки
Р – 50	Решітка з паралельними стрижнями. Товщина стрижня 10 мм. Ширина решітки від 381 мм до 914 мм, відстань між стрижнями 35 мм. Довжина решітки від 610 мм до 1219 мм, відстань між стрижнями 102 мм.
Р – 50 х 100	Решітка з паралельними стрижнями. Діаметр стрижня 10 мм. Ширина решітки від 381мм до 914мм, відстань між стрижнями 19 мм. Довжина решітки від 610 мм до 1219 мм, відстань між поперечними стрижнями 96 мм.

Таблиця 1.3 (продовження)

Тип	Опис решітки
Р – 30	Решітка з паралельними стрижнями. Діаметр паралельних стрижнів 10 мм. Ширина решітки може бути від 381мм до 914мм, відстань між паралельними стрижнями 19 мм. Довжина решітки від 610 мм до 1219 мм, відстань між центрами поперечних стрижнів 286 мм.
Криволінійні лопаті (Curved Vane)	Решітка з поперечними стрижнями у формі криволінійної лопаті. Висота лопаті 76 мм, а ширина 65мм (Довжина від крайньої лівої до крайньої верхньої точки). Ширина решітки може бути від 381мм до 914мм. Довжина решітки від 610 мм до 1219 мм, відстань між поперечними стрижнями 114 мм.
45° – 60 заокруглений брусок нахилу (Tilt Bar)	Решітка з похилими поперечними брусками під кутом 45^0 із заокругленими кромками у верхній частині . Висота бруска 76 мм, а його товщина 27 мм. Ширина решітки може бути від 381мм до 914мм, а ширина між поперечними брусками 102мм. Довжина решітки від 610 мм до 1219 мм, відстань між паралельними стрижнями 57 мм.
45° – 85 заокруглений брусок нахилу (Tilt Bar)	Решітка з похилими поперечними брусками під кутом 45^0 із заокругленими кромками у верхній частині . Висота бруска 76 мм, а його товщина 27 мм. Ширина решітки може бути від 381мм до 914мм, а ширина між поперечними брусками 102мм. Довжина решітки від 610 мм до 1219 мм, відстань між паралельними стрижнями 83 мм.
30° – 85 заокруглений брусок нахилу (Tilt Bar)	Решітка з похилими поперечними брусками під кутом 30^0 із заокругленими кромками у верхній частині . Висота бруска 64 мм, а його товщина 22 мм. Ширина решітки може бути від 381мм до 914мм, а ширина між поперечними брусками 102мм. Довжина решітки від 610 мм до 1219 мм, відстань між паралельними стрижнями 83 мм.
Сітчаста решітка (Reticuline)	Решітка з стрижнями у формі сітки. Товщина поперечних стержнів 6 мм. А відстань між ними 102 мм. Ширина решітки може бути від 381мм до 914мм. Довжина решітки від 610 мм до 1219 мм. Паралельні стрижні виконані у формі латинської букви V, товщина стрижня 5 мм, у найширшому місці 51мм.

1.2.2. Решітки водоприймальних трапів

Окремим типом водоприймачів є трапи. Розташовані всередині приміщень, вони відіграють ключову роль у відведенні води з побутових і комерційних приміщень, забезпечуючи захист від підтоплення підлоги.

Нормативні документи [10, 60] регламентують не гідравлічну характеристику трапа, а лише його мінімально допустиму пропускну здатність при максимально допустимому напорі.

Згідно вимог п. 4.2.1 діючого в Україні стандарту [10] "трапи типів Т50, ТК50, ТВ50 повинні забезпечувати відведення стічних вод у кількості не менше 0,7 л/с; трапи типів Т100м, ТК100м, ТВ100 – не менше 2,1 л/с; трапи типів Т100б і ТК100б – не менше 3,7 л/с при середній висоті шару води перед зовнішньою кромкою решітки не більше (20+3) мм".

У документі [10] використовується таке маркування трапів:

Т50 — трап з прямим відводом з умовним проходом 50 мм;

ТК50 — трап з косим відводом з умовним проходом 50 мм;

Т100м — трап з прямим відводом з умовним проходом 100 мм, малий;

ТК100м — трап з косим відводом з умовним проходом 100 мм, малий;

Т100б — трап з прямим відводом з умовним проходом 100 мм, великий;

ТК100б — трап з косим відводом з умовним проходом 100 мм, великий;

ТВ50 — трап з вертикальним відводом з умовним проходом 50 мм;

ТВ100 — трап з вертикальним відводом з умовним проходом 100 мм.

Згідно з вимогами діючого в країнах ЄС документу EN 1253-1:2002, пропускна здатність водоприймальних трапів різного діаметра повинна відповідати вимогам, представленим в табл. 1.4.

Таблиця 1.4. Мінімальна пропускна здатність водоприймальних трапів, що встановлюються на підлозі за вимогами EN 1253-1:2002 [60]

Номінальний вхідний розмір		Пропускна здатність Q, дм^3/с	Напір води a, мм
DN/OD	*DN/ID*		
32	30	0,4	20
40	40	0,6	
50	50	0,8	
63	50	0,8	
75	70	0,8	
90	75	0,8	
100	100	1,4	
110	100	1,4	
125	125	1,4	
160	150	2,8	
200	200	4,0	

У роботах Martins et al. (2018), Rubinato et al. (2018) [98, 112] представлені результати експериментального дослідження трапів з різною конфігурацією решіток. Досліджено 10 різних решіток для трапів (рис. 1.5). Для кожної решітки було виконано дослідження у діапазоні витрат притоку від 4 л/с до 10 л/с. Щоб забезпечити надійне кількісне визначення глибини та швидкості потоку для кожного тесту, потоки залишали для стабілізації протягом 5 хв перед тим, як реєстрували швидкість потоку та глибину.

Результати досліджень підтверджують що геометрія кожної решітки сильно впливає на потік, що надходить в каналізаційну мережу. При порівнянні результатів для аналогічних гідравлічних умов, решітка *H* (A_e*=0,0017м*^{2}*;* P_v*=0,5128м*), де A_e – загальна площа отворів; P_v – загальна довжина периметру всіх отворів, є решіткою яка має найменшу пропускну здатність. Тоді як решітка A (A_e*=0,0145м*^{2}*;* P_v*=3,0364м*) забезпечує найкращу пропускну здатність.

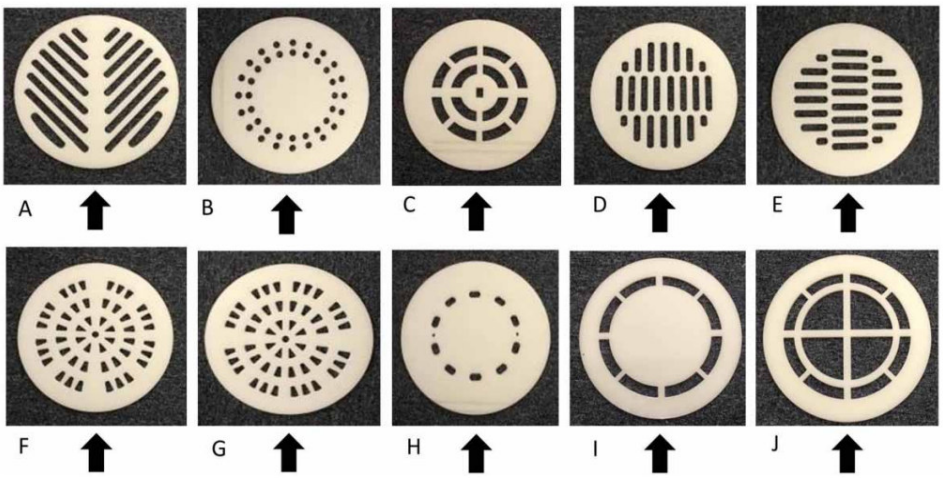


Рис. 1.5. Експериментальні решітки (чорна стрілка вказує на напрямок потоку відносно решітки) [Rubinato_2018] [112]

Потрібно зазначити, що хоча решітка А має найбільший периметр, її площа отворів менша, ніж, наприклад, для решітки J (рис. 1.3). Загалом результати підтверджують, що пропускна здатність кожної окремої решітки сильніше корелює з ефективним периметром, ніж площа отворів; однак індивідуальні конструкції решіток можуть впливати на структуру потоку навколо пустот а, отже, і на ефективність дренажу. Складність геометричної форми решітки трапів ускладнює розрахунок периметру водозливу, для обчислення пропускної здатності у режимі ВШП. Решітки у яких отвори мають заокруглені кути, або широкі пази між отворами, призводить до складності визначення довжини периметра водозливу, тому що важко спрогнозувати напрямок потоку води. Запитання, які утворюються під час аналізу досліджень, мотивують продовжувати здійснювати дослідження різних трапів з різними методами визначення периметру водозливу або швидкості потоку.

1.2.3. Бордюрні та комбіновані дощоприймачі

Бордюрні дощоприймачі (рис 1.4), найбільш ефективні на пологих схилах, у місцях заниження, де вода може збиратися і з потоками, які зазвичай несуть значну кількість плаваючого сміття. Перехоплювальна здатність вхідних отворів, бордюрного дощоприймача, зменшується в міру кута похилу жолоба. Використання бордюрних дощоприймачів, згідно HEC-22 [124] рекомендується

на схилах з поздовжнім похилом менше 3%. Бордюрні дощоприймачі також полегшують прибирання снігу, адже вони не створюють додаткових перешкод для снігоочисної машини. Бордюрні дощоприймачі встановлюють на лицьовій стороні бордюру, а не в лотку паралельно до проїжджої частини (рис 1.6). Це означає, що на смузі руху немає залізних решіток, щоб їх об'їжджали автомобілі чи велосипедисти. Також опорна конструкція, що лежить під ним, не повинна витримувати постійне навантаження від транспорту, це призводить до меншого осідання та пошкодження самого входу.

Комбіновані дощоприймачі (рис. 1.7) об'єднують переваги бордюрних і решітчастих дощоприймачів, забезпечуючи високу пропускну здатність водоприймача. Використовується в конфігурації де присутнє заниження рівня, система для вловлювання сміття може мати бордюрні отвори з обох боків решітки HEC-22 [124].

Рис. 1.6. Високоміцний сталевий бордюрний дощоприймач типу А конструкції компанії Shawnee Steel & Welding (США)

Рис. 1.7. Комбінований посилений чавунний дощоприймач EPA 6" (American Cast Iron Products, Inc.)

1.3. Гідравлічний розрахунок точкових дощоприймачів

Проблемам гідравлічного моделювання потоків дощових стічних вод у спорудах систем водовідведення присвячено праці ряду українських вчених, зокрема Большакова В.О., Василенка О.А., Вовк Л.І., Гнатіва Р.М., Жука В.М., Константінова Ю.М., Матлая І.І., Попадюка І.Ю., Попова В.М., Ткачука О.А., Ткачука С.Г., Чернишева Д.О., Шевчук О.В., Ярути Я.В. та ін. За кордоном цією проблематикою займалися Akan O., Cárdenas-Quintero M., Cosco C., Gómez M., Hager W., Hao X., James W., Mrowiec M., Rossman L., Rubinato M., Russo B., Słyś D., Stec A., Tellez-Alvarez J., Zachoval Z. та ін.

1.3.1. Диференціальні рівняння, що описують течії в точкових дощоприймачах

Активний науковий інтерес до проблематики точкових дощоприймачів та велика кількість наукових публікацій за останніх два десятиліття в області досліджень точкових дощоприймачів, свідчить про важливість та актуальність цієї проблеми. Нижче наведено поширену числова модель симуляції, що є модифікованою моделлю Kawaike [87]. Вона складається з горизонтальної 2D моделі потоку та 2D моделі пристінного шару, та моделює витрату потоку при взаємодії між пристінним та нижнім шаром за допомогою рівняння (1.2) та рівняння (1.3).

Диференціальні рівняння, які використовуються для двовимірної моделі потоку, складаються з рівняння нерозривності потоку (1.1) та двох рівнянь руху по осях *x* та *y* (1.2–1.3):

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (uh)}{\partial x}+\frac{\partial (vh)}{\partial y}=-q_s \tag{1.1}$$

$$\frac{\partial (uh)}{\partial t}+\frac{\partial (u^2h)}{\partial x}+\frac{\partial (vuh)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial x}-\frac{gn^2uh\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} \tag{1.2}$$

$$\frac{\partial (vh)}{\partial t}+\frac{\partial (uvh)}{\partial x}+\frac{\partial (v^2h)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial y}-\frac{gn^2vh\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} \tag{1.3}$$

де h – глибина води, H – рівень води, u, v – швидкість у напрямку x, y відповідно, q_s – питома витрата дощового стоку на одиницю площі (якщо його значення від'ємне, це означає витрату затоплення); її обчислюють лише на решітці дощоприймача, g – прискорення вільного падіння, n – коефіцієнт шорсткості поверхні за Маннінгом.

Диференціальні рівняння – математично складні, з невизначеними граничними умовами, часто – з розривом суцільності потоку, що робить задачу їх аналітичного розв'язку практично нереальною, а потребує застосування методів обчислювальної гідродинаміки.

Додатково, при врахуванні часткових умов розташування водоприймача (тип, шорсткість та похил поверхні, конфігурація та розміри отворів водоприймача) система диференціальних рівнянь (1.1)–(1.3) повинна бути доповнена відповідними геометричними параметрами та коефіцієнтами опору, більшість з яких не може бути достовірно визначена шляхом чисельного моделювання. Відповідно, чисельне моделювання складних гідродинамічних процесів, які мають місце при течії поверхневого стоку крізь точкові дощоприймачі, призводить до суттєвих похибок чисельного комп'ютерного моделювання таких течій.

1.3.2. Експериментальні дослідження гідравлічних параметрів точкових водоприймачів

Враховуючи математичну складність та потенційно високі похибки чисельного моделювання течій крізь точкові водоприймачі, основним науковим методом їх дослідження залишається експериментальне дослідження на фізичних моделях різних типів і масштабів. У табл. 1.5 зведено інформацію з більше ніж 20 наукових публікацій, присвячених дослідженню різноманітних типів та конфігурацій дощоприймачів різних типів. Аналіз наведених даних відкриває можливості для розуміння впливу різних параметрів на функціональність точкових дощоприймачів та визначення їхнього оптимального використання в умовах змінного клімату та урбанізації.

Таблиця 1.5. Параметри лабораторних установок для експериментального дослідження дощоприймачів

Тип водоприймача	Масштаб	Довжина та ширина, м	Похил	Витрата, л/с	Посилання
1	2	3	4	5	6
Решітчастий	1:3	12,3 × 0,6	i_x = 0–0,1 i_y = 0–0,1	≤ 6,5	Choi et al., 2016 [54]
Решітчастий	1:1	5,5 × 3	i_x = 0,1 i_y = 0,04	25 – 200	Cosco et al. (2020) [55]
Решітчастий	1:1	5,5 × 3	i_x = 0–0,1 i_y = 0–0,04	20 – 200	Gomes & Russo, 2011 [66]
Решітчастий, бордюрний та комбінований	1:3	20 × 3,5	i_x = 0,01 i_y = 0,01	≤ 32	Guo et al. (2009) [68]
Решітчастий	1:1	10 × 1,5	i_x = 0,025–0,1 i_y = 0,025	3 – 21	Kemper & Schlenkhoff, 2019 [88]
Решітчастий	1:2	11 × 1,25	i_x = 0,02–0,1 i_y = 0,02–0,1	0,5 – 6	Kim et al., 2016 [89]
Решітчастий	1:10	6 × 0,5	i_x = 0 i_y = 0	0,8 – 5	Lee et al., 2012 [93]
Решітчастий	1:6	8,2 × 4	i_x = 0,001 i_y = 0	4 – 10	Rubinato et al., 2018 [112]
Решітчастий	1:1	4,27 × 1,83	i_x = 0–0,033	≤ 50	Sabtu et al., 2016 [118]
Решітчастий	1:2	1,4 × 1	i_x = 0,05–0,2 i_y = 0,025	3,8 – 7,6	Wu et al., 2015 [127]
Решітчастий	1:1	2,4 × 11,83	i_x = 0,02 i_y = 0,025	2 – 12	Wakif & Sabtu (2019) [125]
Решітчастий	1:4	b = 0,95	i_x = 0,005–0,12 i_y = 0,002–0,004	≤ 7,19	Pazmino et al. (2017) [107]
Решітчастий	1:5	b = 0,60	i_x = 0–0,1 i_y = 0 – 0,04	≤ 1,97	Sabogal & Hernandez (2011) [117]

Таблиця 1.5 (продовження)

1	2	3	4	5	6
Решітчастий	1:1	5,3 × 3	i_x = 0,001–0,1 i_y = 0,05	50 – 250	Cardenas et al. (2017) [53]
Решітчастий, бордюрний та комбінований	1:3	6 × 0,75	i_x = 0,005–0,14 i_y = 0,03	≤ 12	Lara & Araujo (2011) [90]
Решітчастий, бордюрний та комбінований	1:1	14 × 3,5	$i_x \leq 0,03$ $i_y \leq 0,05$	≤ 180	Morales (2016) [101]
Решітчастий, бордюрний та комбінований	1:1	14 × 3,5	$i_x \leq 0,03$ $i_y \leq 0,03$	≤ 180	Kaliski & Cortez (2008) [84]
Решітчастий, бордюрний та комбінований	1:1	14 × 3,5	$i_x \leq 0,03$ $i_y \leq 0,03$	≤ 120	Kaliski & Cortez (2004, 2005) [86]
Решітчастий, бордюрний та комбінований	1:1	5 × 3	i_x = 0,005–0,04 i_y = 0–0,02	≤ 60	Despotovice et al. (2005) [58]
Решітчастий, бордюрний та комбінований	1:1,28	4,9 × 1,5	i_x = 0,005–0,066 i_y = 0,02–0,076	≤ 150	Spaliviero et al. (2000) [119]

Розглянуті дослідження включають решітчасті, бордюрні та комбіновані варіації дощоприймачів. Практично усі дослідні установки були в масштабі 1:1, що забезпечує дослідження реальних дощоприймачів. Завдяки такому масштабі нівелюються можливі похибки, при масштабуванні розмірів і гідравлічних характеристик. Великі витрати та похил водонепроникної поверхні забезпечує максимально наближені умови до реальних. Такі умови забезпечують якісне моделювання та результати, які допомагають знайти слабкі гідравлічні характеристики дощоприймачів.

Зазвичай при розрахунках пропускної здатності дощоприймача використовуються два основних режими роботи. Перший режим, відомий як водозлив з широким порогом (ВШП), застосовується, коли потік води у течії

вважається недостатньо сильним, і дощоприймач при цьому не затоплений. У другому режимі, відомому як режим витікання через отвір, пропускна здатність розглядається, як витікання через отвір, коли гідравлічний напір великий, і дощоприймальна решітка повністю покрита водою.

Проте, застосування такого підходу, який ґрунтується лише на цих двох режимах роботи, може бути деякою спрощеністю моделі, оскільки він не враховує реального поступового переходу між цими режимами, який може відбуватися поступово, а не миттєво.

У ряді наукових праць обґрунтовується та підтверджується наявність трьох характерних режимів непідтоплених течій крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід", в яких окрім режиму ВШП та режиму отвору розглядають додатково третій, перехідний режим, який найчастіше називають комбінованим чи змішаним [68, 132].

1.3.3. Режим водозливу з широким порогом

1.3.3.1. Залежності для визначення пропускної здатності водоприймачів у режимі водозливу. За невеликих значень притоку поверхневого стоку при частковому покритті водоприймальної решітки шаром води водоприймачі працюють у режимі водозливу з широким порогом (ВШП) [91, 95, 113].

Пропускну здатність водоприймального пристрою у режимі водозливу визначають за різними модифікаціями рівняння витрати через ВШП, які попри єдність структури відрізняються підходом до визначення всіх трьох визначальних параметрів, що впливають на пропускну здатність ВШП, а саме коефіцієнта витрати, довжини водозливного гребеня та напору на водозливі. Це призводить до істотно відмінних трактувань у визначенні коефіцієнта витрати, а відтак – і до різниці відповідних його значень та до труднощів при порівнянні результатів різних досліджень між собою. З використанням теорії пограничного шару отримано теоретично обґрунтоване рівняння витрати непідтопленого потоку крізь прямокутний ВШП [80, 131]:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_w L_w \sqrt{g} h^{3/2}, \qquad (1.4)$$

де C_w – коефіцієнт витрати ВШП; L_w – ширина водозливу, яка для водоприймачів з багатостороннім притоком води дорівнює периметру водоприймального отвору; h – геометричний напір на водозливі, який визначається як висота розташування вільної поверхні води над площиною порогу водозливу (рис. 1.8).

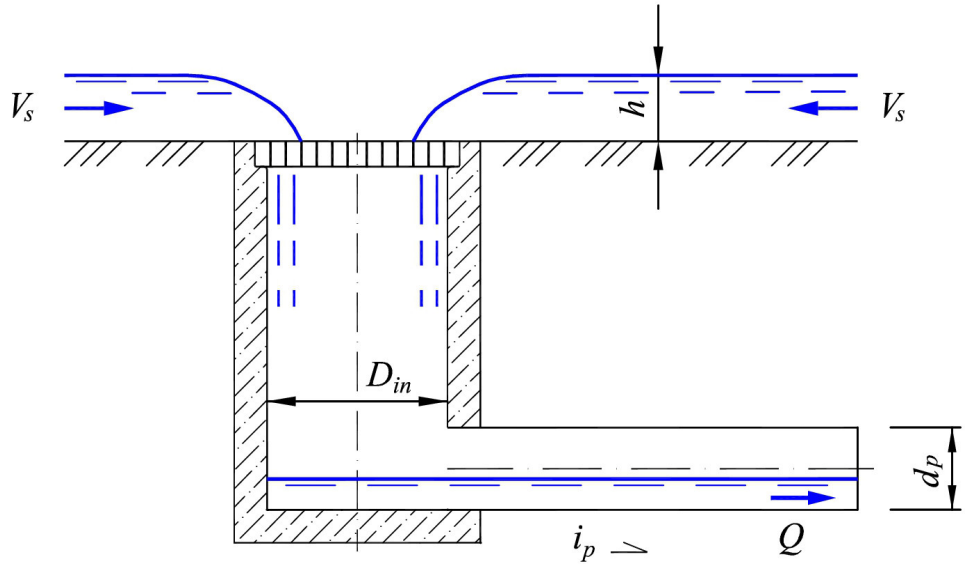


Рис. 1.8. Принципова гідравлічна схема роботи водоприймача в режимі водозливу

Першим фактором, що робить різницю між методами, є сама структура рівняння пропускної здатності ВШП. Відповідно до прийнятих гідравлічних методик, рівняння пропускної здатності (1.4) записують також іншими способами. Всі вони аналогічні до рівняння (1.1), але мають іншу структуру, а відтак коефіцієнти витрати у цих рівняннях суттєво відрізняються за значеннями від коефіцієнта витрати C_w у рівнянні (1.4).

Наприклад, ряд дослідників [105, 116] застосовують рівняння витрати крізь ВШП у формі

$$Q = \frac{2}{3} C_{w.2} L_w \sqrt{2g} h^{3/2}. \qquad (1.5)$$

За такої форми рівняння витрати для ВШП коефіцієнт витрати $C_{w.2} = C_w / \sqrt{3} \approx 0{,}577\ C_w$.

Інші дослідники, наприклад, [68, 70] та ін. застосовують формулу витрати крізь ВШП у вигляді :

$$Q = C_{w.3} L_w \sqrt{2g} h^{3/2}, \tag{1.6}$$

що відповідає $C_{w.3} = 2C_w /(3\sqrt{3}) \approx 0{,}385\ C_w$.

Потрібно зазначити, що в українських галузевих методиках [30, 43] пропускну здатність ВШП визначають за формулою зі структурою, аналогічною до (1.6), але коефіцієнт витрати традиційно позначають як *m*, а також враховують швидкісний напір потоку перед водозливом:

$$Q = mb\sqrt{2g} H^{3/2}, \tag{1.7}$$

де *b* – ширина водозливу; *H* – повний (гідродинамічний) напір *H*:

$$H = h + \frac{\alpha V_w^2}{2g}, \tag{1.8}$$

де α − коефіцієнт кінетичної енергії (коефіцієнт Коріоліса); V_w − середня швидкість течії води перед водозливом.

У випадках, коли можна знехтувати величиною швидкісного напору потоку перед водозливом, *H*=*h*, і використовуваний в українських методиках коефіцієнт витрати *m* чисельно дорівнює коефіцієнту витрати $C_{w.3}$ у рівнянні (1.6), тобто $m = C_{w.3} = 2C_w /(3\sqrt{3}) \approx 0{,}385\ C_w$.

У практичних методиках для гідравлічного розрахунку водоприймачів різних типів, які працюють у режимі водозливу, використовують формули максимально спрощеної структури. Наприклад, нормативний документ HEC-22, розроблений Федеральною адміністрацією автомобільних доріг США HEC-22 [124], який використовують для проектування систем дренажу та поверхневого водовідведення у багатьох країнах світу, при роботі водоприймачів у режимі водозливу рекомендує застосовувати формулу

$$Q = 1{,}66 L_w h^{3/2}, \tag{1.9}$$

що відповідає значенню коефіцієнта витрати в рівнянні (1.1) C_w= 0,974.

В Україні при розрахунку дощоприймачів, що працюють у режимі ВШП, використовують аналогічні до (1.9) спрощені емпіричні рівняння за ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14], як функцію гідродинамічного напору:

$$Q = 1{,}5 L_w H^{3/2}, \tag{1.10}$$

або залежно від геометричного напору [30, 43]:

$$Q = 1{,}55 L_w h^{3/2}. \tag{1.11}$$

Коефіцієнт пропорційності 1,55 у формулі (1.11) відповідає значенню коефіцієнта витрати в рівнянні (1.4) C_w= 0,909, що на 6,7% менше, ніж коефіцієнт витрати, рекомендований HEC-22. З іншого боку, коефіцієнт 1,55 у рівнянні (1.11) відповідає значенню m=0,350. Згідно ДСТУ-Н Б В.2.5.-61:2012 [14] режим водозливу має місце за умови:

$$H \le \frac{1{,}33\omega_o}{L_p}, \tag{1.12}$$

де L_p − довжина периметру решітки.

Використання повного напору потоку при гідравлічному розрахунку ВШП регламентується стандартом ASTM D5614-94 [45]. Саме цей підхід застосовувався у більшості досліджень ВШП у лотках і каналах, зокрема [28, 36, 38, 46, 70, 110, 138] та ін. Цей підхід інколи застосовують також і при визначенні пропускної здатності водоприймачів різних типів. Наприклад, при дослідженні впливу забиття решіток на пропускну здатність водоприймача [72] застосовували рівняння витрати (1.9), але з повним напором H замість геометричного напору h:

$$Q = C'_{w.3}\, L_w \sqrt{2g} H^{3/2}. \tag{1.13}$$

Порівняння рівнянь (1.6) та (1.11) дає можливість отримати залежність між відповідними коефіцієнтами витрати у вигляді:

$$C'_{w.3} = C_{w.3}\left(1 + \frac{\alpha V^2}{2gh}\right)^{3/2}. \tag{1.14}$$

Важливою проблемою застосування повного напору для водоприймачів є багатосторонній притік води, характерний для переважної більшості з них. Нормальна глибина потоку перед водозливом h має місце вверх проти течії на відстані не менше (3–5)h від передньої грані водозливу [80, 36]. У випадку влаштування ВШП у каналах призматичного поперечного перерізу точність наближення до глибини h, а відтак і відстань від водозливу до контрольного перерізу, не впливає на ширину водозливного фронту та на значення середньої швидкості потоку перед водозливом V_w. З іншого боку, при багатосторонньому притоці поверхневого стоку до водоприймача має місце зовсім інша картина. Враховуючи багатосторонній притік води до водоприймача, периметр водозливу L_w, який відповідає непониженій глибині h перед водозливом, різко зростає зі збільшенням відстані до входу у водоприймач, відтак середня швидкість потоку по мірі віддалення від контуру вхідного отвору решітки швидко зменшується. Таким чином, виникає проблема неоднозначності задання напору h та швидкості V_w, які, для коректності застосування методу, повинні бути визначені для одного і того ж контурного перерізу перед решіткою водоприймача.

Виходячи з цих міркувань, у якості ширини ВШП при гідравлічних розрахунках водоприймачів використовують, як правило, довжину периметра вхідного отвору решітки [70, 134, 131, 30, 43]. З іншого боку, застосування в якості ширини ВШП зовнішнього периметра решітки вимагає визначення середньої швидкості та глибини потоку безпосередньо на її вхідному контурі, що є непростою гідравлічною проблемою, враховуючи різко неплавнозмінний характер течії у контурному вертикальному перерізі потоку, проведеному по периметру вхідного отвору решітки водоприймача.

Наступним технічним фактором за яким дещо відрізняються залежності для визначення пропускної здатності водоприймачів у режимі ВШП, є врахування чи неврахування коефіцієнта стиснення потоку стержнями водоприймальних решіток. Найчастіше розрахункову ширину ВШП L_w для водоприймачів приймають такою, що дорівнює частині периметра решітки L_p, з

якої має місце притік води, тобто $L_w = L_p$. Враховуючи наявність у решітках перегородок, часом використовують підхід, при якому ширину водозливу L_w визначають як сумарну ширину отворів на зовнішньому контурі решітки зі сторони притоку води [68]. Тоді у формулу для визначення пропускної здатності додатково вводять безрозмірний коефіцієнт стиснення потоку на ВШП N_L, який визначається як відношення відповідних периметрів:

$$N_L = L_w / L_p . \tag{1.15}$$

У такому разі коефіцієнт витрати, визначений з врахуванням коефіцієнта стиснення N_L, при всіх однакових умовах буде пропорційно більший за той самий коефіцієнт, визначений за повним зовнішнім периметром:

$$C_{w.N} = C_w / N_w . \tag{1.16}$$

Аналіз гідравлічної картини течій крізь водоприймачі різних типів вказує на те, що коефіцієнт стиснення потоку в режимі ВШП потрібно враховувати для бордюр них та для комбінованих дощоприймачів. Для ґратчастих дощоприймачів з горизонтальною водоприймальною решіткою врахування коефіцієнта стиснення виглядає недостатньо обґрунтованим, оскільки кінцевим перерізом течії крізь ВШП є вертикальний контурний переріз вхідного отвору решітки, а стержні решітки розташовані нижче за течією і безпосереднього обмежувального впливу на водозливний потік не мають. Разом з тим, стержні решітки обмежують вільні струмені води на вході у камеру водоприймача, відтак, задача з гідравлічної точки зору все-таки є складнішою, ніж у випадку непідтоплених одноступінчастих контурних чи кільцевих перепадів.

1.3.3.2. Залежності для коефіцієнтів витрати ВШП. У загальному випадку коефіцієнт витрати ВШП залежить від цілого ряду вхідних параметрів [131, 138]:

$$C_w = f(\delta / h; P / h; b / h; k / h; \mathrm{Re}; \mathrm{Fr}; \mathrm{We}) \tag{1.17}$$

де δ – довжина порогу водозливу в напрямку течії; P – висота порогу водозливу; b – ширина водозливу (рис. 1.10); k – шорсткість поверхні водозливу; Re, Fr та We – критерії Рейнольдса, Фруда та Вебера відповідно.

Для визначення числа Рейнольдса для потоків через ВШП використовується:

$$\mathrm{Re} = \frac{Qh}{\omega v}, \tag{1.18}$$

де Q – об'ємна витрата потоку; h – гідравлічний напір над водозливом; ω – площа перерізу потоку; v – кінематична в'язкість рідини. За допомогою отриманого значення можна визначити, буде потік рідини ламінарним чи турбулентним, залежно від значень параметрів водозливу та характеристик рідини, що протікає через нього.

Число Фруда в Україні визначають як:

$$Fr = \frac{V^2}{gh}, \tag{1.19}$$

де V – швидкість потоку; h – гідравлічний напір над водозливом, тоді як в більшості англомовних методик прийнято:

$$Fr^* = \frac{V}{\sqrt{gh}} \tag{1.20}$$

Критерій Вебера для потоків на ВШП визначається як:

$$We = \frac{\rho L v^2}{\sigma} \tag{1.21}$$

де ρ – густина рідини; L – ширина порогу водозливу; v – швидкість потоку; σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

Принципова схема стенду для експериментального визначення коефіцієнта витрати ВШП за міжнародним стандартом ISO 3846 наведена на рис. 1.9.

Значення коефіцієнта витрати ВШП, рекомендовані європейським нормативним документом ISO 3846:2008 [80], наведені в табл. 1.6. Проте, діапазони значень h/P та h/δ, для яких наведені значення коефіцієнта витрати ВШП в [80], мають невелике практичне значення для гідравлічного розрахунку

водоприймальних елементів, оскільки в переважній більшості водоприймачі характеризуються нульовою висотою порогу P=0, що відповідає відносному напору $h/P \to \infty$, тоді як максимальне значення h/P ISO 3846:2008 становить лише 1,6. З іншого боку, ВШП на вході у водоприймачі характеризуються особливо великими значеннями товщини порогу, тоді як мінімальне значення h/δ у [80] становить 0,1.

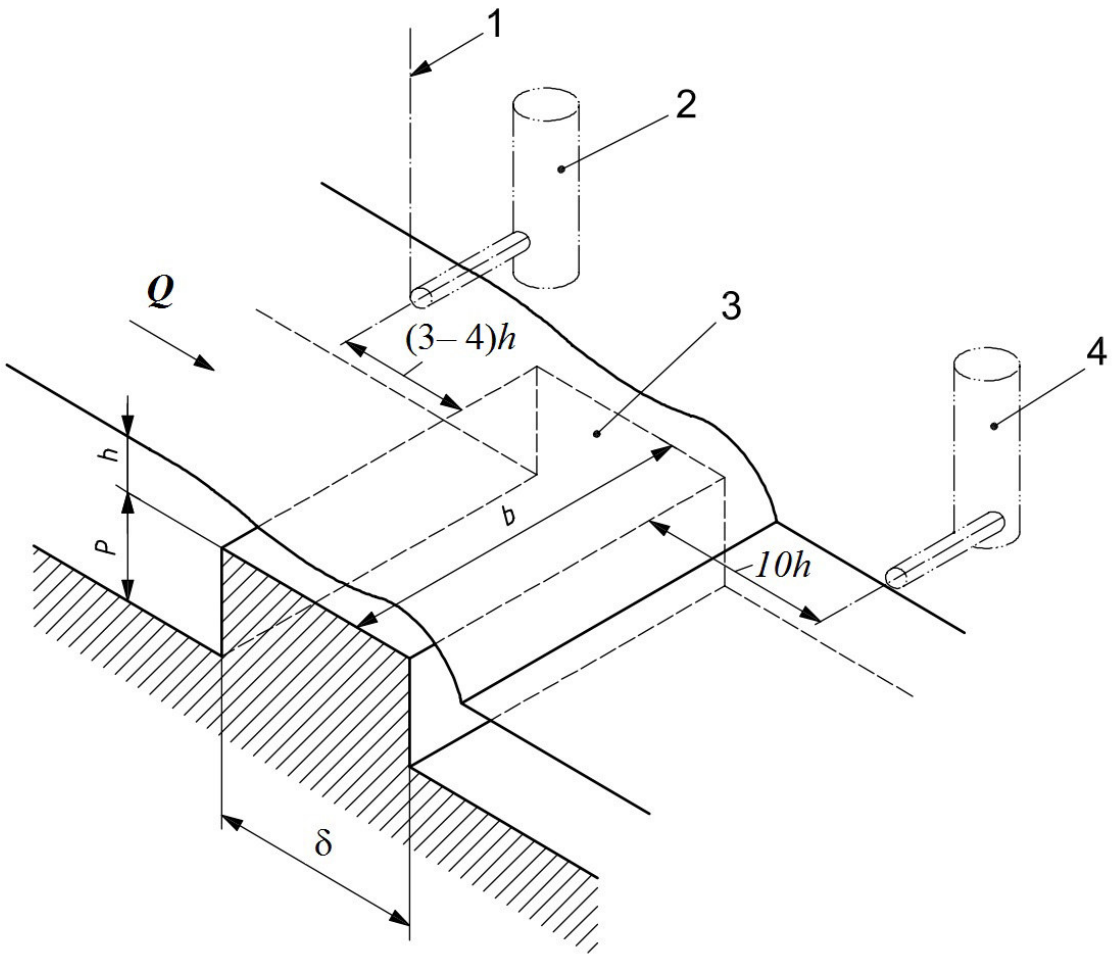


Рис. 1.9. Принципова схема виконання гідравлічних випробувань на ВШП за вимогами ISO 3846 [80]: 1 – рівнемір; 2, 4 – колодязі-стабілізатори напору відповідно у верхньому та у нижньому б’єфах; 3 – поріг ВШП

Таблиця 1.6 Коефіцієнт витрати ВШП (за ISO 3846:2008 [80])

	h/P															
***h*/δ**	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
0,1	0,85	0,855	0,864	0,873	0,882	0,892	0,901	0,911	0,921	0,929	0,935	0,941	0,946	0,953	0,961	*0,972*
0,2	0,85	0,855	0,864	0,873	0,882	0,892	0,901	0,911	0,921	0,929	0,937	0,944	0,951	0,959	0,968	0,978
0,3	0,85	0,855	0,864	0,873	0,882	0,892	0,901	0,912	0,922	0,931	0,94	0,949	0,957	0,967	0,975	0,985
0,4	0,861	0,864	0,868	0,874	0,883	0,894	0,906	0,916	0,925	0,936	0,946	0,956	0,966	0,975	0,984	0,994
0,5	0,87	0,874	0,879	0,885	0,894	0,904	0,916	0,926	0,936	0,946	0,956	0,966	0,977	0,986	0,997	1,01
0,6	0,885	0,888	0,894	0,901	0,909	0,92	0,932	0,942	0,952	0,962	0,972	0,982	0,993	1,005	1,018	1,03
0,7	0,893	0,907	0,913	0,92	0,929	0,941	0,952	0,962	0,972	0,982	0,993	1,004	1,016	1,028	1,04	1,05
0,8	0,925	0,93	0,936	0,945	0,954	0,964	0,975	0,985	0,996	1,006	1,017	1,028	1,04	1,05	1,061	1,073
0,9	0,948	0,954	0,961	0,969	0,978	0,99	1	1,01	1,02	1,031	1,042	1,053	1,063	1,075	1,086	1,096
1	0,971	0,977	0,986	0,995	1,005	1,016	1,026	1,036	1,046	1,056	1,066	1,077	1,089	1,101	1,111	1,119
1,1	0,993	1,001	1,011	1,021	1,032	1,043	1,052	1,062	1,072	1,081	1,092	1,103	1,114	1,124	1,134	1,142
1,2	1,016	1,026	1,037	1,047	1,057	1,067	1,077	1,086	1,096	1,106	1,115	1,126	1,136	1,147	1,156	1,164
1,3	1,039	1,05	1,061	1,072	1,083	1,094	1,104	1,112	1,12	1,128	1,138	1,148	1,158	1,168	1,176	1,184
1,4	1,062	1,074	1,085	1,097	1,109	1,12	1,129	1,136	1,143	1,15	1,159	1,168	1,178	1,187	1,196	1,204
1,5	1,085	1,096	1,11	1,122	1,133	1,143	1,152	1,158	1,163	1,169	1,177	1,186	1,196	1,206	1,215	1,224
1,6	1,106	1,12	1,132	1,144	1,154	1,164	1,171	1,176	1,181	1,187	1,195	1,204	1,214	1,224	1,235	1,245
1,7	1,13	1,142	1,152	1,163	1,173	1,182	1,188	1,194	1,199	1,204	1,212	1,222	1,232	1,244	1,258	1,268
1,8	1,148	1,159	1,169	1,18	1,188	1,196	1,203	1,209	1,214	1,22	1,228	1,237	1,25	1,266	1,277	1,289

У наукових працях, присвячених дослідженню ВШП, діапазони безрозмірних вхідних параметрів *h/P* та *h*/δ більше відповідають водозливам гідротехнічних вузлів, аніж параметрам ВШП на вході у водоприймальні пристрої (рис. 1.10).

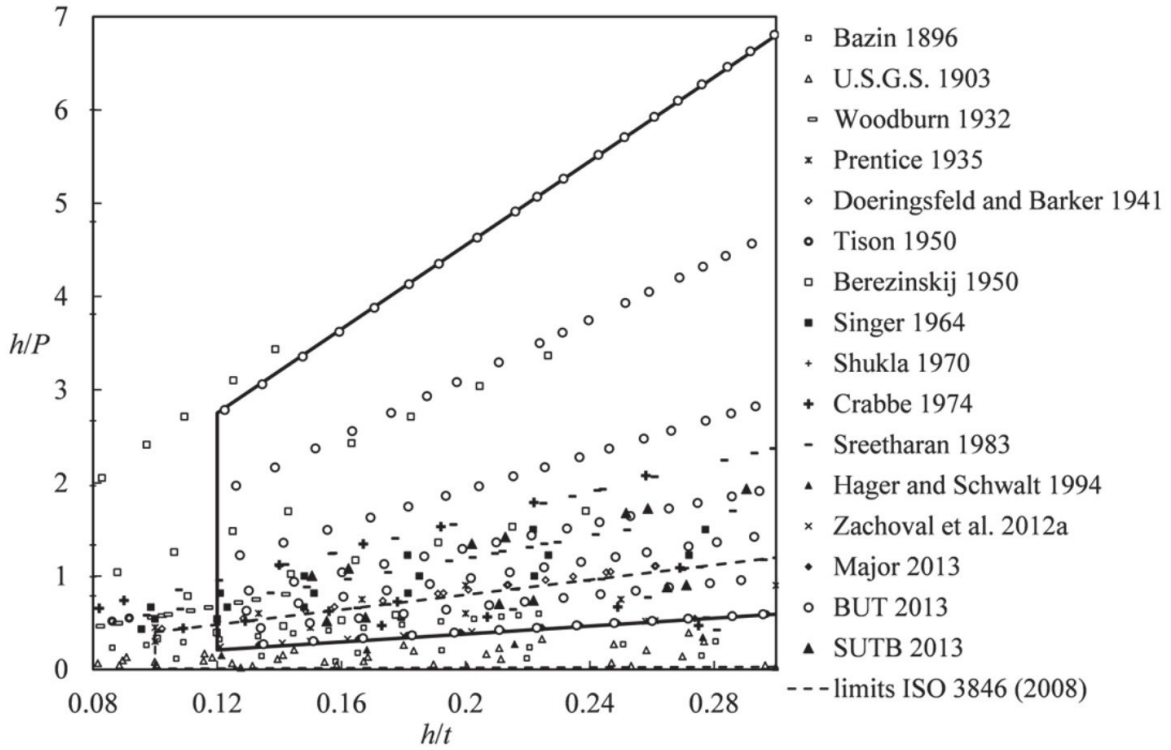


Рис. 1.10. Діапазони відносних напорів *h/P* та *h*/δ для досліджених ВШП шириною $b \geq 0{,}3$ м за даними Zahoval et al., 2014 [131]

У рекомендаціях з гідравлічного розрахунку ВШП [37], а також у довіднику з гідравліки під редакцією проф. Большакова [36] вказано, що коефіцієнт витрати ВШП залежить від відносної висоти порогу *P*/*h* та від кута нахилу передньої стінки водозливу до горизонту Θ (рис. 1.11, табл. 1.7). Для водоприймачів точкового типу висота порогу *P*=0, тоді за даними [36, 37] коефіцієнт витрати *m*=0,385, що відповідає значенню C_w=1,000.

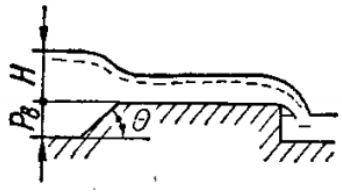


Рис. 1.11. Схема течії води через ВШП (до табл. 1.5)

Таблиця 1.7. Коефіцієнт витрати ВШП (за даними [36, 37])

P/h	Коефіцієнт витрати *m* при значеннях ctg Θ:			
	0	1	2	≥2,5
0	0,385	0,385	0,385	0,385
0,2	0,366	0,377	0,382	0,382
0,4	0,356	0,373	0,380	0,381
0,6	0,350	0,370	0,379	0,380
0,8	0,345	0,368	0,378	0,379
1	0,342	0,367	0,377	0,378

Згідно з іншим підходом коефіцієнт витрати водозливу з широким порогом залежить лише від відносної ширини порогу [70, 110]. Наприклад, В. Хагер отримав теоретично обґрунтовану залежність, рекомендовану для напорів H0, більших за 0,03−0,05 м [70]:

$$m = 0{,}326 \times \frac{9}{7} \times \left(1 - \frac{2/9}{1 + (H_0/\delta)^4} \right). \qquad (1.22)$$

Просте порівняння методів Куміна та Хагера для одного і того ж ВШП вказує на суттєву різницю у відповідних значеннях коефіцієнта витрати. Логічно припустити, що на коефіцієнт витрати ВШП мають вплив як відносна висота стінки, так і відносна ширина порогу, за аналогією з наявністю двох складових гідродинамічного опору – опору форми та опору тертя. Нижче, на рис. 1.12, виконано порівняння значень коефіцієнтів витрати ВШП за вищевказаними підходами (за емпіричними даними Куміна, рекомендованими [37], а також за теоретично-обґрунтованим методом В. Хагера [70]) з експериментальними результатами, отриманими у роботі [134].

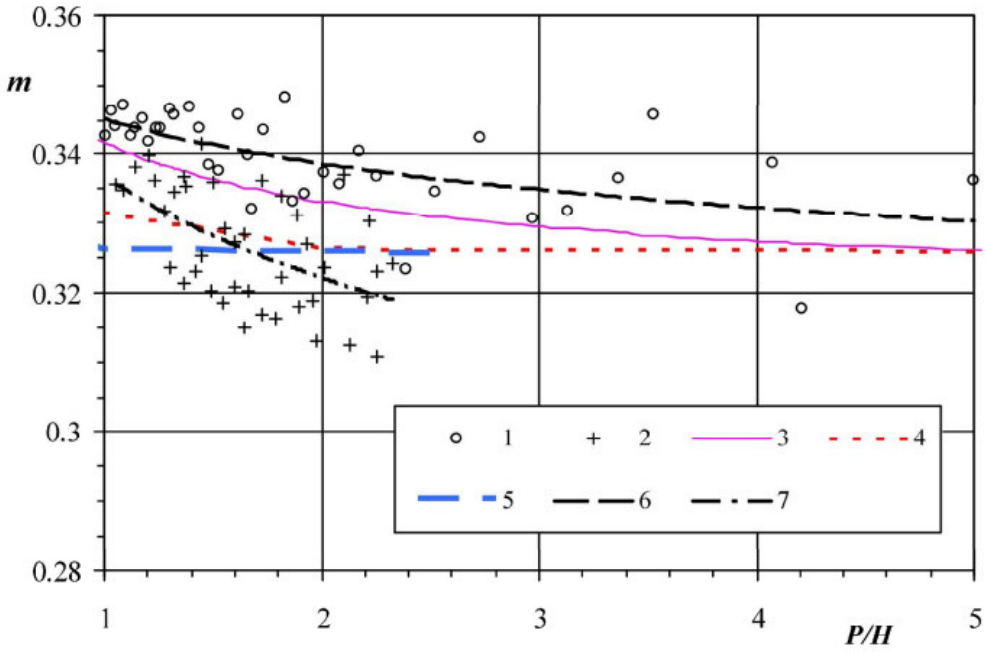


Рис. 1.12. Коефіцієнти витрати ВШП за Хагером та Куміним:
1, 2 – експериментальні результати [134]; 3 – за Куміним [37];
4, 5 – за Хагером [70]; 6, 7 – лінії тренду [134]

1.3.3.3. Течії на одноступінчастих непідтоплених перепадах. Враховуючи суттєву подібність картини течії поверхневого стоку через водоприймач та течії на одноступінчастих перепадах, було виконано детальний аналіз гідравлічних особливостей течій на перепадах.

У випадку, коли вхідна частина перепаду влаштовується такого ж перерізу, що і підвідне русло, глибину і швидкість над стінкою перепаду визначають, наприклад, за рівнянням, отриманим В. Поповим [35]:

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega_1} + y_1\omega_1 = \frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega_n} + \beta y_n \omega_n , \qquad (1.23)$$

де α_0 – коефіцієнт кількості руху, який приймають $\alpha_0 \approx 1\ldots1{,}04$; ω_1, $\omega_п$ – площа перерізів 1-1 і над стінкою падіння; y_1 і y_n – глибини занурення геометричних центрів цих перерізів (рис. 1.13); β – безрозмірний коефіцієнт.

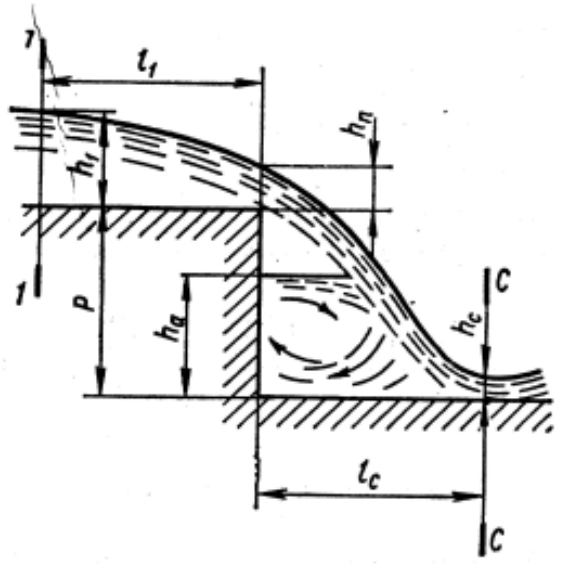


Рис. 1.13. Схема течії на непідтопленому одноступінчастому перепаді

За переріз 1–1 приймається переріз в кінці ділянки із плавнозмінним рухом. При спокійному стані потоку у верхньому б'єфі таким перерізом являється переріз з критичною глибиною h_{cr}, тобто $h_1 = h_{cr}$. При бурхливому стані потоку і рівномірному русі у верхньому б'єфі слід приймати $h_1 = h_0$. Якщо у верхньому б'єфі утворюється нерівномірний рух, то глибину можна визначати одним із методів побудови кривих вільної поверхні.

По відомій глибині можна визначити швидкість над стінкою падіння. При вільному доступі повітря під потік і наявності бокових стінок на водоспадній ділянці коефіцієнт β приймається рівним 1/3; під час викиду струменя в атмосферу 1/5; при відсутності доступу повітря під потік, коефіцієнт β=0 [35]. Для спрощення розрахунків, згідно [36] для всіх типів перепадів наближено приймають β=0, тоді швидкість потоку над стінкою падіння, з деяким запасом, визначають за формулою:

$$V_p = V_1\left(1 + y_1\omega_1^2 - \frac{g}{\alpha_0 Q^2}\right), \qquad (1.24)$$

де $V_1=Q/\omega_1$ – середня швидкість потоку в першому перерізі.

Результати чисельного визначення глибини на порозі з рівняння (1.24) для перепадів у руслах прямокутного перерізу за значень глибини потоку перед водозливом h_1=(0,5–1)h_{cr} наведені у табл. 1.8.

Таблиця 1.8. Відносна глибина над стінкою падіння h_p/h_1 перепадів в руслах прямокутного перерізу (за даними [36])

Коефіцієнт β	Значення h_p/h_1 за h_1 / h_{cr} :					
	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
0	0,67	0,73	0,80	0,85	0,9	0,94
1/5	0,69	0,75	0,82	0,87	0,92	0,95
1/3	0,71	0,77	0,83	0,89	0,93	0,96

1.3.4. Режим отвору

Гідравлічний режим витікання крізь непідтоплені отвори водоприймальної решітки має місце при достатньо великих значеннях поверхневого притоку, коли решітка водоприймача повністю покривається шаром води і працює за типом напірного витікання крізь сукупність донних отворів у решітці. Витрата притоку також повинна бути меншою за пропускну здатність відвідного трубопроводу. За цих умов всередині камери водоприймача має місце розрив струменя, і таким чином, водоприймач працює в режимі напірної течії крізь непідтоплені отвори водоприймальної решітки (рис. 1.14). Пропускну здатність водоприймачів у режимі отвору визначають за геометричним напором на отворі h [72]:

$$Q = C_o \omega_o \sqrt{2gh}\,, \tag{1.25}$$

де C_o – коефіцієнт витрати водоприймача в режимі отвору; ω_o – сумарні площа отворів решітки водоприймача; або ж за повним напором потоку H перед водоприймачем [39,72 93]:

$$Q = C_o \omega_o \sqrt{2gH}\,. \tag{1.26}$$

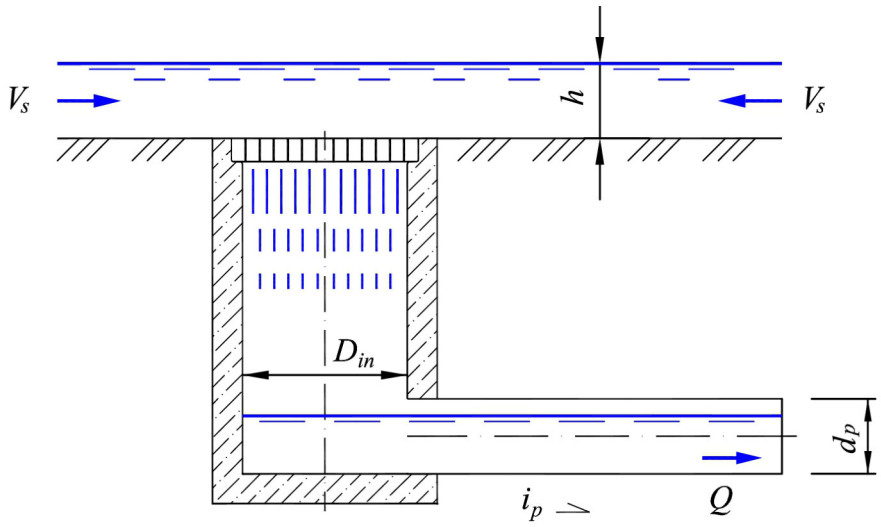


Рис. 1.14. Принципова схема течії крізь решітку водоприймача в режимі непідтоплених отворів

Поширені на практиці методи для визначення пропускної здатності водоприймачів у режимі отвору також передбачають істотні спрощення. Так, нормативний документ НЕС-22 [123] рекомендує визначати пропускну здатність за рівнянням (1.23), де коефіцієнт витрати C_o приймається сталим і таким, що дорівнює 0,67. Це значення входить до діапазону значень коефіцієнта витрати 0,65−0,7, який рекомендує застосовувати для великих донних отворів без стиснення по дну з впливом бічного стиснення довідник під редакцією проф. Большакова [36, табл. 5.5]. Разом з тим, той самий довідник для донних отворів з незначним бічним стисненням вказує на значення коефіцієнта витрати в діапазоні C_o = 0,7−0,75, а для донних отворів з плавними бічними підходами − навіть C_o = 0,8−0,85.

В Україні при гідравлічних розрахунках дощоприймачів, що працюють в режимі отвору, традиційно використовують спрощене емпіричне рівняння [14, 30, 43]:

$$Q = 2{,}0\ \omega_o \sqrt{H}\ , \tag{1.27}$$

а умовою роботи дощоприймача в режимі отвору є:

$$H > \frac{1{,}33\omega_o}{L_p}\ . \tag{1.28}$$

Коефіцієнт пропорційності 2,0 у рівнянні (1.27) відповідає значенню коефіцієнта витрати $C_o = 0{,}452$, що в 1,48 рази менше, ніж згідно з HEC-22. Таку суттєву різницю можна пояснити, ймовірно, тільки принципово різними підходами до гідравлічного розрахунку за цими двома методами. Коефіцієнт $C_o = 0{,}67$ в рекомендаціях HEC-22 [123] відповідає напірній течії рідини крізь непідтоплені знизу отвори решітки водоприймача, тоді як істотно менше значення $C_o = 0{,}452$, рекомендоване ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14], відповідає сумарному приведеному коефіцієнту гідравлічного опору

$$\zeta_{np.\text{tot}} = \frac{1}{C_o^2} - \alpha = \frac{1}{0{,}452^2} - 1 = 3{,}9.$$

Таке значення гідравлічного опору більш характерне для напірної течії крізь всю систему "водоприймач − водовідвідний трубопровід", тобто крізь підтоплені отвори решітки, камеру водоприймача та відвідний трубопровід. Але тоді виникає необхідність застосовувати напір в системі "водоприймач − відвідний трубопровід", а не напір потоку перед решіткою відносно її верхньої вхідної поверхні, що ставить під сумнів ефективність використання формули (1.27).

1.3.5. Комбінований (змішаний) режим

Загальноприйнято вважати, що течія яка проходить крізь дощоприймач поділяється на безнапірну та напірну. Отвори у водоприймальній решітці при безнапірній течії можуть працювати у двох режимах, як водозлив з широким порогом так і в режимі отвору. При дослідженні дощоприймачів Guo et al., 2009 [68] описує третій режим, який називає змішаним або комбінованим режимом (mix flow), який відбувається при переході з ВШП у режим отвору. Транзитну глибину $h_{tr.0}$, що відповідає переходу водоприймача з режиму водозливу в режим отвору, зазвичай визначають з умови рівності пропускної здатності для обох цих режимів (рис. 1.15):

$$h_{tr.0} = \frac{3\sqrt{3}C_o\omega_o}{2C_w L_w}, \qquad (1.29)$$

звідки транзитна витрата:

$$Q_{tr.0} = \left(C_o \omega_o\right)^{3/2} \sqrt{\frac{3\sqrt{3}g}{C_w L_w}} . \tag{1.30}$$

Витрата змішаного потоку за Guo et al., 2009 [68]:

$$Q_m = C_m \sqrt{Q_w Q_o} = \frac{2}{3^{3/4}} C_m h \sqrt{C_w C_o L_w \omega_o g} , \tag{1.31}$$

де C_m – коефіцієнт витрати для змішаного режиму; Q_w – витрата в режимі ВШП; Q_o – витрата в режимі отвору; C_w – коефіцієнт витрати в режимі ВШП; C_o – коефіцієнт витрати в режимі отвору; L_w – периметр решітки; ω_o – площа отвору.

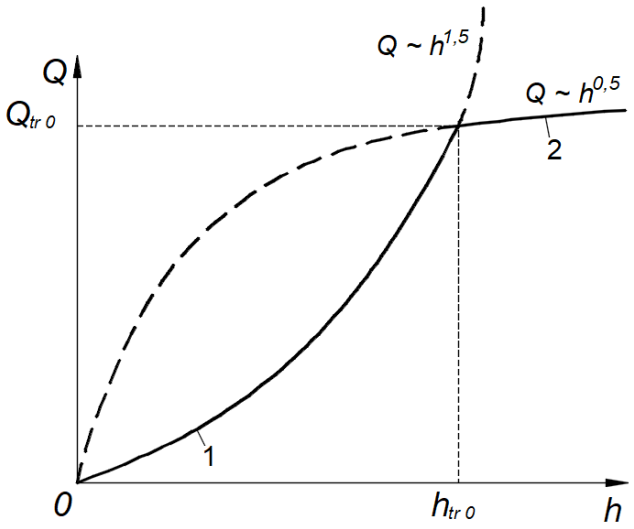


Рис. 1.15. Номінальна перехідна витрата $Q_{tr.0}$, визначена за принципом мінімуму витрати: 1 – режим водозливу; 2 – режим отвору

Виникає питання щодо меж змішаного режиму течії. Математично початок переходу можна знайти з умови $Q_w = Q_m$.

$$\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_w L_w \sqrt{g} h^{3/2} = \frac{2}{3^{3/4}} C_m h \sqrt{C_w C_o L_p A_o g} \tag{1.32}$$

Після скорочень можна отримати вираз для першої транзитної глибини:

$$h_{tr.1} = \frac{3\sqrt{3} C_m^2 C_o A_o}{2 C_w L_w} \tag{1.33}$$

Підставляючи $h_{tr.0}$ з рівняння (1.27), можна отримати:

$$h_{tr.1} = C_m^2 h_{tr.o} . \tag{1.34}$$

Дослідження Guo et al., 2009, виконані для ґратчастих решіток з технічними характеристиками L_w=1 м, ω_0=0,44м^2, дали значення коефіцієнта витрати в комбінованому режимі C_m=0,93, що відповідає значенню першого транзитного напору: $h_{tr.1}$=0,865$h_{tr.0}$ (рис. 1.16).

Математично завершення переходу Guo et al. (2009) знаходять з умови рівності витрат для комбінованого режиму та для режиму отвору ($Q_m = Q_o$):

$$\frac{2}{3^{3/4}} C_m h \sqrt{C_w C_o L_p \omega_o g} = C_o \omega_o \sqrt{2gh} \ , \tag{1.35}$$

звідки друга транзитна глибина:

$$h_{tr.2} = \frac{3\sqrt{3} C_o \omega_o}{2 C_m^2 C_w L_p} . \tag{1.36}$$

Підставляючи $h_{tr.0}$ з рівняння (1.29), можна отримати:

$$h_{tr.2} = \frac{h_{tr.o}}{C_m^2} , \tag{1.37}$$

тобто при C_m=0,93: $h_{tr.2}$ = 1,156 $h_{tr.0}$.

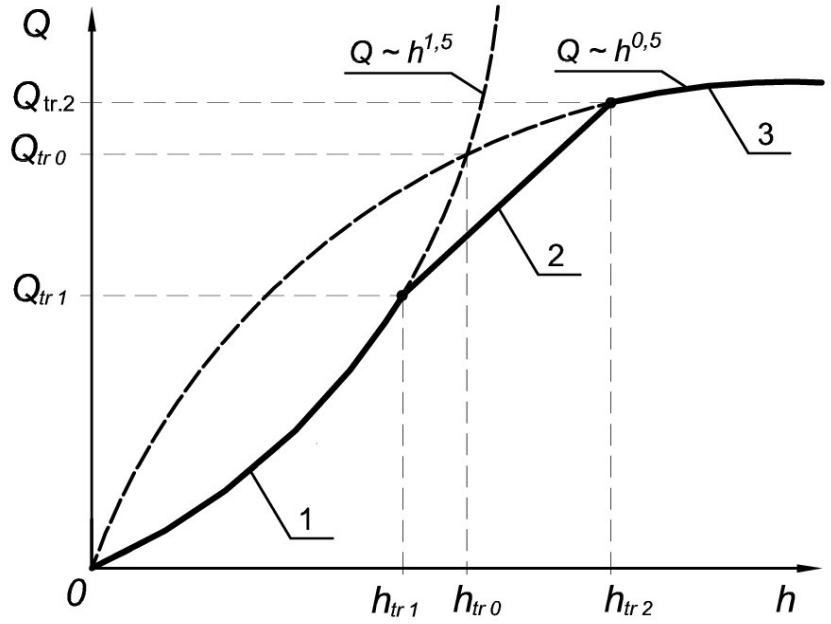


Рис. 1.16. Трьохетапна схема роботи непідтопленого водоприймача [68]:
1 – режим водозливу; 2 – комбінований режим; 3 – режим отвору

1.3.6. Гідравлічний режим підтопленого водоприймача

Пропускну здатність підтоплених водоприймачів визначають за формулою для напірного витікання крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід":

$$Q_s = C_s \omega_p \sqrt{2gH}\ , \qquad (1.38)$$

де C_s – коефіцієнт витрати системи дощоприймач – відвідний трубопровід;

ω_p – площа живого перерізу відвідного трубопроводу;

$H = (h + D)$ – напір, під яким поверхневий потік проходить крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід".

На рис. 1.17 наведено ілюстрацію дощоприймача, який працює у режимі підтоплення. Цей режим відображає ситуацію, коли ряд умов відбуваються одночасно.

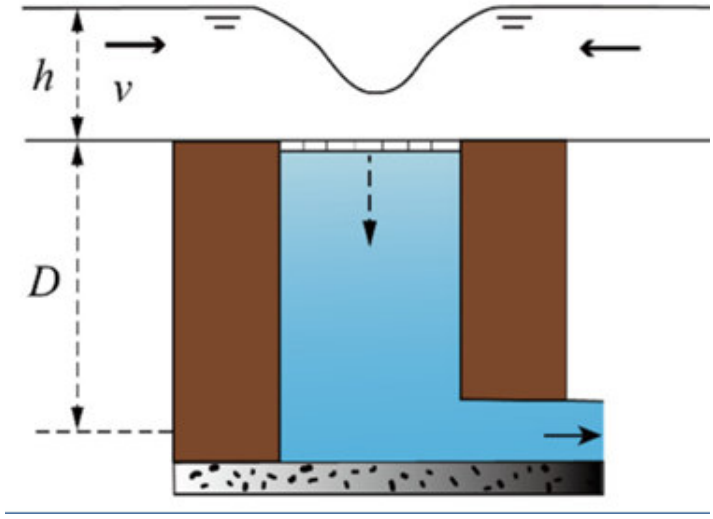


Рис. 1.17. Схема підтопленої течії крізь дощоприймач (за Lee et al. [93])

Як зображено на рис. 1.17, відвідний трубопровід працює повним перерізом, а дощоприймальний колодязь – заповнений водою. Додатково, вода рівномірно стікає до дощоприймальної решітки з обох сторін, перевищуючи пропускну здатність водовідвідного трубопроводу. У цих умовах течія стає нерозривною, і решітка вкривається шаром води з характерним просіданням над нею.

1.4. Мета роботи та задачі досліджень

У світі зберігається тенденція по урбанізації міст, що супроводжується інтенсивним збільшенням площ водонепроникних територій. Разом з глобальними кліматичними змінами це спричиняє все частіші та масштабніші підтоплення, які призводять до цілого ряду соціально-економічних проблем. Критично важливим компонентом міської інженерної інфраструктури є системи дощового водовідведення. Їх важливим елементом є дощоприймачі, якими здійснюється збір поверхневого стоку та його відведення у мережу дощової каналізації. Важливою задачею в зв'язку з цим є забезпечення належних гідравлічних характеристик дощоприймачів, які дозволяють ефективно збирати поверхневий стік, запобігаючи підтопленню урбанізованої території.

Внаслідок наявності великої кількості вхідних факторів та часткових умов, моделювання пропускної здатності дощоприймачів є складною гідравлічною задачею. Українські та закордонні нормативні документи в галузі дощового водовідведення, наприклад ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14] та HEC-22 US FHWA [124], рекомендують до використання максимально спрощені методи гідравлічного розрахунку дощоприймачів. Ці методи передбачають наявність двох характерних режимів роботи дощоприймача, а саме режиму ВШП та режиму отвору, а також сталість значень безрозмірних коефіцієнтів витрат для обох цих режимів. Проте, ряд нових експериментальних досліджень водоприймачів у натурних умовах переконливо вказують на наявність трьох режимів роботи, з проміжним, комбінованим режимом.

Разом з тим, всі ці три режими актуальні лише для непідтоплених течій крізь дощоприймачі, у випадку перевищення пропускної здатності системи "дощоприймач – відвідний трубопровід" гідравлічна характеристика визначається вже за сумарним гідравлічним опором всіх елементів цієї системи, включаючи втрати напору по довжині відвідного трубопроводу, так і переходом на загальний напір у системі відносно осі труби на виході з відвідного трубопроводу.

Разом з тим, у загальному випадку коефіцієнт витрати ВШП залежить від цілого ряду вхідних параметрів. Наприклад, Zachoval et al. (2014) та Zhuk et al. (2021) [131, 138] отримали емпіричні залежності коефіцієнта витрати в режимі ВШП від числа Фруда, Вебера та Рейнольдса. У ряді досліджень ВШП у лотках і каналах використовується повний напір потоку. Важливою проблемою застосування повного напору для водоприймачів є багатосторонній притік води. Враховуючи такий притік води до водоприймача, периметр водозливу L_w, який відповідає непониженій глибині h перед водозливом, різко зростає зі збільшенням відстані до входу у водоприймач, відтак середня швидкість потоку по мірі віддалення від контуру вхідного отвору решітки швидко зменшується. Таким чином, виникає проблема неоднозначності задання напору h та швидкості V_w, які, для коректності застосування методу, повинні бути визначені для одного і того ж контурного перерізу перед решіткою водоприймача. Виходячи з цих міркувань у якості ширини ВШП у розрахунках використовують довжину периметра вхідного отвору решітки. З іншого боку такий підхід вимагає визначення середньої швидкості та глибини потоку безпосередньо на її вхідному контурі, що є непростою гідравлічною проблемою, враховуючи різко неплавнозмінний характер течії у контурному вертикальному перерізі потоку, проведеному по периметру вхідного отвору решітки водоприймача.

Наступним технічним фактором є врахування коефіцієнта стиснення потоку стержнями водоприймальних решіток. Коефіцієнт стиснення обчислюється, як відношення периметру отворів до периметру решітки. Для ґратчастих дощоприймачів з горизонтальною водоприймальною решіткою врахування коефіцієнта стиснення виглядає недостатньо обґрунтованим, оскільки кінцевим перерізом течії крізь ВШП є вертикальний контурний переріз вхідного отвору решітки, а стержні решітки розташовані нижче за течією і безпосереднього обмежувального впливу на водозливний потік не мають.

Враховуючи особливості течії крізь ВШП, її можна розглядати як течію на одноступінчастих перепадах. Але такий підхід має свої недоліки адже, стержні решітки обмежують вільні струмені води на вході у камеру водоприймача, відтак, задача з гідравлічної точки зору все-таки є складнішою, ніж у випадку непідтоплених одноступінчастих контурних чи кільцевих перепадів.

Враховуючи наведені вище наукові пробіли в розумінні фізичної природи течій крізь водоприймальні елементи, а також розбіжності щодо числових значень основних кількісних параметрів, які ці течії описують, сформульовано мету та задачі дисертаційного дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розроблення нових і удосконалення відомих гідравлічних методів моделювання роботи дощоприймальних елементів точкового типу для різних типів течії та режимів їх роботи.

Об'єктом досліджень у роботі є потоки дощових стічних вод крізь точкові дощоприймачі та відвідні трубопроводи.

Предмет досліджень – методи гідравлічного розрахунку витратно-напірних характеристик точкових дощоприймачів для різних типів течії та режимів їх роботи.

Відповідно до мети дисертаційної роботи сформульовано наступні *задачі дослідження*:

– проаналізувати існуючі методи розрахунку гідравлічних характеристик дощоприймачів точкового типу у різних режимах їх роботи;

– запроектувати та змонтувати дослідну установку для експериментального визначення гідравлічних параметрів дощоприймачів точкового типу;

– розробити методику виконання експериментальних досліджень дощоприймачів, а також методику математичної обробки їх гідравлічних характеристик для характерних режимів роботи

– розробити математичну модель, що описує гідравлічні явища при затопленій течії крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід", та метод чисельного визначення граничної витрати Q_{lim} та відповідного граничного напору h_{lim}, що відповідають переходу до затопленої течії;

– виконати теоретичний аналіз залежності коефіцієнта витрати дощоприймача в режимі ВШП від значення критерію Фруда на перепаді водозливного отвору;

– з використанням теорії розмірностей обґрунтувати структуру розрахункової залежності для визначення пропускної здатності точкових водоприймачів у комбінованому режимі роботи;

– отримати експериментальні напірно-витратні характеристики дощоприймачів зі стрижневими решітками та відповідні емпіричні значення коефіцієнтів витрати в режимі ВШП, комбінованому режимі та в режимі отвору;

– розробити удосконалений метод гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу, що враховує тип потоку крізь дощоприймач та режим течії крізь водоприймальну решітку для непідтоплених потоків;

– розглянути науково-практичні аспекти застосування розробленого методу гідравлічного розрахунку точкових дощоприймачів, зокрема змоделювати напірно-витратні характеристики типових дощоприймачів для випадків одно-, дво- та чотирьохстороннього притоку до них поверхневого стоку;

– розробити удосконалену конструкцію дощоприймального колодязя.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Загальна методика виконання дисертаційного дослідження

Для досягнення поставленої мети та вирішення завдань дисертаційної роботи використано широкий комплекс теоретичних і експериментальних методів дослідження. У дисертаційній роботі розроблені наукові підходи, теоретичні моделі, оформлені висновки та рекомендації, які ґрунтуються на глибокому теоретичному обґрунтуванні. Достовірність презентованих результатів підтверджена результатами чисельних та фізичних експериментів, проведених за допомогою сучасних методів теоретичних і експериментальних досліджень у сфері будівництва та цивільної інженерії.

2.2. Установка для гідравлічного дослідження водоприймачів

Враховуючи математичну складність, багатофакторність та відповідно суттєві похибки аналітичного та чисельного комп'ютерного моделювання течій крізь водоприймальні пристрої, у дисертаційні роботі виконано систематичне експериментальне дослідження гідравлічних характеристик водоприймачів на фізичній експериментальній установці.

Заплановано та виконано систематичні експериментальні дослідження гідравлічних параметрів водоприймальних пристроїв з решітками різних розмірів та конфігурації. Експериментальні дослідження пропускної здатності водоприймальних елементів було проведено у комплексній лабораторії гідравліки Національного університету "Львівська політехніка" (Львів, Україна), на тестовій лабораторній установці, що відповідає вимогам європейського нормативу EN 1253-2:2003. Дослідна установка складається з резервуару, що має форму правильного шестикутника з довжиною сторони 635 мм. Поздовжній розмір резервуара в плані в напрямку від притоку води до виходу відвідного трубопроводу складає 1100 мм, загальна висота резервуара – 1100 мм. Габаритні розміри установки дозволяють визначати гідравлічні

характеристики водоприймальних пристроїв, як з горизонтальним, так і з вертикальним випуском з діаметрами до DN = 200 мм включно.

Подача води у дослідний резервуар відбувалася по напірному сталевому трубопроводу діаметром 50 мм за допомогою циркуляційного консольного відцентрового насоса Grundfos NB 40-160/158 з номінальною подачею 39,1 м3/год та напором 30,3 м. Вода потрапляла у простір між зовнішнім корпусом та внутрішньою стінкою дослідного резервуара (рис. 2.1). Посередині дослідного резервуара у строго горизонтальному положенні встановлено дощоприймач. Таке розташування дощоприймача забезпечувало моделювання його роботи в режимі притоку води з усіх сторін.

Запроектований дослідний резервуар в плані має форму правильного шестикутника з довжиною сторони 635 мм (рис. 2.1). Поперечний розмір резервуара в плані в напрямку від подачі води до виходу відвідного трубопроводу складає 1100 мм, що відповідає вимогам [25]. Загальна висота дослідного резервуара – 1100 мм, що дозволяє виконувати експериментальні дослідження водоприймальних трапів як з горизонтальним, так і з вертикальним випуском діаметром до 200 мм включно.

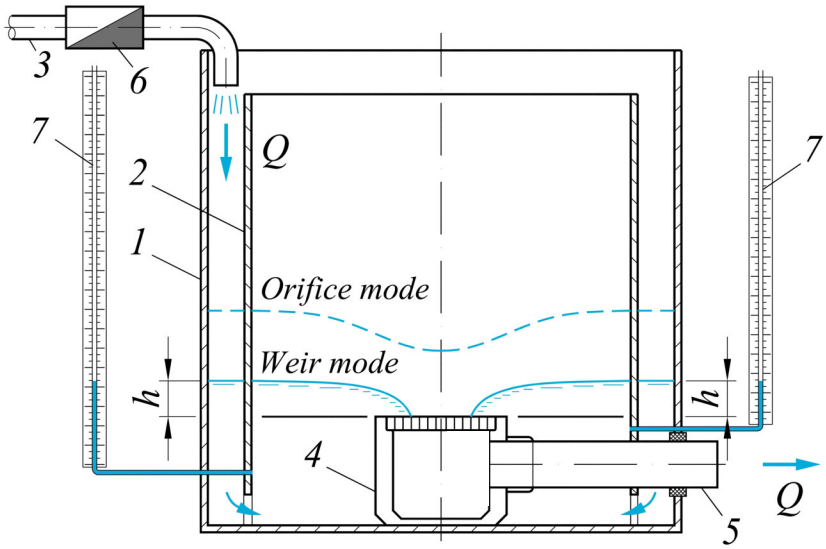


Рис. 2.1. Схема дослідної установки для експериментального визначення гідравлічних характеристик водоприймачів за вимогами EN 1253-2:2003:

1 − корпус; 2 − внутрішня перегородка; 3 − подавальна труба; 4 − водоприймач; 5 − відвідна труба; 6 – водолічильник; 7 – п’єзометри

Водоприймачі встановлювали по центру дослідного резервуара відповідно до схеми на рис. 2.1. Для стабілізації рівнів рідини на підході до водоприймача в дослідному резервуарі влаштовано внутрішню перегородку висотою 1000 мм у формі правильного шестикутника з довжиною сторони 520 мм (рис. 2.2).

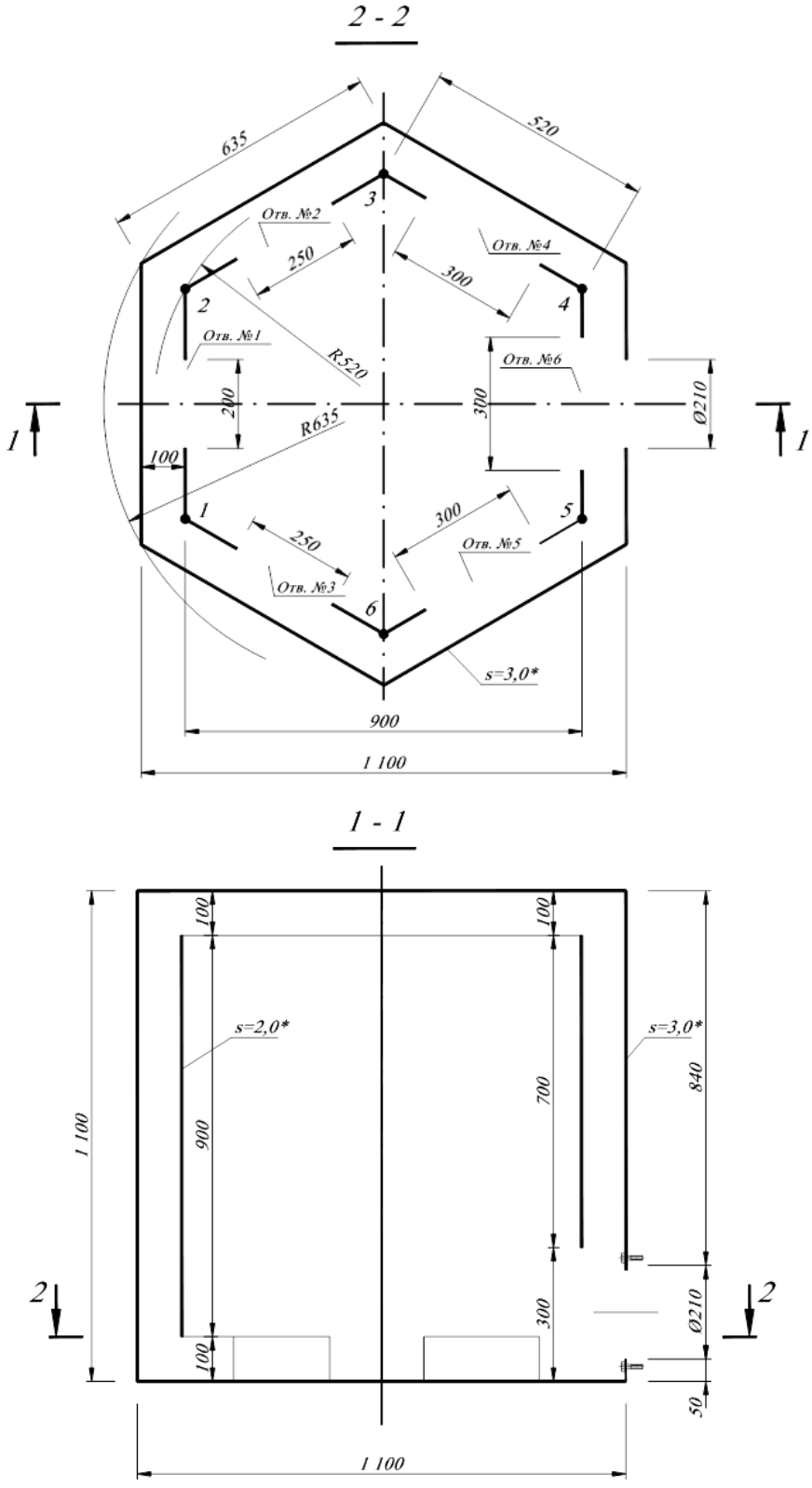


Рис. 2.2. Резервуар для гідравлічного дослідження водоприймачів

Подача води напірним трубопроводом у дослідний резервуар здійснювалася у простір між зовнішньою стінкою та перегородкою з боку отвору №1. Для виходу води з міжстінного простору в центральну частину дослідного резервуара в нижній частині по кожній стороні перегородки було влаштовано водопропускні вікна висотою 100 мм зі змінною шириною: від 200 мм з боку вводу напірного трубопроводу до 300 мм на дальніх від вводу сторонах перегородки (рис. 2.3). Змінна ширина водопропускних вікон дозволяє забезпечувати рівномірне надходження води в центральну частину дослідного резервуара з усіх сторін. Отвір в протилежній від вводу стінці перегородки зроблено висотою 300 мм для можливості влаштування випускних трубопроводів для трапів діаметром до 200 мм включно.

Матеріал корпусу дослідного резервуара та перегородки – сталь. Всі поверхні корпуса і перегородки дослідного резервуара заґрунтовані та пофарбовані масляною фарбою.

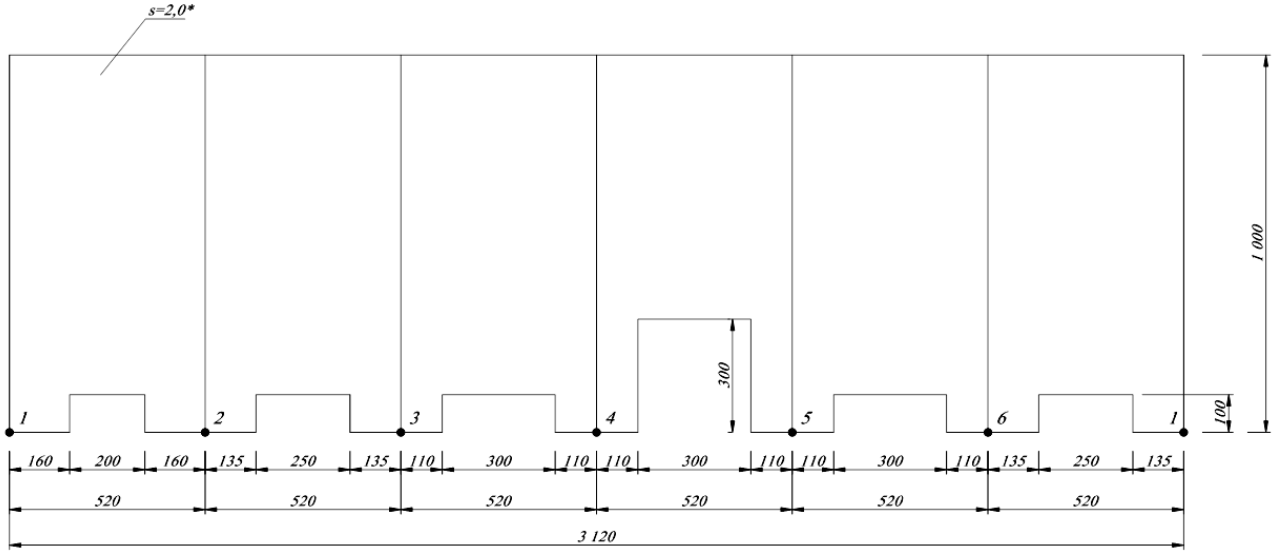


Рис. 2.3. Розгортка внутрішньої перегородки дослідного резервуара

Для виконання гідравлічних досліджень пропускної здатності водоприймачів було запроектовано установку циркуляційного типу, представлену на рис. 2.4. Вода за допомогою відцентрового насоса 3 забиралася з нижнього резервуара 1 і напірним трубопроводом 7 подавалася у дослідний резервуар 6, по центру якого встановлювався досліджуваний дощоприймач.

Далі вода крізь відповідну решітку дощоприймача, відвідний трубопровід та стояк відповідного діаметра потрапляла назад у нижній резервуар 1. Для подачі води з нижнього резервуара 1 в дослідний резервуар 6 використовувався насос відцентровий 3 консольного типу марки Grundfos NB 40-160/158 з номінальною подачею $Q_н$=39,1 м^3/год та напором $H_н$=30,3 м.

Вимірювання об'ємної витрати води, що надходила в дослідний резервуар 6, здійснювалося за допомогою крильчастого водолічильника 4 марки Gross MTK UA 50FS з умовним діаметром D_y=50 мм. Цей водолічильник призначений для вимірювання об'єму холодної води з температурою від 5 °С до 30 °С. Номінальна об'ємна витрата, на яку розрахований водолічильник, становить $Q_{ном,ліч}$=15 м^3/год, максимальна витрата – $Q_{max,ліч}$=30 м^3/год, мінімальна витрата – $Q_{min,ліч}$=0,6 м^3/год. Максимальний робочий надлишковий тиск води, об'єм якої вимірюється – 1 МПа. Клас точності лічильника – В. Максимальна відносна похибка вимірювання об'єму води лічильником MTK UA 50FS становить ± 2%, що відповідає вимогам ДСТУ EN 14154-1:2015 [15].

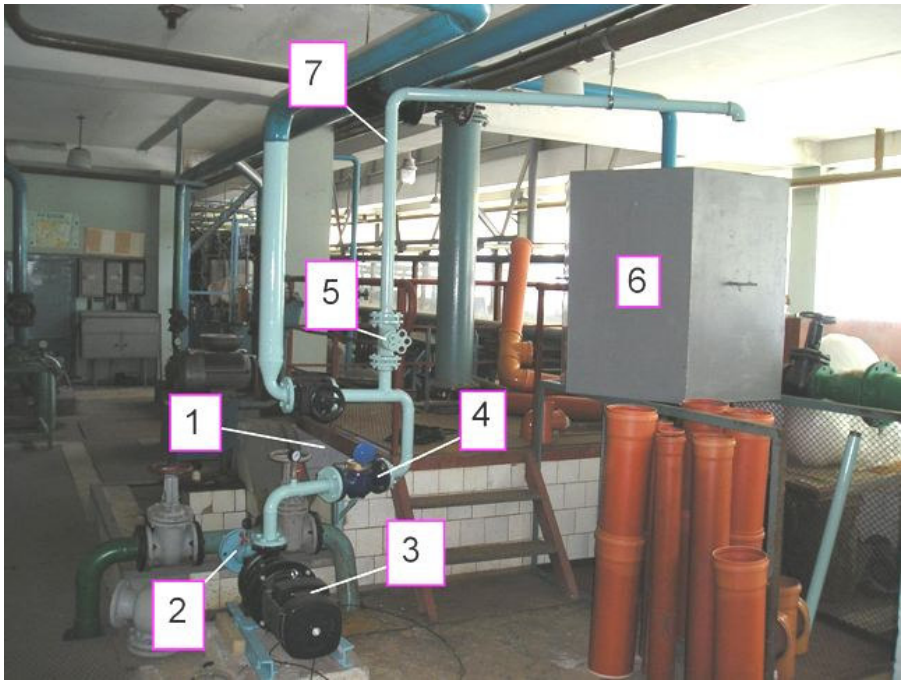


Рис. 2.4. Установка для експериментального визначення пропускної здатності водоприймальних трапів: 1 − нижній резервуар; 2 − всмоктувальний трубопровід; 3 − відцентровий насос; 4 − водолічильник; 5 − регулювальний вентиль; 6 − дослідний резервуар; 7 – напірний трубопровід

Для підвищення точності визначення напору води на водоприймальному трапі було влаштовано два п’єзометри-рівнеміри на двох дальніх сторонах дослідного резервуара, симетрично розташованих відносно точки подачі води в резервуар. Імпульсна трубка обох п’єзометрів була виведена крізь міжстінний простір та внутрішню перегородку в центральну частину дослідного резервуара. На рис. 2.5 показано змонтований відвідний трубопровід D=200 мм та видно один з двох п’єзометрів-рівнемірів (п’єзометр №2). П’єзометр №1 встановлений симетрично до п’єзометра №2 відносно центральної лінії дослідного резервуара, що з’єднує точки подачі та відведення води з резервуара.

Рис. 2.5. Дослідний резервуар зі змонтованим відвідним трубопроводом діаметром 200 мм

Дощоприймач встановлювали на двох пластикових брусках (рис. 2.6) для забезпечення рівної горизонтальної поверхні решітки і фіксувалися до них за допомогою спеціальних кріплень (див. рис. 2.7). Металеві стяжки стягували дріт, який був протягнутий через верх дощоприймача та зафіксований до внутрішньої перегородки дослідного резервуару. Таке рішення забезпечувало жорстку фіксацію дощоприймача та його положення відносно горизонту.

а) *б)*

Рис. 2.6. Дослідний резервуар зі встановленим дощоприймачем Dy=200 мм з горизонтальним випуском:
а – вирівнювальні бруски; б – перевірка горизонтальності розташування

Рис. 2.7. Спеціальні кріплення дощоприймачів і трапів

2.3. Досліджувані водоприймачі

Нижче представлено опис базового дощоприймача Basic 400, дослідженого в натурному масштабі (М 1:1), а також решіток більших дощоприймачів, досліджених у масштабах від 1:2 до 1:6.

а) *б)*

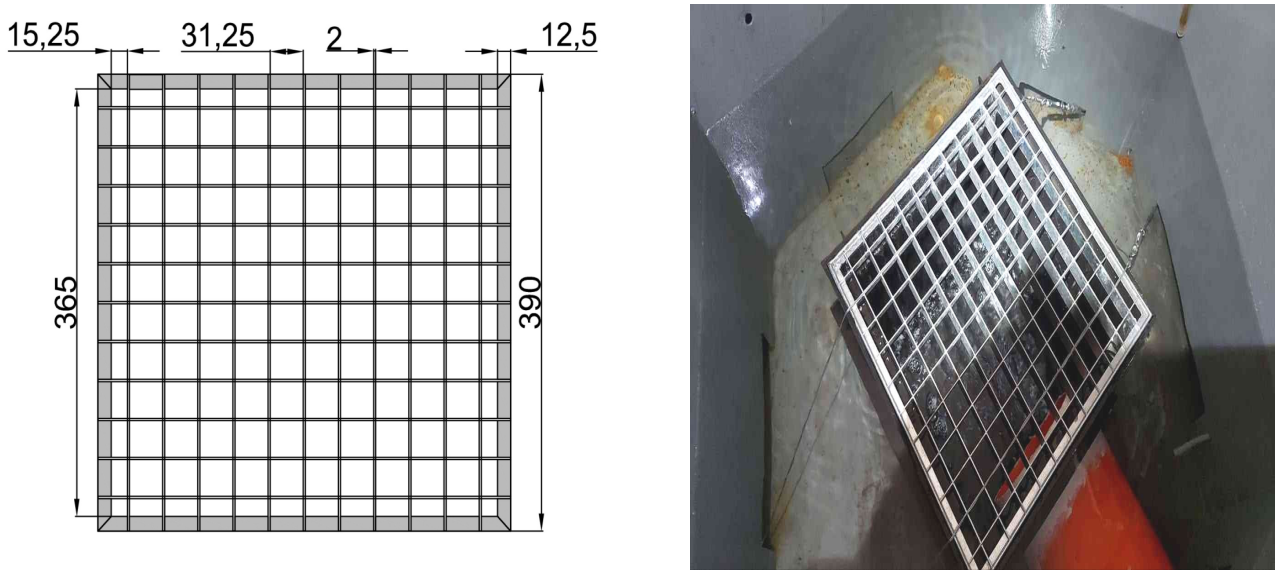


Рис. 2.8. Решітка дощоприймача Basic 400 (М 1:1):
а – схема з розмірами; б – встановлена в дослідному резервуарі

Сумарну площу отворів квадратних стрижневих решіток визначали за формулою:

$$\omega_o = \left(b_w - ne\right)^2, \qquad (2.\ 1)$$

де b_w – довжина сторони водоприймального отвору решітки; n, e – кількість та товщина внутрішніх стержнів відповідно. Конструкцією решітки типового дощоприймача Basic 400 передбачена однакова товщина всіх стержнів решітки $e = 2$ мм.

Сумарну площу отворів прямокутних стрижневих решіток визначали як:

$$\omega_o = \left(b_{w1} - n_1 e\right)\left(b_{w2} - n_2 e\right), \qquad (2.\ 2)$$

де b_{w1}, b_{w2} – довжина та ширина водоприймального отвору решітки відповідно; n_1, n_2 – кількість поперечних та поздовжніх внутрішніх стержнів відповідно.

Шпаруватість водоприймальних решіток ε_p визначали як частку сумарної площі отворів та площі решітки брутто за її зовнішнім контуром:

$$\varepsilon_p = \frac{\omega_o}{\omega_p}, \qquad (2.3)$$

а шпаруватість ε_w визначали відносно площі водоприймального отвору ω_w:

$$\varepsilon_w = \frac{\omega_o}{\omega_w}, \qquad (2.4)$$

де $\omega_w = b_{w1} \times b_{w2}$.

Схеми досліджених стрижневих решіток наведені на рис. 2.9–2.10, а їх основні геометричні характеристики зведені в табл. 2.1.

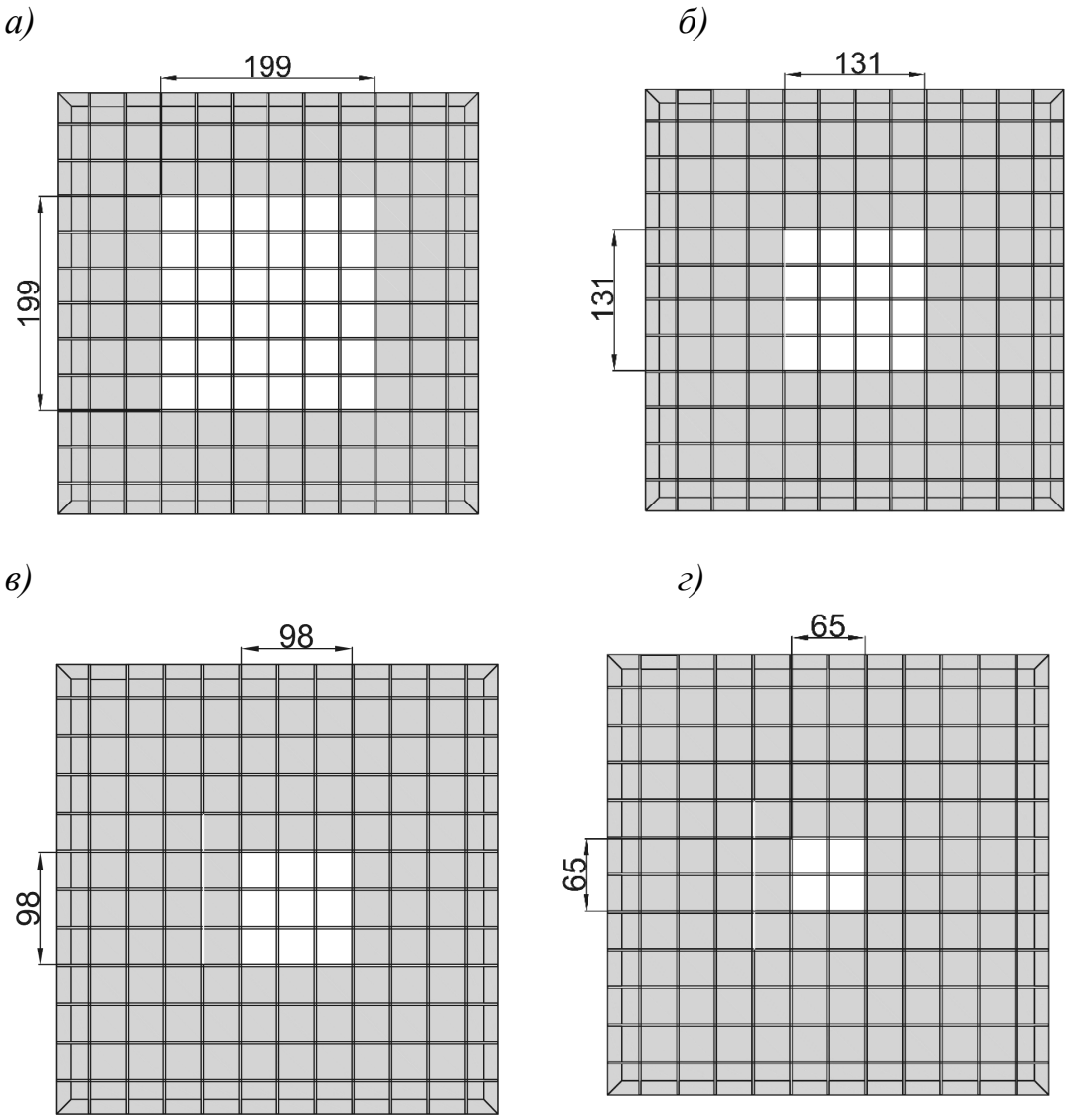


Рис. 2.9. Схеми досліджених стрижневих решіток квадратної конфігурації: а – 199×199 мм; б – 131×131 мм; в – 98×98 мм; г – 65×65 мм

а) *б)*

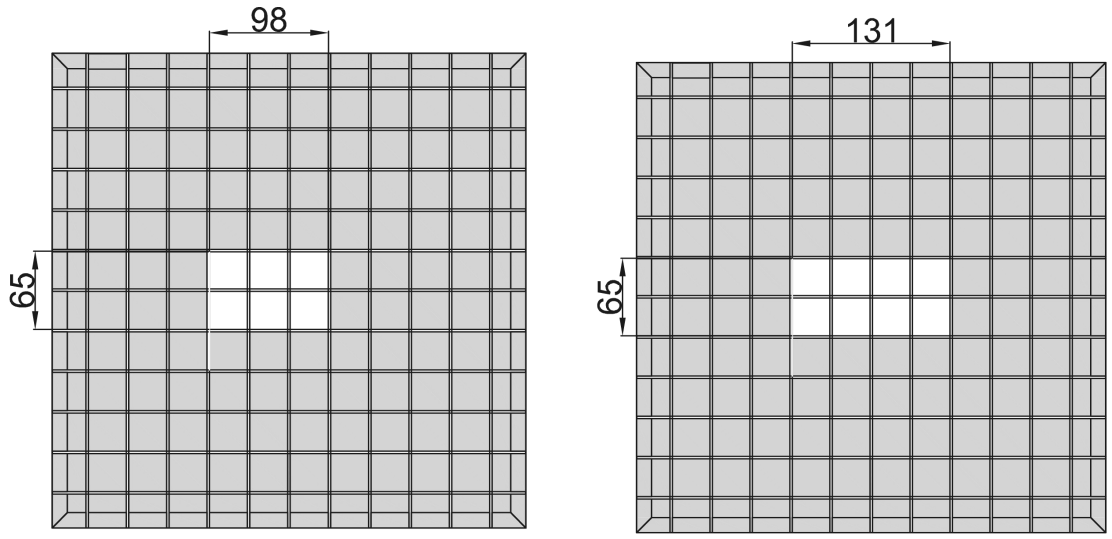


Рис. 2.10. Схеми досліджених стрижневих решіток прямокутної конфігурації: а – 98×65 мм; б – 131×65 мм

Шпаруватість ε_p відповідає шпаруватості вихідної решітки Basic 400 при її рівномірному забитті по всьому контуру, тоді як шпаруватість ε_w відноситься до геометрично подібних, масштабованих решіток.

Таблиця 2.1. Параметри досліджених дощоприймачів точкового типу

№ ч/ч	Довжина b_{w1} м	Ширина b_{w2}, м	Периметр L_w, м	Площа ω_o, м^2	Площа ω_w, м^2	Шпаруватість	
						ε_p	ε_w
1	0,365	0,365	1,460	0,1176	0,1332	0,773	0,883
2	0,264	0,264	1,056	0,0625	0,0697	0,458	0,897
3	0,199	0,199	0,796	0,0357	0,0396	0,260	0,902
4	0,131	0,131	0,524	0,0156	0,0172	0,113	0,907
5	0,098	0,098	0,392	0,00884	0,00960	0,063	0,921
6	0,065	0,065	0,260	0,00372	0,00423	0,028	0,879
7	0,098	0,065	0,326	0,00592	0,00637	0,042	0,929
8	0,131	0,065	0,392	0,00788	0,00852	0,056	0,925

2.4. Методика дослідження гідравлічних параметрів водоприймачів

Після встановлення водоприймального трапу в проектне положення та монтажу відвідного трубопроводу і герметизації вихідного вузла дослідний резервуар заповнювали чистою водопровідною водою. Перед кожною серією дослідів виконували перевірку водоприймача на герметичність, з тим, щоб жоден стик чи з'єднання не пропускали воду. Далі за допомогою спеціальних кріплень (рис. 2.7) виконували тонке налаштування строго горизонтального розташування решітки водоприймача. Для забезпечення надійної роботи п'єзометрів на початку кожної серії виконували їх продувку зворотним потоком повітря.

Перед початком та по завершенню кожної серії дослідів визначали нульові значення показів п'єзометрів, що відповідають рівню води в центральній частині дослідного резервуара, рівному позначці верхньої площини водоприймача. На початку, в середині та в кінці кожної серії дослідів вимірювали температуру води з точністю 0,1 ^{o}C.

Об'ємну витрату потоку води крізь водоприймальний трап і відвідний трубопровід, а також п'єзометричні позначки рівнів води в центральній частині дослідного резервуара визначали після 1–2-хвилинного притоку води з постійною об'ємною витратою. Витрату потоку плавно змінювали з допомогою регулювального вентиля (рис. 2.4).

Об'єм води, що надходив у дослідний резервуар, вимірювали за допомогою лічильника МТК UA 50FS. Для підвищення точності визначення об'ємної витрати для кожної експериментальної точки виконували мінімум два вимірювання часу, за який у дослідний резервуар надходив певний об'єм води. П'єзометричні позначки рівнів води в центральній частині дослідного резервуара вимірювали за двома контрольними п'єзометрами №1 та №2, розташованими на протилежних сторонах дослідного резервуару.

З метою контролю повторюваності результатів, для кожного водоприймача виконували принаймні два проходження в діапазоні змін витрати від мінімальної до максимальної та у зворотному напрямку.

2.5. Математична обробка та похибки експериментальних результатів

2.5.1. Основні формули для математичної обробки результатів

Пропускна здатність дощоприймача приймалася рівною об'ємній витраті води в напірному трубопроводі і визначалася як частка об'єму W, виміряного за допомогою лічильника МТК UA 50FS, та часу t:

$$Q = W / t . \tag{2.5}$$

Геометричний напір на підході до водоприймального пристрою визначали як середнє арифметичне за показами двох п'єзометрів-рівнемірів, розташованих з протилежних сторін дослідного резервуара:

$$h_{mid} = \frac{(z_1 - z_{1,0}) + (z_2 - z_{2,0})}{2}, \tag{2.6}$$

де $z_{1,0}$, $z_{2,0}$ – нульові значення показів відповідно п'єзометра №1 і №2;

z_1, z_2 – поточні покази відповідно п'єзометра №1 і №2.

У режимі ВШП коефіцієнт витрати дощоприймача визначали, виходячи з формули (1.1):

$$C_w = \frac{(3/2)^{3/2} Q}{L_w \sqrt{g} h_{mid}^{3/2}} \tag{2.7}$$

де L_w – периметр ВШП; для досліджуваного дощоприймача Basic 400 зі стандартною стрижневою решіткою зі всебічним притоком у загальному випадку: $L_w = 2(b_{w1} + b_{w2})$, а для квадратних решіток: $L_w = 4\, b_w$.

Для зручності порівняння з прийнятими на практиці в Україні рекомендаціями щодо гідравлічного розрахунку ВШП, паралельно з визначенням коефіцієнта витрати C_w за міжнародним стандартом ISO 3846:2008 [80], розраховували також відповідні значення коефіцієнта витрати m. З врахуванням того, що швидкісні напори потоку на зовнішньому контурі дослідного резервуара, у місцях вимірювання п'єзометричних напорів h_1 та h_2, навіть за максимальних значень витрати Q не перевищували 0,002 мм (додаток Г), а відношення швидкісних напорів до середнього значення геометричного напору h_{mid} становило максимум 1/10000, повний напір H у формулі (1.4) з

точністю не більше як на 0,01% відрізняється від відповідного геометричного напору h_{mid}.

Тоді коефіцієнт витрати m:

$$m = \frac{Q}{L_w \sqrt{2g} h_{mid}^{3/2}}. \tag{2.8}$$

У режимі отвору відповідний коефіцієнт витрати C_o визначали з формули (1.25):

$$C_o = \frac{Q}{\omega_o \sqrt{2gh_{mid}}}, \tag{2.9}$$

де ω_o – сумарна площа отворів водоприймальної решітки.

2.5.2. Відносні похибки експериментальних результатів

Виходячи з різної структури формули для визначення коефіцієнтів витрати в режимі ВШП C_w та в режимі отвору C_o, розрахункові залежності для оцінки відносних похибок для вказаних режимів також відрізняються. Нехтуючи похибкою за прискоренням вільного падіння, яке приймали рівним g=9,81 м/с^2, відносна похибка експериментального визначення коефіцієнта витрати в режимі ВШП:

$$\delta C_w = \frac{\Delta C_w}{C_w} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta L_w}{L_w} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta h_{mid}}{h_{mid}}, \tag{2.10}$$

де ΔC_w – абсолютна похибка експериментального визначення коефіцієнта витрати C_w;

ΔQ, ΔL_w, Δh_{mid} – абсолютні похибки вимірювання відповідно об’ємної витрати, периметра водозливного отвору та середнього геометричного напору на підході до водоприймача.

Відносна похибка визначення коефіцієнта витрати у режимі отвору:

$$\delta C_o = \frac{\Delta C_o}{C_o} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta \omega_o}{\omega_o} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta h_{mid}}{h_{mid}}, \tag{2.11}$$

де ΔC_o – абсолютна похибка експериментального визначення коефіцієнта витрати C_o;

$\Delta\omega_o$ – абсолютна похибка визначення сумарної площі отворів решітки водоприймача.

Довжину однієї сторони водоприймального отвору b_w вимірювали штангенциркулем з точністю 0,1 мм, відтак максимальна абсолютна похибка визначення периметра водозливного отвору становила $\Delta L_{w.\max}$= 0,4 мм. Відносна похибка вимірювання периметру залежала від значення периметру ΔL_w, відповідні значення наведені в табл. 2.2.

Відносна похибка обчислення площі ω_w по контуру водозливного отвору:

$$\delta\omega_w = \frac{\Delta\omega_w}{\omega_w} = \frac{\Delta b_{w1}}{b_{w1}} + \frac{\Delta b_{w2}}{b_{w2}}, \qquad (2.12)$$

а відносна похибка визначення сумарної площі ω_o отворів квадратної решітки:

$$\delta\omega_o = \frac{\Delta\omega_o}{\omega_o} = 2\frac{\Delta(b_w - ne)}{(b_w - ne)}, \qquad (2.13)$$

тоді як прямокутних решіток:

$$\delta\omega_o = \frac{\Delta\omega_o}{\omega_o} = \frac{\Delta(b_{w1} - n_1 e)}{(b_{w1} - n_1 e)} + \frac{\Delta(b_{w2} - n_2 e)}{(b_{w2} - n_2 e)}. \qquad (2.14)$$

Граничні максимально допустимі значення відносних похибок $\delta\omega_w$ та $\delta\omega_o$ залежно від типу досліджуваної решітки наведені в табл. 2.2. Відносна похибка визначення водозливного периметра решітки L_w зростає зі зменшенням габаритів решітки, а саме від 0,03% для повнорозмірної решітки №1 до 0,15% для мінімальної дослідженої решітки №6. Аналогічна залежність має місце також для відносних похибок визначення характерних площ. Для сумарної площі отворів решіток ω_o відносна похибка збільшується від 0,06% для решітки №1 до 0,32% для решітки №6, тоді як для площі водозливного контуру решіток ω_w відносна похибка зростає від 0,06% для решітки №1 до 0,31% для решітки №6 (табл. 2.2).

Відносну похибку експериментального визначення об'ємної витрати з врахуванням (2.10), визначали за формулою:

$$\delta Q = \frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta W}{W} + \frac{\Delta t}{t}, \qquad (2.15)$$

де $\Delta W/W = \delta W$ – відносна похибка експериментального вимірювання об'єму W; $\Delta t / t$ – відносна похибка вимірювання часових інтервалів.

Таблиця 2.2. Максимальні відносні похибки визначення характерних периметрів та площ решіток дощоприймача

Параметр	Граничні відносні похибки (%) для решітки:							
	№1 (12×12)	№2 (8×8)	№3 (6×6)	№4 (4×4)	№5 (3×3)	№6 (2×2)	№7 (3×2)	№8 (4×2)
Периметр L_w	0,027	0,038	0,050	0,076	0,102	0,154	0,123	0,102
Площа ω_o	0,058	0,080	0,106	0,160	0,213	0,317	0,265	0,239
Площа ω_w	0,055	0,076	0,101	0,153	0,204	0,308	0,256	0,230

Об'єм води, що надходив у дослідний резервуар, вимірювали за допомогою лічильника МТК UA 50FS з максимальною відносною похибкою $\delta W = 2$ %. Час вимірювали вручну за допомогою електронного секундоміра з розділювальною здатністю до 0,01 с. Максимальна абсолютна похибка вимірювання часових інтервалів з врахуванням реакції дослідника становила $\Delta t = 0{,}1$ с. Для мінімізації відносної похибки за об'ємною витратою контрольний об'єм води щоразу вибирали з розрахунку, щоб значення часового інтервалу було не меншим за 25 с. Таким чином, максимальна відносна похибка вимірювання часових інтервалів становила:

$$\Delta t / t = 0{,}1 / 25 = 0{,}004 = 0{,}4\%, \tag{2.16}$$

а максимальна відносна похибка визначення об'ємної витрати:

$$(\Delta Q / Q)_{\max} = (\Delta W / W + \Delta t / t)_{\max} = 2{,}4\%. \tag{2.17}$$

Покази п'єзометрів-рівнемірів $z_{1,0}$, $z_{2,0}$, z_1 , z_2 визначали з максимальною абсолютною похибкою 0,5 мм. Відповідно, абсолютна похибка за напорами h_1 і h_2 становила 1,0 мм, а за середнім напором h_{mid}, відповідно до формули (2.6) ±0,5 мм. Враховуючи, що значення геометричного напору h_{mid} змінювалося в межах від 5,0 мм до 124 мм, відносна похибка визначення напору h_{mid} змінювалося в широких межах а саме від ±10% до ±0,40% відповідно. Окрім того, враховуючи відмінність структур розрахункових залежностей для

коефіцієнта пору в режимі ВШП C_w та коефіцієнта витрати в режимі отвору C_o, однакова відносна похибка визначення напору h_{mid} зумовлює істотно більшу відносну похибку за коефіцієнтом C_w.

У таблиці 2.3 наведено оцінку максимальних відносних похибок визначення коефіцієнтів витрати C_w та C_o для всіх досліджених решіток з врахуванням фактичних значень граничних напорів для обох режимів і для всіх досліджуваних решіток.

Таблиця 2.3. Зведена таблиця максимальних відносних похибок експериментального визначення коефіцієнтів витрати C_w та C_o

Решітка	Режим ВШП, $\delta C_{w.max}$, %			Режим отвору, $\delta C_{o.max}$, %		
	за $h_{1.min}$	за $h_{1.mid}$	за $h_{1.max}$	за $h_{2.min}$	за $h_{2.mid}$	за $h_{2.max}$
№1	13,0	8,0	6,2	–	–	–
№2	17,0	7,3	5,3	–	–	–
№3	11,1	6,5	5,1	–	–	–
№4	11,6	6,0	4,7	–	–	–
№5	11,4	6,2	4,8	3,12	2,99	2,91
№6	–	–	–	3,47	3,02	2,91
№7	8,7	7,1	6,2	3,30	2,99	2,89
№8	9,3	6,6	5,4	3,19	3,07	3,00

Граничні відносні похибки експериментального визначення коефіцієнта витрати в режимі ВШП для всіх досліджених решіток дощоприймача систематично і суттєво перевищували аналогічні відносні похибки для режиму отвору. Найбільший внесок у значення граничних відносних похибок у режимі ВШП складали похибки визначення геометричного напору h_{mid}. Максимальні значення граничних похибок визначення коефіцієнта витрати C_w (до 17%) відповідають мінімальному прийнятому значенню геометричного напору 5 мм та решіткам з найменшими значеннями водозливного периметра L_w.

Дослідження прямокутних решіток (№7 та №8) розпочинали з дещо більших значень напору h_{mid} = 11,1–12,7 мм при яких гранична відносна похибка за коефіцієнтом витрати C_w вже не перевищувала 10% (табл. 2.3). У режимі отвору граничні значення відносної похибки експериментального визначення коефіцієнта витрати C_o не перевищували 3,6%, причому, враховуючи відносно великі значення напору h_{mid} в режимі отвору, основну частку відносної похибки коефіцієнта C_o склала відносна похибка за об'ємною витратою (2,4%).

2.6. Висновки

1. Враховуючи математичну складність, багатофакторність та відповідно суттєві похибки аналітичного та чисельного комп'ютерного моделювання течій крізь водоприймальні пристрої, у дисертаційній роботі виконано систематичні фізичні експерименти з метою отримання гідравлічних характеристик водоприймачів у формі залежностей їх пропускної здатності від геометричного напору потоку води на підході до водоприймача.

2. Запроектовано і змонтовано дослідну установку для експериментального визначення пропускної здатності водоприймачів (рис. 2.1–2.4), що відповідає вимогам європейського стандарту EN 1253-2:2003 до гідравлічного випробування водоприймальних пристроїв різних типів: дощоприймачів, водоприймальних трапів, водостічних вирв і т.п.

3. Конструкція та розміри дослідної установки дозволяє виконувати гідравлічні випробування водоприймальних пристроїв з номінальним діаметром відвідного трубопроводу до 200 мм включно. Це дозволяє моделювати гідравлічні режими роботи більшості типових водоприймачів у натурному масштабі, а найбільш габаритних – за незначного лінійного зменшення розмірів (до 2–3 разів).

4. Розроблено методику виконання експериментальних досліджень дощоприймачів та водоприймальних трапів. Удосконалено систему кріплення досліджуваного водоприймача, що дозволяє з високою точністю встановлювати

його як в строго горизонтальне положення, так і моделювати, за необхідності, довільний похил площини водоприймального отвору до горизонту.

5. Розроблено методику математичної обробки вихідних гідравлічних характеристик дощоприймачів з метою отримання ряду похідних параметрів та характеристик, зокрема: значення пропускної здатності за характерного напору 20 мм; значення транзитних напорів та витрат, що відповідають переходам з режиму ВШП в змішаний режим та в режим отвору; залежності коефіцієнтів витрати в різних режимах роботи водоприймача як від напору, так і від критерію Фруда для потоку на порозі водоприймального отвору.

6. Отримано залежності (2.10)–(2.17) для визначення відносних похибок експериментального визначення гідравлічних параметрів водоприймальних пристроїв: пропускної здатності Q, геометричного напору h_{mid}, коефіцієнтів витрати у режимі ВШП C_w та у режимі отвору C_o.

7. Виконано оцінку граничних, максимально допустимих відносних похибок основних гідравлічних параметрів водоприймачів. Відносна похибка визначення об'ємної витрати Q не перевищувала 2,4%, водозливного периметра L_w – від 0,03% до 0,10%, сумарної площі водоприймальних отворів ω_o – від 0,06% до 0,24%.

8. Відносна похибка експериментального визначення коефіцієнта витрати у режимі ВШП C_w суттєво зростає зі зменшенням периметра L_w , а особливо – зі зменшенням напору h_{mid}. Граничні значення відносних похибок за C_w становили у межах від 4,7% до 17,0% (табл. 2.3).

9. У режимі отвору граничні значення відносної похибки визначення коефіцієнта витрати C_o не перевищували 3,5% (табл. 2.3), причому основну частку відносної похибки коефіцієнта C_o склала відносна похибка за об'ємною витратою, що не перевищувала 2,4%.

РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ДОЩОПРИЙМАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Типи течії та режими роботи водоприймачів

Аналіз попередніх наукових праць, представлений у розділі 1, вказує на наявність різних підходів до класифікації потоків крізь водоприймальні елементи, що зумовлює відмінності в методах їх гідравлічного моделювання, в рекомендованих діапазонах різних режимів та типів течій, а також в значеннях відповідних коефіцієнтів витрати.

Першим фактором, який є визначальним для гідравлічного моделювання роботи будь-якого водоприймача, є тип течії крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід". Потрібно чітко розрізняти два типи течії: непідтоплену та підтоплену.

При непідтопленій течії має місце розрив потоку всередині камери чи корпусу водоприймача. Непідтоплена течія включає два пов’язаних але окремих гідравлічних процеси: безнапірну чи напірну течію крізь отвори водоприймальної решітки чи іншого водоприймального елемента, а також безнапірну чи напірну течію у відвідному трубопроводі. З практичної точки зору перша течія є значно важливішою за другу, оскільки основною функцією будь-якого водоприймача є забезпечення необхідної пропускної здатності за якомога меншого напору затоплення решітки. Щодо типу течії у відвідному трубопроводі, то згідно нормативних документів, чинних у різних країнах світу, немає особливих проблем у короткочасній роботі мереж дощового водовідведення у напірному режимі. За наявності розриву потоку всередині водоприймача гідравлічні параметри відвідного трубопроводу ніяк не впливають на потік крізь решітку. Відповідно, потік крізь решітку визначається величиною напору h, який дорівнює перевищенню позначки рівня води над площиною водоприймальної решітки (рис. 3.1).

Враховуючи наявність щонайменше двох режимів течії крізь водоприймальну решітку (режим ВШП та режим отвору), а також наявність

двох режимів течії у відвідному трубопроводі (безнапірний та напірний), отримуємо мінімум 4 можливих гідравлічних схеми, наведених на рис. 3.1,а–г. Ряд попередніх досліджень [68, 132] вказують на доцільність виділення між режимами ВШП та отвору ще третього, змішаного режиму течії крізь водоприймальну решітку, – так званого комбінованого режим (mix flow), фізична суть якого може бути пояснена роботою зовнішньої частини водоприймальних отворів у режимі напірного витікання крізь отвір, а деякого внутрішнього контуру в режимі ВШП.

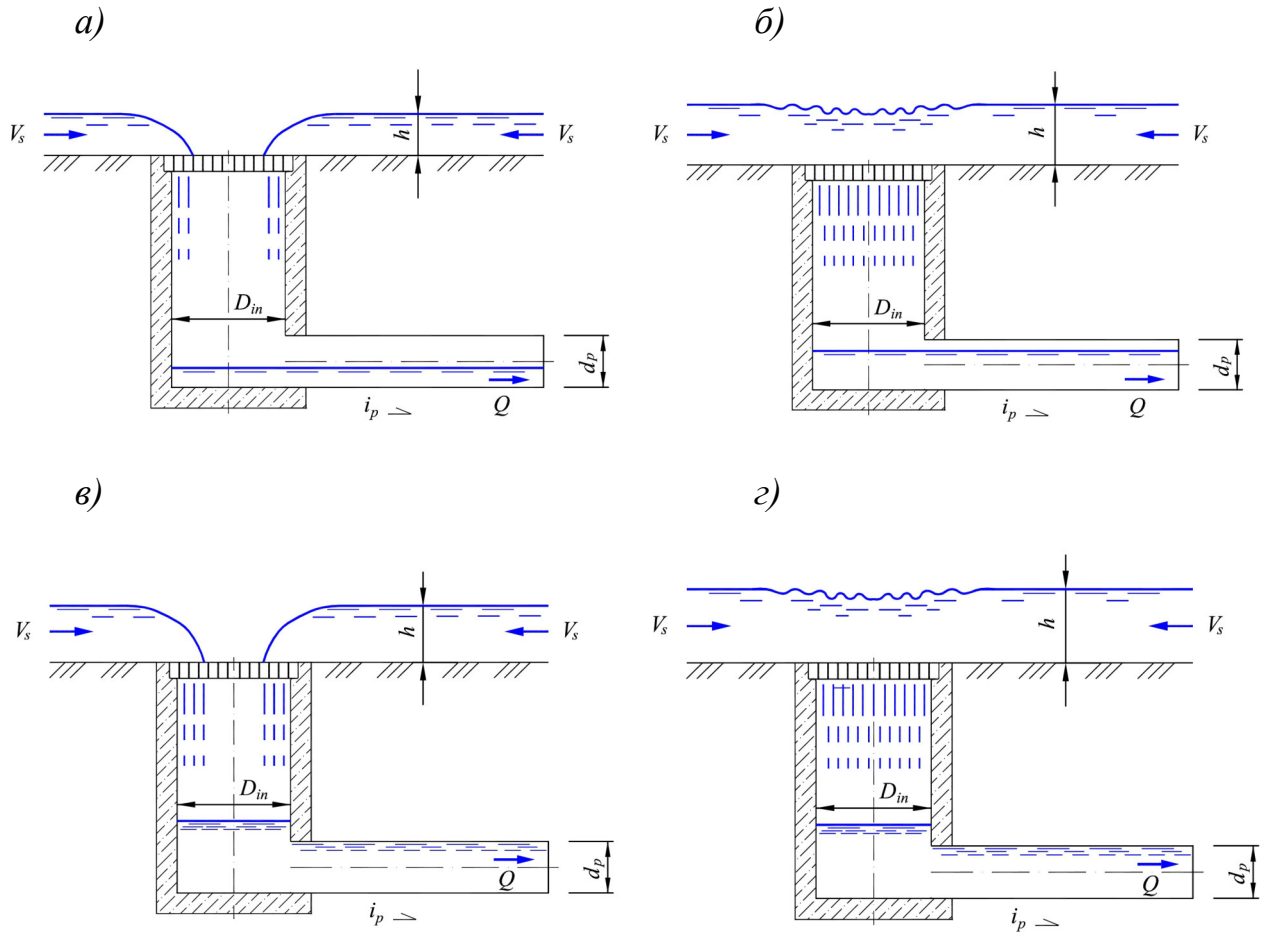


Рис. 3.1. Принципові схеми гідравлічних процесів для непідтопленого типу течії крізь водоприймальний елемент та водовідвідний трубопровід:
а, в – режим ВШП на водоприймальній решітці; б, г – режим отвору на решітці;
а, б та в, г – відповідно безнапірна та напірна течія у відвідному трубопроводі

Затоплена течія крізь водоприймальний пристрій (рис. 3.2) характеризується наявністю суцільного нерозривного потоку від вільної поверхні рідини над площиною водоприймальної решітки до вихідного перерізу відвідного трубопроводу, під яким звичайно розуміють точку приєднання відвідного трубопроводу до водовідвідного трубопроводу (колектора) великого діаметра. Таким чином, рушійною різницею напорів H для затопленої течії є різниця позначки рівня води на вільній поверхні над решіткою та позначки осі труби відвідного трубопроводу в його кінцевому перерізі, тобто в місці приєднання до колектора великого розміру.

Враховуючи нерозривність потоку між перерізами 1–1 та 2–2, на параметри затопленої течії впливають гідравлічні опори всіх елементів, розташованих між цими перерізами: водоприймальної решітки, спеціальних засобів для попереднього очищення стоку, гідро затворів та ін. (за наявності), а також відвідного трубопроводу. Перехід від непідтопленої до підтопленої течії відбувається за деякої граничної витрати притоку Q_{lim}, що відповідає загальному напору H_{lim} та глибині підтоплення решітки водоприймача h_{lim}, причому всі ці параметри є взаємопов’язані та залежать від гідравлічних опорів окремих елементів та загального гідравлічного опору системи "водоприймач – відвідний трубопровід" у цілому.

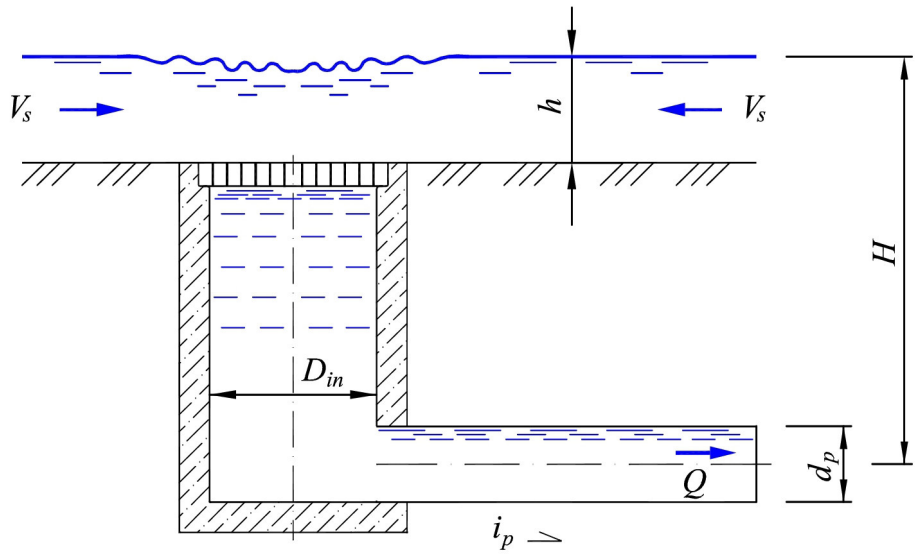


Рис. 3.2. Принципова схема затопленої течії крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід"

Таким чином, за об’ємних витрат притоку, що перевищують граничну витрату Q_{lim}, можливий тільки затоплений тип течії з коефіцієнтами витрати, що відповідають загальному гідравлічного опору системи "водоприймач – відвідний трубопровід" (рис. 3.3). Якщо ж витрата притоку є меншою за граничне значення Q_{lim}, в камері чи корпусі дощоприймача має місце розрив струменя і верхній потік крізь водоприймальну решітку визначається повністю напором води над площиною решітки, а також геометричними параметрами та гідравлічним опором самої решітки. При цьому течія крізь водоприймальну решітку може відбуватися максимум у трьох різних режимах, а саме в режимі ВШП, в комбінованому режимі та в режимі отвору з перехідними (транзитними) витратами $Q_{tr.1}$ та $Q_{tr.2}$ відповідно (рис. 3.3). Транзитні витрати залежать від периметра, площі отворів та інших конструкційних особливостей водоприймальної решітки. У випадку, якщо транзитна витрата $Q_{tr.2}$ є більшою, ніж гранична витрата Q_{lim}, режим отвору – відсутній, і комбінований режим напряму переходить у затоплену течію. Аналогічно, якщо транзитна витрата $Q_{tr.1}$ є більшою, ніж гранична витрата Q_{lim}, відсутні як режим отвору, так і комбінований режим, і режим ВШП напряму переходить у затоплену течію.

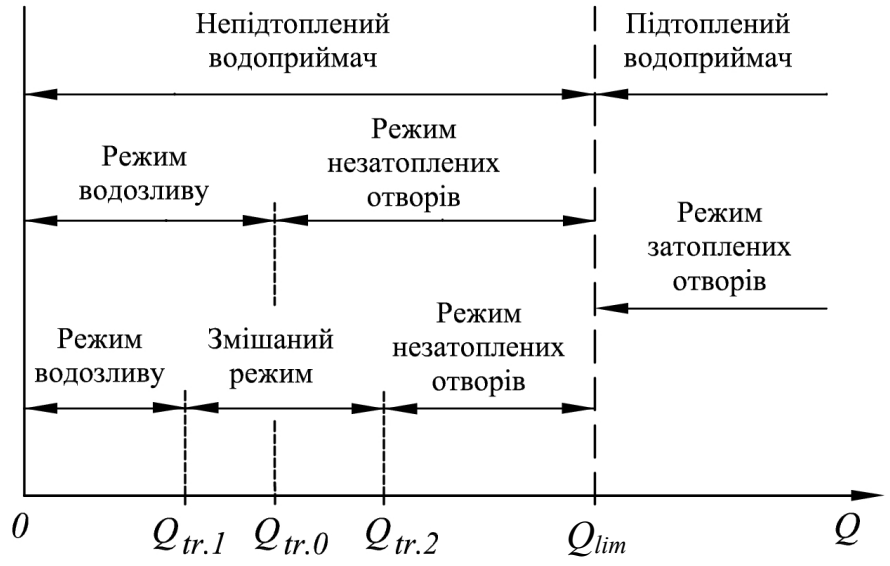


Рис. 3.3. Типи та режими течії у водоприймачах: Q_{lim} – гранична витрата, яка відповідає затопленню дощоприймача; Q_{tr0} –транзитна витрата у двохзонній моделі; Q_{tr1}, Q_{tr2} – нижня та верхня транзитні витрати

3.2 Моделювання затопленої течії крізь систему дощоприймач – відвідний трубопровід

Ефективність реалізації запропонованого удосконаленого методу гідравлічного розрахунку водоприймачів точкового типу залежить від точності визначення ключових кількісних параметрів пропускної здатності. Найважливішим параметром з цього ряду є гранична пропускна здатність системи дощоприймач – водовідвідний трубопровід Q_{lim}, що безпосередньо впливає на тип течії в дощоприймачі.

Розглянемо найпростішу схему влаштування точкового водоприймача, без кольматації решітки та без замулення камери дощоприймача та / або відвідного трубопроводу, а також без гідрозатвору та без внутрішніх сміттє-затримувальних чи інших пристроїв для попереднього очищення поверхневого стоку (рис. 3.4). Внутрішній діаметр відвідного трубопроводу становить d_p, його довжина – L_p, а поздовжній похил прокладання – i_p. Відвідний трубопровід закінчується приєднанням до водовідвідного колектора великого діаметра. Таким чином, припускаємо відсутність підтоплення цього колектора за будь-яких режимів роботи дощоприймача та відвідного трубопроводу.

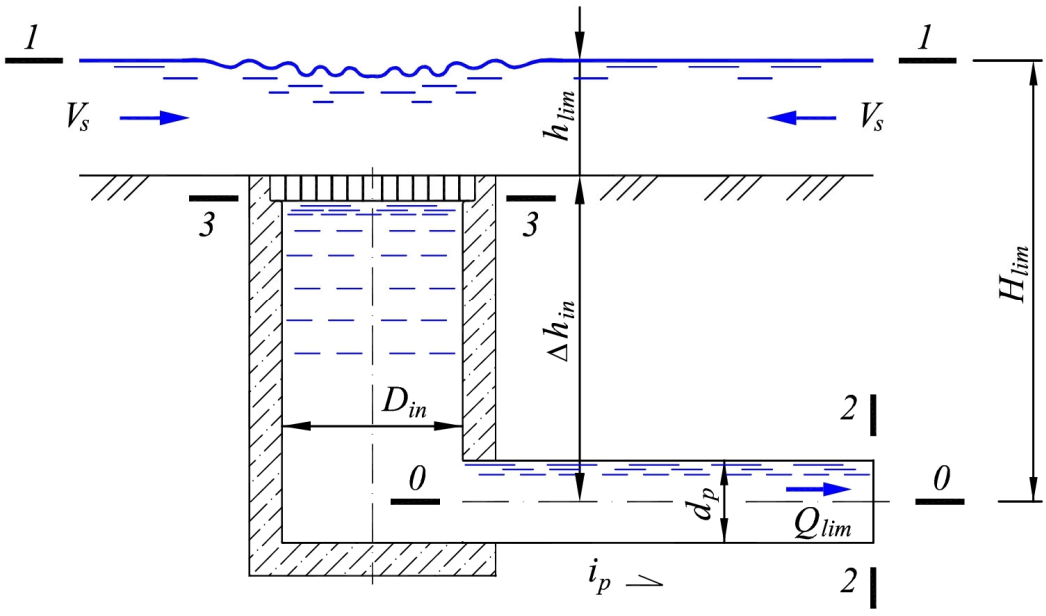


Рис. 3.4. Розрахункова схема початку підтопленої течії крізь водоприймач та відвідний трубопровід за граничної витрати Q_{lim}

Гранична пропускна здатність системи дощоприймач – водовідвідний трубопровід Q_{lim}, за визначенням, відповідає точці переходу дощоприймача з непідтопленого в підтоплений тип течії, тобто початку повного заповнення поверхневим стоком водоприймальної камери дощоприймача (рис. 3.4). Таким чином, гранична витрата Q_{lim} є функцією гідравлічного напору H_{lim}, що визначається як перевищення рівня вільної поверхні води на підході до решітки водоприймача над позначкою осі відвідного трубопроводу у місці його приєднання до колектора великого діаметра.

Записуючи рівняння Бернуллі для перерізів 1–1 та 2–2 (рис. 3.4), за умови, що горизонтальна площина порівняння 0–0 проходить через вісь відвідного трубопроводу в його вихідному перерізі, можна отримати:

$$H_{\lim} = \frac{\alpha_p V_{p.\lim}^2}{2g} + h_{w.\lim.1-2}, \qquad (3.1)$$

де $V_{p.lim}$ – середня швидкість напірного потоку у водовідвідній трубі за граничної витрати Q_{lim};

α_p – коефіцієнт кінетичної енергії (коефіцієнт Коріоліса) для напірного потоку у водовідвідній трубі, враховуючи незначний діапазон зміни коефіцієнта кінетичної енергії для турбулентного режиму напірної течії в круглоциліндричних трубах, надалі значення коефіцієнта α_p прийнято постійним і таким, що дорівнює 1,05;

$h_{w.lim.1-2}$ – сумарні втрати напору в системі "дощоприймач – відвідний трубопровід" за граничної витрати потоку Q_{lim}.

З геометричних міркувань напір H_{lim} визначається як

$$H_{\lim} = h_{\lim} + \Delta h_{in} + i_p L_p, \qquad (3.2)$$

де h_{lim} – глибина поверхневого потоку відносно верхньої площини водоприймальної решітки за граничної витрати Q_{lim}; Δh_{in} – конструкційна глибина водоприймального пристрою, яка визначається як перевищення верхньої площини водоприймальної решітки над віссю відвідного трубопроводу; $i_p L_p$ – перепад позначок осі на початку та в кінці відвідного трубопроводу.

Сумарні втрати напору в системі "дощоприймач – відвідний трубопровід" визначаються як сума втрат напору у всіх елементах, які послідовно проходить потік. У найпростішому випадку, за відсутності додаткових гідравлічних опорів, спричинених кольматацією, замуленням та наявністю в камері водоприймача гідрозатвору або сміттєзатримувальних чи очисних пристроїв – це сума втрат напору в отворах дощоприймальної решітки, втрат напору по довжині та на місцевих опорах відвідного трубопроводу:

$$h_{w.\lim.1-2} = h_{w.gr} + h_{p.L} + h_{p.loc}, \tag{3.3}$$

де $h_{w.gr}$ – втрати напору у вхідних отворах водоприймальної решітки;

$h_{p.L}$ – втрати напору по довжині відвідного трубопроводу;

$h_{p.loc}$ – втрати напору на місцевих опорах відвідного трубопроводу.

Виражаючи втрати напору в рівнянні (3.2) за формулами Вайсбаха для місцевих опорів та Дарсі-Вайсбаха для втрат по довжині [39, 40] , отримуємо:

$$h_{w.\lim.1-2} = \frac{\zeta_o V_{o.\lim}^2}{2g} + \frac{(\lambda_{p.\lim} L_p / d_p + \Sigma\zeta_p) V_{p.\lim}^2}{2g}, \tag{3.4}$$

де ζ_o – коефіцієнт місцевого опору отворів водоприймальної решітки; $V_{o.lim}$ – середня швидкість напірного потоку у отворах водоприймальної решітки за граничної витрати Q_{lim}; $\lambda_{p.\lim}$, $\Sigma\zeta_p$ – коефіцієнт гідравлічного тертя та сумарний коефіцієнт місцевих опорів відвідного трубопроводу відповідно.

У рівнянні (3.4) зручно всі втрати напору виразити через швидкісний напір у відвідній трубі. З рівняння нерозривності потоку:

$$V_{o.\lim}\omega_o = V_{p.\lim}\omega_p, \tag{3.5}$$

де ω_o – сумарна площа отворів водоприймальної решітки; ω_p – площа живого перерізу потоку у відвідній трубі, $\omega_p = \pi d_p^2 / 4$.

Отже,

$$V_{o.\lim} = \frac{\pi d_p^2}{4\omega_o} V_{p.\lim}, \tag{3.6}$$

звідки рівняння (3.4) можна записати у вигляді:

$$h_{w.\lim.1-2} = \left(\frac{\zeta_o \pi^2 d_p^4}{16\omega_o^2} + \frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p \right) \frac{V_{p.\lim}^2}{2g}. \qquad (3.7)$$

З урахуванням рівнянь (3.2) та (3.7) рівняння Бернуллі (3.1) набуває вигляду:

$$(h_{\lim} + \Delta h_{in} + i_p L_p) = \left(\frac{\zeta_o \pi^2 d_p^4}{16\omega_o^2} + \frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p + \alpha_p \right) \frac{V_{p.\lim}^2}{2g}, \qquad (3.8)$$

або, з врахуванням, що середня швидкість у відвідному трубопроводі

$$V_{p.\lim} = \frac{4Q_{\lim}}{\pi d_p^2}, \qquad (3.9)$$

можна отримати загальний розв'язок у вигляді:

$$(h_{\lim} + \Delta h_{in} + i_p L_p) = \left(\frac{\zeta_o \pi^2 d_p^4}{16\omega_o^2} + \frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p + \alpha_p \right) \frac{8Q_{\lim}^2}{\pi^2 g d_p^4}. \qquad (3.10)$$

Таким чином, гранична витрата для кожного водоприймача з відвідним трубопроводом є унікальною та залежить як від параметрів дощоприймача (Δh_{in}, ζ_o), так і від діаметра, протяжності та гідравлічних характеристик течії у відвідному трубопроводі:

$$Q_{\lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 g d_p^4 (h_{\lim} + \Delta h_{in} + i_p L_p)}{8\left(\frac{\zeta_o \pi^2 d_p^4}{16\omega_o^2} + \frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p + \alpha_p \right)}}. \qquad (3.11)$$

Після винесення площі відвідного трубопроводу ω_p з-під знака кореня вираз для визначення граничної витрати потоку набуває вигляду:

$$Q_{\lim} = \frac{\pi d_p^2}{4} \sqrt{\frac{2g(h_{\lim} + \Delta h_{in} + i_p L_p)}{\left(\frac{\zeta_o \pi^2 d_p^4}{16\omega_o^2} + \frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p + \alpha_p \right)}}. \qquad (3.12)$$

Рівняння (3.12) зручно спростити до вигляду:

$$Q_{\lim} = \frac{\pi d_p^2}{4} \sqrt{\frac{2g(h_{\lim} + \Delta h_{in} + i_p L_p)}{\zeta_{tot}}}. \qquad (3.13)$$

де ζ_{tot} – сумарний приведений коефіцієнт гідравлічного опору системи "дощоприймач – відвідний трубопровід":

$$\zeta_{tot} = \frac{\zeta_o \pi^2 d_p^4}{16\omega_o^2} + \frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p + \alpha_p . \qquad (3.14)$$

Узагальнюючи рівняння (3.13), пропускну здатність системи "водоприймач − відвідний трубопровід" можна представити у формі рівняння напірного витікання:

$$Q_{\lim} = C_{tot}\omega_p \sqrt{2gH_{\lim}} , \qquad (3.15)$$

де C_{tot} − коефіцієнт витрати системи "водоприймач − відвідний трубопровід";

$$C_{tot} = \frac{1}{\sqrt{\zeta_{tot}}} . \qquad (3.16)$$

З математичної точки зору рівняння (3.12) та (3.13) є невизначеними, оскільки окрім граничної витрати Q_{lim} невідомим є також значення відповідної глибини підтоплення водоприймача h_{lim}.

Записуючи рівняння Бернуллі для перерізів 1–1 та 3–3 (рис. 3.4), після підстановки втрат напору на решітці, отримуємо:

$$h_{\lim} = \frac{(\alpha_o + \zeta_o) Q_{\lim}^2}{2g\omega_o^2} , \qquad (3.17)$$

де α_o − коефіцієнт кінетичної енергії потоку рідини безпосередньо в отворах решітки; надалі значення коефіцієнта α_o прийнято постійним і рівним 1.

Підставляючи (3.17) в (3.10), отримуємо:

$$\left(\frac{\zeta_o Q_{\lim}^2}{2g\omega_o^2} + \Delta h_{in} + i_p L_p \right) = \left(\frac{\zeta_o \pi^2 d_p^4}{16\omega_o^2} + \frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p + \alpha_p \right) \frac{8Q_{\lim}^2}{\pi^2 g d_p^4} , \qquad (3.18)$$

звідки, після скорочення втрат напору на решітці в лівій та правій частинах рівняння (3.18):

$$\left(\Delta h_{in} + i_p L_p \right) = \left(\frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p + \alpha_p \right) \frac{8Q_{\lim}^2}{\pi^2 g d_p^4} . \qquad (3.19)$$

Таким чином, гранична витрата:

$$Q_{\lim} = \frac{\pi d_p^2}{4} \sqrt{\frac{2g(\Delta h_{in} + i_p L_p)}{\left(\frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p + \alpha_p \right)}} \tag{3.20}$$

або скорочено:

$$Q_{\lim} = \frac{\pi d_p^2}{4} \sqrt{\frac{2g(\Delta h_{in} + i_p L_p)}{\zeta_{p.tot}}}, \tag{3.21}$$

де $\zeta_{p.tot}$ – сумарний приведений коефіцієнт гідравлічного опору відвідного трубопроводу:

$$\zeta_{p.tot} = \frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p + \alpha_p . \tag{3. 22}$$

Після визначення граничної витрати Q_{lim} значення відповідної глибини затоплення решітки можна визначити з рівняння (3.17).

Виконаємо чисельний аналіз рівняння (3.20) для встановлення факторів, які найсуттєвіше впливають на значення граничної витрати Q_{lim} для типових дощоприймачів, що використовуються у системах дощового водовідведення. Моделювання виконано для дощоприймача малого Д(А15) із сумарною площею отворів решітки ω_o=0,05 м^2, що відповідає мінімально допустимому значенню, регламентованому ДСТУ Б В.2.5-26:2005 [11]. Коефіцієнт місцевого опору в отворах решітки ζ_o залежить головним чином від шпаруватості решітки, і для мінімальної шпаруватості ε = 0,3 для квадратичної зони опорів за рекомендаціями НЕС-22 [124] прийнятий рівним ζ_o = 0,12.

Розрахункова гідравлічна глибина дощоприймального колодязя Δh_{in} прийнята рівною найпоширенішим на практиці значенням 0,97 м, 1,27 м та 1,57 м, що відповідають каналізаційним колодязям, влаштованим зі збірних залізобетонних елементів за ДСТУ Б В.2.6-106-2010 з модульним кроком висоти стінових кілець (КС) 300 мм, плитою перекриття водоприймальних колодязів висотою 170 мм за діаметра відвідного трубопроводу DN/OD = 200 мм. Похил відвідного трубопроводу у всіх випадках прийнято рівним i_p=0,02 згідно вимог ДБН В.2.5-75:2013 [7].

Прийнято найпоширеніші на практиці пластикові гладкостінні безнапірні труби для зовнішнього водовідведення НПВХ або ПП, з кільцевою жорсткістю SN4, для яких за номінального діаметра DN/OD=200 мм товщина стінок дорівнює 4,9 мм, а внутрішній діаметр, що використовується в гідравлічних розрахунках − d_p = 190,2 мм.

Коефіцієнт гідравлічного тертя відвідного трубопроводу визначали за напівлогарифмічною формулою, рекомендованою ДБН В.2.5-75:2013 [7]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{p.\lim}}} = -2\lg\left(\frac{\Delta_e}{3{,}42 d_p} + \frac{a_2}{\mathrm{Re}_{\lim}}\right), \qquad (3.\ 23)$$

де Δ_e − еквівалентна висота виступів шорсткості; a_2 − коефіцієнт, що враховує характер шорсткості труб та наявність завислих речовин у стічних водах; за рекомендаціями [17, 27] для пластикових водовідвідних труб прийнято Δ_e =0,2; a_2 = 20;

$\mathrm{Re}_{\lim}$ − значення критерію Рейнольдса для напірного потоку у водовідвідній трубі за граничної об'ємної витрати Q_{lim}:

$$\mathrm{Re}_{\lim} = \frac{V_{p.\lim} d_p}{\nu} = \frac{4Q_{\lim}}{\pi d_p \nu}, \qquad (3.\ 24)$$

де ν − коефіцієнт кінематичної в'язкості дощових стічних вод; прийнятий рівним $1{,}43\times10^{-6}$ м^2/с, що відповідає температурі стічних вод 10 °С та концентрації завислих речовин 600 мг/л [27].

Довжину відвідного трубопроводу при моделюванні приймали від мінімальної до максимально допустимої довжини 40 м з кроком 5 м.

Оскільки, на початку моделювання гранична витрата Q_{lim} невідома, то невідоме також значення числа Рейнольдса $\mathrm{Re}_{\lim}$, а відтак рівняння (3.23) для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя $\lambda_{p.\lim}$ є невизначеним. Відтак, систему рівнянь (3.20) та (3.23) вирішували чисельно.

Основні результати чисельного моделювання витрати Q_{lim} для пластикових відвідних трубопроводів з труб DN/OD= 200 мм (d_p = 190,2 мм), прокладених із похилом i_p = 0,02, наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Граничні пропускні здатності системи "дощоприймач − відвідний трубопровід" (труби ПВХ, SN4, DN/OD= 200 мм, d_p = 190,2 мм; i_p = 0,02; ω_o=0,05 м^2)

Параметр	Довжина відвідного трубопроводу L_p, м								
	2	5	10	15	20	25	30	35	40
1. Гідравлічна глибина дощоприймального колодязя: 0,97 м									
Q_{lim}, л/с	95,06	89,79	83,52	79,12	75,86	73,33	71,32	69,67	68,30
$V_{p.lim}$, м/с	3,346	3,160	2,939	2,785	2,670	2,581	2,510	2,452	2,404
$\mathrm{Re}_{p.lim}$	444981	420328	390965	370386	355106	343286	333857	326153	319735
h_{lim}, м	0,2063	0,1841	0,1593	0,1429	0,1314	0,1228	0,1161	0,1108	0,1065
ζ_{tot}	1,809	2,141	2,696	3,253	3,811	4,371	4,931	5,492	6,053
C_{tot}	0,743	0,683	0,609	0,554	0,512	0,478	0,450	0,427	0,406
2. Гідравлічна глибина дощоприймального колодязя: 1,27 м									
Q_{lim}, л/с	108,28	101,65	93,69	88,06	83,84	80,56	77,92	75,76	73,95
$V_{p.lim}$, м/с	3,811	3,578	3,297	3,099	2,951	2,835	2,743	2,666	2,603
$\mathrm{Re}_{p.lim}$	506900	475861	438584	412216	392484	377117	364785	354655	346178
h_{lim}, м	0,2677	0,2359	0,2004	0,1771	0,1605	0,1482	0,1387	0,1311	0,1249
ζ_{tot}	1,808	2,139	2,692	3,247	3,803	4,361	4,919	5,478	6,038
C_{tot}	0,744	0,684	0,610	0,555	0,513	0,479	0,451	0,427	0,407
3. Гідравлічна глибина дощоприймального колодязя: 1,57 м									
Q_{lim}, л/с	120,06	112,27	102,87	96,17	91,14	87,20	84,02	81,40	79,20
$V_{p.lim}$, м/с	4,226	3,952	3,620	3,385	3,208	3,069	2,957	2,865	2,788
$\mathrm{Re}_{p.lim}$	562050	525581	481548	450210	426635	408187	393320	381062	370768
h_{lim}, м	0,3292	0,2878	0,2416	0,2112	0,1897	0,1736	0,1612	0,1513	0,1432
ζ_{tot}	1,808	2,137	2,688	3,242	3,797	4,353	4,910	5,468	6,027
C_{tot}	0,744	0,684	0,610	0,555	0,513	0,479	0,451	0,428	0,407

Графічні залежності граничних пропускних здатностей системи "дощоприймач − відвідний трубопровід" для дощоприймача малого з сумарною площею вхідних отворів ω_o=0,05 м^2 та пластикових відвідних труб DN/OD= 200 мм (d_p = 190,2 мм), прокладених із поздовжнім похилом i_p = 0,02, представлені на рис. 3.5. Отримані залежності з достатньо високою для практики точністю описуються степеневими залежностями гіперболічного типу, показаними на рис. 3.5 відповідними кривими (Q_{lim} − в л/с):

− для дощоприймальних колодязів глибиною Δh_{in} = 0,97 м:

$$Q_{\lim} = 106\, L_p^{-0,115} \quad (R^2=0,975), \tag{3. 25}$$

− для дощоприймальних колодязів глибиною Δh_{in} = 1,27 м:

$$Q_{\lim} = 123\, L_p^{-0,132} \quad (R^2=0,970), \tag{3. 26}$$

− для дощоприймальних колодязів глибиною Δh_{in} = 1,57 м:

$$Q_{\lim} = 138\, L_p^{-0,143} \quad (R^2=0,967). \tag{3. 27}$$

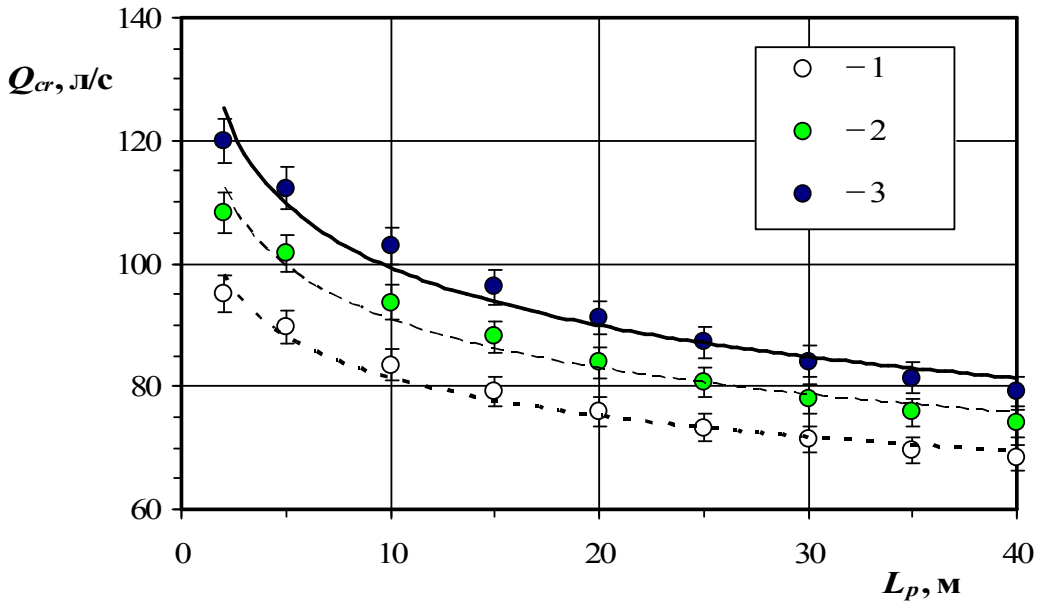


Рис. 3.5. Залежності граничної пропускної здатності системи "дощоприймач − відвідний трубопровід" від довжини відвідної труби DN/OD = 200 мм, d_p=0,1902 м; i_p=0,02 для дощоприймача малого Д(А15) ω_o=0,05 м^2:
1 − Δh_{in} = 0,97 м; 2 − Δh_{in} = 1,27 м; 3 − Δh_{in} = 1,57 м
(показано відносні відхилення ±3%)

Потрібно зазначити, що граничні пропускні здатності Q_{lim} значно перевищують номінальну пропускну здатність пластикових водовідвідних труб з діаметром $d_p = 190{,}2$ мм, прокладених із поздовжнім похилом $i_p = 0{,}02$, що відповідає переходу течії у відвідній трубі з безнапірної в напірну, яка за кінематичної в'язкості стічних вод $1{,}43\times10^{-6}$ м^2/с чисельно дорівнює $Q_0 = 59{,}4$ л/с. У діапазоні, коли об'ємна витрата притоку до дощоприймача перевищує витрату Q_0, але є меншою за відповідну граничну витрату Q_{lim}, течія у водовідвідному трубопроводі є напірною, але камера дощоприймача тільки частково заповнена стічними водами. Всередині камери водоприймача відбувається розрив потоку, а водоприймальна решітка працює в режимі ВШП чи в режимі отвору залежно від гідравлічних параметрів решітки.

Аналогічний вигляд мають залежності глибини затоплення дощоприймача при граничній пропускній здатності Q_{lim} від довжини відвідного трубопроводу (рис. 3.6).

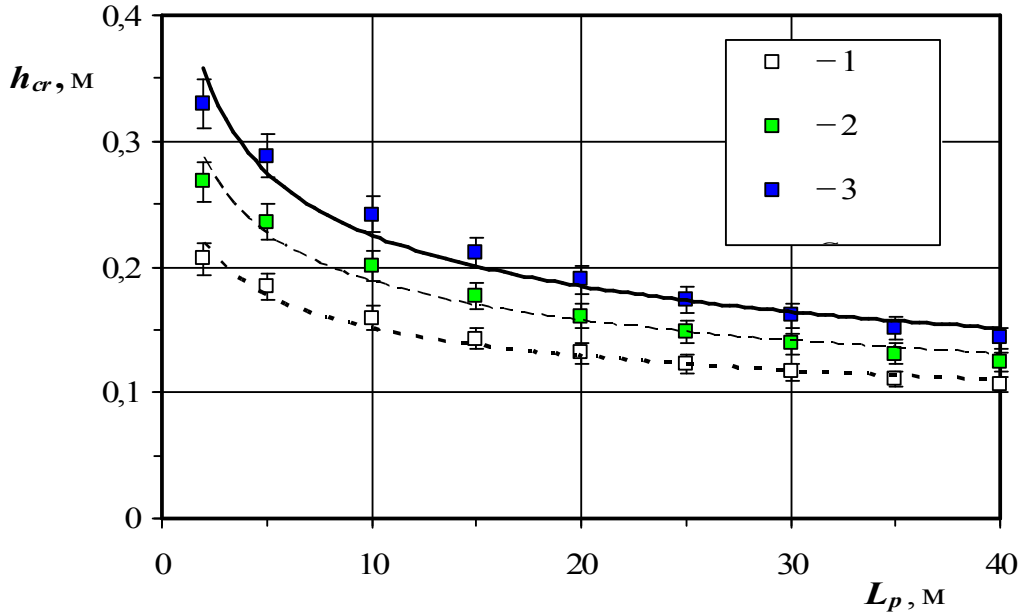


Рис. 3.6. Залежності глибини затоплення дощоприймача при граничній пропускній здатності Q_{lim} від довжини відвідного трубопроводу d_p=0,1902 м; i_p=0,02 для дощоприймача малого (ω_o=0,05 м^2, ζ_o=0,12):

1 − Δh_{in} = 0,97 м; 2 − Δh_{in} = 1,27 м; 3 − Δh_{in} = 1,57 м

(показано відносні відхилення ±6%)

Враховуючи, що граничний режимі роботи відвідних трубопроводів характеризується особливо великими значеннями чисел Рейнольдса в діапазоні (320−560)×10^3, зв'язок між Q_{lim} та h_{lim} − практично квадратичний. Степеневі лінії тренду, отримані для залежностей $h_{lim} - L_p$, є аналогічними до формул (3.25)−(3.27), характеризуються тими ж значеннями коефіцієнта детермінованості R^2, з тією різницею, що відповідні показники степеня є практично вдвічі більшими:

− для дощоприймальних колодязів глибиною Δh_{in} = 0,97 м:

$$h_{\lim} = 0{,}257\, L_p^{-0{,}229} \qquad (R^2=0{,}975), \tag{3. 28}$$

− для дощоприймальних колодязів глибиною Δh_{in} = 1,27 м:

$$h_{\lim} = 0{,}346\, L_p^{-0{,}264} \qquad (R^2=0{,}970), \tag{3. 29}$$

− для дощоприймальних колодязів глибиною Δh_{in} = 1,57 м:

$$h_{\lim} = 0{,}437\, L_p^{-0{,}287} \qquad (R^2=0{,}967). \tag{3. 30}$$

Вдвічі більшими є також і максимальні відносні відхилення розрахункових значень глибини Δh_{in} відносно відповідних степеневих ліній тренду (6% проти 3% для граничної витрати Q_{lim}).

Потрібно також зазначити, що у наведеному вище чисельному моделюванні коефіцієнт місцевого опору вхідних отворів водоприймальної решітки прийнято сталим та рівним ζ_o=0,12. Значення коефіцієнта опору ζ_o у всьому розглянутому діапазоні практично не впливає на загальний приведений коефіцієнт опору системи "водоприймач − відвідний трубопровід" ζ_{tot} (табл. 3.1), а відтак і на значення граничної витрати Q_{lim}. З іншого боку, відповідно до формули (3.17), коефіцієнт опору ζ_o має суттєвий вплив на значення глибини затоплення h_{lim}. Враховуючи математичну складність та, відповідно, надто великі похибки теоретичного чисельного визначення коефіцієнта опору ζ_o, у експериментальні частині роботи значну увагу приділено емпіричному знаходженню коефіцієнта опору ζ_o водоприймальних решіток залежно від різних вхідних параметрів.

Загальний безрозмірний коефіцієнт витрати системи "водоприймач − відвідний трубопровід" C_{tot} характеризується аналогічною залежністю від довжини відвідного трубопроводу L_p, як і параметри Q_{lim} та h_{lim} (рис. 3.7). Функція $C_{tot}\,(L_p)$ практично не залежить від гідравлічної глибини дощоприймального колодязя, що пояснюється наявністю квадратичної або доквадратичної області за всіма складовими загального коефіцієнта опору ζ_{tot}.

Степенева лінія тренду, отримана за методом найменших квадратів:

$$C_{tot} = 0{,}922\, L_p^{-0{,}206}\ (\mathrm{R}^2{=}0{,}948). \qquad (3.\,31)$$

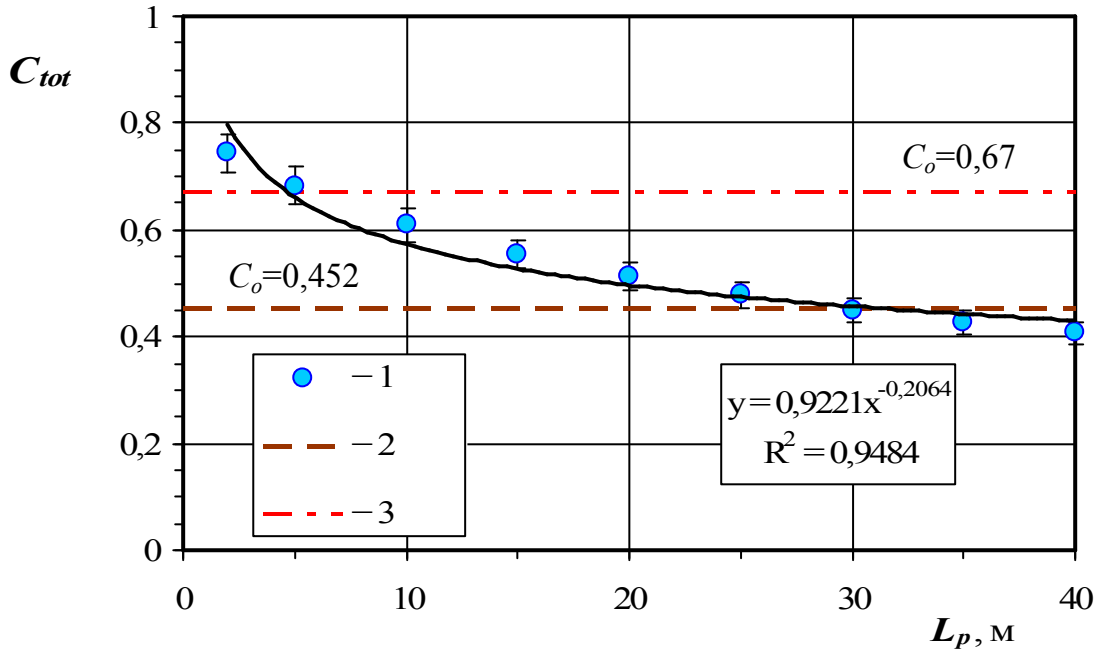


Рис. 3.7. Залежність загального коефіцієнта витрати системи "водоприймач − відвідний трубопровід" від довжини відвідного трубопроводу d_p=0,1902 м; i_p=0,02: 1 − результати моделювання; 2 − C_o=0,452 [14]; 3 − C_o=0,67 [123] (показано відносні відхилення ±5%)

Для наочності порівняння на рис. 3.7 представлені також значення C_o=0,452, рекомендоване для напірного режиму отвору ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14], а також значення C_o=0,67, рекомендоване нормативним документом HEC-22 [123].

3.3 Моделювання непідтопленої течії крізь водоприймачі

3.3.1. Взаємозв'язок між критерієм Фруда та коефіцієнтом витрати водоприймача в режимі ВШП.

Об'ємна витрата потоку крізь водоприймач у режимі ВШП:

$$Q = m_w L_w \sqrt{2g} h^{3/2} \ , \tag{3.32}$$

звідки середня швидкість потоку на перепаді:

$$V_w = \frac{Q}{L_w h_w} = \frac{m_w \sqrt{2g} h^{3/2}}{h_w} \ , \tag{3.33}$$

де h_w − глибина потоку безпосередньо на перепаді.

Критерій Фруда для потоку на вході у водоприймальний отвір:

$$\mathrm{Fr_w} = \frac{V_w^2}{g h_w} = \frac{2 m_w^2 h^3}{h_w^3} \ . \tag{3.34}$$

З іншого боку, рівняння енергії для потоку на підході до водоприймача (переріз 1−1) та безпосередньо на перепаді (переріз W−W):

$$h + \frac{V_o^2}{2g} = h_w + \frac{\alpha_w V_w^2}{2g} + \frac{\zeta_w V_w^2}{2g}, \tag{3.35}$$

де $V_o^2 / 2g$ − швидкісний напір потоку на підході до водоприймача; враховуючи збіжний характер течії, цим швидкісним напором з високим ступенем точності можна знехтувати, тобто $V_o^2 / 2g = 0$;

α_w − коефіцієнт кінетичної енергії потоку на перепаді, у перерізі W−W;

ζ_w − приведений коефіцієнт гідравлічного опору між перерізами 1−1 та W−W, віднесений до швидкісного напору $V_w^2 / 2g$.

З рівняння (3.34):

$$V_w^2 = \mathrm{Fr_w} g h_w \ . \tag{3.36}$$

Підставляючи (3.36) у (3.35) за умови $V_o^2 / 2g = 0$, можна отримати:

$$h = h_w + \frac{(\alpha_w + \zeta_w)\mathrm{Fr_w} h_w}{2} = h_w \left(1 + \frac{(\alpha_w + \zeta_w)\mathrm{Fr_w}}{2} \right), \tag{3.37}$$

Підстановка h з рівняння (3.37) у (3.34) дає:

$$\mathrm{Fr_w} = 2m_w^2\left(1+\frac{(\alpha_w+\zeta_w)\mathrm{Fr_w}}{2}\right)^3, \tag{3.38}$$

звідки коефіцієнт витрати m_w може бути явно виражений через число Фруда:

$$m_w = \frac{\sqrt{\mathrm{Fr_w}/2}}{\left[1+(\alpha_w+\zeta_w)\mathrm{Fr_w}/2\right]^{3/2}}\ . \tag{3.39}$$

Приймаючи у першому наближенні коефіцієнт кінетичної енергії α_w=1 та нехтуючи втратами напору між перерізами 1−1 та W−W ($\zeta_w \approx 0$), вираз для коефіцієнта витрати водоприймача m_w спрощується до виду:

$$m_w = \frac{\sqrt{\mathrm{Fr_w}/2}}{\left(1+\mathrm{Fr_w}/2\right)^{3/2}} \tag{3.40}$$

Враховуючи взаємозв'язок між коефіцієнтами витрати m_w та C_w :

$$C_w = \frac{3\sqrt{3}}{2}m_w = (3/2)^{3/2}\frac{\sqrt{\mathrm{Fr_w}}}{\left(1+\mathrm{Fr_w}/2\right)^{3/2}} \tag{3.41}$$

Таким чином, за умови нехтування втратами напору перед водоприймачем коефіцієнт витрати C_w та число Фруда $\mathrm{Fr_w}$ мають бути пов'язані аналітичною залежністю (3.41). Графічна залежність між числом Фруда на перепаді водоприймального отвору $\mathrm{Fr_w}$ та коефіцієнтом витрати водоприймача в режимі ВШП C_w наведена на рис. 3.8.

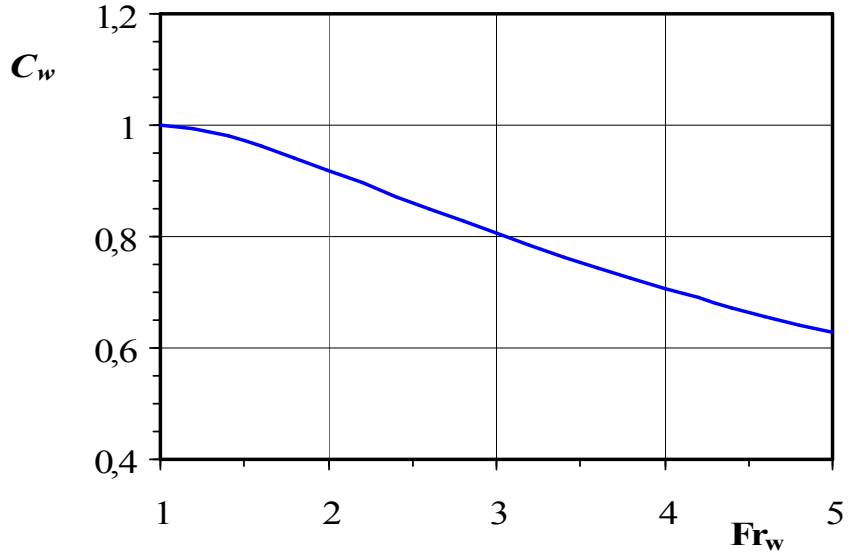


Рис. 3.8. Графік залежності коефіцієнта витрати водоприймача в режимі ВШП C_w від критерію Фруда $\mathrm{Fr_w}$ за рівнянням (3.41)

3.3.2. Перехідний напір у двохзонній моделі між режимом ВШП та режимом отвору.

Транзитний напір h_{tr}, що відповідає переходу водоприймача з режиму ВШП напряму в режим отвору, у найпростішій двохзонній моделі визначається з рівності пропускних здатностей за формулами (1.4) та (1.5) відповідно:

$$\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_w L_w \sqrt{g} h_{tr}^{3/2} = C_o \omega_o \sqrt{2g} h_{tr}^{1/2} \ , \qquad (3.42)$$

звідки розрахункова транзитний напір у двохзонній моделі:

$$h_{tr.0} = \frac{3\sqrt{3} C_o \omega_o}{2 C_w L_p} \ . \qquad (3.43)$$

У табл. 3.2 зведено значення перехідних напорів $h_{tr.0}$, а також перехідних витрат $Q_{tr,0}$, визначених за залежністю (3.43), для трьох типових дощоприймачів, а саме: для компактного внутрішньо-майданчикового дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою розмірами 390×390 мм, для дощоприймача вуличного малого типу Д з решіткою розмірами 580×300 мм та для дощоприймача великого / магістрального типу ДМ з решіткою розмірами 800×400 мм.

Залежно від схеми поверхневого водовідведення та місця встановлення дощоприймача, на практиці можливі 4 випадки з різною кількістю сторін, з яких поверхневий стік підводиться до дощоприймача:

– 1-сторонній притік, при встановленні дощоприймача у спеціальній "кишеньці";

– 2-сторонній притік, при кутовому розташуванні дощоприймача;

– 3-сторонній притік, при розташуванні дощоприймача впритул до бордюру, як правило, більшою стороною;

– 4-сторонній притік, при розташуванні дощоприймача у найнижчій точці майданчика, розташованій на певній віддалі від бордюрів.

Точки переходу визначено за методом ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012, згідно з яким C_w= 0,909; C_o= 0,452, а також за методом HEC-22 (C_w= 0,974; C_o=0,67).

Таблиця 3.2. **Зведена таблиця перехідних напорів і витрат для типових дощоприймачів за методами ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 та HEC-22**

Дощо-приймач	Розміри решітки, мм	К-ть сторін	L_p, м	ω_o, м^2	ω_o/L_p, м	Параметри точок переходу			
						за ДСТУ		за HEC-22	
						$h_{tr.0}$, мм	$Q_{tr.0}$, л/с	$h_{tr.0}$, мм	$Q_{tr.0}$, л/с
Basic 400	390× 390	1	0,39	0,1176	0,302	0,390	147,0	0,539	256,2
		2	0,78	0,1176	0,151	0,195	103,9	0,269	181,2
		3	1,17	0,1176	0,101	0,130	84,8	0,180	147,9
		4	1,56	0,1176	0,075	0,097	73,5	0,135	128,1
Малий Д(А15)	580× 300	1	0,58	0,05	0,086	0,111	33,4	0,154	58,2
		2	0,88	0,05	0,057	0,073	27,1	0,102	47,3
		3	1,18	0,05	0,042	0,055	23,4	0,076	40,8
		4	1,76	0,05	0,028	0,037	19,2	0,051	33,4
Великий ДМ(С250)	800× 400	1	0,8	0,075	0,094	0,121	52,3	0,168	91,1
		2	1,2	0,075	0,063	0,081	42,7	0,112	74,4
		3	1,6	0,075	0,047	0,061	37,0	0,084	64,4
		4	2,4	0,075	0,031	0,040	30,2	0,056	52,6

За умови сталих значень коефіцієнтів витрати C_w та C_o транзитна витрата є пропорційною до відношення сумарної площі отворів та периметра решітки:

$$h_{tr.0} = \frac{k_{tr.0}\omega_o}{L_p} \ , \tag{3.44}$$

де $k_{tr,0}$ – безрозмірний коефіцієнт перехідного напору, що залежить лише від співвідношення коефіцієнтів витрати C_o та C_w:

$$k_{tr.0} = \frac{3\sqrt{3}C_o}{2C_w} \ . \tag{3.45}$$

Таким чином, коефіцієнт перехідного напору, визначений за методом ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012, становить $k_{tr,0}$ = 1,292, тоді як за методом HEC-22 – $k_{tr,0}$ = 1,787. За рівномірного по площі забиття решітки дощоприймача транзитна витрата $h_{tr.0}$ пропорційно зменшується, що зумовлює відповідне пришвидшення переходу з режиму ВШП до режиму отвору.

3.3.3. Перехідні напори у трьохзонній моделі.

Трьохзонна модель включає три характерних зони гідравлічної характеристики водоприймача, а саме: режим ВШП, комбінований режим та режим отвору. Витрата потоку в комбінованому режимі за Guo et al., 2009 [68]:

$$Q_{mix} = C_m\sqrt{Q_w Q_o} = \frac{2}{3^{3/4}} C_m h\sqrt{C_w C_o L_w \omega_o g}\,. \tag{3.46}$$

Перший перехідний напір $h_{tr.1}$ можна знайти, з умови $Q_w = Q_{mix}$:

$$\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_w L_w \sqrt{g} h^{3/2} = \frac{2}{3^{3/4}} C_m h\sqrt{C_w C_o L_p A_o g}\,,$$

звідки після скорочень:

$$h_{tr.1} = \frac{3\sqrt{3} C_m^2 C_o \omega_o}{2 C_w L_w} \tag{3.47}$$

Підставляючи в (3.17) напір $h_{tr.0}$ з рівняння (3.12), можна отримати:

$$h_{tr.1} = C_m^2 h_{tr.o} \tag{3.48}$$

У роботі Guo et al. (2009) для гратчастих решіток у комбінованому режимі роботи отримано стале значення коефіцієнта витрати C_m=0,93 [58]. Це відповідає першому транзитному напору:

$$h_{tr.1} = 0{,}865\ h_{tr.0}. \tag{3.49}$$

Перехід від комбінованого режиму до режиму отвору можна знайти з умови, що $Q_{mix} = Q_o$:

$$\frac{2}{3^{3/4}} C_m h\sqrt{C_w C_o L_w \omega_o g} = C_o \omega_o \sqrt{2gh}\,,$$

звідки, після скорочень, другий транзитний напір:

$$h_{tr.2} = \frac{3\sqrt{3} C_o \omega_o}{2 C_m^2 C_w L_w} \tag{3.50}$$

Підставляючи $h_{tr.0}$ з рівняння (3.44), отримуємо:

$$h_{tr.2} = h_{tr.o} / C_m^2, \tag{3.51}$$

що за коефіцієнта витрати C_m=0,93 дає значення другого транзитного напору:

$$h_{tr.2} = 1{,}156\ h_{tr.0}. \tag{3.52}$$

3.3.4. Пропускна здатність водоприймачів у комбінованому режимі

Мала кількість публікацій з результатами досліджень комбінованого режиму роботи водоприймачів гостро ставить питання як щодо самої наявності цього режиму, так і щодо рівняння та параметрів, які його описують. Для обґрунтування структури рівняння витрати у комбінованому режимі можна застосувати теорію розмірностей. З попередніх досліджень відомо, що в загальному випадку в комбінованому режимі пропускна здатність водоприймача залежить від: напору h, прискорення вільного падіння g, водозливного периметра L_w та від сумарної площі отворів ω_o:

$$Q_{mix} = f(h, g, L_w, \omega_o). \tag{3.53}$$

Припускаємо, що шукана функціональна залежність є степеневий багаточлен, аналогічно як це має місце для режимів ВШП та отвору; тоді:

$$Q_{mix} = C\, h^{x1}\, g^{x2}\, L_w^{\,x3}\, \omega_o^{\,x4}, \tag{3.54}$$

де C – безрозмірний сталий множник, до складу якого входить безрозмірний коефіцієнт витрати C_{mix}; x_1, x_2, x_3, x_4 – невідомі показники степеня.

Прирівняємо розмірності лівої та правої частин рівняння (3.54):

$$\text{м}^3\text{с}^{-1} = \text{м}^{x1}\, \text{м}^{x2}\text{с}^{-2x2}\, \text{м}^{x3}\, \text{м}^{2x4}. \tag{3.55}$$

Прирівнюючи показник степеня за секундами, отримуємо: x_2=0,5. Далі прирівнюючи показник степеня за метрами:

$$x_1 + x_3 + 2x_4 = 2{,}5. \tag{3.56}$$

Найпростішим фізично-обґрунтованим розв’язком рівняння (3.56), яке є двічі невизначеним, відповідає значенням $x_3 = x_4 = 0{,}5$, тоді $x_1 = 1$. Тоді

$$Q_{mix} = C\, h\, g^{0,5}\, L_w^{\,0,5}\, \omega_o^{\,0,5}. \tag{3.57}$$

Порівнюючи структуру рівняння (3.57) з рівнянням пропускної здатності в режимі ВШП (1.1) та в режимі отвору (1.25), отримуємо, що для умов плавного нерозривного переходу трьох режимів один в інший, безрозмірний коефіцієнт C у рівнянні (3.57) дорівнює:

$$C = 2C_{mix} / 3^{3/4}, \tag{3.58}$$

звідки пропускна здатність у комбінованому режимі:

$$Q_{mix} = \frac{2}{3^{3/4}} C_{mix} h \sqrt{g L_w \omega_o} \,. \tag{3.59}$$

Порівняння отриманого виразу для Q_{mix} з залежністю, якою оперували Guo J. Et al. [68], вказує на повну аналогію структури цих рівнянь з тією відмінністю, що пропонований у роботі коефіцієнт C_{mix} пов'язаний з аналогічним коефіцієнтом C_m, обґрунтованим у роботі [68], залежністю

$$C_{mix} = C_m \sqrt{C_w C_o} \,. \tag{3.60}$$

Обґрунтована вище структура рівняння для визначення пропускної здатності водоприймачів у комбінованому режимі за своєю фізичною суттю аналогічна до структури відповідного рівняння в роботі [68]. Перевагою формули (3.49) є більш чисте трактування коефіцієнта витрати C_{mix} порівняно з визначенням коефіцієнта витрати C_m у роботі [68]. При визначенні останнього враховуються також значення коефіцієнтів витрати в режимі ВШП C_w та в режимі отвору C_o, що з фізичної точки зору, не повинні мати ніякого впливу ні на коефіцієнт витрати комбінованого режиму, ні на відповідну пропускну здатність водоприймального пристрою.

Таким чином, аналогічно до результатів, наведених у роботі Guo et al., 2009 [68], гідравлічна характеристика водоприймача у режимі ВШП $Q_w \sim h^{3/2}$ плавно переходить у характеристику в режимі отвору $Q_o \sim h^{1/2}$ через комбінований режим, у якому пропускна здатність водоприймача пропорційна до першого степеня напору: $Q_{mix} \sim h$. Стале значення коефіцієнта витрати у комбінованому режимі C_m=0,93, отримане в роботі [68], відповідає значенню коефіцієнта витрати C_{mix} у рівнянні (3.59):

$$C_{mix} = 0{,}93 \times (0{,}974 \times 0{,}67)^{0{,}5} = \ 0{,}751. \tag{3.61}$$

Враховуючи складність гідравлічних явищ, що відбуваються при роботі водоприймачів у комбінованому режимі, необхідна експериментальна перевірка та уточнення отриманих аналітичних залежностей та чисельних значень коефіцієнта витрати C_{mix}.

3.4 Висновки

1. Обґрунтовано критерії наявності непідтопленого та підтопленого типів течії крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід". Отримано критерії встановлення режиму ВШП, комбінованого режиму та режиму отвору для непідтоплених течій.

2. Розроблено математичну модель, що описує гідравлічні явища при затопленій течії крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід", та запропоновано метод чисельного вирішення системи рівнянь для знаходження граничної витрати Q_{lim} та відповідної глибини підтоплення водоприймача h_{lim}.

3. Отримано залежності граничної витрати Q_{lim} та глибини підтоплення h_{lim} для типового малого дощоприймача Д(А15) від довжини водовідвідних трубопроводів L_p для відвідних трубопроводів з пластикових труб діаметром DN/OD=200 мм, укладених з похилом 0,02. Отримано степеневі лінії тренду (3.11)–(3.14) для граничної витрати Q_{lim} і глибини підтоплення h_{lim} за трьох типових значень гідравлічної глибини дощоприймальних колодязів: 0,97 м, 1,27 м та 1,57 м для відвідних трубопроводів довжиною 2–40 м.

4. Отримано узагальнену залежність (3.16) для визначення безрозмірного коефіцієнта витрати системи "водоприймач − відвідний трубопровід" C_{tot} від довжини пластикового відвідного трубопроводу L_p діаметром DN/OD=200 мм (рис. 3.7).

5. Змодельовано перехідні режими роботи непідтоплених водоприймачів з режиму ВШП в режим отвору для типових дощоприймачів за умови 1, 2, 3-стороннього та всебічного притоку до них стічних вод. Отримано значення транзитних напорів $h_{tr.0}$ та відповідних транзитних витрат $Q_{tr.0}$ для точкових дощоприймачів Basic 400, Д(А15) та ДМ(В125, С250) за значень коефіцієнтів витрати C_w та C_o, рекомендованих нормативними документами ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14] та HEC-22 US FHWA [124].

6. Отримано аналітичну залежність (3.34) між критерієм Фруда для потоку на перепаді водприймального отвору та коефіцієнтом витрати водоприймача в режимі ВШП m_w. За умов нехтування нерівномірністю розподілу швидкостей

на перепаді, а також втратами напору потоку на підході до водоприймача, отримано прості функціональні залежності коефіцієнтів витрати m_w та C_w від числа Фруда Fr_w (рівняння (3.40) та (3.41) відповідно).

7. Для трьохзонної моделі течії крізь непідтоплений водоприймач отримано аналітичні залежності (3.47) і (3.50) для обчислення першого та другого транзитних напорів $h_{tr.1}$ та $h_{tr.2}$, що відповідають переходу з режиму ВШП до комбінованого режиму та з комбінованого режиму в режим отвору відповідно.

8. З використанням теорії розмірностей обґрунтовано структуру розрахункової залежності (3.60) для визначення пропускної здатності точкових водоприймачів у комбінованому режимі, як функції водозливного периметра L_w, сумарної площі отворів ω_o та геометричного напору перед водоприймачем h, що дає можливість науково-обґрунтованого визначення безрозмірного коефіцієнта витрати C_{mix}.

9. Виконаний теоретичний аналіз та математичне моделювання вказують на необхідність експериментальної перевірки представлених теоретичних концепцій, що стосуються транзитних напорів і витрат між різними режимами роботи водоприймачів, а також уточнення числових значень коефіцієнтів витрати точкових водоприймачів у режимах ВШП, комбінованому режимі та в режимі отвору.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ

4.1 Гідравлічні характеристики точкових дощоприймачів

Експериментальна гідравлічна характеристика вихідної повнорозмірної решітки дощоприймача Basic 400 з розмірами вхідного отвору 365×365 мм представлена на рис. 4.1. Чисельний аналіз вказує на те, що у дослідженому діапазоні витрат та напорів ця решітка працює виключно в режимі водозливу з широким порогом. За методом найменших квадратів отримано степеневу апроксимацію:

$$Q = 0{,}054 \cdot h^{1{,}569} \tag{4.1}$$

де h – геометричний напір, мм; Q – пропускна здатність, л/с.

У практиці проектування водоприймачів різних типів важливою реперною точкою гідравлічної характеристики є пропускна здатність водоприймача Q_{20} за геометричного напору h = 20 мм. З рис. 4.1 видно, що для стрижневої решітки дощоприймача Basic 400 значення Q_{20} = 6,00 л/с.

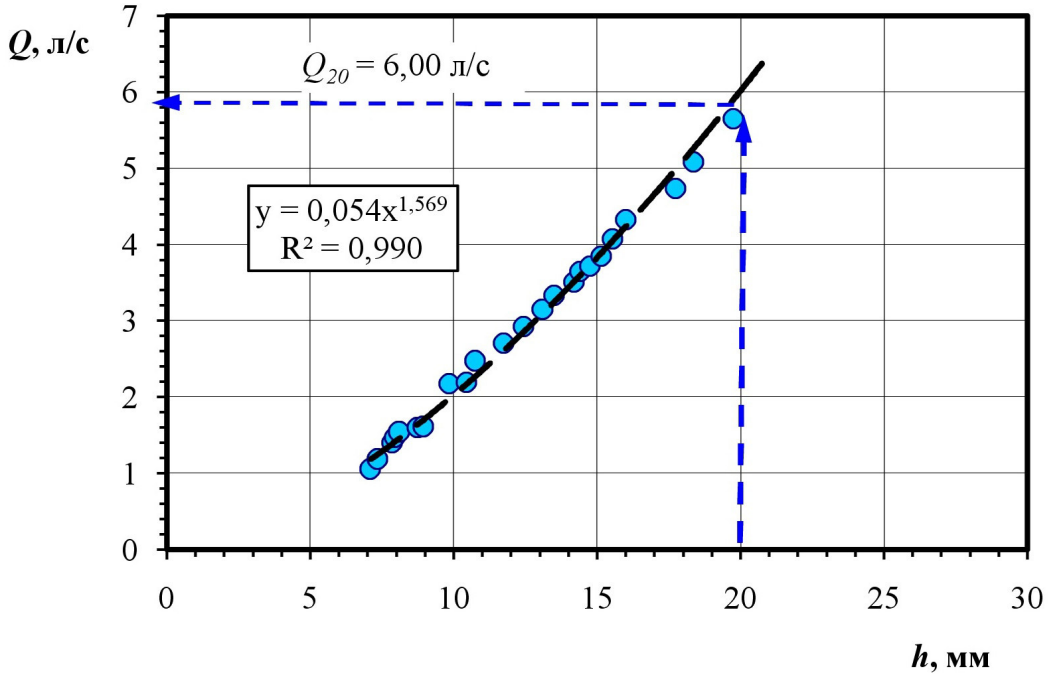


Рис. 4.1. Гідравлічна характеристика пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №1 з розмірами 365×365 мм

Характеристика пропускної здатності для решітки розмірами 264×264 мм, що відповідає кількості вхідних квадратних комірок 8×8, наведена на рис. 4.2. Всі експериментальні точки відповідають режиму ВШП; математичною обробкою експериментального ряду отримано степеневою лінію тренду:

$$Q = 0{,}050 \cdot h^{1{,}505} \qquad (4.2)$$

Показник степеня біля напору h у формулах (4.1)–(4.2) – близький до теоретичного значення h=1,5, що є непрямим підтвердженням того, що у всьому дослідженому діапазоні досліджені дощоприймальні решітки №1 та №2 працюють виключно у режимі ВШП. Коефіцієнт детермінованості для залежностей (4.1) та (4.2) $R^2 \geq 0{,}99$, що підтверджує наявність сильної функціональної залежності між напором h та пропускною здатністю водоприймача Q.

Пропускна здатність Q_{20} за характерного напору h = 20 мм для решітки №2 становить 0,778 від значення цієї витрати для решітки №1, що лише на 7,6% більше за відношення відповідних водозливних периметрів $L_{w.1}/L_{w.2} = 0{,}723$.

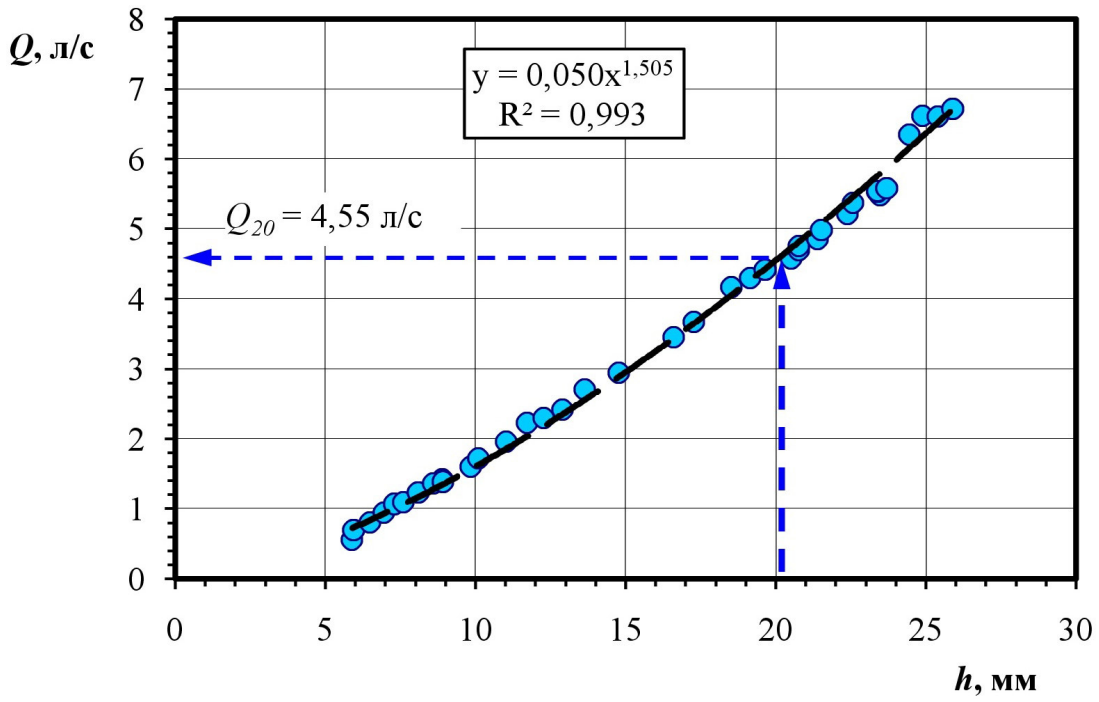


Рис. 4.2. Гідравлічна характеристика пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №2 з розмірами 264×264 мм (8×8 комірок)

Дослідженням решітки №3 у правій частині гідравлічної характеристики отримано відхилення експериментальних точок від залежності $Q \sim h^{3/2}$, характерної для режиму ВШП (рис. 4.3). У результаті математичної обробки результатів встановлено, що при об'ємній витраті притоку до 4,77 л/с експериментальні результати описуються степеневою залежністю, більш характерною для режиму ВШП:

$$Q = 0{,}036 \cdot h^{1{,}495}, \tag{4.3}$$

тоді як при більших витратах залежність переходить практично в лінійну:

$$Q = 0{,}153 \cdot h^{1{,}059}. \tag{4.4}$$

Значення показника степеня n=1,001 суттєво відрізняється від теоретичних значень, як для режиму ВШП, так і для режиму отвору (n=1,5 та n=0,5 відповідно), причому отримане значення показника степеня є рівновіддаленим від обох цих значень. Цей факт може бути пояснений наявністю у цьому діапазоні комбінованого режиму роботи дощоприймача.

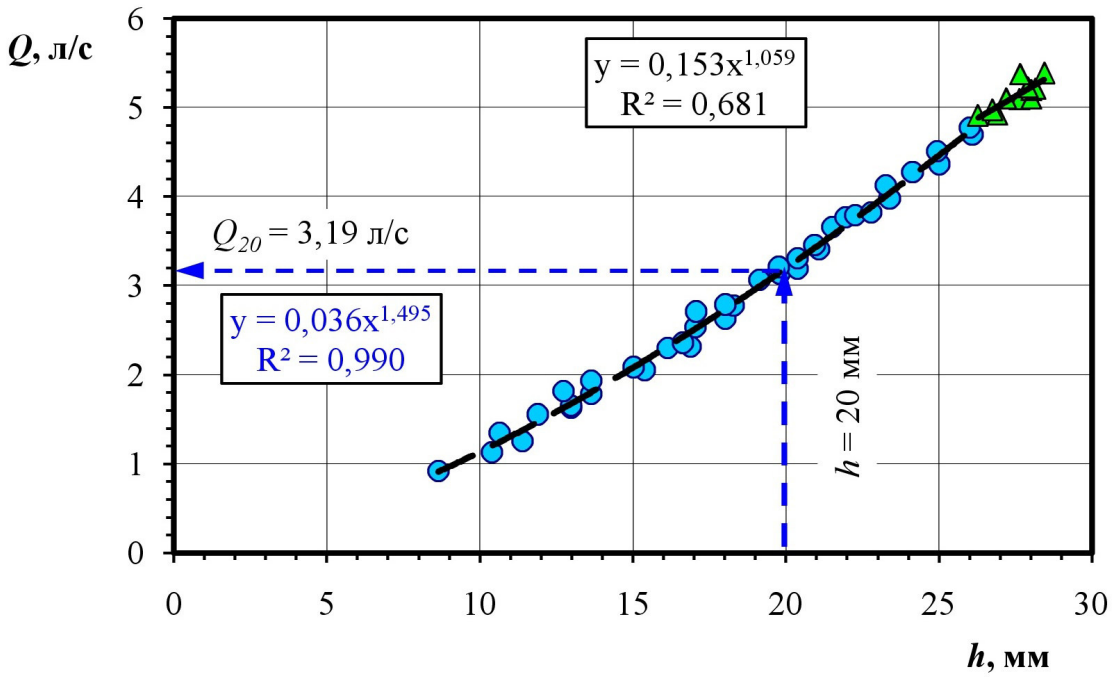


Рис. 4.3. Гідравлічна характеристика пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №3 з розмірами 199×199 мм (6×6 комірок): 1 – режим ВШП; 2 – комбінований режим

Подібна картина отримана також для решітки №4 з розмірами водозливного отвору розміром 131×131 мм (рис. 4.4). Аналіз результатів показав, що при об'ємній витраті притоку до 4,48 л/с експериментальні дані описуються степеневою залежністю, більш характерною для режиму ВШП:

$$Q = 0{,}022 \cdot h^{1{,}496}\ , \tag{4.5}$$

тоді як при більших витратах залежність переходить в бік лінійної:

$$Q = 0{,}065 \cdot h^{1{,}206}\ . \tag{4.6}$$

При об'ємній витраті притоку, більшій за 4,48 л/с значення показника степеня n=1,206 близьке до одиниці, що може свідчити про наявністю у цьому діапазоні комбінованого режиму течії.

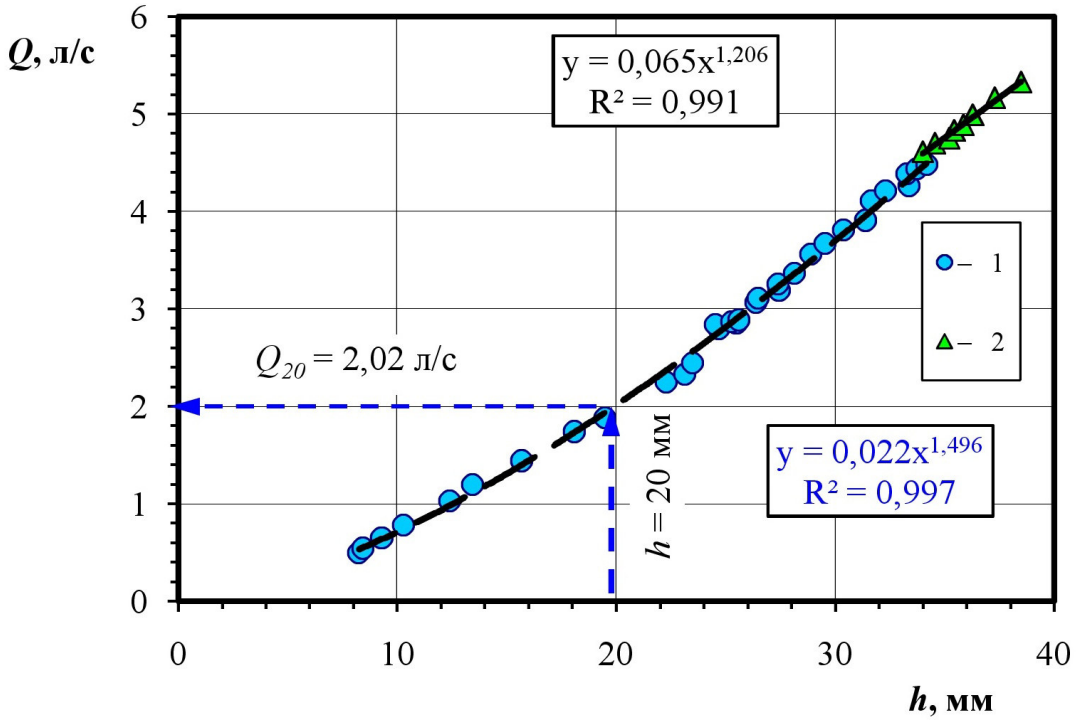


Рис. 4.4. Гідравлічна характеристика пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №4 з розмірами 131×131 мм (4×4 комірки): 1 – режим ВШП; 2 – перехідна зона

Для решітки №5 з розмірами водоприймального отвору 98×98 мм отримано всі три режими течії (рис. 4.5). При об'ємній витраті до 3,45 л/с експериментальні результати отримано режим ВШП:

$$Q = 0{,}020 \cdot h^{1{,}460} \ , \qquad (4.7)$$

при витратах від 3,45 л/с до 4,67 л/с залежність переходить практично в лінійну:

$$Q = 0{,}105 \cdot h^{0{,}994} , \qquad (4.8)$$

тоді як при витратах, більших за 4,67 л/с лінія тренду характеризується показником степеня n=0,57, що в межах експериментальної похибки відповідає автомодельному значенню для режиму отвору n=0,5:

$$Q = 0{,}529 \cdot h^{0{,}571} \ . \qquad (4.9)$$

Враховуючи наявність для решітки №5 всіх трьох режимів роботи непідтопленого дощоприймача, було виконано порівняння експериментальних результатів для решітки №5 з відповідними розрахунковими характеристиками за двохрежимною схемою, коли режим ВШП напряму переходить в режим отвору (рис. 4.6).

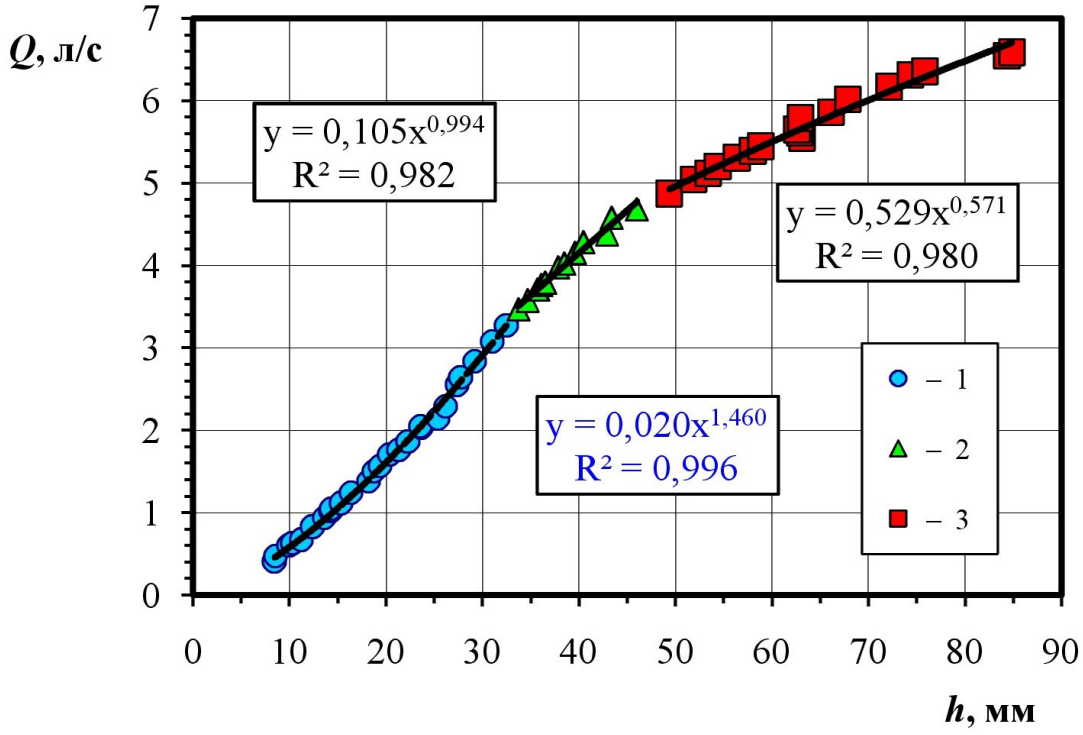


Рис. 4.5. Гідравлічна характеристика пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №5 з розмірами 98×98 мм (3×3 комірки): 1 – режим ВШП; 2 – комбінований режим; 3 – режим отвору

Експериментальна характеристика проходить, в основному, в коридорі, обмеженому знизу розрахунковою характеристикою отриманою за методикою ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14], а зверху – за методикою НЕС-22 [124]. Виключення складає початкова ділянка в режимі ВШП, де експериментальна характеристика проходить дещо вище, ніж за обома нормативними методами.

Інженерні методи для обчислення пропускної здатності водоприймачів не враховують наявність перехідного, комбінованого режиму. За обома цими методами перехід від режиму ВШП до режиму отвору відбувається точково, з різкою зміною патерну гідравлічної характеристики. Експериментальні результати демонструють поступовий, плавний перехід від режиму ВШП до режиму отвору за рахунок перехідної ділянки – так званого комбінованого режиму, в якому зовнішня частина водоприймального отвору вже працює в режимі отвору, а внутрішня – в режимі ВШП.

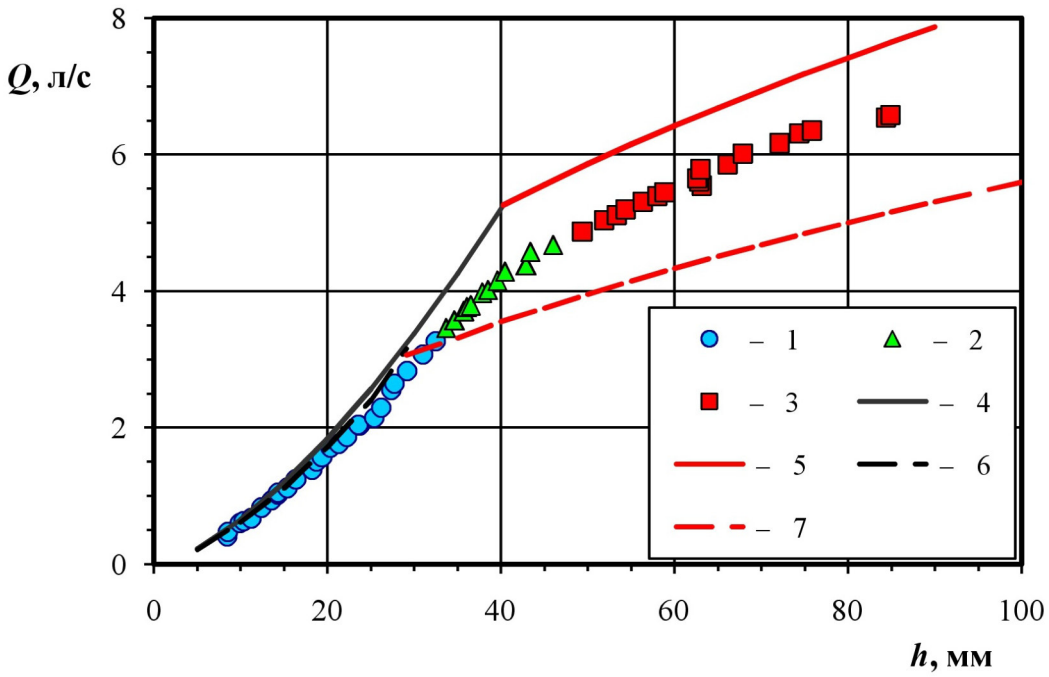


Рис. 4.6. Порівняння гідравлічної характеристики дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою 98×98 мм з розрахунковими характеристиками за методами НЕС-22 та ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012: 1 – режим ВШП; 2 – комбінований режим; 3 – режим отвору; 4, 5 – режими ВШП та отвору відповідно за НЕС-22; 6, 7 – режими ВШП та отвору відповідно за ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012

Подальше зменшення розмірів водоприймальної решітки призводить до короткого діапазону режиму ВШП, при напорах до 0,927 мм включно (рис. 4.7).

$$Q = 0{,}009 \cdot h^{1{,}628}. \qquad (4.10)$$

Математичною обробкою експериментальних даних встановлено, що решітка з розмірами 65×65 мм при витратах, від 0,940 л/с до 1,82 л/с працює в перехідному режимі, при цьому її пропускна здатність:

$$Q = 0{,}044 \cdot h^{1{,}089}, \qquad (4.11)$$

тоді як при більших витратах має місце вихід на степеневу криву з показником степеня n, близьким до 0,5, що є характерним для режиму отвору:

$$Q = 0{,}339 \cdot h^{0{,}507}. \qquad (4.12)$$

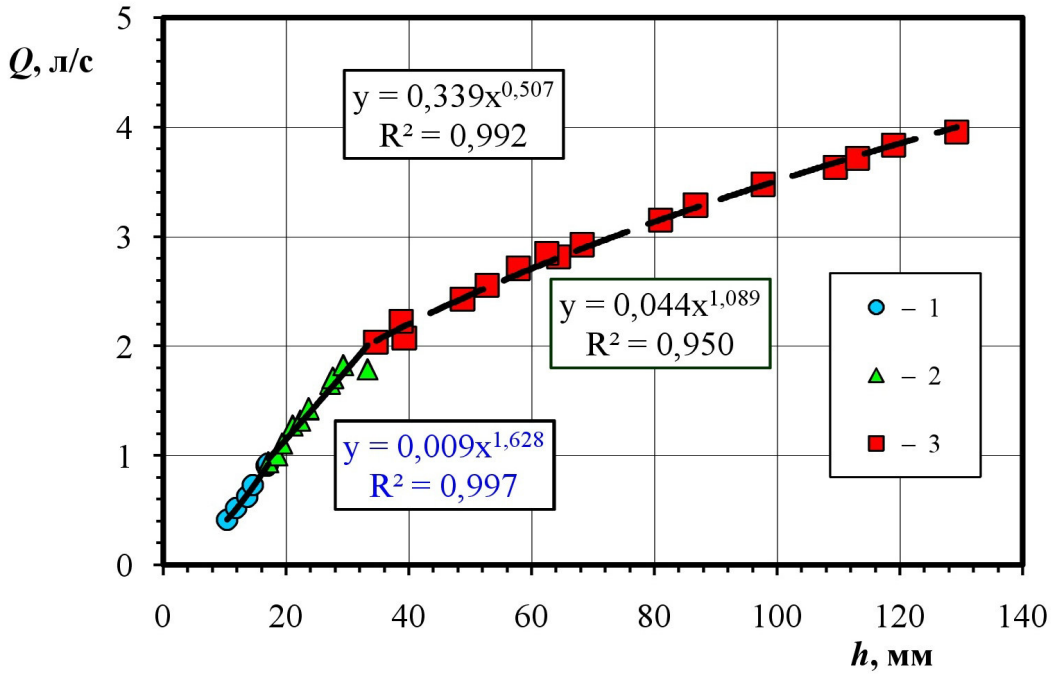


Рис. 4.7. Гідравлічна характеристика пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №6 з розмірами 65×65 мм (2×2 комірки): 1 – режим ВШП; 2 – перехідна зона; 3 – режим отвору

Потрібно зазначити, що зі зменшенням розмірів водоприймальної решітки експериментальна гідравлічна характеристика зміщується вверх відносно розрахункових характеристик за нормативними методами, і в режимі отвору експериментальні точки майже накладаються з кривою за HEC-22 (рис. 4.8).

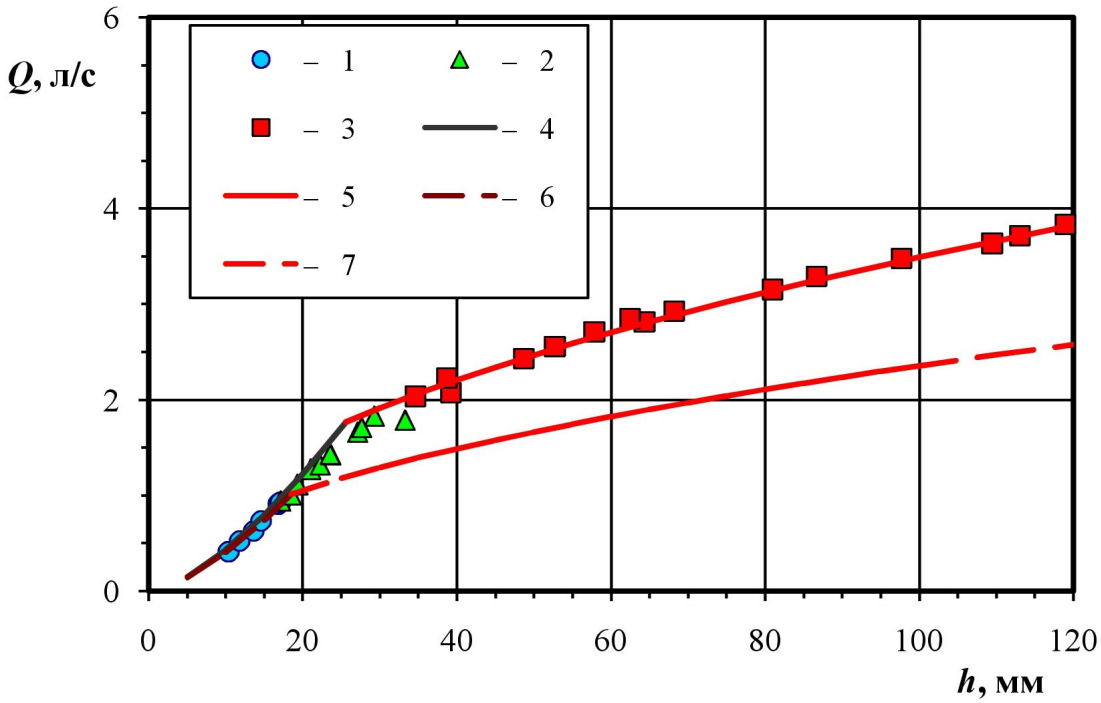


Рис. 4.8. Порівняння гідравлічної характеристики пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №6 з розмірами 65×65 мм (2×2 комірки) з розрахунковими характеристиками за методами НЕС-22 та ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012: 1 – режим ВШП; 2 – комбінований режим; 3 – режим отвору; 4, 5 – режими ВШП та отвору відповідно за НЕС-22; 6, 7 – режими ВШП та отвору відповідно за ДСТУ

На рис. 4.9 та рис. 4.11 представлені гідравлічні характеристики водоприймальних решіток прямокутної форми, зі співвідношенням сторін 3:2 (№7) та 4:2 (№8) відповідно. Для обох цих решіток отримано повні трьохетапні характеристики, з наявністю всіх трьох можливих режимів: режиму ВШП, комбінованого режиму та режиму отвору.

Математична обробка результатів для решітки №7 (98×65 мм) вказує на те, що при об'ємній витраті притоку до 1,81 л/с експериментальні результати описуються степеневою залежністю, характерною для режиму ВШП:

$$Q = 0{,}015 \cdot h^{1{,}525}, \qquad (4.13)$$

тоді як при витратах від 1,81 л/с і до 3,30 л/с має місце комбінований режим роботи дощоприймача:

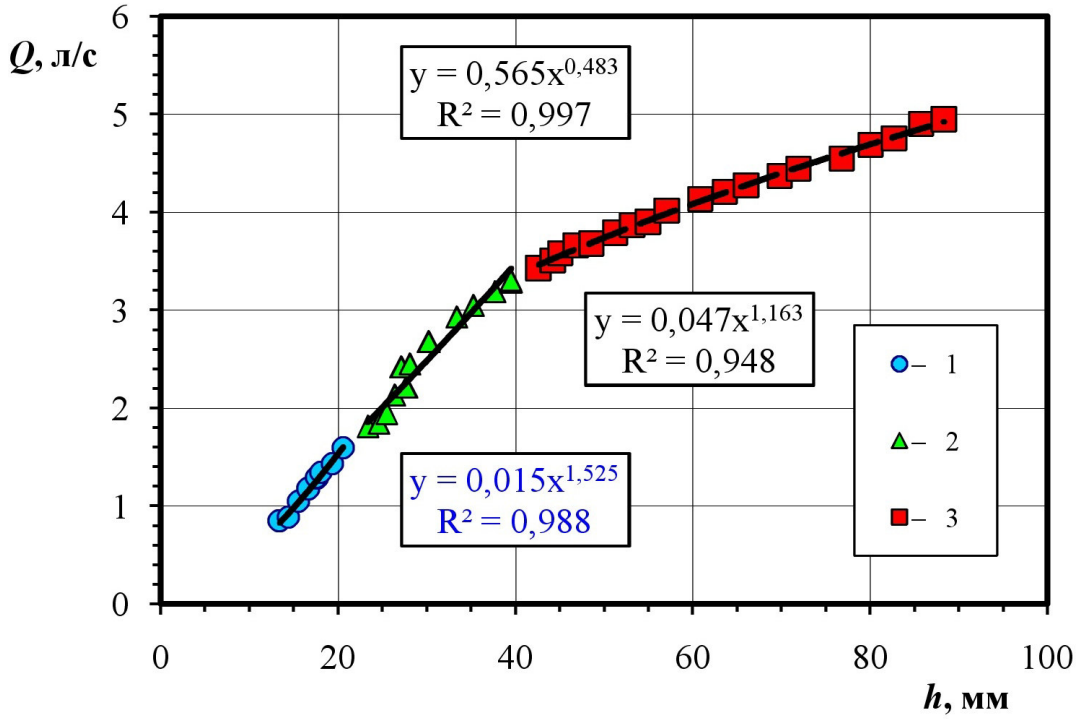


Рис. 4.9. Гідравлічна характеристика пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №7 з розмірами 98×65 мм (3×2 комірки): 1 – режим ВШП; 2 – перехідна зона; 3 – режим отвору

$$Q = 0{,}047 \cdot h^{1{,}163}, \tag{4.14}$$

а при витраті понад 3,429 л/с дощоприймач починає працювати в режимі отвору:

$$Q = 0{,}565 \cdot h^{0{,}483}. \tag{4.15}$$

Порівняльний графік, наведений на рис. 4.10, також має характерні тенденції, отримані для решіток №5 та №6, з практично повним накладенням експериментальних точок на розрахункові характеристики в режимі ВШП та плавним переходом до режиму отвору через ділянку комбінованого режиму. Експериментальні точки в режимі отвору проходять відносно розрахункової кривої за НЕС-22 дещо вище, ніж для решітки №5 (98×98 мм), але нижче, ніж для найменшої з решіток, №6 (65×65 мм), що вказує на систематичність залежності коефіцієнта витратив режимі отвору від габаритних розмірів водоприймальної решітки.

Виділимо межі комбінованого режиму роботи водоприймальної решітки №7. Комбінований режим на експериментальній характеристиці починається при витраті близько 1,6 л/с, а завершується при 3,2 л/с, тоді як згідно ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 перехід від режиму ВШП до режиму отвору має місце при витраті 1,82 л/с, а за методикою НЕС-22 цей перехід має відбуватися при витраті 3,17 л/с. Таким чином, перехідна витрата, отримана за методом ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012, приблизно відповідає початку комбінованого режиму, а перехідна витрата за НЕС-22 – близька до завершення комбінованого режиму для досліджуваної стрижневої решітки №7 та переходу до режиму отвору.

Описані вище тенденції отримані також для решітки №8 зі співвідношенням довжин сторін 2:1 і розмірами водоприймального отвору розмірами 131×65 мм (рис. 4.11–4.12).

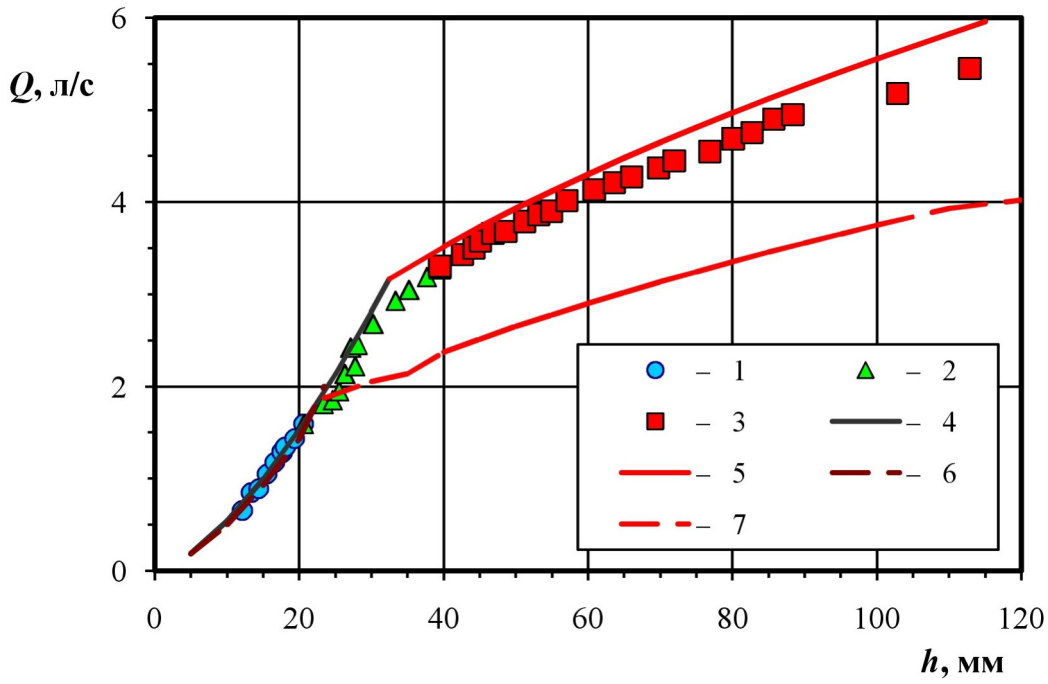


Рис. 4.10. Порівняння гідравлічної характеристики пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №7 з розмірами 98×65 мм (3×2 комірки) з розрахунковими характеристиками за методами НЕС-22 та ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012: 1 – режим ВШП; 2 – комбінований режим; 3 – режим отвору; 4, 5 – режими ВШП та отвору відповідно за НЕС-22; 6, 7 – режими ВШП та отвору відповідно за ДСТУ

Математичною обробкою експериментальних даних для решітки №8 встановлено, що при режим ВШП має місце при витратах, менших за 2,4 л/с, а відповідна степенева лінія тренду:

$$Q = 0{,}017 \cdot h^{1{,}515}. \qquad (4.16)$$

У діапазоні витрат від 2,6 л/с до 4,2 л/с гідравлічна характеристика стає практично лінійною, що відповідає комбінованому режиму:

$$Q = 0{,}100 \cdot h^{1{,}001}, \qquad (4.17)$$

а при об'ємній витраті понад 4,2 л/с отримано типову характеристику витікання крізь отвір:

$$Q = 0{,}554 \cdot h^{0{,}540}. \qquad (4.18)$$

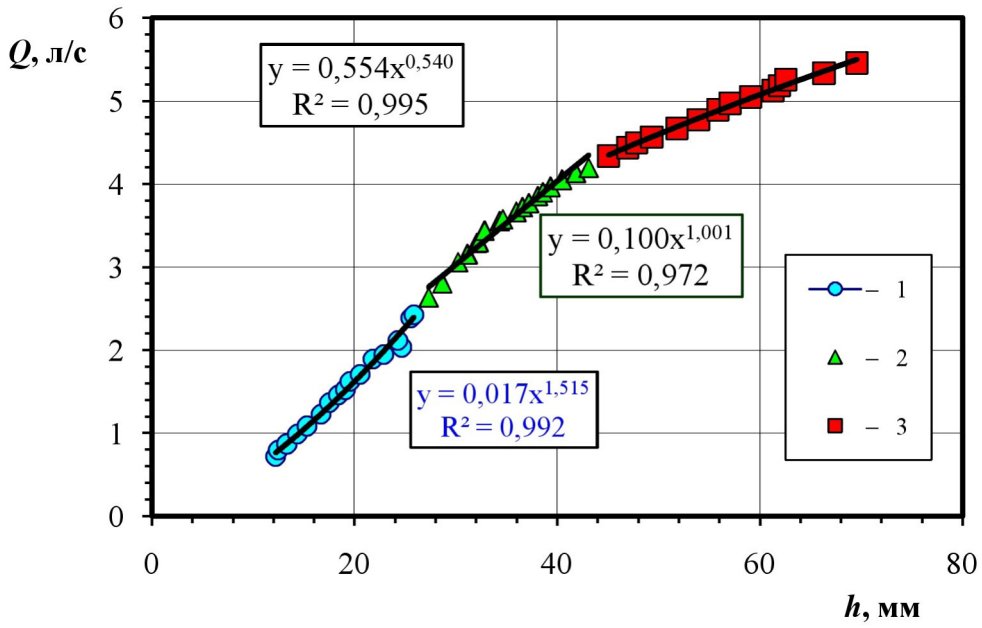


Рис. 4.11. Гідравлічна характеристика пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №8 з розмірами 131×65 мм (4×2 комірки): 1 – режим ВШП; 2 – перехідна зона; 3 – режим отвору

Порівняння експериментальної гідравлічної характеристики дощоприймача з водоприймальною решіткою №8 з розрахунковими характеристиками наведене на рис. 4.12.

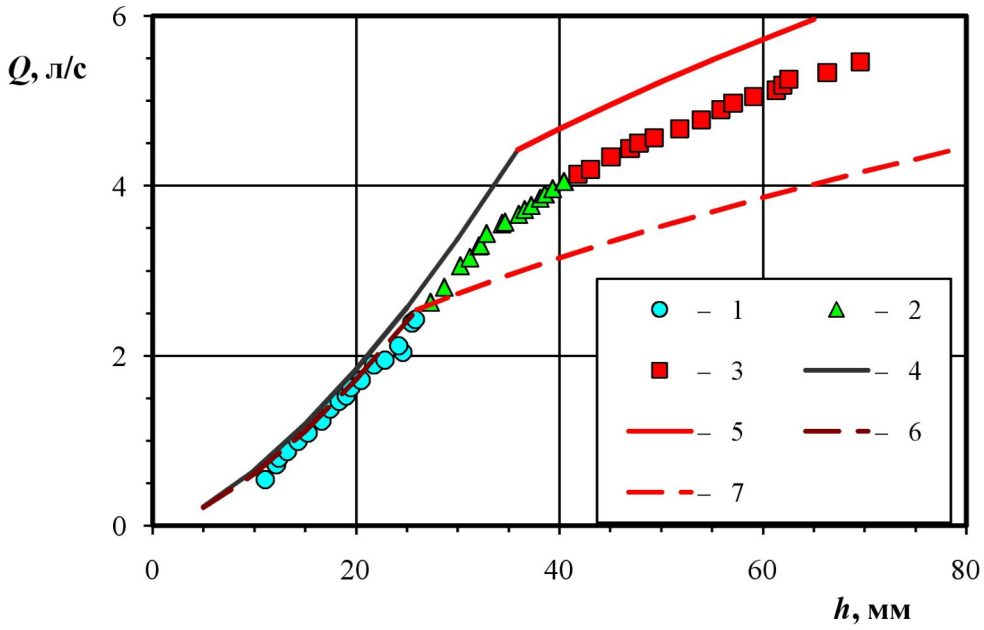


Рис. 4.12. Гідравлічна характеристика дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №8 (131×65 мм) та розрахункові характеристики за методами НЕС-22 та ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012: 1 – режим ВШП; 2 – комбінований режим; 3 – режим отвору; 4, 5 – режими ВШП та отвору відповідно за НЕС-22; 6, 7 – режими ВШП та отвору відповідно за ДСТУ

Зведений графік гідравлічних характеристик пропускної здатності дощоприймача Basic 400 зі стрижневими решітками №1 – №8 різних розмірів наведений на рис. 4.13. Отримано чітку кореляцію між розмірами водоприймального отвору решітки та крутизною відповідної гідравлічної характеристики. З іншого боку, при зменшенні геометричного напору до 5 мм всі характеристики практично накладаються між собою, тобто пропускна здатність решіток №1–№8 практично однакова і дорівнює наближено 0,4 л/с, при тому, що водозливний параметр найбільшої решітки (№1) та найменшої (№6) відрізняється у 5,62 рази, а відповідні площі цих решіток – аж у 31,6 рази.

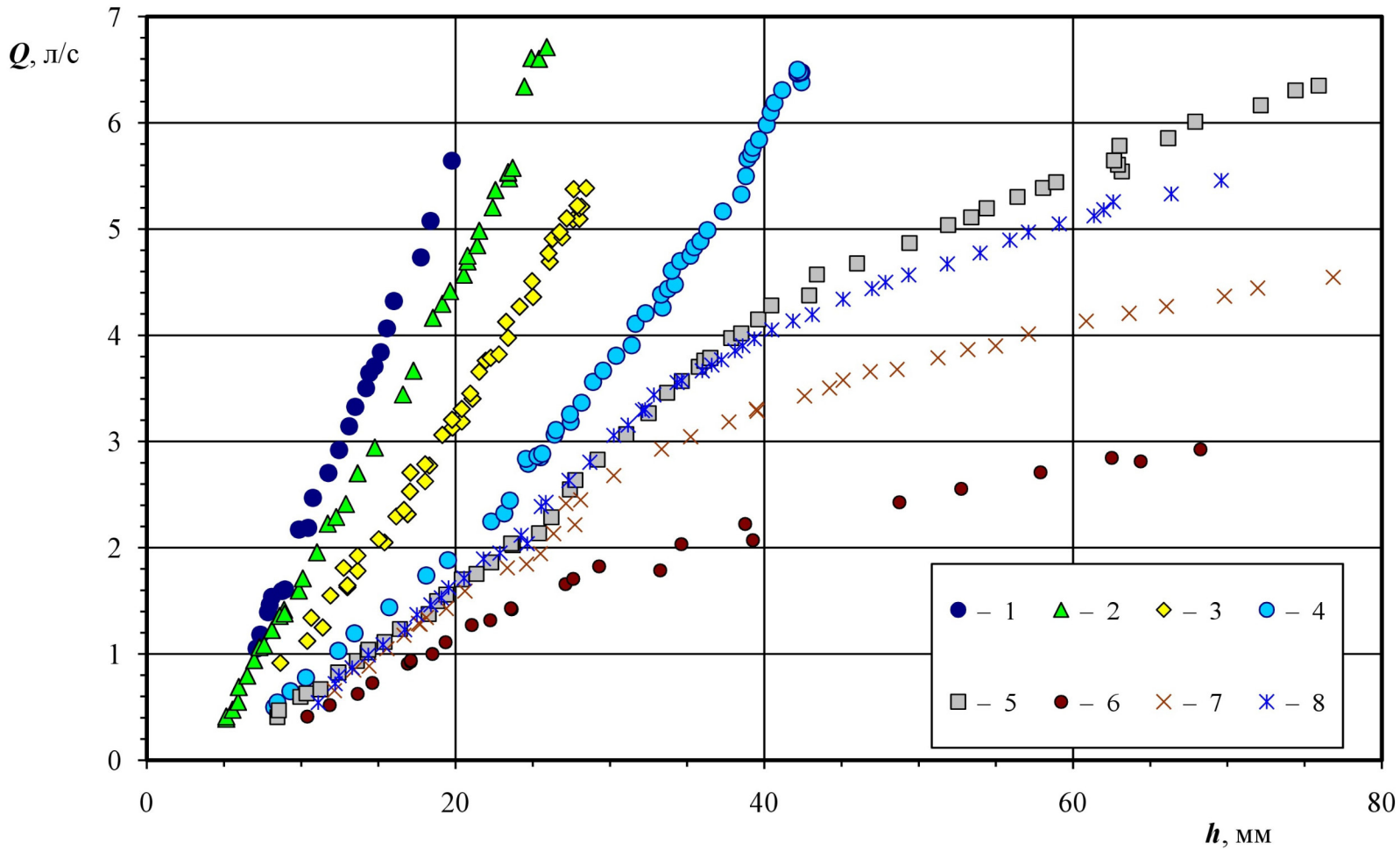


Рис. 4.13. Зведений графік характеристик пропускної здатності дощоприймача Basic 400 з решітками №1–№8 з розмірами вхідного отвору $b_{w1}\times b_{w2}$: 1 – 365×365 мм; 2 –264×264 мм; 3 –199×199 мм; 4 –131×131 мм; 5 –98×98 мм; 6 –65×65 мм; 7 – 98×65 мм; 8 – 131×65 мм

Прикладне значення має зведений графік залежності пропускної здатності дощоприймальної решітки Q_{20} при характерному напорі $h = 20$ мм від периметра вхідного отвору решітки L_w, наведений на рис. 4.14. Потрібно зазначити, що всі решіток окрім решітки №6 при напорі $h = 20$ мм працювали в режимі ВШП. Трикутниками на рис. 4.14,а позначено точки для прямокутних решіток №7 та №8, а квадратною позначкою без заливки – точку для решітки №6, – єдиної, для якої при напорі $h = 20$ мм вже спостерігали комбінований режим течії.

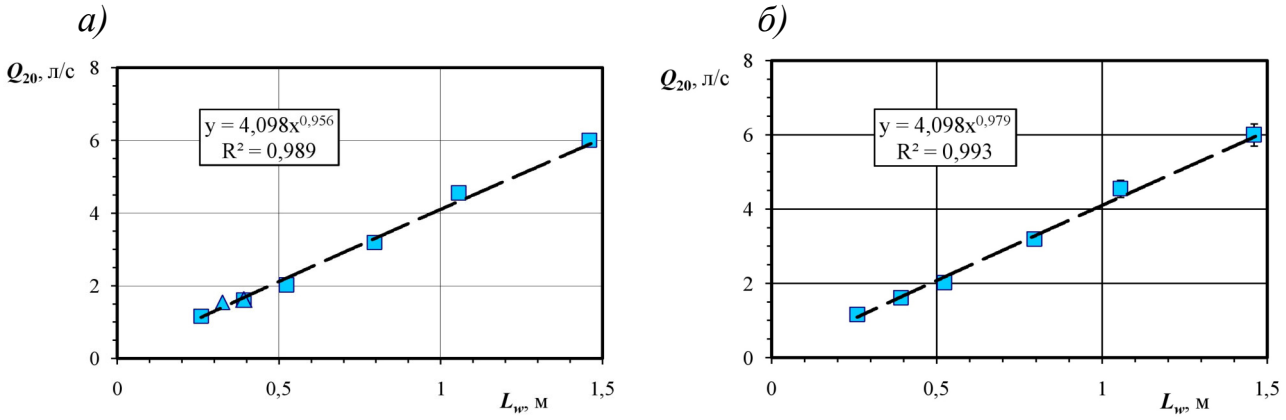


Рис. 4.14. Пропускна здатність дощоприймальної решітки Q_{20} при напорі $h = 20$ мм залежно від периметра вхідного отвору решітки L_w : а – всі решітки; б – квадратні решітки №1–№6; трикутниками позначено прямокутні решітки

Побудова лінії тренду для повної вибірки всіх досліджених решіток №1–№8 (рис. 4.14,а) дає для характерної витрати Q_{20}, л/с, досить якісну степеневу апроксимацію з коефіцієнтом детермінованості $R^2 = 0{,}989$:

$$Q_{20} = 4{,}098 L_w^{0{,}956}. \qquad (4.19)$$

Якщо ж розглядати тільки решітки №1–№6 квадратної форми (рис. 4.16,б) відповідна залежність стає вже сильною функціональною ($R^2 = 0{,}993$):

$$Q_{20} = 4{,}098 L_w^{0{,}979}, \qquad (4.20)$$

що дозволяє з високим ступенем достовірності поширювати цю залежність на інші стрижневі решітки квадратної форми.

4.2 Коефіцієнти витрати решітчастих дощоприймачів

Для узагальнення отриманих експериментальних результатів були приведені до безрозмірного вигляду у формі залежностей для відповідних коефіцієнтів витрати. Коефіцієнти витрати для режиму ВШП та режиму отвору обчислювали за загальноприйнятими, теоретично обґрунтованими формулами (2.7) та (2.9) відповідно, тоді як коефіцієнт опору для комбінованого режиму – за формулою (3.14), отриманою в цій роботі з використанням методів теорії подібності.

4.2.1. Режим ВШП

Для всіх досліджених водоприймальних решіток для діапазону їх роботи в режимі ВШП побудовано графічні залежності від геометричного напору h на підході до дощоприймача двох різних коефіцієнтів витрати, а саме: 1) коефіцієнта витрати C_w за міжнародним стандартом ISO 3846:2008, визначеного за формулою (2.7); 2) коефіцієнта витрати m, визначеного за формулою (2.8), яку традиційно використовують для розрахунку ВШП в Україні.

Залежність коефіцієнта витрати C_w від напору h для типового дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №1 з розмірами водоприймального отвору 365×365 мм наведена на рис. 4.15. Експериментальні значення коефіцієнта витрати на рис. 4.15 є суттєво меншими, ніж рекомендовані інженерними методиками. За напорів $h \geq 10$ мм вже можна говорити про автомодельність експериментального коефіцієнта витрати C_w з середнім значенням близько 0,842, що 8,4 % менше за нормативне значення C_w=0,909 за ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14] і в 1,17 рази менше за C_w=0,974, рекомендоване в HEC-22 [124]. При напорах, менших за h = 10 мм, отримано різке зниження коефіцієнта витрати C_w зі зменшенням напору, що можна пояснити збільшенням у цьому діапазоні витрат гідравлічного опору, зумовленим як зменшенням числа Рейнольдса та відповідним відносним збільшенням сил в’язкості, так і додатковим опором з боку сил поверхневого натягу.

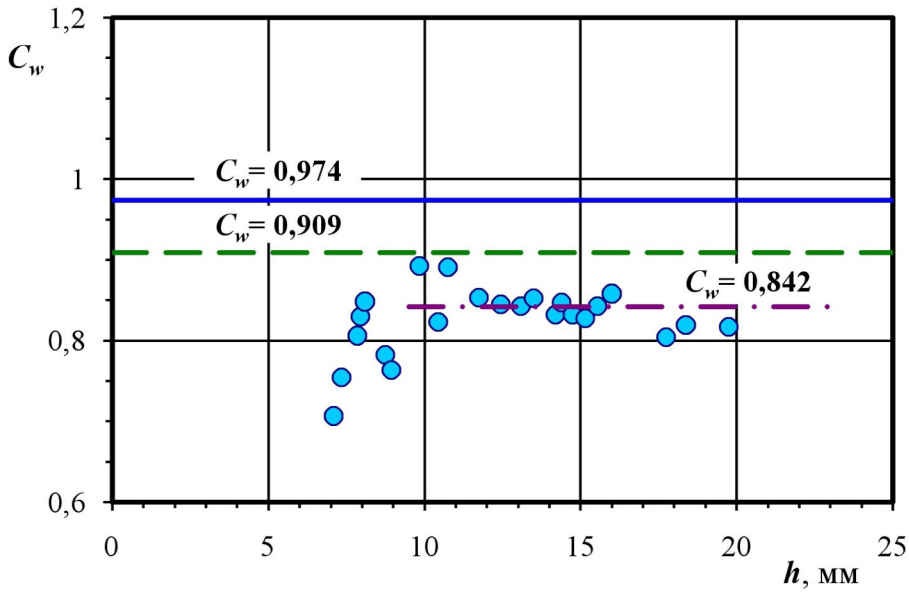


Рис. 4.15. Залежність коефіцієнта витрати C_w в режимі ВШП від напору h для дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №1 (365×365 мм)

Аналогічна залежність коефіцієнта витрати m від напору h для дощоприймача Basic 400 з решіткою №1 наведена на рис. 4.16. Середнє експериментальне значення коефіцієнта витрати m за напору $h \geq 10$ мм становить 0,321, що на 16,6% менше за значення m=0,385, рекомендоване для безпорогових ВШП [36].

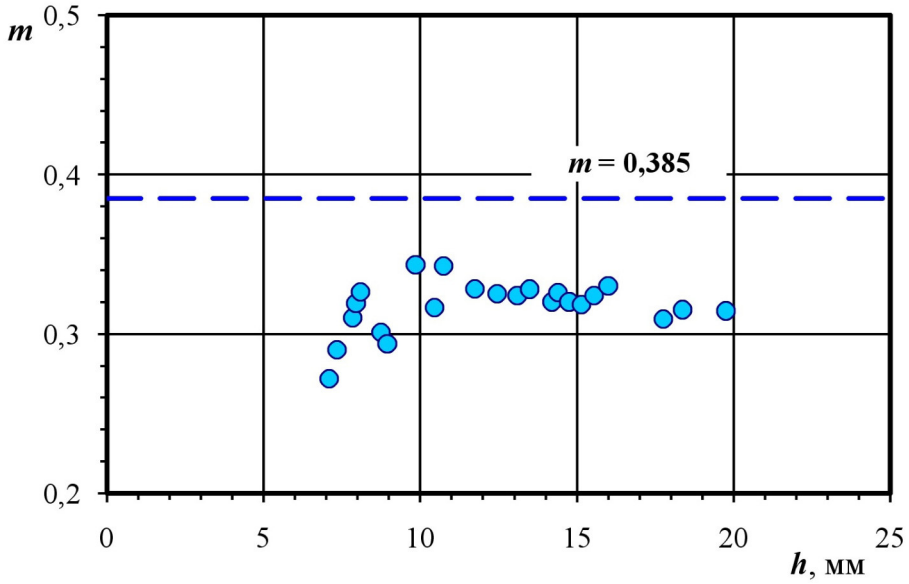


Рис. 4.16. Залежність коефіцієнта витрати m в режимі ВШП від напору h для дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №1 (365×365 мм)

З графічної залежності коефіцієнта витрати C_w від напору h для дощоприймача з решіткою №2 (264×264 мм), наведеної на рис. 4.17, випливає, що експериментальні значення коефіцієнта витрати достатньо добре узгоджуються з нормативними значеннями C_w=0,974 за НЕС-22 [124] та C_w=0,909 за ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14]. Разом з тим, отримано незначну тенденцію до зменшення коефіцієнта витрати C_w за збільшення напору h: від 0,95–0,97 при h= 8–10 мм до 0,85–0,9 при збільшенні напору до 20–26 мм. При зменшенні напору відносно $h = 8$ мм отримано таке ж стрімке зниження коефіцієнта витрати C_w, як і для решітки №1.

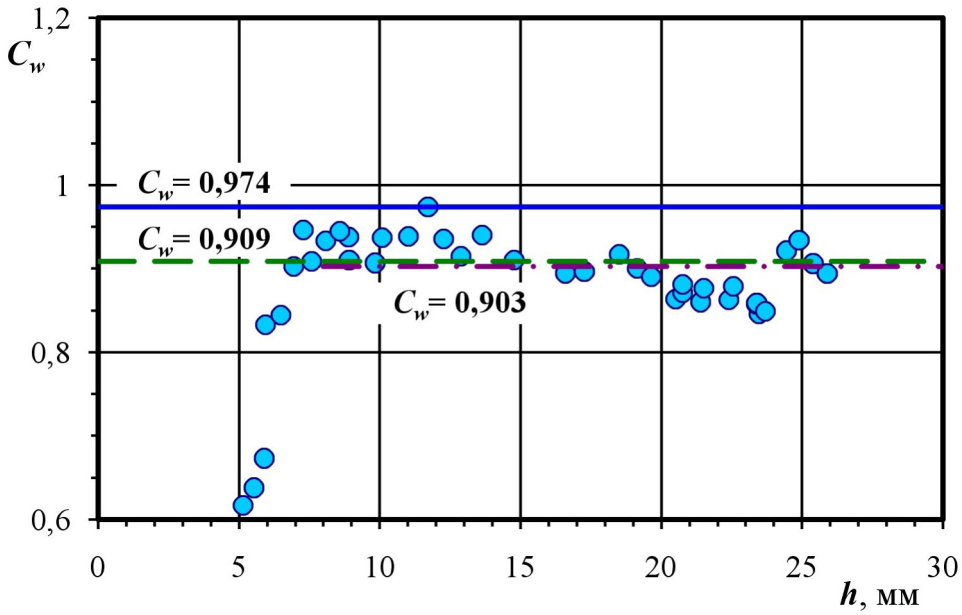


Рис. 4.17. Залежність коефіцієнта витрати C_w в режимі ВШП від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №2 (264×264 мм)

Експериментальні значення коефіцієнта витрати m для дощоприймача з решіткою 264×264 мм за напору $h \geq 8$ мм, як і для решітки №1, є меншими за значення m=0,385, прийняте в українській інженерній практиці для безпорогових ВШП, хоча ця різниця вже не є настільки великою (рис. 4.18). Зокрема, середнє арифметичне експериментального коефіцієнта витрати становить m =0,347, що на 9,9 % менше за m = 0,385.

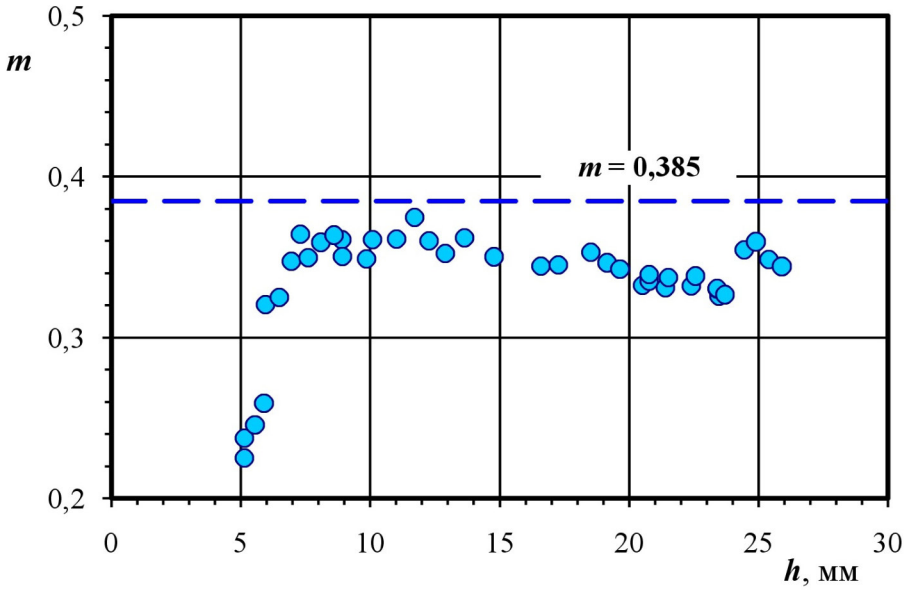


Рис. 4.18. Залежність коефіцієнта витрати m в режимі ВШП від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №2 (264×264 мм)

Аналіз графічної залежності коефіцієнта витрати C_w від напору h для стрижневої решітки з розмірами водоприймального отвору 199×199 мм (рис. 4.19) вказує на те, що експериментальні значення коефіцієнта витрати дещо менші за нормативні значення C_w =0,974 за НЕС-22 [124] та C_w =0,909 за ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14]. Більшість експериментальних точок знаходиться в діапазоні C_w= 0,77–0,85. За напорів h від 8,6 мм до 17 мм отримано відносно великий розкид значень коефіцієнта витрати C_w, тоді як за більших напорів значення коефіцієнта C_w виходять на горизонтальну автомодельну пряму із середнім значенням $C_{w.mid}$ = 0,835 (рис. 4.19).

Відповідно, аналогічною є залежність коефіцієнта витрати m для дощоприймача з решіткою №3 із розмірами вхідного отвору 199×199 мм. За напору $h \geq 9$ мм експериментальні значення коефіцієнта витрати m помітно менші за значення m=0,385, яке, рекомендоване для безпорогових ВШП за ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14] (рис. 4.20).

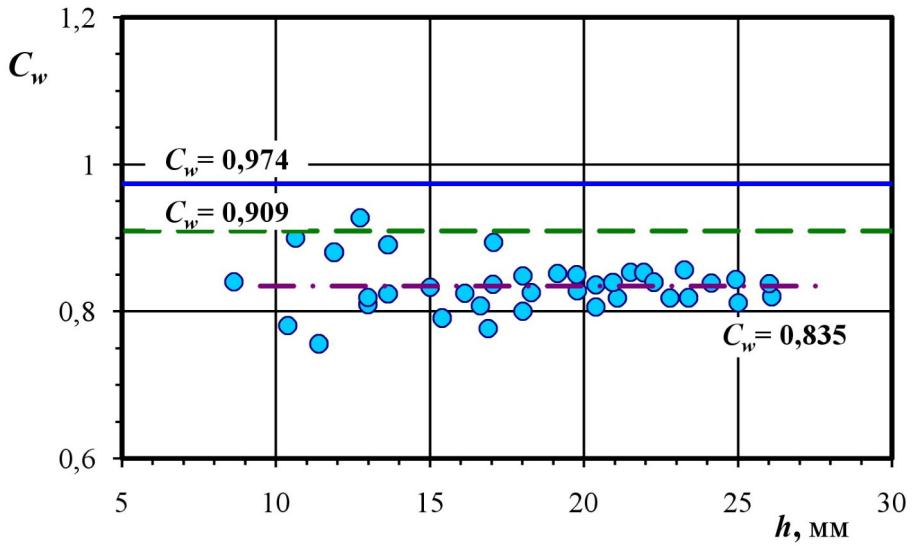


Рис. 4.19. Залежність коефіцієнта витрати C_w в режимі ВШП від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №3 (199×199 мм)

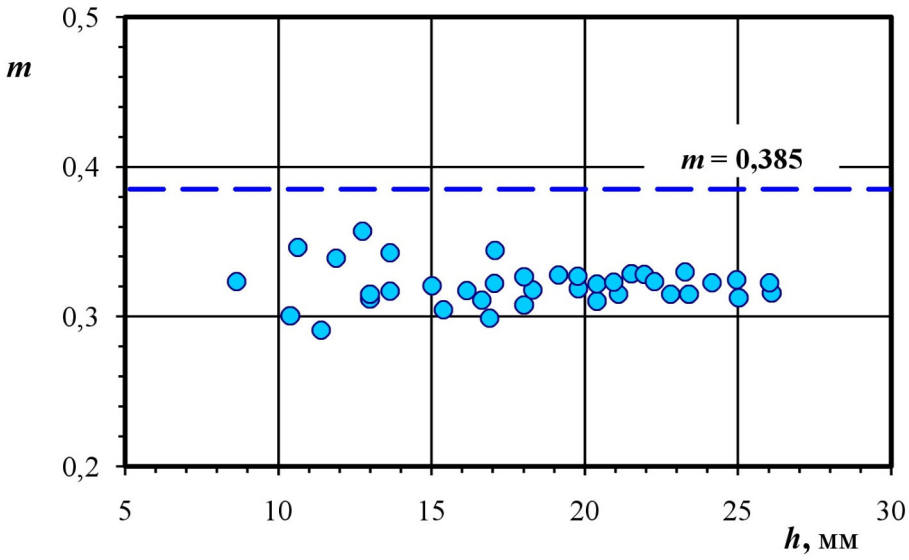


Рис. 4.20. Залежність коефіцієнта витрати m в режимі ВШП від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №3 (199×199 мм)

За допомогою математичного аналізу експериментальних даних, визначено коефіцієнти витрати C_w від напору h для стрижневої решітки №4 з розмірами водоприймального отвору 131×131 мм (рис. 4.21). При гідравлічному напорі h від 8 мм і до 35 мм експериментальні значення C_w менші за рекомендації, подані у відповідних нормативах з проектування, зокрема C_w =0,974 згідно з

НЕС-22 [124] та C_w =0,909 згідно з ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14]. Також спостерігається тенденція, що коефіцієнт витрати C_w спершу має коливання при невеликих гідравлічних напорах від h =8 мм до h =24 мм. Усереднене значення коефіцієнт витрати становить $C_{w.mid}$ = 0,800.

Усі експериментальні значення коефіцієнта витрати m помітно менші за значення m=0,385, яке, рекомендоване для безпорогових ВШП за ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14] для дощоприймача з решіткою №4 (рис. 4.22).

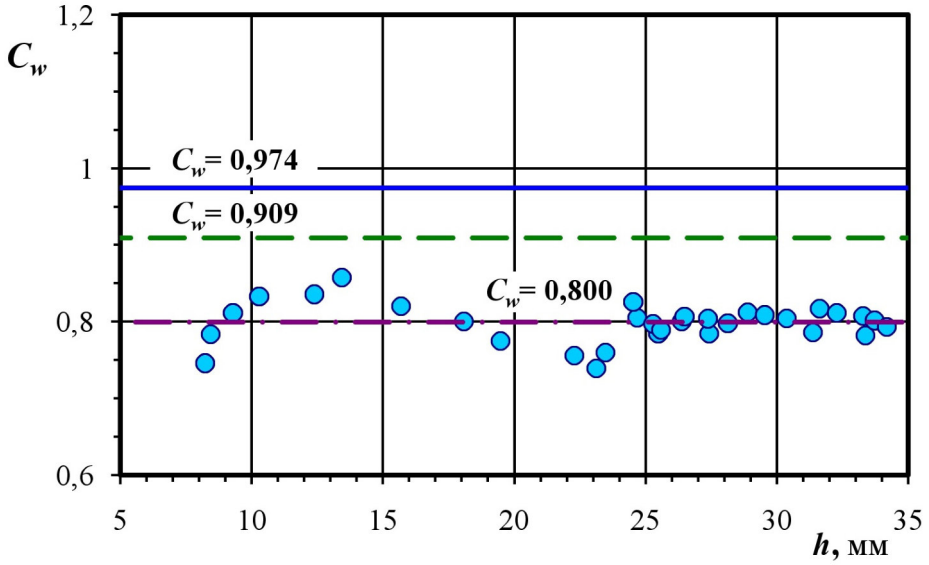


Рис. 4.21. Залежність коефіцієнта витрати C_w в режимі ВШП від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою 131×131 мм

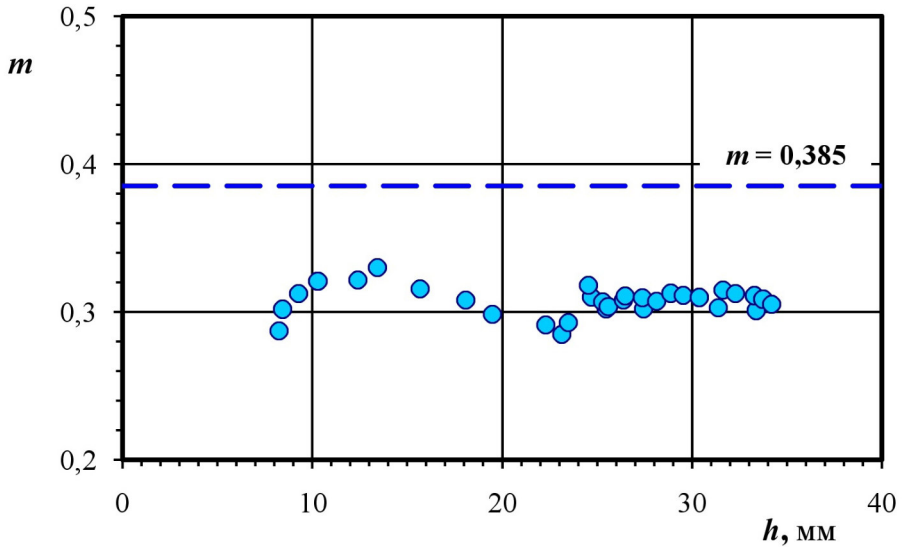


Рис. 4.22. Залежність коефіцієнта витрати m в режимі ВШП від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №4 (131×131 мм)

На рис. 4.23 наведена залежність коефіцієнта витрати C_w від напору h для типового дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №5 з розмірами водоприймального отвору 98×98 мм. Середнє значення коефіцієнта C_w=0,857 є меншим за нормативні значення C_w=0,974 за НЕС-22 [124] та C_w=0,909 за ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14]. Аналогічну залежність коефіцієнта витрати m від напору h для дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою з розмірами водоприймального отвору №5 98×98 мм та порівняння з рекомендованим значенням m=0,385 представлено на рис. 4.24.

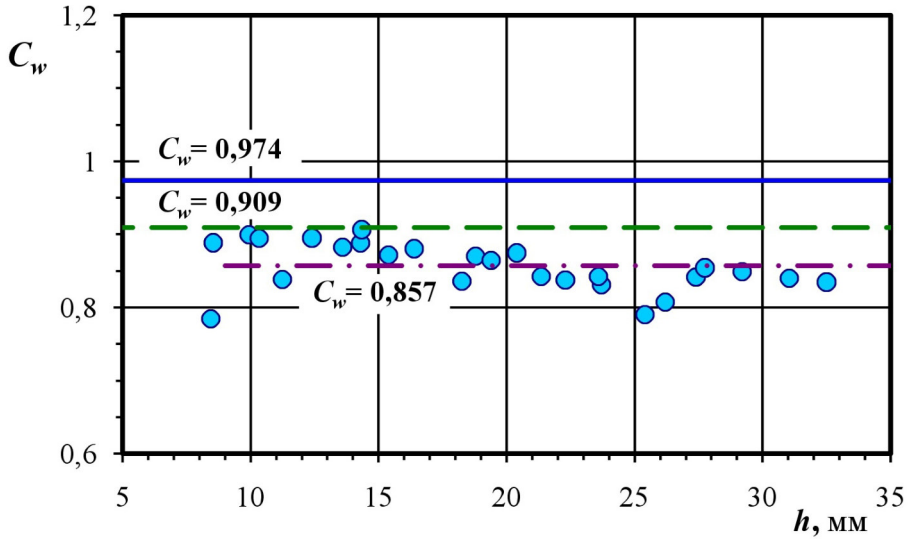


Рис. 4.23. Залежність коефіцієнта витрати C_w в режимі ВШП від напору h для дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №5 (98×98 мм).

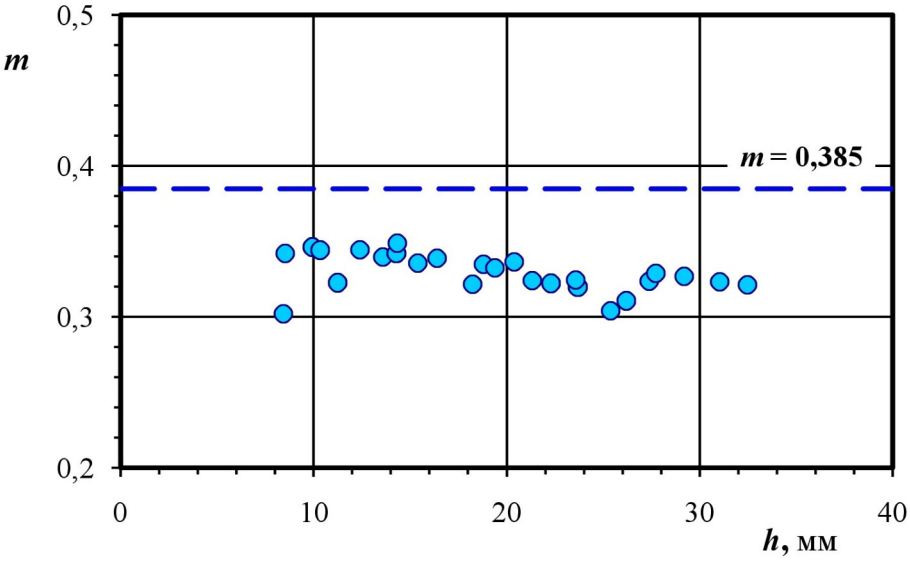


Рис. 4.24. Залежність коефіцієнта витрати m в режимі ВШП від напору h для дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №5 (98×98 мм)

Зведений графік залежності осереднених значень коефіцієнта витрати $C_{w.mid}$ від довжини водозливного периметра водоприймача L_w наведений на рис. 4.25. Експериментально встановлено, що фактичні значення коефіцієнта витрати C_w в режимі ВШП для дощоприймачів Basic 400 з решітками стрижневого типу є суттєво меншими за нормативні значення C_w=0,974 за НЕС-22 та C_w=0,909 за ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012.

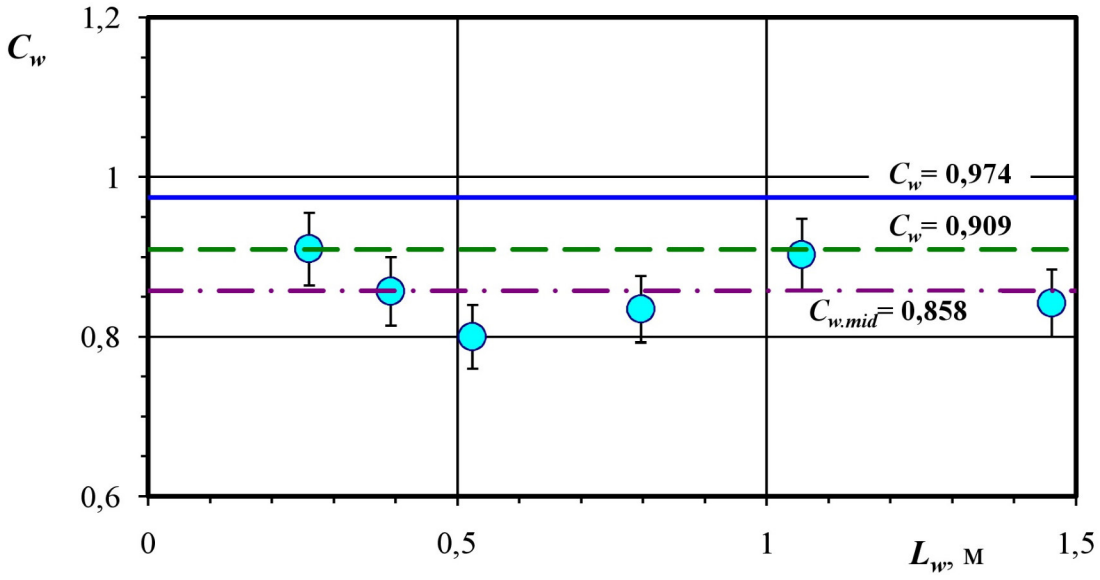


Рис. 4.25. Зведений графік залежності осереднених значень коефіцієнта витрати C_w від довжини водозливного периметра дощоприймача L_w (вказано відносні похибки ±5%)

Середнє експериментальне значення коефіцієнта витрати $C_{w.mid}$ для всіх шести досліджених стрижневих решіток становить $C_{w.mid}$ = 0,858, що на 11,9% менше, ніж C_w=0,974 за нормативним документом НЕС-22 [124] або на 5,6 % менше, ніж значення C_w=0,909, регламентоване ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14]. Менші значення коефіцієнта витрати C_w відповідають меншій пропускній здатності водоприймача за всіх інших однакових умов. Використання ж нормативних коефіцієнтів витрати C_w=0,909 або C_w=0,974, відповідно, може призвести до завищення проектної пропускної здатності дощоприймача порівняно з його фактичним значенням.

4.2.2. Комбінований режим

У розділі 3 обґрунтовано структуру формули для визначення пропускної здатності водоприймачів у комбінованому режимі роботи

$$Q_{mix} = \frac{2}{3^{3/4}} C_{mix} \sqrt{g} \sqrt{L_w \omega_0} h \ , \tag{4.21}$$

з якої визначали експериментальні значення відповідного коефіцієнта витрати C_{mix}:

$$C_{mix} = \frac{3^{3/4} Q_{mix}}{2\sqrt{L_w \omega_0} \sqrt{g} h} \tag{4.22}$$

Побудовано графічні залежності коефіцієнта витрати C_{mix} від геометричного напору перед водоприймачем h_{mid} для всіх дослідних серій, в яких було зафіксовано комбінований режим роботи дощоприймача (рис. 4.28–4.33).

З графічної залежності коефіцієнта витрати C_{mix} від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №3 з розмірами водоприймального отвору 199×199 мм (рис. 4.26) випливає, що експериментальні значення коефіцієнта витрати майже одинакові; всі вони знаходяться в межах 5% відносної похибки, а їх середнє значення дорівнює C_{mix}=0,402.

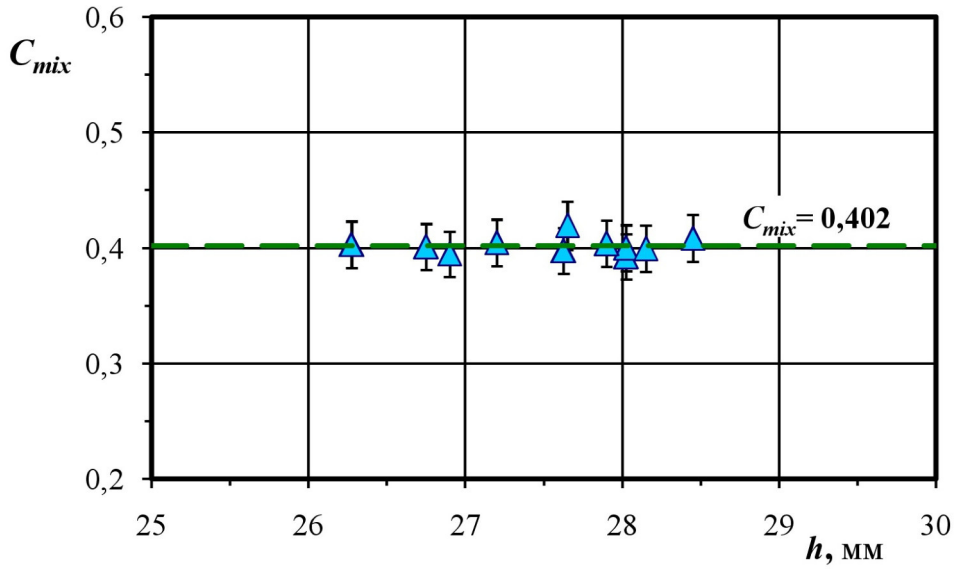


Рис. 4.26. Залежність коефіцієнта витрати C_{mix} в комбінованому режимі від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №3 розмірами 199×199 мм (вказано відносні похибки ±5 %)

Залежність коефіцієнта витрати C_{mix} від напору h для типового дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №4 з розмірами водоприймального отвору 131×131 мм, наведена на рис. 4.27. Спостерігається незначне зростання коефіцієнта витрати C_{mix}= 0,550 порівняно зі значенням для решітки №3 (199×199 мм).

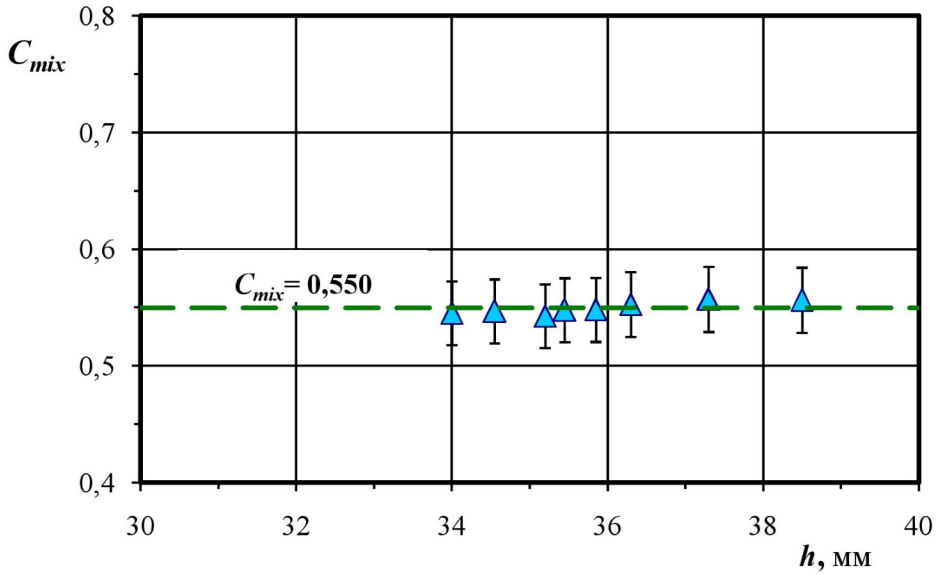


Рис. 4.27. Залежність коефіцієнта витрати C_{mix} в комбінованому режимі від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №4 розмірами 131×131 мм (вказано відносні похибки ±5 %)

У дощоприймача з решіткою №5 (98×98 мм) за напору $33 \le h \le 43{,}4$ мм експериментальні значення коефіцієнта витрати C_{mix} далі продовжують зростати відносно попередніх двох решіток, причому осереднене значення коефіцієнта витрати становить C_{mix}=0,642 (рис. 4.28). Зберігається незначна відмінність між отриманими значеннями, у межах похибки експериментального визначення коефіцієнта C_{mix}.

Графічну залежність коефіцієнта витрати C_{mix} від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №6 з розмірами водоприймального отвору 65×65 мм представлено на рис. 4.29. Спостерігається поступове зростання проміжних значень коефіцієнта витрати C_{mix}; це явище може бути

зумовлене малою площею водоприймальних отворів. Майже всі значення знаходяться в межах похибки 5%, а осереднене значення коефіцієнта витрати становить C_{mix}= 0,687.

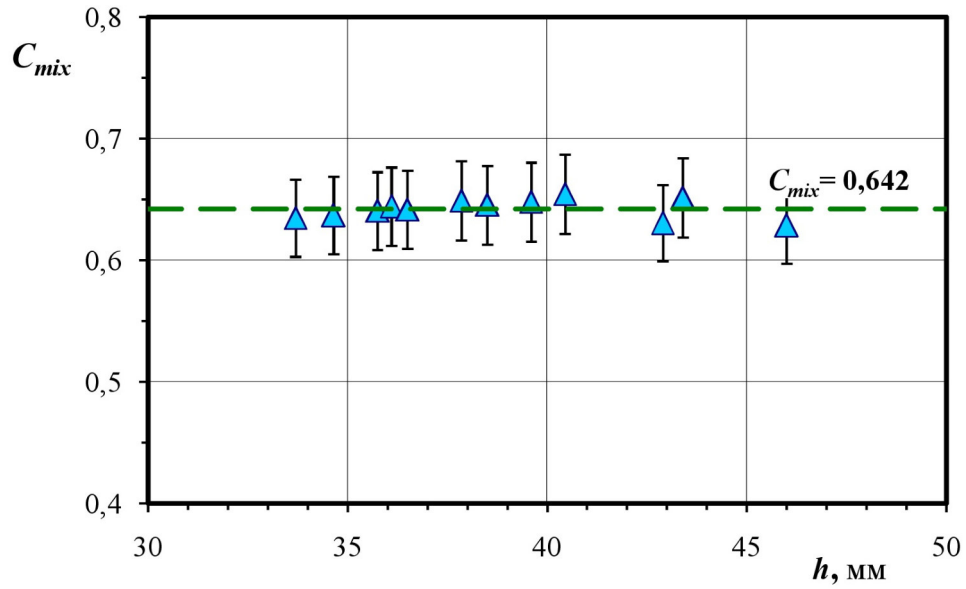


Рис. 4.28. Залежність коефіцієнта витрати C_{mix} в комбінованому режимі від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №5 розмірами 98×98 мм (вказано відносні похибки ±5 %)

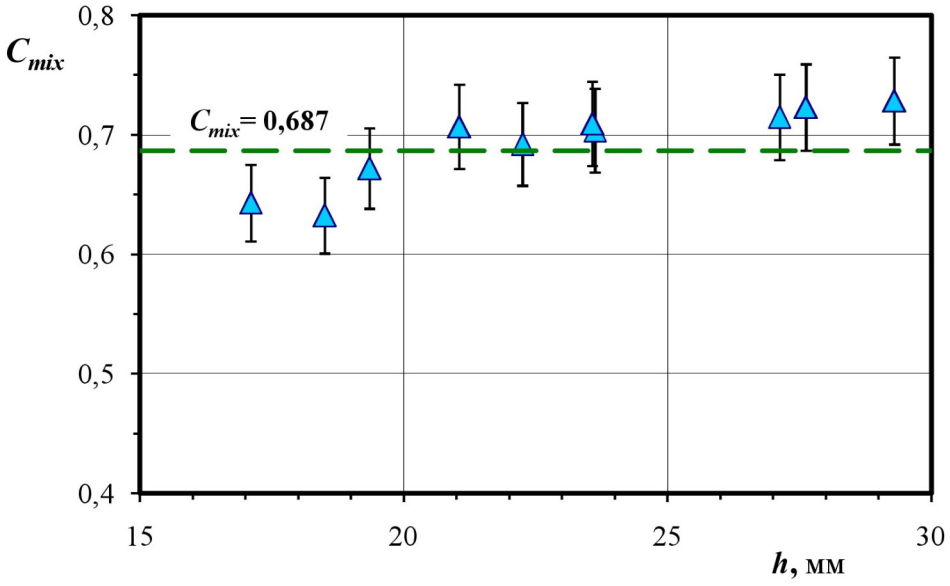


Рис. 4.29. Залежність коефіцієнта витрати C_{mix} в комбінованому режимі від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №6 (65×65 мм)

Для дощоприймача зі стрижневою решіткою №7 з розмірами водоприймального отвору 98×65 мм отримано середній коефіцієнт витрати C_{mix}=0,688 (рис. 4.30). Зі збільшенням напору h спостерігається спочатку різке збільшення значень коефіцієнта витрати C_{mix}, а потім – їх повільне спадання. Таке коливання може бути пояснено прямокутною формою решітки №7 на відміну від попередньо проаналізованих решіток №3 – №6.

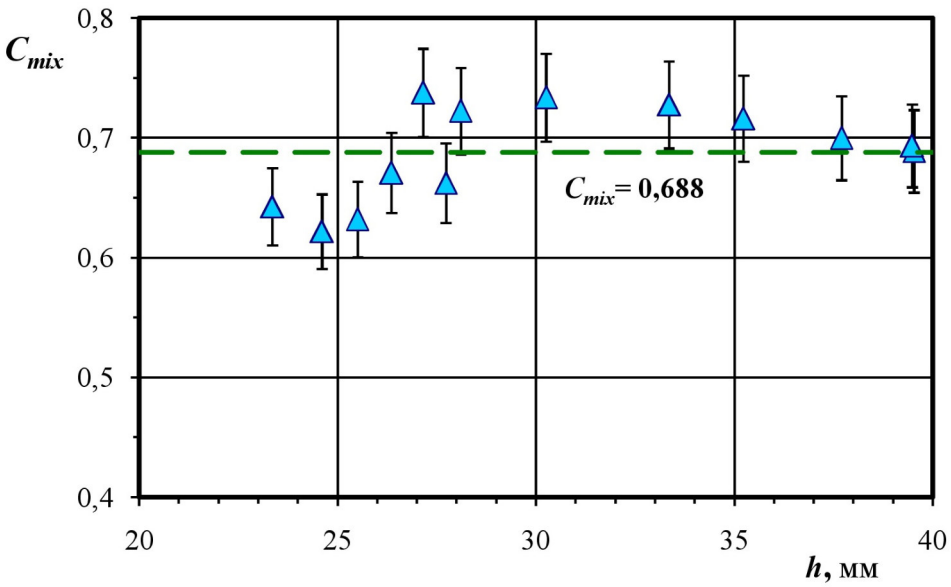


Рис. 4.30. Залежність коефіцієнта витрати C_{mix} в комбінованому режимі від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №7 (98×65 мм)

Подібні результати отримано також для дощоприймача зі стрижневою решіткою №8 з розмірами водоприймального отвору 131×65 мм (рис. 4.31), для якої середнє значення експериментального коефіцієнта витрати становить C_{mix}=0,661. При збільшенні напору h для решітки №8 спостерігається плавне зростання значень коефіцієнта витрати C_{mix}, досягаючи максимального значення при напорах h=33–34 мм з незначним поступовим зменшенням при напорах, більших за 34 мм. Останній тренд є аналогічним до картини, отриманої для решітки №7. Таким чином, зазначені особливості залежностей $C_{mix}=f(h)$ для решіток №7 та №8, найбільш ймовірно, можна пояснити прямокутною формою їх водоприймальних отворів.

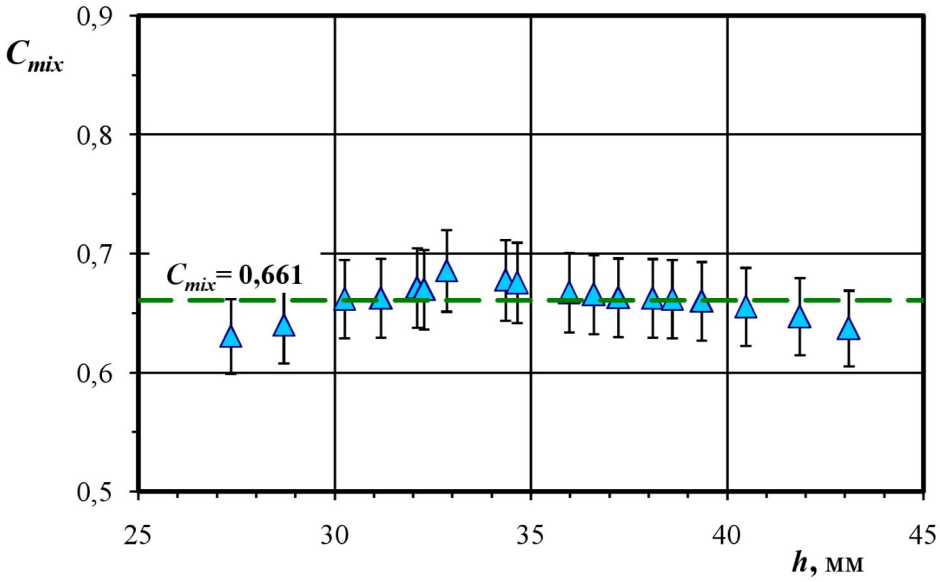


Рис. 4.31. Залежність коефіцієнта витрати C_{mix} в комбінованому режимі від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №8 (131×65 мм)

Зведені графіки залежності осереднених значень коефіцієнта витрати C_{mix} від геометричних параметрів водоприймача L_w та ω_o наведені на рис. 4.32 та рис. 4.33 відповідно. На рис. 4.32, а та рис. 4.33, а представлено всі експериментальні точки, а на рис. 4.32, б та рис. 4.33, б – лише решіток квадратної форми у плані.

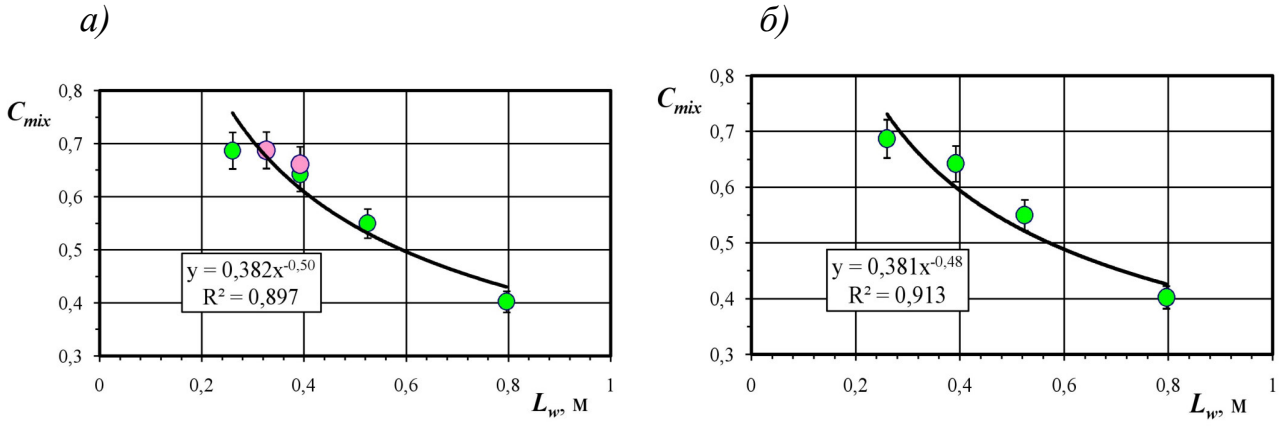


Рис. 4.32. Зведені графіки залежності осереднених значень коефіцієнта витрати C_{mix} від довжини водозливного периметра дощоприймача L_w:
а – всі експериментальні точки; б – для решіток квадратної форми

Для квадратних решіток (рис. 4.32, б та рис. 4.33, б) графіки залежності осереднених значень коефіцієнта витрати C_{mix} від геометричних параметрів водоприймача L_w та ω_o добре описуються степеневими лініями тренду. Значення коефіцієнта витрати C_{mix} для решіток прямокутної форми у плані дещо випадають з лінії тренду для квадратних решіток, що може бути свідченням того, що співвідношення довжин сторін також має деякий вплив на значення коефіцієнта витрати дощоприймачів C_{mix}.

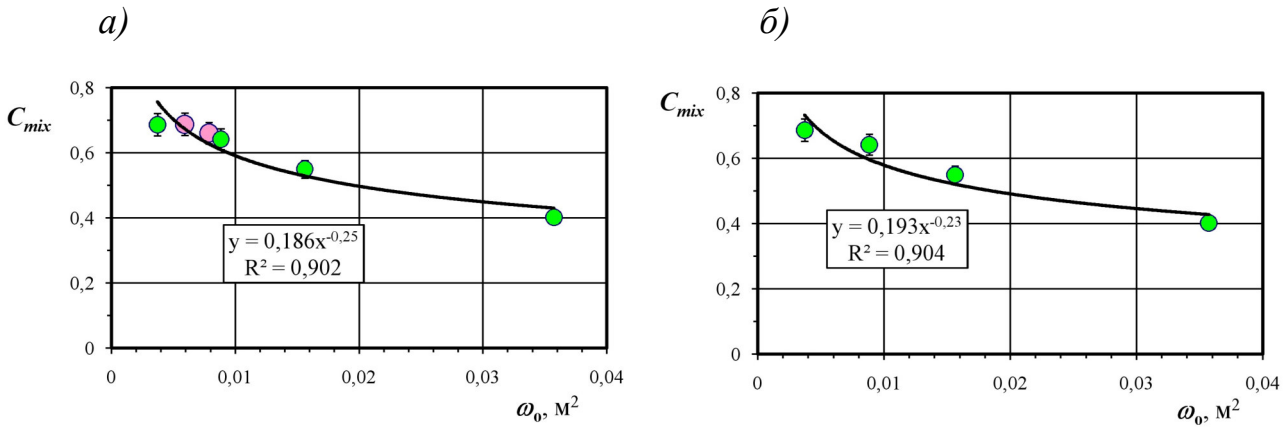


Рис. 4.33. Зведені графіки залежності осереднених значень коефіцієнта витрати C_{mix} від сумарної площі отворів дощоприймача ω_o:
а – всі експериментальні точки; б – для решіток квадратної форми

Для дощоприймачів з квадратними водоприймальними отворами отримано сильні функціональні степеневі залежності з високими значеннями коефіцієнта детермінованості $R^2>0,9$. Емпірична залежність коефіцієнта витрати C_{mix} від довжини периметра водоприймального отвору L_w:

$$C_{mix} = 0,381 \cdot L_w^{-0,48} \quad (R^2=0,913), \tag{4.23}$$

а від сумарної площі водоприймальних отворів ω_o:

$$C_{mix} = 0,193 \cdot \omega_0^{-0,23} \quad (R^2=0,904). \tag{4.24}$$

4.2.3. Режим отвору

Для всіх досліджених водоприймальних решіток для діапазону їх роботи в режимі отвору побудовано графічні залежності коефіцієнта витрати C_o, визначеного за формулою (2.9), від геометричного напору h на підході до дощоприймача.

Залежність коефіцієнта витрати C_o від напору h для типового дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою з розмірами водоприймального отвору 98×98 мм, наведена на рис. 4.34. Отриманий коефіцієнт витрати становить C_o=0,576, що значно перевищує значення C_o=0,452, рекомендоване ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14], але є помітно меншим за нормативне значення C_o=0,67 згідно з HEC-22 [124].

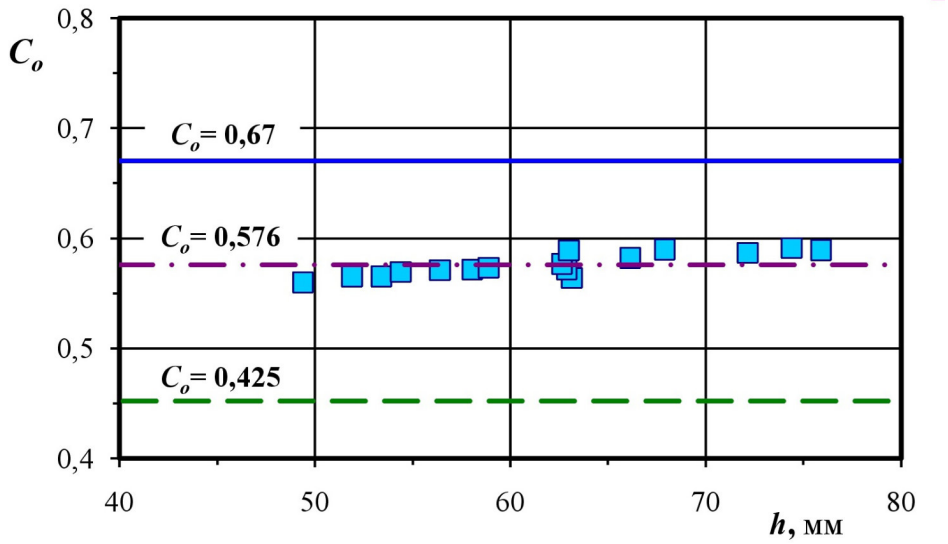


Рис. 4.34. Залежність коефіцієнта витрати в режимі отвору C_o від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №5 (98×98 мм); $C_{o.mid}$ = 0,576.

Аналогічна залежність коефіцієнта витрати C_o від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №6 з розмірами водоприймального отвору 65×65 мм, наведена на рис. 4.35. Характерною особливістю цієї решітки є те, що її коефіцієнт витрати C_o = 0,672, що майже дорівнює рекомендованому в HEC-22 [124] значенню C_o = 0,67.

При обробці експериментальних даних отримано графічну залежність коефіцієнта витрати C_o від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою № 7 з розмірами водоприймального отвору 98×65 мм (рис. 4.36). Отримане осереднене значення C_o=0,634 явно вище за рекомендоване ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14] C_o=0,452, проте все ще дещо менше, порівняно з C_o=0,67, рекомендованим HEC-22 [124].

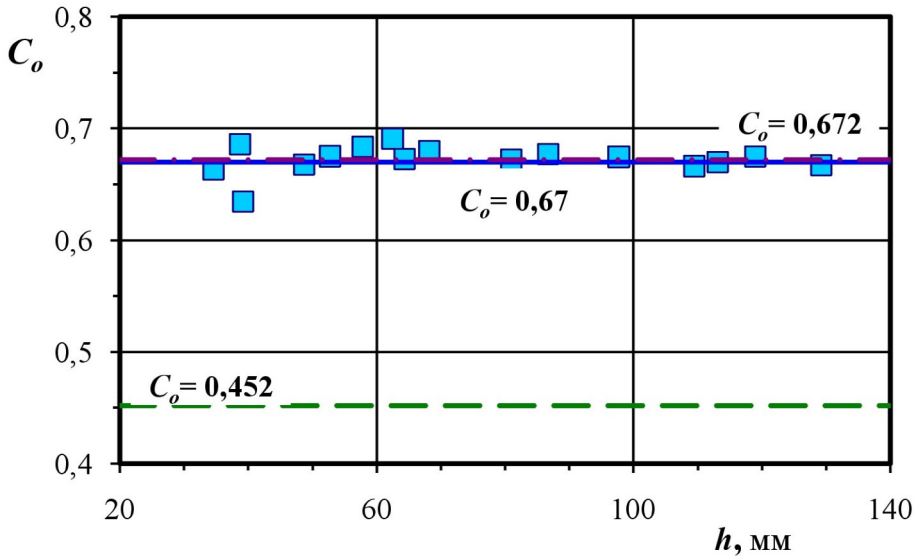


Рис. 4.35. Залежність коефіцієнта витрати в режимі отвору C_o від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №6 (65×65 мм); $C_{o.mid}$ = 0,672.

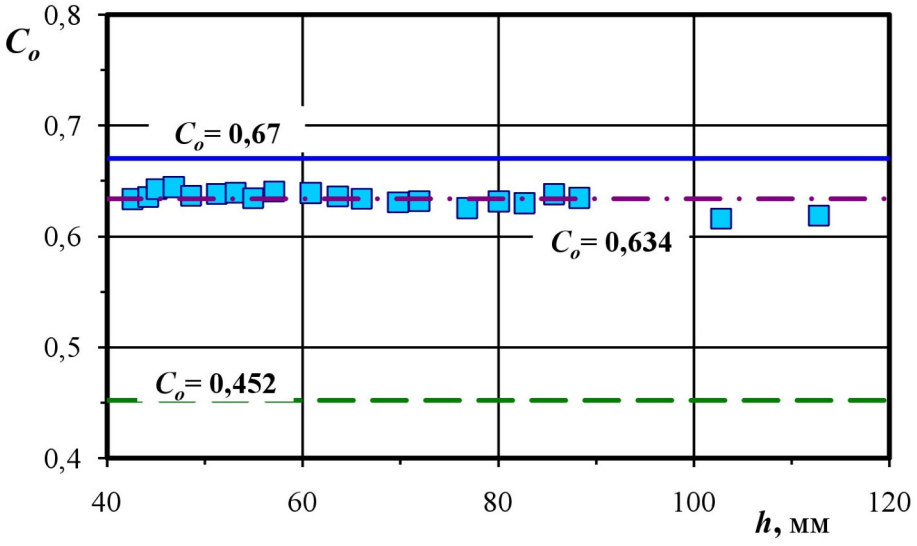


Рис. 4.36. Залежність коефіцієнта витрати в режимі отвору C_o від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №7 (98×65 мм); $C_{o.mid}$ = 0,634.

Для дощоприймача зі стрижневою решіткою №8 з розмірами водоприймального отвору 131×65 мм (рис. 4.37), зберігається тенденція де коефіцієнта витрати становить C_o=0,592, що явно більше за значення яке запропоноване в ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14] та менше, ніж значення за НЕС-22 [124].

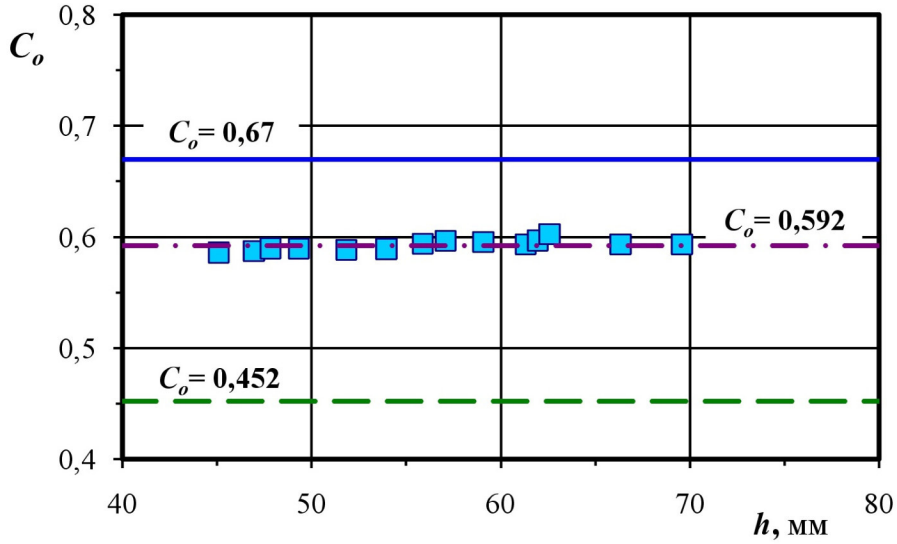


Рис. 4.37. Залежність коефіцієнта витрати C_o в режимі отвору від напору h для дощоприймача зі стрижневою решіткою №8 (131×65 мм) ; $C_{o.mid}$ = 0,592.

Зведені графіки залежності осереднених значень коефіцієнта витрати C_o (рис. 4.38) вказують на наявність сильної функціональної кореляції між C_o та ω_o:

$$C_o = 0{,}25 \cdot \omega_o^{-0{,}17} \quad (R^2=0{,}973). \qquad (4.25)$$

а) *б)*

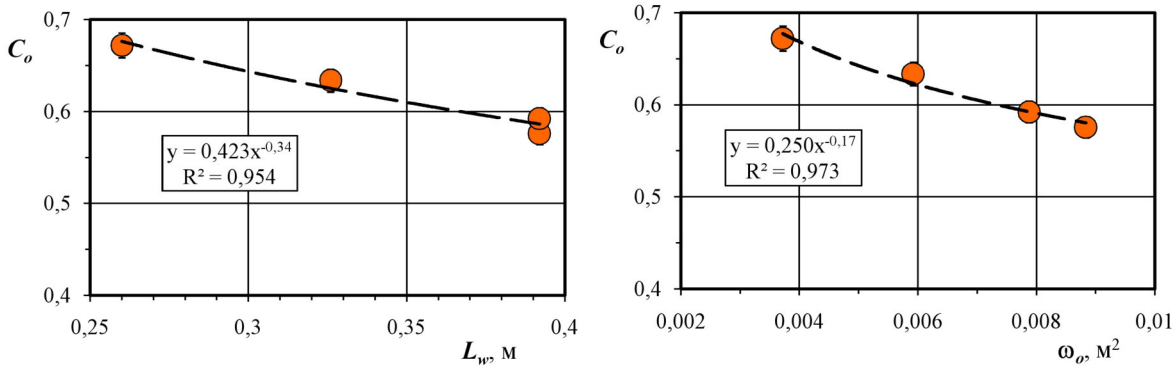


Рис. 4.38. Зведені графіки залежності коефіцієнта витрати дощоприймача в режимі отвору C_o від: а – довжини водозливного периметра L_w; б – сумарної площі отворів ω_o.

4.3 Візуалізація картин течії в різних режимах роботи водоприймача.

Нижче наведено візуалізацію картин течії урізних режимах роботи дощоприймача Basic 400 зі стрижневою решіткою №8 (131×65 мм). При витратах менших за 1,0 л/с спостерігали типову мілку течію по водозливному периметру (рис. 4.39). Безпосередньо біля перепадної площини струмені різко повертають на кут, близький до 90°. При витраті Q=1,90 л/с вже спостерігається об'єднання потоку нижче стержнів решітки, причому кутові отвори вже майже повністю затоплені, на відміну від не кутових отворів (рис. 4.40).

Рис. 4.39. Дощоприймач Basic 400 з решіткою №8 (131×65 мм) в режимі ВШП (Q=0,99 л/с, h=14,4 мм)

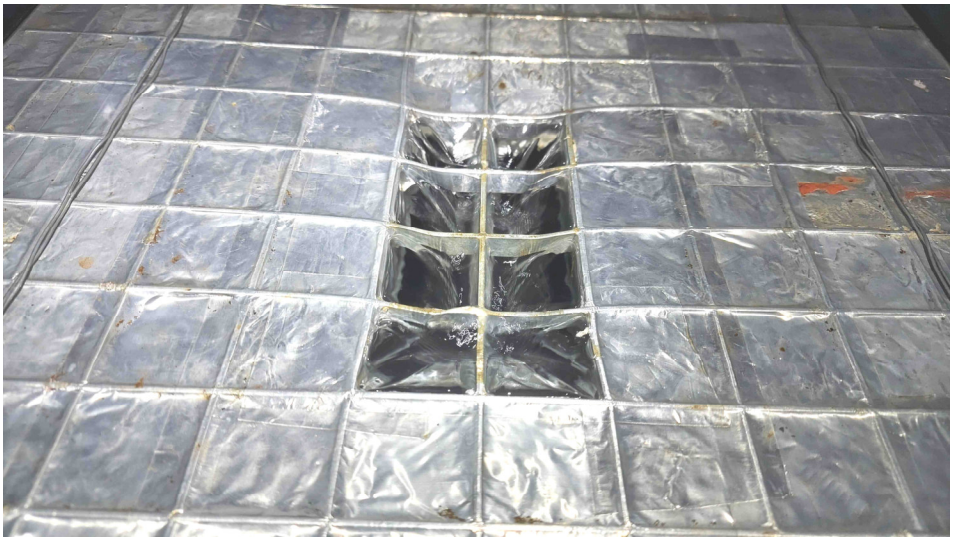


Рис. 4.40. Дощоприймач Basic 400 з решіткою №8 (131×65 мм) в режимі ВШП (Q=1,90 л/с, h=21,8 мм)

При роботі дощоприймача у режимі ВШП підтверджено, що глибина h_p безпосередньо на перепаді завжди є меншою за відповідну критичну глибину h_{cr}, яку визначали за об'ємною витратою притоку та шириною водозливного фронту дощоприймача L_w:

$$h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{\alpha_p Q^2}{g L_w^2}}, \tag{4.26}$$

де α_p – коефіцієнт кінетичної енергії потоку безпосередньо на перепаді; $\alpha_p \approx 1$.

На рис. 4.41 наведено приклад вимірювання глибини h_p для решітки №2 (L_w= 1,056 м) за витрати притоку Q =0,941 л/с; фактичне значення глибини на порозі – h_p = 3,5 мм, що менше, ніж відповідна критична глибина h_{cr} = 4,33 мм.

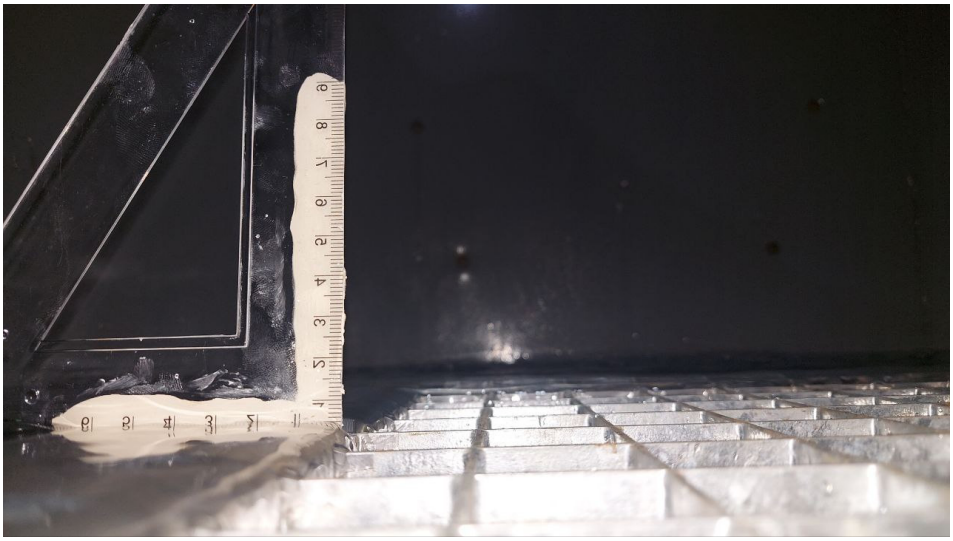


Рис. 4.41. Вимірювання глибини на перепаді для решітки №2 (264×264 мм) за витрати Q=0,941 л/с (h_p =3,5 мм; h_{cr} =4,33 мм)

При подальшому збільшенні притоку, за об'ємної витрати Q=2,63 л/с, вся решітка працює у комбінованому режимі. Картина течії при цьому характеризується змиканням бічних струменів на центральному стержні, перетоком частини витрати з бічних комірок у суміжні центральні, а також високою неоднорідністю вільної поверхні рідини над площиною отвору (рис. 4.42).

Рис. 4.42. Дощоприймач Basic 400 з решіткою №8 (131×65 мм) у комбінованому режимі (Q=2,63 л/с, h=27,4 мм)

При витраті Q=3,44 л/с, що відповідає напору h=33,0 мм починає з’являтися центральний вихор, а при витраті Q=3,97 л/с, картина течії за зовнішніми ознаками вже дуже схожа на режим отвору, але на графіку (рис. 4.11) ця точка все ще – в комбінованому режимі. Вільна поверхня над водоприймальною решіткою характеризується суттєвою неоднорідністю та хаотичністю хвильових структур (рис. 4.43).

Рис. 4.43. Дощоприймач Basic 400 з решіткою №8 (131×65 мм) у комбінованому режимі (Q=3,97 л/с, h=39,4 мм)

За витрати Q=4,44 л/с експериментально отримано картину течії, характерну для режиму отвору, що добре корелює з розрахунковим значенням транзитної витрати $Q_{tr.0}$=4,43 л/с, отриманої для решітки №8 за методом HEC-22. Над площиною решітки спостерігається чітко виражений центральний вихровий шнур (рис. 4.44). За витрати Q=5,46 л/с з'являється тенденція до зменшення амплітуди хвиль на підході до решітки. Вихровий шнур при цьому періодично з'являється та пропадає, причому вхід шнура на вільній поверхні води все більше віддаляється від геометричного центру отвору (рис. 4.45).

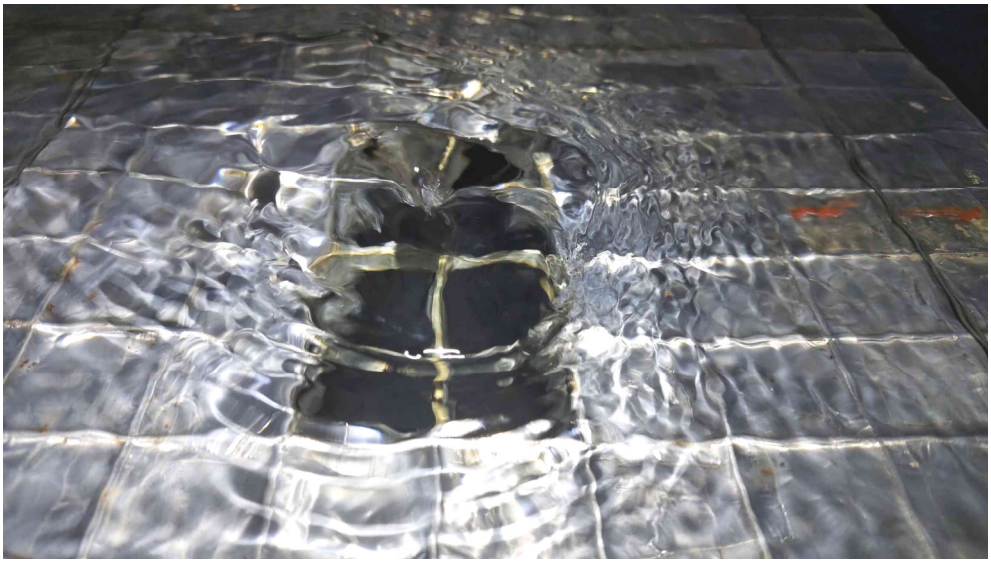


Рис. 4.44. Дощоприймач Basic 400 з решіткою №8 (131×65 мм) в режимі отвору (Q=4,44 л/с, h=47,0 мм)

Рис. 4.45. Дощоприймач Basic 400 з решіткою №8 (131×65 мм) в режимі отвору (Q=5,46 л/с, h=69,6 мм)

4.4 Перехідні напори та витрати

Нижче виконано порівняння розрахункових та експериментальних транзитних напорів для дощоприймача Basic 400 зі стрижневими решітками №5 – №8. Розрахунковий напір $h^*_{tr.0}$ визначали за формулою (3.43), а розрахункові транзитні напори $h^*_{tr.1}$ і $h^*_{tr.2}$ в трьохзонній моделі – за формулами (3.47) та (3.49) відповідно. Експериментальні транзитні напори $h_{tr.1}$ відповідають середнім арифметичним значенням крайньої точки режиму ВШП та першої точки комбінованого режиму. Аналогічно експериментальні транзитні напори $h_{tr.2}$ визначено як середнє арифметичне напору крайньої точки комбінованого режиму та першої точки режиму отвору. Решітки в табл. 4.1 вказані в порядку зменшення їх сумарної площі отворів ω_o та співвідношення ω_o / L_w.

Таблиця 4.1. Розрахункові та експериментальні транзитні напори

№ решітки	Розміри $b_{w1} \times b_{w2}$, мм	ω_o / L_w, мм	Розрахункові напори h_{tr}, мм			Експеримент. напори h_{tr}, мм		$\frac{h_{tr.1}}{h^*_{tr.0}}$	$\frac{h_{tr.2}}{h^*_{tr.0}}$
			$h^*_{tr.0}$	$h^*_{tr.1}$	$h^*_{tr.2}$	h_{tr1}	h_{tr2}		
№5	98×98	22,54	40,28	34,84	46,57	33,1	47,7	0,822	1,184
№8	131×65	20,09	35,90	31,05	41,51	26,6	44,1	0,741	1,228
№7	98×65	18,17	32,47	28,08	37,54	22,0	41,0	0,678	1,263
№6	65×65	14,31	25,58	22,12	29,58	17,1	32,0	0,668	1,251

Аналіз отриманих експериментальних даних вказує на те, що зі збільшенням параметра решітки ω_o / L_w від 14,3 мм до 22,5 мм співвідношення $h_{tr.1} / h^*_{tr.0}$ зростає від 0,668 до 0,822, тоді як відношення $h_{tr.2} / h^*_{tr.0}$ плавно зменшується від 1,251 до 1,184 (рис. 4.46).

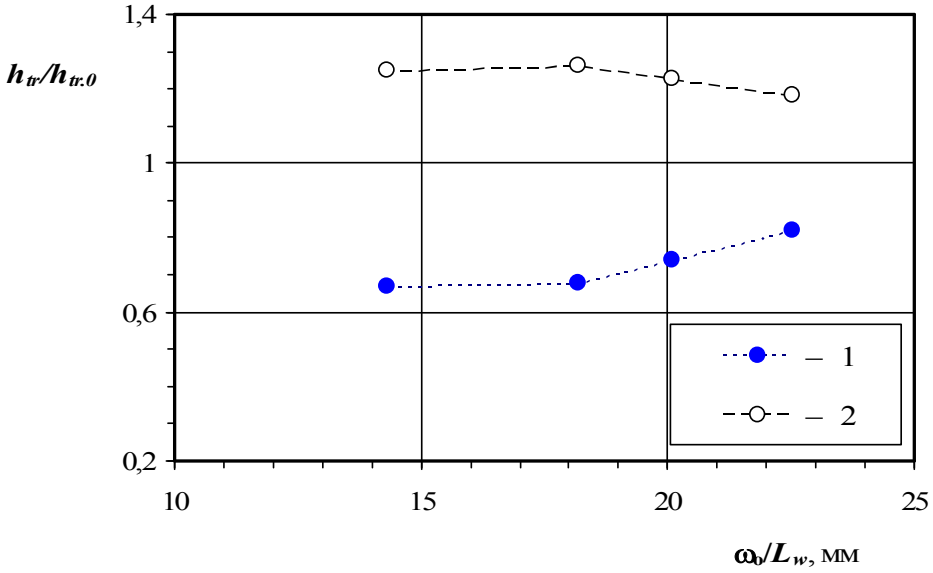


Рис. 4.46. Експериментальні залежності співвідношення транзитних витрат від параметра решітки ω_o / L_w : 1 – $h_{tr.1} / h^*_{tr.0}$; 2 – $h_{tr.2} / h^*_{tr.0}$

4.5 Гідравлічні характеристики водоприймальних трапів

Трапи водоприймальні з горизонтальним відведенням стічної рідини та гідрозатвором пластинчастого типу найчастіше використовуються в системах поверхневого водовідведення великих виробничих приміщень. Конструкційно всі досліджені трапи аналогічні та містять гідравлічний затвор пластинчастого типу для недопущення потрапляння каналізаційних газів у приміщення.

Гідравлічні характеристики трапів з решітками та горизонтальним виходом, з номінальними діаметрами відвідних труб 100 мм і 150 мм, були випробувані на лабораторній установці, яка відповідає вимогам стандарту EN 1253-2:2015 [61].

Точність визначення коефіцієнтів витрати для різних водоприймачів є критичною для мінімізації помилок моделювання у системах водовідведення та зменшення ризику затоплення прилеглих територій. Особливим режимом роботи для водоприймачів, є режим ВШП, оскільки він є їх основним робочим режимом та його дотримання є критичним для належного функціонування

водоприймачів, на відміну від режиму отвору, який не використовується при нормальній експлуатації водоприймачів.

Експериментальні залежності пропускної здатності досліджених водоприймальних трапів з умовним діаметром відвідного трубопроводу DN 100 та DN 150 мм від геометричного напору h наведені на рис. 4.47.

На кривих витрат для трапів з діаметром DN 100 мм виразно видно перегини відповідних кривих, що вказує на початок підтоплення водоприймача та його перехід від режиму водозливу до режиму отвору. Відповідні координати переходу (гранична витрата Q_{lim} та граничний напір h_{lim}, наведені в табл. 4.2, були визначені за максимальними значеннями коефіцієнтів детермінованості степеневих ліній тренду, що описують $Q-h$ залежності при $h \le h_{lim}$, тобто в режимі водозливу:

$$Q = Ch^k \qquad (4.27)$$

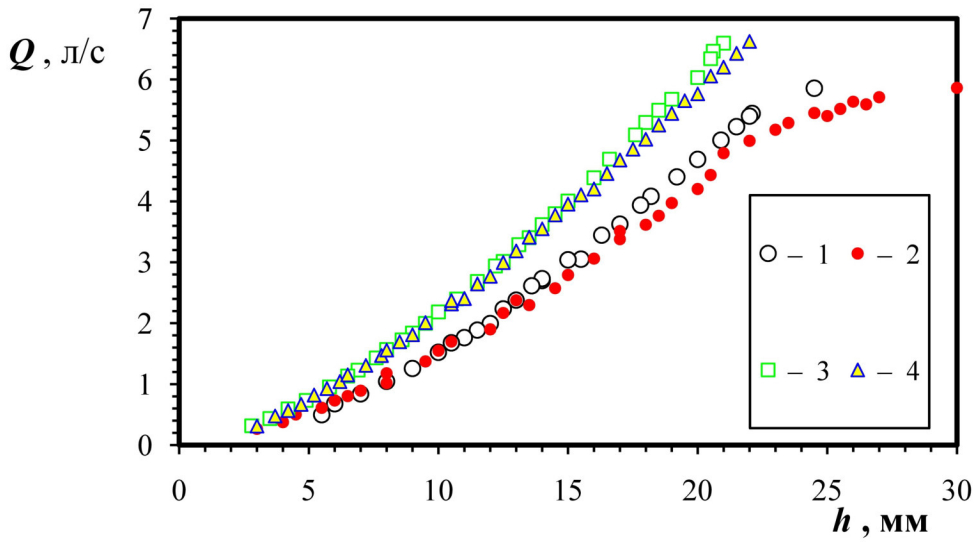


Рис. 4.47. Витратно-напірні характеристики водоприймальних трапів з гідрозатворами та горизонтальним відведенням води: 1 – DN=100 мм, стрижнева решітка; 2 – DN=100 мм, перфорована решітка; 3 – DN=150 мм, стрижнева решітка; 4 – DN=150 мм, перфорована решітка

Характерною максимальною пропускною здатністю внутрішніх водоприймачів є витрата Q_{20}, яку вони здатні пропустити за геометричного напору h =20мм (табл. 4.2). Пропускна здатність Q_{20} водоприймачів з стрижневими решітками суттєво перевищує відповідні значення для тих самих водоприймачів з перфорованими решітками, зокрема для трапу DN=100 мм − на 15,2 %, а для трапу DN=150 мм − на 23,9 %. У табл. 4.2 вказані також нормативно мінімальні значення пропускної здатності трапів $Q_{min.20}$ за напору h=20 мм, що регламентуються (EN 1253-2:2015), а також фактичні значення напорів h', за яких досягаються ці витрати на досліджених трапах.

Експериментальні залежності коефіцієнта витрати C_w від геометричного напору h для трапів зі стрижневими решітками, представлені на рис. 4.48, достатньо добре описуються степеневими лініями тренду, отриманими за методом найменших квадратів:

− для трапа DN=100 мм:

$$C_w = 0{,}551 h^{0{,}208}, \tag{4.28}$$

− для трапа DN=150 мм:

$$C_w = 0{,}909 h^{0{,}079}. \tag{4.29}$$

Таблиця 4.2. Основні гідравлічні характеристики досліджуваних водоприймальних трапів з горизонтальним водовідводом

Трапи	Q_{lim}, л/с	h_{lim}, мм	C	k	Q_{20}, л/с	Q_{min20}, л/с	h', *мм*
DN 100, стрижнева решітка	5,44	21,5	0,032	1,681	4,92	1,4	9,5
DN 100, перфорована решітка	5,29	23,5	0,0522	1,470	4,27	1,4	9,4
DN 150, стрижнева решітка	−	−	0,0649	1,577	7,31	2,8	10,9
DN 150, перфорована решітка	−	−	0,0759	1,453	5,90	2,8	12,0

Експериментальні значення коефіцієнта витрати C_w , отримані для трапів з стрижневими решітками, вказують на їх змінну поведінку. Експериментальні коефіцієнти витрати C_w для трапа DN 100 мм зі стрижневою решіткою в режимі ВШП змінюються в діапазоні 0,95–1,15, тоді як для трапа DN 150 мм – від 0,8 до 1,1, причому обидва показують чітку тенденцію до збільшення при зростанні напору h [133]. Отримані коефіцієнти витрати набагато вищі, ніж відповідні результати інших досліджень зокрема $C_w = 0{,}65$ для малих водоприймачів з розмірами 10×5 см [93], і $C_w = 0{,}78$ отриманий Guo *et al.* (2009) [68] для повнорозмірних водоприймачів з габаритними розмірами 90×48 см.

Отримані результати у цьому досліджені близькі до коефіцієнтів витрати за ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14] $C_w = 0{,}909$ та за USDT 2009 $C_w = 0{,}974$, також спостерігається чітка тенденція до зростання коефіцієнта витрати у режимі ВШП зі збільшенням гідравлічного напору, а також вплив масштабу вхідного водовідвідного отвору на коефіцієнт витрати. На рис. 4.48 вказано також довірчі діапазони значень коефіцієнта витрати C_w, що відповідають граничним відносним похибкам, визначеним за рівнянням:

$$\delta C_w = 0{,}253 h^{-0{,}605} \tag{4.30}$$

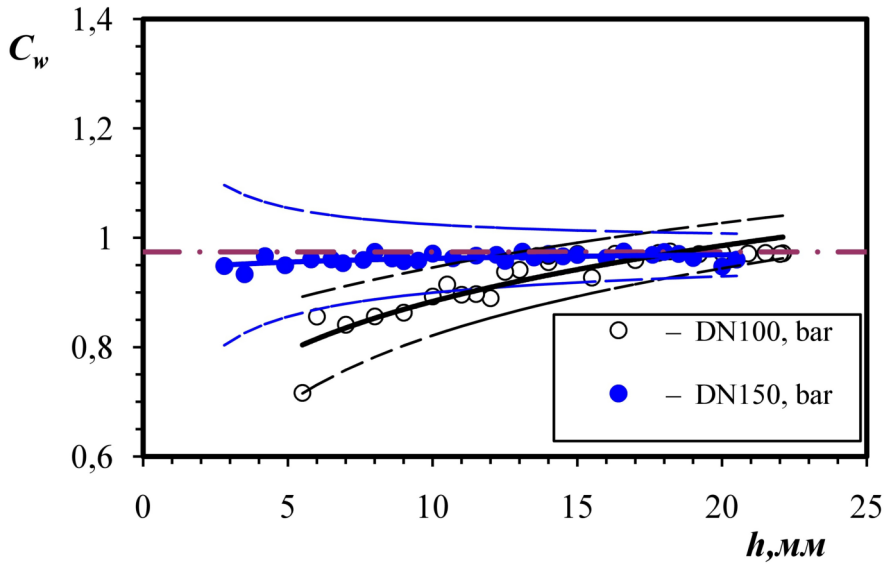


Рис. 4.48. Експериментальні коефіцієнти витрати C_w водоприймальних трапів горизонтального типу DN100 та DN150 зі стрижневими решітками у режимі ВШП [133]

Для водоприймачів з перфорованими решітками спостерігалася протилежна тенденція, а саме, зменшення коефіцієнта витрати C_w зі зростанням гідравлічного напору h (рис. 4.49).

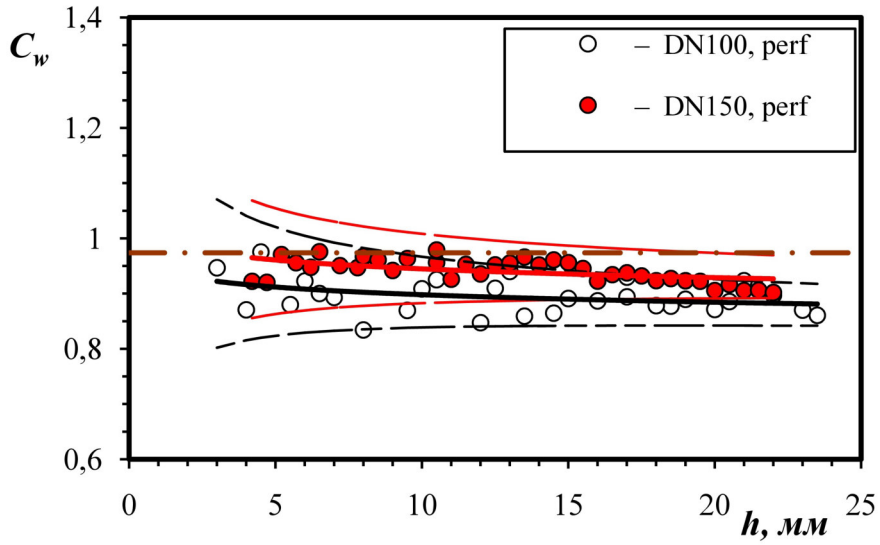


Рис. 4.49. Експериментальні коефіцієнти витрати C_w водоприймальних трапів горизонтального типу DN100 та DN150 з перфорованими решітками у режимі ВШП (штриховими лініями вказано діапазони, що відповідають граничним похибкам за рівнянням (4.30)) [133]

Цей результат може бути пояснений значно складнішими моделями потоку через перфоровані решітки, а саме, переходом частини отворів до режиму отвору зі збільшенням гідравлічного напору. Степеневі залежності коефіцієнта витрати C_w від напору h для водоприймачів із перфорованими решітками:

− для трапа DN 100 мм з перфорованою решіткою:

$$C_w = 0{,}968\, h^{-0{,}030}, \tag{4.31}$$

− для трапа DN 150 мм з перфорованою решіткою:

$$C_w = 1{,}111\, h^{-0{,}062}. \tag{4.32}$$

Були визначені глибини переходу з режиму ВШП у режим отвору, і було виявлено, що перфоровані решітки створюють значний додатковий гідравлічний опір порівняно з відповідними стрижневими решітками. Це

призводить до відповідного зменшення пропускної здатності перфорованих трапів, зі зменшенням у 1,15 разів для трапа DN 100 мм і у 1,24 рази для трапа DN 150 мм при характерній висоті напору 20 мм [133]. Отримані степеневі залежності (4.28) і (4.29) між коефіцієнтом витрати в режимі водозливу та геометричним напором для водоприймачів із стрижневими решітками з номінальними діаметрами відвідних трубопроводів DN 100 та DN 150, відповідно. Аналогічні степеневі залежності (4.31)–(4.32) отримано для водоприймачів DN 100 та DN 150 із перфорованими решітками

4.6 Висновки

1. Отримано експериментальні витратно-напірні характеристики дощоприймача Basic 400 з діаметром відвідного трубопроводу 200 мм, а також водовідвідних трапів з горизонтальними відводами діаметрами 100 мм та 200 мм і гідрозатвором пластинчастого типу за різних типів і розмірів водоприймальних решіток.

2. Запропоновано критерій виділення на гідравлічних характеристиках діапазонів, що відповідають режиму ВШП, комбінованому режиму та режиму отвору, а саме чисельні значення показників степеня в степеневих лініях трендів за максимальних значень коефіцієнта детермінованості R^2, що для вказаних вище режимів дорівнюють відповідно 1,5; 1 та 0,5.

3. Отримано емпіричні степеневі формули (4.18)–(4.19) для визначення пропускної здатності дощоприймачів зі стрижневими водоприймальними решітками Q_{20} за характерного напору 20 мм залежно від довжини водозливного периметра L_w. Формула (4.19) для решіток квадратної форми є сильною функціональною залежністю (R^2=0,996), що дозволяє з високим ступенем достовірності поширювати цю залежність на інші стрижневі решітки квадратної форми.

4. Експериментальні значення коефіцієнта витрати в режимі ВШП C_w для дощоприймача Basic 400 зі стрижневими решітками №1–№8 з розмірами в плані від 365×365 мм до 65×65 мм становлять C_w= 0,858 ± 6%. Отриманий

коефіцієнт витрати на 5,6% менший за рекомендоване значення C_w = 0,909 у нормативному документі ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012 [14] та на 11,9% менший за значення C_w = 0,974, рекомендоване HEC-22 US FHWA [124].

5. Експериментальні значення коефіцієнта витрати в комбінованому режимі C_{mix} для дощоприймача Basic 400 зі стрижневими решітками №4–№8 з розмірами в плані від 131×131 мм до 65×65 мм добре описуються степеневою лінією тренду (4.23), як функція периметру водоприймального отвору L_w, що дозволяє з високим ступенем достовірності поширювати цю залежність на інші стрижневі решітки.

6. Експериментальні значення коефіцієнта витрати в режимі отвору C_o для дощоприймача Basic 400 зі стрижневими решітками №5–№8 з розмірами в плані від 98×98 мм до 65×65 мм добре описуються степеневою лінією тренду (4.25), як функція сумарної площі водоприймальних отворів ω_o, що дозволяє з високим ступенем достовірності поширювати цю залежність на інші решітки стрижневого типу.

7. Досліджено зміну картини течії крізь дощоприймач зі стрижневою решіткою по мірі збільшення об’ємної витрати притоку. Описано основні патерни картин течії, характерних для режиму ВШП, комбінованого режиму та режиму отвору.

8. Гідравлічні характеристики водоприймальних трапів зі стрижневими решітками з коефіцієнтом перфорації 0,86, у межах експериментальної похибки накладаються з характеристиками відповідних трапів без решіток. Перфоровані решітки створюють істотний додатковий опір, зумовлюючи при характерному напорі h = 20 мм зниження пропускної здатності трапа DN100 мм в 1,15 раз, а для трапа з DN150 мм в 1,24 рази порівняно зі значеннями для відповідних трапів зі стрижневими решітками.

Розділ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

5.1. Удосконалений метод гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу

Теоретичні та експериментальні результати, представлені відповідно у розділах 3 і 4, дозволяють сформулювати алгоритм удосконаленого методу гідравлічного розрахунку точкових дощоприймачів.

5.1.1. Тип течії крізь систему "дощоприймач – відвідний трубопровід".

На першому етапі потрібно встановити тип течії крізь систему "дощоприймач – відвідний трубопровід". Затоплена течія має місце у випадках, коли витрата притоку Q більша або дорівнює граничній пропускній здатності системи Q_{lim}:

$$Q \geq Q_{\lim} = \frac{\pi d_p^2}{4} \sqrt{\frac{2g(\Delta h_{in} + i_p L_p)}{\left(\frac{\lambda_{p.\lim} L_p}{d_p} + \Sigma\zeta_p + \alpha_p \right)}}, \qquad (5.1)$$

де d_p, L_p – внутрішній діаметр та довжина відвідного трубопроводу відповідно; Δh_{in} – конструкційна глибина водоприймального пристрою, яка визначається як перевищення верхньої площини водоприймальної решітки над віссю відвідного трубопроводу на виході з дощоприймача; $i_p L_p$ – перепад позначок осі на початку і в кінці відвідного трубопроводу; $\lambda_{p.\lim}$, $\Sigma\zeta_p$ – коефіцієнт гідравлічного тертя та сумарний коефіцієнт місцевих опорів відвідного трубопроводу відповідно за витрати Q_{lim}; α_p – коефіцієнт кінетичної енергії для напірного потоку у водовідвідній трубі; з достатньою для практики точністю можна рекомендувати стале значення $\alpha_p = 1{,}05$.

Гранична пропускна здатність системи Q_{lim} може бути безпосередньо розрахована за формулою (5.1), виходячи з параметрів дощоприймача та відвідного трубопроводу, з урахуванням усіх часткових деталей, а саме: тип та характеристики водоприймальної решітки, наявність та тип гідрозатвору чи сміттєзатримувального пристрою, діаметр, матеріал, довжина і поздовжній похил відвідного трубопроводу. Для найпростіших стандартних

дощоприймачів без гідрозатвору чи сміттєзатримувальних пристроїв, з пластиковими водовідвідними трубами діаметром DN/OD= 200 мм, прокладеними з поздовжнім похилом i=0,02, значення граничної пропускної здатності Q_{lim} можна також визначити за емпіричними залежностями (3.25)–(3.27) або ж інтерполяцією розрахункових значень, наведених у табл. 3.1.

5.1.2. Затоплена течія крізь систему "дощоприймач – відвідний трубопровід".

У випадку виконання умови (5.1) потрібно розрахувати відповідну глибину затоплення прилеглої території h_{sch} безпосередньо в місці розташування дощоприймача:

$$h_{sch} = \frac{(\alpha_o + \zeta_o)Q^2}{2g\omega_o^2}\ , \qquad (5.2)$$

де ζ_o – коефіцієнт місцевого опору отворів водоприймальної решітки; α_o – коефіцієнт кінетичної енергії для напірного потоку крізь водоприймальні отвори; з достатньою для практики точністю можна рекомендувати стале значення $\alpha_o = 1{,}05$; ω_o – сумарна площа отворів водоприймальної решітки.

Глибину затоплення h_{sch} потрібно порівняти з граничним допустимим значенням h_{don}, регламентованим ДБН В.2.5-75:2013 та ДБН В.2.3-5:2018, а саме: 5–6 см для ділянок території з пилкоподібним профілем або ж глибина, що відповідає ширині поверхневого потоку безпосередньо перед дощоприймачем не більше 2 м. Крайня вимога є більш загальною, за нею значення максимально допустимої глибини затоплення під час випадання розрахункового дощу з повторюваністю P років залежить від поперечного планувального похилу території (у напрямку до дощоприймача). Для автомобільних доріг у межах населених пунктів ДБН В.2.3-5:2018 рекомендує значення поперечного похилу 0,025, що відповідає гранично допустимій глибині 5 см, а для автостоянок – 0,02, що відповідає глибині 4 см. У випадку перевищення h_{sch} над h_{don}, необхідно збільшити пропускну здатність водоприймальної решітки та / або системи "дощоприймач – відвідний трубопровід".

5.1.3. Непідтоплені течії крізь систему "дощоприймач – відвідний трубопровід".

У випадку, якщо розрахункова максимальна витрата притоку Q є меншою за граничну пропускну здатність системи Q_{lim} за рівнянням (5.1), має місце непідтоплена течія крізь систему "дощоприймач – відвідний трубопровід", що може відбуватися в режимі ВШП, комбінованому режимі чи в режимі отвору.

Для визначення режиму непідтопленої течії необхідно визначити першу та другу транзитні глибини:

$$h_{tr.1} = \frac{3\sqrt{3}C_{mix}^2\omega_o}{2C_w^2 L_w}, \tag{5.3}$$

$$h_{tr.2} = \frac{3\sqrt{3}C_o^2\omega_o}{2C_{mix}^2 L_w}, \tag{5.4}$$

а також відповідні транзитні витрати:

$$Q_{tr.1} = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_w L_w \sqrt{g} h_{tr.1}^{3/2}, \tag{5.5}$$

$$Q_{tr.2} = C_o \omega_o \sqrt{2g h_{tr.2}}, \tag{5.6}$$

де C_w, C_{mix}, C_o – коефіцієнти витрати в режимі ВШП, комбінованому та в режимі отвору відповідно.

У випадку, якщо витрата притоку $Q \le Q_{tr.1}$, має місце режим ВШП, а відповідна розрахункова глибина потоку перед решіткою становить:

$$h_{sch} = 1{,}5\left(\frac{Q}{C_w L_w \sqrt{g}}\right)^{2/3}. \tag{5.7}$$

Якщо витрата притоку $Q > Q_{tr.1}$, $Q \le Q_{tr.2}$ має місце комбінований режим, а відповідна розрахункова глибина потоку перед решіткою:

$$h_{sch} = \frac{1{,}14Q}{C_{mix}\sqrt{g}\sqrt{L_w \omega_o}}. \tag{5.8}$$

Для витрат притоку $Q > Q_{tr.2}$ (але $Q < Q_{lim}$) дощоприймач працює в режимі отвору режим, а розрахункова глибина потоку відносно площини решітки:

$$h_{sch} = \frac{Q^2}{2gC_o^2\omega_o^2}. \qquad (5.9)$$

Незалежно від режиму непідтопленої течії, при перевищенні розрахункової глибини h_{sch} , визначеної за рівняннями (5.7), (5.8) чи (5.9) над гранично допустимою глибиною $h_{доп}$, необхідно передбачити збільшення пропускної здатності дощоприймача за рахунок використання водоприймальної решітки з більшим водозливним периметром L_w та / або з більшою сумарною площею водоприймальних отворів ω_o.

5.1.4. Рекомендовані залежності для коефіцієнтів витрати для непідтоплених дощоприймачів зі стрижневими решітками

На підставі аналізу експериментальних результатів, отриманих для стрижневих решіток різних габаритів та конфігурації, які представлені у розділі 4, можна сформулювати наступні рекомендації з визначення коефіцієнтів витрати решіток у режимі ВШП (C_w), комбінованому режимі (C_{mix}) та в режимі отвору (C_o), що використовуються в рівняннях (5.3) – (5.9).

Для режиму ВШП рекомендується використовувати стале значення коефіцієнта витрати $C_w = 0{,}858$.

Враховуючи суттєві ймовірні похибки, пов'язані з екстраполяцією степеневих залежностей (4.23) та (4.25) для комбінованого режиму та режиму отвору відповідно, у діапазон значно більших сумарних площ отвору решіток, на базі експериментальних результатів було виконано пошук відповідних асимптотичних залежностей для коефіцієнтів C_{mix} та C_o. В обох випадках емпіричні коефіцієнти витрати були апроксимовані двопараметричними експоненційними залежностями.

Для комбінованого режиму за методом найменших квадратів за мінімального значення середньоквадратичного відхилення експериментальних та розрахункових значень коефіцієнта C_{mix} отримано лінію тренду:

$$C_{mix} = 1{,}1 - 0{,}7\left[1 - \exp(-3L_w)\right]. \qquad (5.10)$$

Порівняння експериментальних значень коефіцієнта витрати C_{mix} та розрахункових за рівнянням (5.10) наведено на рис. 5.1.

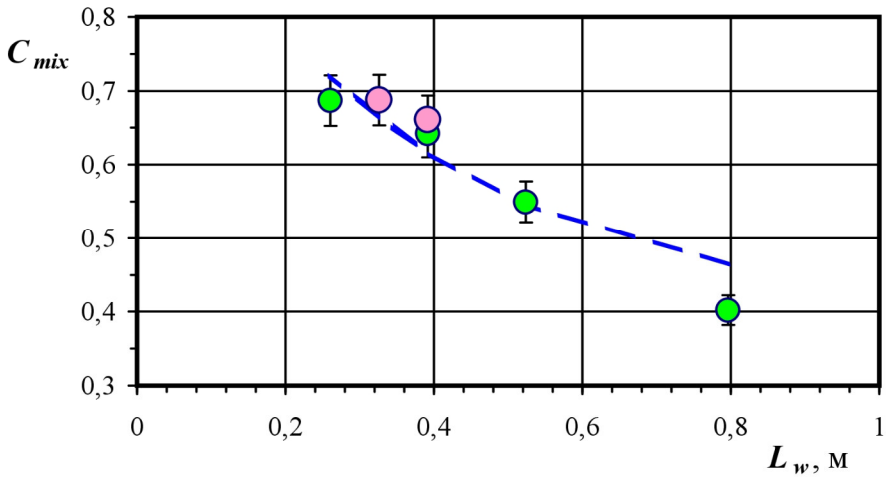


Рис. 5.1. Експериментальні значення коефіцієнта витрати C_{mix} та лінія тренду, побудована за експоненційною залежністю (5.10)

Аналогічно, для режиму отвору отримано двопараметричну експоненційну залежність коефіцієнта витрати C_o від сумарної площі водоприймальних отворів:

$$C_o = 0{,}80 - 0{,}28\left[1 - \exp(-168\omega_o)\right]. \qquad (5.11)$$

Порівняння експериментальних значень коефіцієнта витрати C_o та розрахункових за рівнянням (5.11) наведено на рис. 5.2.

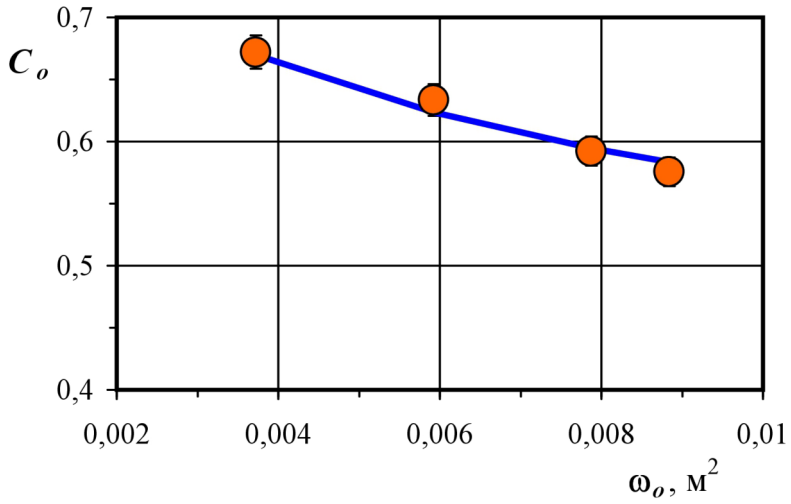


Рис. 5.2. Експериментальні значення коефіцієнта витрати C_o та лінія тренду, побудована за експоненційною залежністю (5.11)

5.1.5. Розрахункові гідравлічні характеристики типових дощоприймачів зі стрижневими решітками.

Запропонований алгоритм удосконаленого гідравлічного розрахунку дощоприймачів, представлений в пп. 5.1.1–5.1.5, був реалізований для трьох типових дощоприймачів, які широко використовуються для дощового водовідведення в Україні, а саме:

– внутрішньо-майданчиковий дощоприймач Basic 400 з габаритними (зовнішніми) розмірами водоприймальної решітки 390×390 мм та розмірами водоприймального отвору 365×365 мм;

– вуличний малий дощоприймач типу Д (А15) з габаритними розмірами 580×300 мм та розмірами водоприймального отвору 520×234 мм;

– вуличний великий дощоприймач типу ДБ (В125) з габаритними розмірами 800×400 мм та розмірами водоприймального отвору 740×340 мм.

Гідравлічні характеристики дощоприймачів Basic 400, Д (А15) та ДБ (В125) з типовими для них стрижневими решітками представлені на рис. 5.3–5.5. Гідравлічні характеристики побудовані для трьох схем розташування дощоприймача, що відповідають 1-сторонньому, 2-сторонньому та всебічному, 4-сторонньому притоку до них поверхневого стоку.

На рис. 5.3–5.5 для порівняння показано також характерні пропускні здатності, зокрема витрата $Q_{0.min}$ = 51,5 л/с, що відповідає початку напірного режиму течії у водовідвідному трубопроводі, складеному з труб діаметром DN(OD)=200 мм (внутрішній діаметр – d_p= 188,2 мм), укладених з поздовжнім похилом i_p=0,02; а також аналогічна витрата $Q_{0.max}$ = 58,2 л/с для труб DN(ID)=200 мм (d_p=197,1 мм) при похилі i_p=0,02.

Важливим є значення граничної витрати Q_{lim}, яка визначає перехід до затопленого типу течії крізь дощоприймач. На рис. 5.3–5.5 вказано практично мінімально можливе значення граничної витрати $Q_{lim.min}$ = 68,3 л/с що відповідає діаметру відвідного трубопроводу DN(ID)=200 мм та максимально допустимій за ДБН В.2.5-75:2013 довжині відвідного трубопроводу $L_{w.max}$=40 м за мінімальної гідравлічної глибини дощоприймального колодязя Δh_{in}=0,97 м.

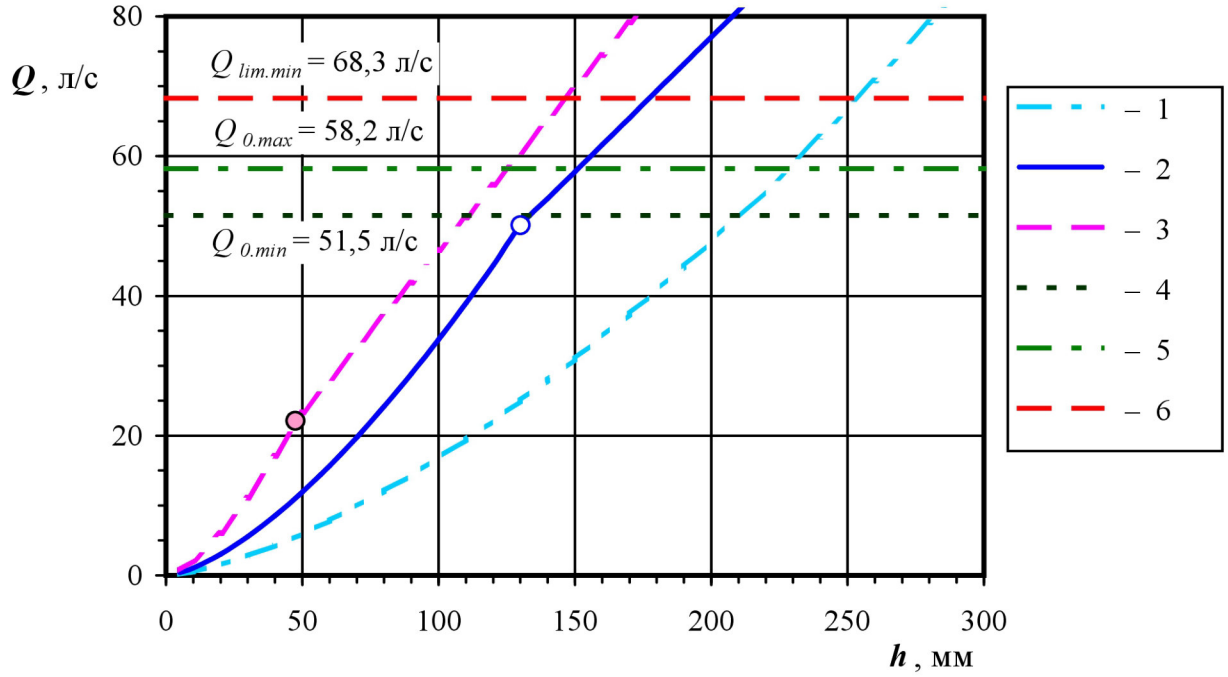


Рис. 5.3. Гідравлічні характеристики дощоприймача Basic 400 за:
1 – 1-стороннього; 2 – 2-стороннього; 3 – 4-стороннього притоку дощових вод; 4, 5 – початок напірної течії у відвідній трубі DN(OD)=200 мм та DN(ID)=200 мм відповідно; 6 – мінімальне значення граничної витрати затоплення

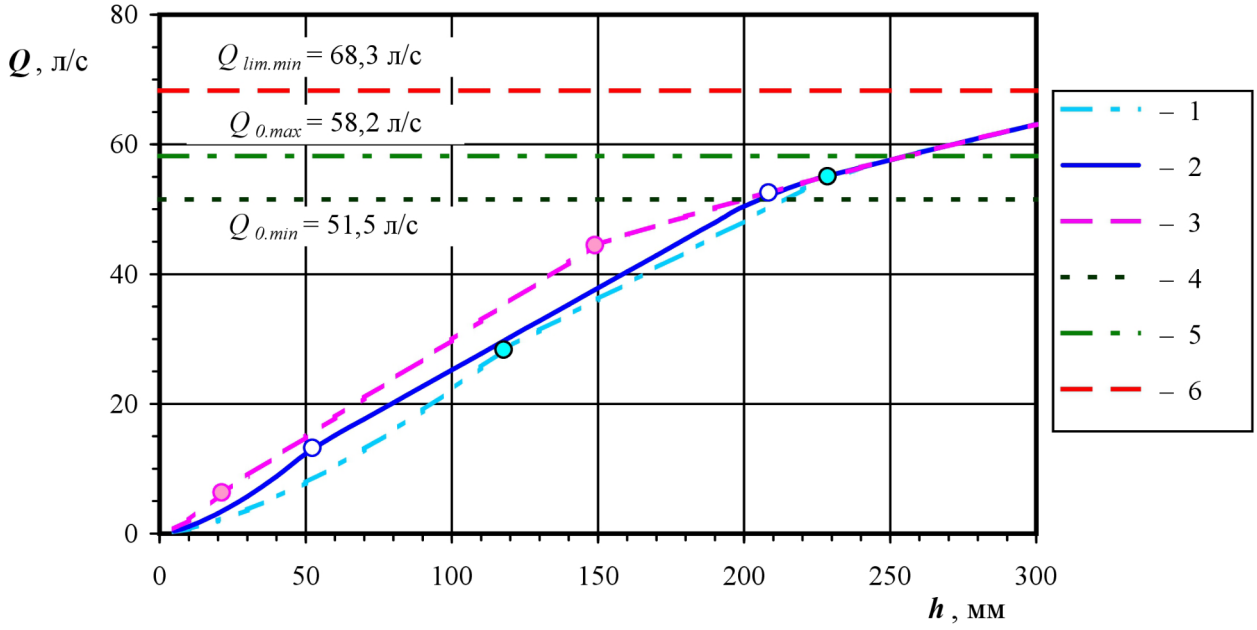


Рис. 5.4. Гідравлічні характеристики дощоприймача Д (А15) за:
1 – 1-стороннього; 2 – 2-стороннього; 3 – 4-стороннього притоку дощових вод; 4, 5, 6 – як на рис. 5.3

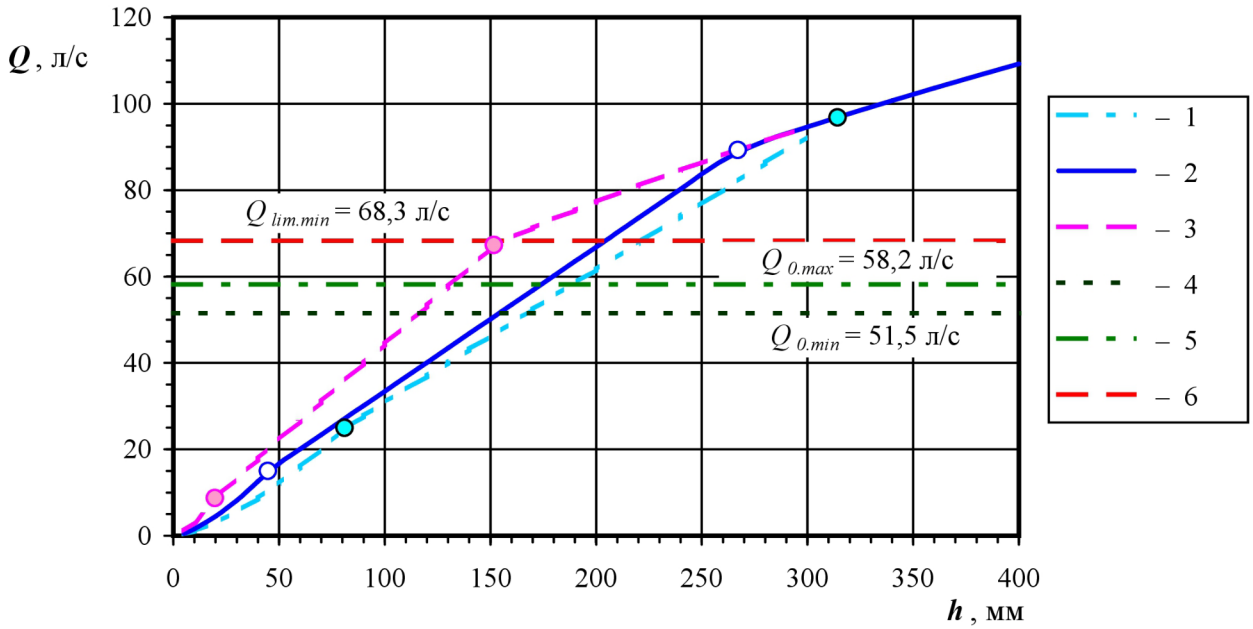


Рис. 5.5. Гідравлічні характеристики дощоприймача ДБ (В125) за: 1 – 1-стороннього; 2 – 2-стороннього; 3 – 4-стороннього притоку дощових вод; 4, 5, 6 – як на рис. 5.3

5.2. Натурне обстеження забиття решіток дощоприймачів

У більшості міст України останні десятиліття опади великої інтенсивності все частіше супроводжуються масштабними підтопленнями урбанізованої території. Однією з найпростіших причин підтоплення території є забиття решіток дощоприймачів.

Проведене натурне обстеження дощоприймальних решіток під час сильних опадів яскраво показує швидкість та ступінь їх забиття і те, наскільки малою стає сумарна площа водоприймальних отворів у забитих решітках. Нижче наведено результати натурного обстеження від 05.07.2022 р., виконаного у районі вул. В. Великого (м. Львів) під час випадання у Львові найінтенсивнішої за період 2020–2023 рр. зливи.

На рис. 5.6 зображено яскравий приклад забиття дощоприймальної решітки опалим листям, що призвів у цьому конкретному випадку до зменшення площі водоприймальних отворів у 3,4 рази порівняно з чистою решіткою.

а) *б)*

Рис. 5.6. Дощоприймальна решітка типу ДБ2(В125) з габаритними розмірами 540×440 мм, периметром вхідного отвору 490×390 мм та поперечними отворами у м. Львові, по вул. Володимира Великого, 24:

а – чиста, $\varepsilon_р = 0{,}310$; б – забита, $\varepsilon_р = 0{,}10$

Ще гострішою проблема забиття є на ділянках вулиць з наявністю крупних механічних забруднень (рис. 5.7).

а) *б)*

Рис. 5.7. Дощоприймальна решітка типу ДБ2(В125) з габаритними розмірами 540×440 мм, периметром вхідного отвору 490×390 мм та поперечними отворами у м. Львові, по вул. Володимира Великого, 51:

а – чиста, $\varepsilon_р = 0{,}34$; б – забита, $\varepsilon_р = 0{,}05$

Окрім природних забруднень, таких як листя чи гілки дерев, також виявлені штучні механічні забруднення у вигляді одноразового посуду чи пакетів, як на рис. 5.8.

а) *б)*

Рис. 5.8. Спарені дощоприймальні решітки типу ДБ2 (В125) з габаритними розмірами 510×510 мм і периметрами вхідних отворів 450×440 мм кожна у м. Львові по вул. Володимира Великого, 51:
а – чиста, $\varepsilon_p = 0{,}32$; б – забита, $\varepsilon_p = 0{,}22$

5.3. Удосконалена конструкція дощоприймального колодязя

Запропонована у корисній моделі конструкція належить до засобів приймання та відведення поверхневих стічних вод, таких як дощові, талі та поливо-мийні стоки, і може використовуватися в системах водовідведення для приймання та відведення поверхневого стоку. Її функціональність також полягає у недопущенні потрапляння газів із мережі загальносплавного водовідведення та зменшенні забруднення водойм внаслідок скиду неочищених поверхневих стічних вод з урбанізованих територій.

Відомий дощоприймальний колодязь, що містить дощоприймальну решітку, робочу камеру з осадовою частиною та відвідний поворотний патрубок (патент No 119805 U, МПК E03F 5/14, опубл. 10.10.2017), за яким

забезпечується часткове очищення поверхневого стоку та наступне очищення робочої камери від затриманого в ній осаду. Проте, наявність у цьому дощоприймальному колодязі шарнірного з'єднання патрубка може призвести до зниження надійності експлуатації колодязя. Конструкція цього дощоприймального колодязя також не запобігає потраплянню каналізаційних газів із загальносплавної водовідвідної мережі у дощоприймальний колодязь і далі, крізь решітку дощоприймача, на прилеглу забудовану територію. Ближчим за технічною суттю до корисної моделі, що заявляється, є дощоприймальний колодязь, що містить колодязь з осадовою частиною і додатковий колодязь, з'єднані між собою відвідним патрубком, укладеним з контр похилом (патент No 70828, E03F 1/00, опубл. 15.10.2004), за яким забезпечується приймання поверхневих стічних вод, їх часткове очищення від грубодисперсних забруднень і нафтопродуктів, а також недопущення потрапляння каналізаційних газів із загальносплавної водовідвідної мережі у дощоприймальний колодязь.

Проте, необхідність влаштування додаткового колодязя збільшує матеріаломісткість та вартість цього дощоприймального колодязя, вимагає наявності відповідної вільної земельної площі, що часто є неможливим в умовах щільної забудови, та спричиняє недостатню надійність його роботи. В основу корисної моделі поставлено задачу створення такого дощоприймального колодязя, який одночасно забезпечує приймання поверхневих стічних вод, їх часткове очищення від грубодисперсних забруднень і нафтопродуктів, недопущення потрапляння каналізаційних газів із загальносплавної водовідвідної мережі у дощоприймальний колодязь, при цьому не передбачає влаштування додаткового колодязя, не містить рухомих частин та є надійним у експлуатації. Поставлена задача вирішується тим, що у дощоприймальному колодязі, який містить робочу камеру колодязя з осадовою частиною і днищем, водоприймальну решітку та випускний отвір, розташований у бічній стінці робочої камери колодязя, згідно з корисною моделлю, у випускний отвір встановлений прямий рівнопрохідний трійник, верхній розтрубний отвір якого

герметично закритий заглушкою (рис. 5.9). Пропонована корисна модель дощоприймального колодязя забезпечує надійне приймання та відведення поверхневих стічних вод з урбанізованих територій, одночасно з частковим очищенням поверхневого стоку від грубодисперсних забруднень і нафтопродуктів, зменшуючи тим самим скид відповідних забруднень у водовідвідну мережу та на каналізаційні очисні споруди, а також запобігає потраплянню каналізаційних газів із загальносплавної мережі водовідведення на прилеглу до дощоприймального колодязя забудовану територію.

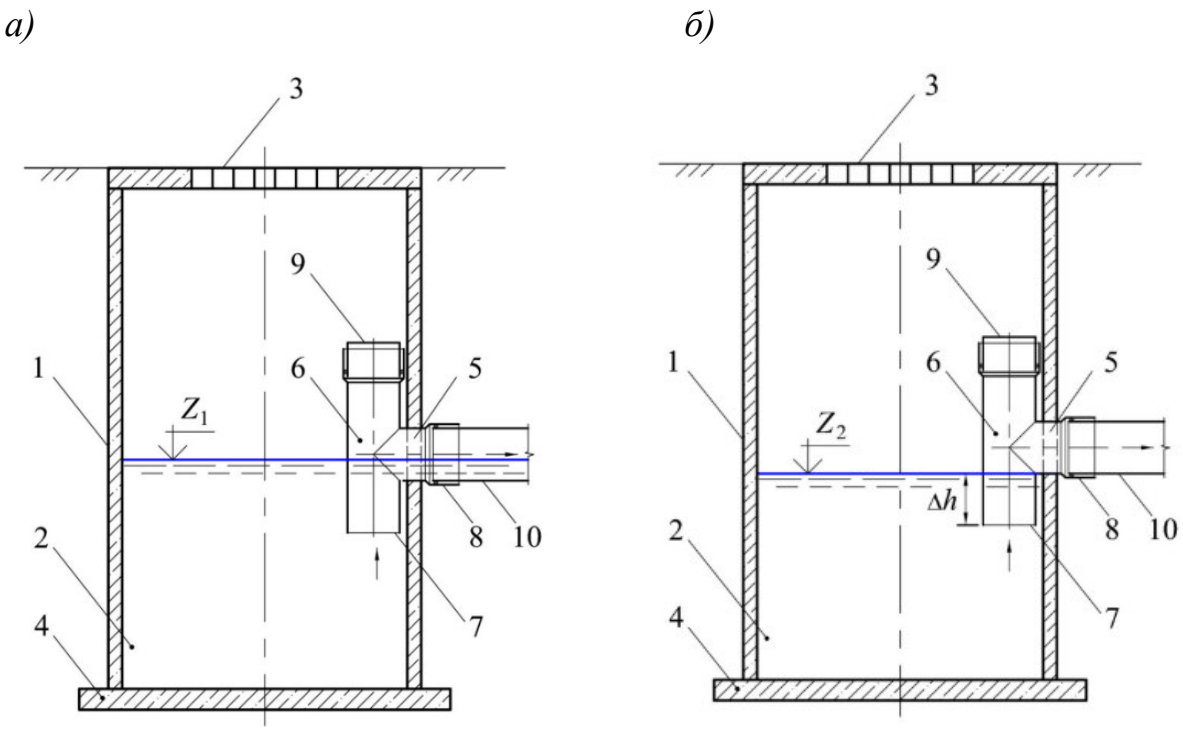


Рис. 5.9. Дощоприймальний колодязь з гідрозатвором: а – за наявності поверхневого стоку; б – за відсутності поверхневого стоку, де: 1 – робоча камера колодязя; 2 – осадова частина; 3 – водоприймальна решітка; 4 – днище; 5 – випускний отвір; 6 – прямий рівнопрохідний трійник; 7 – вхідний отвір; 8 – бічний розтруб; 9 – заглушка; 10 – водовідвідна труба; Z_1 – рівень поверхневих стічних вод за наявності поверхневого стоку в робочу камеру колодязя 1; Z_2 – рівень поверхневих стічних вод за відсутності поверхневого стоку в робочу камеру колодязя 1; Δh – висота гідравлічного затвору.

Дощоприймальний колодязь містить робочу камеру колодязя 1 з осадовою частиною 2, водоприймальною решіткою 3, днищем 4 та випускним отвором 5, розташованим у бічній стінці робочої камери колодязя 1 вище за осадову частину 2. У випускний отвір 5 встановлюють прямий рівнопрохідний трійник 6 з вхідним отвором 7, бічним розтрубом 8 та верхнім розтрубним отвором, що герметично закритий заглушкою 9. Бічний розтруб 8 прямого рівнопрохідного трійника 6 призначений для приєднання водовідвідної труби 10, що з'єднує дощоприймальний колодязь з загальносплавною водовідвідною мережею. Дощоприймальний колодязь працює в такий спосіб. Поверхневі стічні води надходять через водоприймальну решітку 3 в робочу камеру колодязя 1. Підняття рівня стічних вод Z_1 в робочій камері колодязя 1 (рис. 5.9,а) зумовлює їх потрапляння крізь вхідний отвір 7 у прямий рівнопрохідний трійник 6, з якого відбувається самопливне витікання стічних вод у загальносплавну водовідвідну мережу крізь бічний розтруб 8 та водовідвідну трубу 10. Наявність вертикального висхідного потоку у вхідному отворі 7 прямого рівнопрохідного трійника 6 забезпечує підвищений ступінь очищення поверхневих стічних вод від грубодисперсних забруднень. Наявність герметичної заглушки 9 на верхньому розтрубному отворі прямого рівнопрохідного трійника 6 запобігає потраплянню каналізаційних газів з загальносплавної мережі водовідведення у робочу камеру колодязя 1 і, відповідно, далі, крізь водоприймальну решітку 3, на прилеглу до дощоприймального колодязя територію. Після припинення надходження поверхневого стоку в робочу камеру колодязя 1 рівень стічних вод Z_2 (рис. 5.9,б), згідно з основним законом гідростатики, стабілізується на позначці низу внутрішньої поверхні бічного розтрубу 8, яка є вищою за позначку вхідного отвору 7, утворюючи гідравлічний затвор висотою Δh. Цей гідравлічний затвор запобігає потраплянню каналізаційних газів із загально сплавної мережі водовідведення у робочу камеру колодязя 1 через вхідний отвір 7 у "сухі", бездощові періоди. Малі габаритні розміри прямого рівнопрохідного трійника 6 порівняно з розмірами робочої камери колодязя 1 не створюють перешкод для видалення осаду, затриманого в осадовій частині 2.

5.4. Висновки

Результати роботи пропонується впроваджувати в інженерну практику проектування, будівництва та експлуатації систем дощового водовідведення.

1. На підставі отриманих у роботі теоретичних та експериментальних результатів, розроблено удосконалений метод гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу, що враховує тип потоку крізь дощоприймач та режим течії крізь водоприймальну решітку для непідтоплених потоків.

2. Алгоритм гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу полягає у визначенні першого та другого транзитних напорів і транзитних витрат, а також у застосуванні структури витратно-напірних характеристик і відповідних коефіцієнтів витрати для режиму ВШП, комбінованого режиму та режиму отвору.

3. Отримано розрахункові напірно-витратні характеристики типових дощоприймачів, що найчастіше використовуються у мережах дощового водовідведення (Basic 400, Д(А15) та ДМ (С250)) для випадків одно-, дво- та чотирьохстороннього притоку до них поверхневого стоку.

4. Виконані натурні обстеження дощоприймачів у м. Львові під час випадання сильних злив дозволили окреслити вплив окремих факторів на ступінь забиття водоприймальних решіток, що є однією з найбільш поширених причин затоплення урбанізованих територій.

5. Розроблено удосконалену конструкцію дощоприймального колодязя з гідрозатвором, захищену Патентом України на корисну модель UA 153379 U.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання удосконалення існуючих методик гідравлічного розрахунку водоприймальних пристроїв точкового типу з врахуванням змінних гідравлічних режимів роботи. Отримані результати роботи уточнюють та поглиблюють розуміння гідравлічних характеристик водоприймачів, що має важливий вплив на надійність та ефективність роботи мереж дощового водовідведення, особливо в умовах постійної урбанізації та з урахуванням глобальних кліматичних змін.

За отриманими у роботі результатами можна зробити такі загальні висновки.

1. Враховуючи розбіжності існуючих методик гідравлічного розрахунку водоприймальних пристроїв точкового типу, а також математичну складність і багатофакторність відповідних явищ, у дисертаційній роботі виконано теоретичне та експериментальне дослідження гідравлічних характеристик дощоприймачів зі стрижневими решітками у різних режимах їх роботи.

2. Дослідна установка для експериментального визначення гідравлічних параметрів дощоприймачів точкового типу відповідає вимогам європейського стандарту EN 1253-2:2003. Конструкція та розміри дослідної установки дозволяють виконувати гідравлічні випробування водоприймачів з номінальним діаметром відвідного трубопроводу до 200 мм включно, що дозволяє моделювати гідравлічні режими роботи більшості типових водоприймачів у натурному масштабі (1:1).

3. Розроблено методику виконання експериментальних досліджень водоприймачів та методику математичної обробки їх гідравлічних характеристик з отриманням пропускної здатності Q_{20}, значення транзитних напорів та витрат, що відповідають переходам між режимами ВШП, комбінованим режимом та режимом отвору, а також коефіцієнтів витрати в різних режимах роботи.

4. Гранична, максимально допустима відносна похибка визначення об'ємної витрати Q не перевищувала 2,4%, водозливного периметра L_w – 0,10%, сумарної площі водоприймальних отворів ω_o – 0,24%. Граничні значення відносних похибок за коефіцієнтом витрати в режимі ВШП C_w становили у межах від 4,7% до 17,0%, а в режимі отвору – не перевищували 3,5%.

5. Обґрунтовано критерії наявності непідтопленого та підтопленого типів течії крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід". Отримано критерії встановлення режиму ВШП, комбінованого режиму та режиму отвору для непідтоплених течій.

6. Розроблено математичну модель, що описує гідравлічні явища при затопленій течії крізь систему "водоприймач – відвідний трубопровід", та запропоновано метод чисельного вирішення системи рівнянь для знаходження граничної витрати Q_{lim} та відповідної глибини підтоплення водоприймача h_{lim}. Отримано залежності граничної витрати Q_{lim} та глибини підтоплення h_{lim} для дощоприймача малого типу Д(А15) від довжини водовідвідних трубопроводів L_p для відвідних трубопроводів, прокладених із труб DN=200 мм з поздовжнім похилом 0,02. Отримано узагальнену залежність (3.16) для визначення безрозмірного коефіцієнта витрати системи "водоприймач − відвідний трубопровід" C_{tot} від довжини відвідного трубопроводу діаметром DN=200 мм.

7. Для трьохзонної моделі течії крізь непідтоплений водоприймач отримано аналітичні залежності (3.47) і (3.50) для обчислення першого та другого транзитних напорів $h_{tr.1}$ та $h_{tr.2}$, що відповідають переходу з режиму ВШП до комбінованого режиму та з комбінованого режиму в режим отвору відповідно.

8. Отримано аналітичну залежність (3.34) між коефіцієнтом витрати дощоприймача в режимі ВШП C_w та критерієм Фруда Fr_w для потоку безпосередньо на перепаді водоприймального отвору.

9. З використанням теорії розмірностей обґрунтовано структуру розрахункової залежності (3.60) для визначення пропускної здатності точкових водоприймачів у комбінованому режимі, як функції водозливного периметра L_w, сумарної площі отворів ω_o та геометричного напору перед водоприймачем.

10. У експериментальній частині роботи виконано натурну перевірку відповідних теоретичних результатів, а також уточнення числових значень коефіцієнтів витрати точкових водоприймачів у режимах ВШП, комбінованому режимі та в режимі отвору.

11. Експериментальні значення коефіцієнта витрати в режимі ВШП C_w для дощоприймача Basic 400 зі стрижневими решітками №1–№8 з розмірами в плані від 365×365 мм до 65×65 мм становлять C_w= 0,858 ± 6%. Отриманий середній коефіцієнт витрати на 5,6% менший за значення C_w=0,909, рекомендоване ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012, і на 11,9% менший за C_w=0,974 за HEC-22.

12. Експериментальні значення коефіцієнта витрати дощоприймачів зі стрижневими решітками в комбінованому режимі C_{mix} описані степеневою функцією периметру водоприймального отвору L_w (4.23), що дозволяє поширювати цю залежність також на інші решітки стрижневого типу.

13. Експериментальні значення коефіцієнта витрати в режимі отвору C_o для дощоприймачів зі стрижневими решітками представлені як степенева функція (4.25) від сумарної площі водоприймальних отворів ω_o.

14. На підставі отриманих теоретичних та експериментальних результатів, розроблено удосконалений метод гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу, що враховує тип потоку крізь дощоприймач та режим течії крізь водоприймальну решітку для непідтоплених потоків.

15. Алгоритм гідравлічного розрахунку дощоприймачів точкового типу включає визначення транзитних напорів і витрат, а також застосування структури витратно-напірних характеристик та відповідних коефіцієнтів витрати для режиму ВШП, комбінованого режиму та режиму отвору.

16. Отримано розрахункові напірно-витратні характеристики найпоширеніших дощоприймачів типів Basic 400, Д та ДМ для випадків одно-, дво- та чотирьохстороннього притоку до них поверхневого стоку.

17. Розроблено удосконалену конструкцію дощоприймального колодязя з гідрозатвором, захищену Патентом України на корисну модель UA 153379 U.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Василенко О.А., Грабовський П.О., Ларкіна Г.М., Поліщук О.В., Прогульний В.І. Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення. Київ: КНУБА, 2007. 299 с.
2. Возняк О.Т., Желих В.М. Основи наукових досліджень у будівництві Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2003. 176 с.
3. Вовк Л.І. Удосконалення методів гідравлічного розрахунку збірників атмосферних стічних вод: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Нац. ун-т водного госп-ва та природокористування. Рівне: НУВГП, 2007. 19 с.
4. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. Київ: Мінрегіон України, 2019. 177 с.
5. ДБН В.1.1-25-2009. Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 34 с.
6. ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів. Київ: Мінрегіон України, 2018. 61 с.
7. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ: Мінрегіон України, 2013. 128 с.
8. Дикаревский В.С., Курганов А.М., Нечаев А.П., Алексеев М.И. Отведение и очистка поверхностных сточных вод: Учеб. пособие для вузов. Ленинград: Стройиздат, 1990. 224 с.
9. ДСТУ 3013-95 Гідросфера. Правила контролю за відведенням дощових і снігових стічних вод з територій міст і промислових підприємств.
10. ДСТУ Б В.2.5-11-98. Інженерне обладнання будинків і споруд. Трапи для систем каналізації будинків. Технічні умови ГОСТ 1811-97.
11. ДСТУ Б В.2.5-26:2005 Люки оглядових колодязів і дощоприймачі зливо стічних колодязів. Київ, 2005. 21с.

12. ДСТУ Б В.2.6-106-2010 Конструкції бетонні і залізобетонні для колодязів каналізаційних, водопровідних і газопровідних мереж. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 24 с.
13. ДСТУ Б EN 1433:2016 Лотки водовідвідні для транспортних і пішохідних зон. Класифікація, вимоги до виготовлення, методи випробувань, маркування та оцінка відповідності (EN 1433:2002, IDT+EN 1433:2002/A1:2005, IDT+EN 1433:2002/AC:2004, IDT) Київ: Мінрегіон України, 2016. 88с.
14. ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012. Настанова з улаштування систем поверхневого водовідведення. Київ: Мінрегіон України, 2012. 30 с.
15. ДСТУ EN 14154-1:2015 Лічильники води. Частина 1. Загальні технічні вимоги. Київ: Національний науковий центр "Інститут метрології", 2015. 31 с.
16. Жук В.М. Сучасні системи управління дощовим стоком на забудованих територіях. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. Київ: КНУБА, 2011. Вип. 17. С. 26-31.
17. Жук В.М., Стасюк М.І., Мацієвська О.О., Завойко Б.В. Дренажні системи з двошарових пластикових труб зі структурованою стінкою. Посібник з проектування і будівництва. Національний університет “Львівська політехніка”. 2006. с.1-28.
18. Жук В.М. Теоретичні гідрографи притоку для дощів постійної в часі інтенсивності при змінній швидкості течії. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Наук.-техн. зб. К.: КНУБА, 2010. Вип. 15. С. 119–130.
19. Жук В.М. Час концентрації та максимальна витрата дощових стічних вод з прямокутних у плані басейнів стоку з лотком у нижній частині. Гідравліка і гідротехніка. Міжвід. науково-техн. збірник. Київ: НТУ, 2011. Вип. 65. С. 130–137.
20. Жук В.М., Качмар І.З., Матлай І.І. Максимально допустимі відстані між дощоприймачами для кліматичних умов м. Львова. Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання:

матеріали вісімнадцятої міжнародної науково-практичної конференції, Львів, 23–24 травня, 2019 р. С. 15–19.

21. Жук В.М., Матлай І.І. Розрахункова витрата дощових стічних вод для лінійних в плані басейнів стоку з постійним поздовжнім похилом. Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. “Теорія і практика будівництва". Львів: № 697. 2011. С. 97–103.

22. Жук В.М., Матлай І.І. Гідрографи притоку дощових стічних вод з прямокутних у плані урбанізованих басейнів стоку для дощів постійної в часі інтенсивності. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-техн. збірник. Київ: КНУБА, 2012. С. 31–39.

23. Жук В. М., Мисак І.В. Гідрографи притоку з водонепроникних басейнів стоку за методикою SWMM та за секторним методом. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія "Теорія і практика будівництва". 2019. № 912. С. 41–48.

24. Жук В.М., Мисак І.В., Мисак П.В. Гідрографи дощового стоку за модифікованим тривимірним секторним методом для кліматичних умов міста Львова. Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути [зб. наук. пр.]: матеріали V міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (Київ, 3 червня 2020 р.). Київ, 2020. С. 332−338.

25. Ігнатенко О.П. Стан зливової каналізації в Україні та нормативно-правове забезпечення з питань облаштування поверхневого водовідведення. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. Київ: КНУБА, 2011. Вип. 17. С. 7–9.

26. Ігнатенко О.П., Зузанська О.Ю. Державна політика щодо систем поверхневого водовідведення в Україні. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. Київ: КНУБА, 2012. Вип. 19. С. 7–12.

27. Константинов Ю.М., Василенко А.А., Сапухин А.А., Батченко Б.Ф. Гидравлический расчет сетей водоотведения: Расчетные таблицы. Київ. Будівельник, 1987. 120 с.
28. Константінов Ю.К., Гіжа О.О. Інженерна гідравліка. Київ, Слово, 2006, с. 432.
29. Курганов А.М. Таблицы параметров предельной интенсивности дождя для определения расходов в системах водоотведения: Справ. пособие. Москва Стройиздат, 1984. 111 с.
30. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. Москва: Стройиздат, 1986. 440 с.
31. Методичні рекомендації із забезпечення ефективного відведення поверхневих вод. Наказ Міністерства з питань житлово-комунального господарства України від 23.12.2010 р. №470 зі змінами, внесеними наказом Мінрегіону України від 30.08.2013 р. № 425.
32. Патент України на корисну модель UA 153379 U. Дощоприймальний колодязь / В.М. Жук, О.В. Вербовський, В.І. Орел, П.В. Мисак; заявн. Національний університет "Львівська політехніка". u202202739; заявл. 29.07.2022; опубл. 28.06.2023; бюл. №26 / 2023.
33. Піціль А.О. Екологічні аспекти формування дощового поверхневого стоку з міських територій (на прикладі м. Житомир). Вісник НУВГП. Серія «Сільськогосподарські науки». Рівне, 2010 р. Вип. 1(49). С. 82–84.
34. Попадюк І.Ю. Методи гідравлічного розрахунку багатосекційних регулювальних резервуарів дощових стічних вод: Автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.16. Рівне: НУВГП, 2012. 20 с.
35. Попов В.Н. Скорость и глубина протекания потока в верхнем бьефе перепадов. – Тр. Киев. Автомоб.-дор. ин-та. 1957, вып. 3, С. 134–144.
36. Справочник по гидравлике / Под ред. В.А.Большакова. Київ: Вища шк., 1984. 343 с.
37. Рекомендации по гидравлическому расчету водосливов. Ч. I. Прямые водосливы. Ленинград, Энергия, 1974, с. 58.

38. Рогалевич Ю.П. Гідравліка. Київ. Вища школа. 2010. 431 с.
39. Ткачук О.А. Гідравлічні розрахунки трубопровідних систем водопостачання та водовідведення : монографія. Рівне: НУВГП, 2022. 183 с.
40. Ткачук О.А., Шевчук О.В. Нові підходи до гідравлічних розрахунків трубопровідних мереж водовідведення на основі спрощених формул. Науково-технічний збірник. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. Київ, КНУБА. Вип. 40, 2022. с. 44–58.
41. Ткачук О. А., Ярута Я. В. Містобудівна оцінка споруд регулювання дощового стоку в умовах міської забудови. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Рівне, НУВГП, 2021. Вип. 2(94). с. 8–19.
42. Ткачук С.Г., Жук В.М. Регулювання дощового стоку в системах водовідведення: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 216 с.
43. Чернишев Д. О. Рекомендації по гідравлічному розрахунку і проектуванню водовідведення з поверхні доріг. Містобудування та територіальне планування. 2010. (38), ст. 439-444.
44. Akan O. Overland flow on pervious, converging surface. Nordic Hydrology. Vol. 19 (5), 1998. P. 153–164.
45. ASTM D5614-94. Standard Test Method for Open Channel Flow Measurement of Water with Broad-Crested Weirs. ASTM International, 2008. https://doi.org/10.1520/D5614-94R08.
46. Azimi A. H., Rajaratnam N., Zhu D. Z. Discharge characteristics of weirs of finite crest length with upstream and downstream ramps. Journal of irrigation and drainage engineering. 2013. 139(1), 75-83.
47. Babko R., Szulżyk-Cieplak J., Danko Y., Duda, S., Kirichenko-Babko M., Łagód G. Effect of stormwater system on the receiver. Journal of Ecological Engineering, 20(6), 52–59, 2019.
48. Brown S., Stein S., and Warner J., Urban Drainage Design Manual, Hydraulic Engineering Circular No. 22, Report No. FHWA-SA-96-078. U.S. Department of

Transportation, Federal Highway Admin istration, Office of Technology Applications, Washington, DC, 1996. P. 478.
49. BS EN 124:1994 Gully tops and manhole tops for vehicular and pedestrian areas – Design requirements, type testing, marking, quality control. London, 1994, 27 p.
50. Burgi P.H., Gober D.E. Bicycle-Safe Grate Inlets Study; Volume 1–Hydraulic and Safety Characteristics of Three Selected Grate Inlets on Continuous Grades, FHWA-RD-77-24. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Washington, DC, 1977. p. 298.
51. Burgi P. H., Bicycle-Safe Grate Inlets Study; Volume 2–Hydraulic and Safety Characteristics of Three Selected Grate Inlets on Continuous Grades, FHWA-RD-78-4. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Washington, DC, 1978a. p. 160.
52. Burgi P. H., Bicycle-Safe Grate Inlets Study; Volume 3–Hydraulic and Safety Characteristics of Three Selected Grate Inlets on Continuous Grades, FHWA-RD-78-70. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Washington, DC, 1978b. p. 84.
53. Cárdenas-Quintero M., Carvajal-Serna L., Marbello-Pérez R. Evaluación numérica tridimensional de un sumidero de reja de fondo (Three-Dimensional Numerical Assessment of Grate Inlet). // Ibero-American Seminar on Water and Drainage Networks 2017. http:// dx.doi.org/10.2139/ssrn.3112980.
54. Choi S., Eom K., Choi S., Cho J. Development of interception capacity equations according to grate inlet types. // Journal of Korea Water Resources Association 2016, 49 (10), 851–861. https://doi.org/10.3741/JKWRA.2016.49.10.851.
55. Cosco C., Gómez M., Russo B., Tellez-Alvarez J., Macchione F., Costabile P., Costanzo C. Discharge coefficients for specific grated inlets. Influence of the Froude number // Urban Water Journal, 2020, 17(7), 656–668. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1811881
56. Debo T.N., Resse A.J. Municipal stormwater management. Lewis Publisher. 1995. 1154 p.

57. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council on the assessment and management of flood risks // Official Journal of the European Union, 2007, L288, 27-34 p.
58. Despotovic, J., Plavsic, J., Stefanovic, N. & Pavlovic, D. Inefficiency of storm water inlets as a source of urban floods. // Water Science and Technology 2005, 51 (2), 139–145. https://doi.org/10.2166/ wst.2005.0041.
59. Duan H.-F, Gao X. Flooding control and hydro-energy assessment for urban stormwater drainage systems under climate change: Framework development and case study. Water Resources Management. Vol. 33, Iss. 10, P. 3523–3545.
60. EN 1253-1:2003. Gullies for buildings. Requirements. – 18 p.
61. EN 1253-2:2015. Gullies for Buildings. Trapped Floor Gullies with a Depth Water Seal of at Least 50 mm.
62. European Union Directive 2007/60/EC of the European Council and European Parliament of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. Off. J. Eur. Union. 2007, 288, P. 27–34.
63. Federal Highway Administration, Bicycle-Safe Grate Inlets Study; Vol. 1 and 2– Hydraulic and Safety Characteristics of Selected Grate Inlets on Continuous Grades. FHWA-RD-77-4, U.S. Department of Transportation. Washington, DC, 1977. p. 298.
64. Gebre Egziabher M., Demissie Y. Modeling urban flood inundation and recession impacted by manholes. Water (Switzerland). 2020, Vol. 12, Iss. 4, 1160.
65. Gómez M., Recasens J., Russo B., Martínez-Gomariz E.. Assessment of inlet efficiency through a 3D simulation: Numerical and experimental comparison. Water Science and Technology, 2016, 74(8): 1926–1935.
66. Gómez M., Russo B. Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets. Water Management. 2011, 164(2), P. 81–90.
67. Gómez M., Russo B. Comparative study of methodologies determine inlet efficiency from test data. HEC-12 methodology vs UPC method. Water Resources Management. 2005, 80, 623–632. https://doi.org/10.2495/WRM050621

68. Guo J., MacKenzie K., Mommandi A. Design of street sump inlet. Journal of Hydraulic Engineering. 2009, 135 (11), 1000–1004. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000094.
69. Güneralp B., Reba M., Hales B.U., Wentz E.A., Seto K.C. Trends in urban land expansion, density, and land transitions from 1970 to 2010: A global synthesis. Environmental Research Letters. 2020, 15(4), 044015. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6669.
70. Hager W.H., Schwalt M. Broad-crested weir. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1994, 120(1), p.13-26.
71. Hammond M.J., Chen A.S., Djordjević S., Butler D., Mark O. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. Urban Water Journal, 2015, 12, 14–29. https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.857421
72. Hao X., Mu J., Shi H. Experimental study on the inlet discharge capacity under different clogging conditions. Water. 2021, 13, 826. https://doi.org/10.3390/w13060826.
73. High-Level International Conference (HLIC) on the midterm comprehensive review of the implementation of the International Decade for Action, "Water for Life", 2005-2015 Dushanbe, Tajikistan 8-10 June, 2010.
74. Hnativ R., Yakhno O., Hnativ I. Formation of the surface runoff of the rivers of the Carpathian region during the urbanization of slope areas. Journal of Ecological Engineering. 2023, 24(5), 249–255. https://doi.org/10.12911/22998993/161765.
75. Hossain Anni A., Cohen S., Praskievicz S. Sensitivity of urban flood simulations to stormwater infrastructure and soil infiltration. Journal of Hydrology. Vol. 588, September 2020, Article number 125028.
76. Hou X., Guo H., Wang F., Li M., Xue X., Liu X., Zeng S. Is the sponge city construction sufficiently adaptable for the future stormwater management under climate change. Journal of Hydrology. Volume 588, September 2020, Article number 125055.
77. IMD World Digital Competitiveness Ranking. 2022.
78. International Decade for Action, "Water for Sustainable Development", 2018–2028.

79. Ibrahim Y.A. Managing Stormwater as a Complex Adaptive System. Journal of Hydrologic Engineering. Volume 24, Issue 10, 1 October 2019, Article number 04019040.
80. ISO 3846:2008. Hydrometry – Open Channel Flow Measurement Using Rectangular Broad-Crested Weirs. 2016.
81. Jamali B., Bach P.M., Deletic A. Stormwater harvesting for urban flood management – An integrated modelling framework. Water Research. Volume 171, 15 March 2020, Article number 115372.
82. James W., Rossman L. Stormwater management models User's manual to SWMM 5.1. 13th ed. Ontario: CHI Press Publication. 2015. 352 p.
83. Johnson F.L., Chang F.M. Drainage of Highway Pavements, Hydraulic Engineering Circular No. 12, FHWA-TS-84-202. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 1984. P. 155.
84. Kaliski E., Cortéz R. Plataforma de pendientes variables para la experimentación de sumideros de aguas lluvias (Variable slope platform for the experimentation of storm grate inlet). // In XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil. 2004.
85. Kaliski E., Cortéz R. Estudio experimental del funcionamiento de sumideros de aguas lluvias (Experimental study of the operation of storm grate inlet). // In XVII Congreso Chileno de Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Chile, Chile. 2005.
86. Kaliski E., Cortéz R. Estudio experimental del funcionamiento de sumideros de aguas lluvias. Caso: Incorporación de zonas de influencia (Experimental study of the operation of storm grate inlet. Case: Incorporation of zones of influence). // In XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia. 2008.
87. Kawaike K., Shimizu A., Baba Y., Nakagawa H., Takeda M. Verification of numerical model for urban inundation due to torrential rainfall using physical experimental flume with a sewer pipe, Ann. J. of Hyd. Eng., JSCE, 2011, Vol. 55, P. 985–990.

88. Kemper S., Schlenkhoff A. Experimental study on the hydraulic capacity of grate inlets with supercritical surface flow conditions. Water Science and Technology. 2019, 79(9), P. 1717–1726.
89. Kim J., Kwak S., Ryu T., Yoon S. Intercepted flow equation at grate inlet on road. Journal of Korea Water Resources Association. 2016, 49(6), 537–549. https://doi.org/10.3741/JKWRA. 2016.49.6.537.
90. Lara M., Araújo J. Eficiência hidráulica de bocas de lobo situadas em sarjetas de greide contínuo (Hydraulic efficiency of grate inlets located in continuous gutters). Revista Brasileira de Recursos Hídricos–RBRH. 2011, 16 (2), P. 133–143. https://doi.org/10.21168/rbrh.v16n2.p133-143.
91. Leandro J., Lopes P., Carvalho R., Páscoa P., Martins R., Romagnoli M. Numerical and experimental characterization of the 2D vertical average-velocity plane at the center-profile and qualitative air entrainment inside a gully for drainage and reverse flow. Computers & Fluids. 2014, 102, P. 52–61. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.05.032
92. Lee J.G., Heaney J.P. Estimation of urban imperviousness and its impacts on stormwater systems. Journal of Water Resources Planning and Management. 2003, 129(5), P. 419–426.
93. Lee S., Nakagawa H., Kawaike K., Zhang H. Study on inlet discharge coefficient through the different shapes of storm drains for urban inundation analysis. Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser. B1 (Hydraulic Engineering). 2012, 68 (4), I_31–I_36. https://doi.org/10.2208/jscejhe.68.I_31.
94. Liu Z., He C., Zhou Y. et al. How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion. Landscape Ecology. 2014. 29, 763–771. https://doi.org/10.1007/s10980-014-0034-y.
95. Lopes P., Leandro J., Carvalho R.F., Páscoa P., Martins R. Numerical and experimental investigation of a gully under surcharge conditions. Urban Water Journal, 2015, 12, 468–476. https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.831916.
96. Lund N.S.V., Borup M., Madsen H., Mark O., Mikkelsen P.S. CSO reduction by integrated model predictive control of stormwater inflows: A simulated proof of

concept using linear surrogate models. Water Resources Research. 2020, Vol. 56, Iss. 8, e2019WR026272.
97. Maiolo M., Palermo S.A., Brusco A.C., Pirouz B., Turco M., Vinci A., Spezzano G., Piro P. On the use of a real-time control approach for urban stormwater management. Water (Switzerland). 2020, Vol. 12, Iss. 10, 2842.
98. Martins R., Rubinato M., Kesserwani G., Leandro J., Djordjević S., Shucksmith D. On the characteristics of velocities fields in the vicinity of manhole inlet grates during flood events. Water Resources Research. 2018, 54. https://doi.org/10.1029/2018WR022782.
99. Mays L.W. Stormwater Collection Systems Design Handbook. McGraw-Hill Professional, 2001. 1008 p.
100. McGrath G., Kaeseberg T., Reyes Silva J.D., Jawitz J.W., Blumensaat F., Borchardt D., Mellander P., Paik K., Krebs P., Rao P.S.C. Network Topology and Rainfall Controls on the Variability of Combined Sewer Overflows and Loads. Water Resources Research. 2019, Vol. 55, Iss. 11, P. 9578–9591.
101. Morales R. Análisis de Estudios Experimentales Realizados por el Instituto Nacional de Hidráulica, Chile, Sobre Sumideros de Aguas Lluvias (Analysis of Experimental Studies Carried out by the National Institute of Hydraulics on Storm Inlet). B.S. Thesis, University of Chile, Chile. 2016.
102. Mrowiec M. Efektywne wymiarowanie i dynamiczna regulacja kanalizacyjnych zbiornikow retencyjnych. Seria Monografie nr 171. Czestochowa: Wyd-wo politechniki Czestochowskiej. 2009. 166 p.
103. Mysak I.V., Mysak P. Modern methods of hydraulic calculation of linear and point rain-receiving elements. Journal of the Balkan Tribological Association. – 2023. – Vol. 29, iss. 4. – p. 499–511.
104. National management measures guidance to control nonpoint source pollution from urban areas: EPA-841-B-05-004. Washington, D.C. U.S. Environmental Protection Agency, 2005. 518 p.
105. Noh S.J., Lee S., An H., Kawaike K., Nakagawa H. Ensemble urban flood simulation in comparison with laboratory-scale experiments: Impact of interaction

models for manhole, sewer pipe, and surface flow. Advances in water resources. 2016, 97, 25-37.

106.Ouyanga M., Kotsukiabc S., Itod Y., Tokunagad T. Employment of hydraulic model and social media data for flood hazard assessment in an urban city // Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 44 101261 https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101261

107.Pazmiño, F., Hechavarría, R., Morales, F. & León, J. Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales (Experimental calculation of hydraulic efficiency of rain water drain inlets). // Ingeniería Hidráulica y Ambiental 2017, 38 (3), 17–29.

108.Pugh C.A. Bicycle-Safe Grate Inlets Study; Volume 4–Hydraulic Characteristics of Slotted Drain Inlets, FHWA-RD-79-106, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Washington. DC, 1980, p. 157.

109.Pyatkova K.S., Chena A., Butlera D., Vojinovićb Z., Djordjevića S. Assessing the knock-on effects of flooding on road transportation. Journal of Environmental Management, 2019, 244, 48–60. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.013

110.Rao N.G., Muralidhar D. Discharge characteristics of weirs of finite-crest width. La Houille Blanche. 1963, (5), 537-545.

111.Rathnayake U., Faisal A. Dynamic control of urban sewer systems to reduce combined sewer overflows and their adverse impacts. Journal of Hydrology. Volume 579, December 2019, Article number 124150.

112.Rubinato M., Lee S., Martins R., Shucksmith, J. Surface to sewer flow exchange through circular inlets during urban flood conditions. Journal of Hydroinformatics. 2018, 20 (3), 564–576. https://doi.org/10.2166/hydro.2018.127.

113.Rubinato M., Martins R., Kesserwani G., Leandro J., Djordjevic S., Shucksmith J. Experimental calibration and validation of sewer/surface flow exchange equations in steady and unsteady flow conditions. Journal of Hydrology. 2017, 552, 421–432. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.024.

114.Rubinato M., Nichols A., Pen Y., Jian-min Z., Lashford C., Cai Y., Lin P., Tait S. Urban and river flooding: Comparison of flood risk management approaches

in the UK and China and an assessment of future knowledge needs // Water Science and Engineering, 2019, 4, 274-283. https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.12.004

115.Russo B., Gómez M., Tellez J. Methodology to Estimate the Hydraulic Efficiency of Nontested Continuous Transverse Grates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139 (10): 864–871. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000625.

116.Russo B., Gómez M., Tellez-Álvarez J. The Relevance of Grated Inlets within Surface Drainage Systems in the Field of Urban Flood Resilience. A Review of Several Experimental and Numerical Simulation Approaches. Sustainability, 2021, 13(13), 7189. https://doi.org/10.3390/su13137189.

117.Sabogal D., Hernández N. Modelación física de rejillas laterales metálicas y en concreto para sumideros en alcantarillados (Physical Modeling of Metal and Concrete Curb-Opening for Drains in Sewers). B.S. Thesis, University of La Salle, Bogotá, Colombia 2011.

118.Sabtu N., Saul A., Sailor G. Hydraulic interaction of a gully system. American Scientific Research. Journal for Engineering, Technology, and Sciences. 2016, (ASRJETS) 21 (1), 202–209.

119.Spaliviero F., May R., Escarameia, M. Spacing of Road Gullies. Hydraulic Performance of BS EN 124 Gully Gratings and Kerb Inlets. Report SR 533. HR Wallingford. UK. 2000.

120.Sohn W., Brody S.D., Kim J.-H., Li M.-H. How effective are drainage systems in mitigating flood losses. Cities. Volume 107, December 2020, Article number 102917.

121.Stec A., Słyś D. Optymalizacja zbiornika retencyjnego na sieci kanalizacji ogólnospławnej miasta Przemyśl. Proceedings of ECOpole. Opole, 2014. Vol.8, Iss. 1, S. 289–298.

122.Tkachuk O., Yaruta Y., Shevchuk, O. Assessment of application conditions of infiltration basins for regulation of urban rainwater drainage. Journal of Ecological Engineering. 2022, 23(2), p.191–195. https://doi.org/10.12911/22998993/144718.

123.Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. 1986.
124.USDT (U.S. Department of Transportation, FHA) 2009 HEC-22 Urban Drainage Design Manual: Hydraulic. Third edition. U.S. Department of Transportation Washington, D.C., USA
125.Wakif S., Sabtu N. Hydraulic performance of vertically depressed and non-depressed grate. Urban Water Journal. 2019, 16 (8), 554–563. https://doi.org/10.1080/1573062x.2019.1694693.
126.World Cities Report 2022. Envisaging the Future of Cities. United Nations Human Settlements Programme. 2022. www.unhabitat.org
127.Wu C., Yu J., Wong A. & Li, C. Hydraulic interception efficiency of gully gratings on steep roads. HKIE Transactions. 2015, 22 (3), 192–198. https://doi.org/10.1080/1023697x.2015.1061704.
128.Xiong Y., Melching C.S. Comparison of kinematic-wave and nonlinear reservoir routing of urban watershed runoff. ASCE Journal of Hydrologic Engineering. 2005, Vol. 10 (1), P. 39−49.
129.Xu Z., Hua W., Xiong L., He Z. Novel design of volume of detention tanks assisted by a multi-source pollution overflow model towards pollution control in urban drainage basins. Environmental Science and Pollution Research. 2020, Vol. 27, Iss. 11, P. 12781–12791.
130.Young G., Childrey M., Trent R. Optimal design of highway drainage culverts. Journal of Hydraulics Engineering. 1974, 107(7), P. 971–993.
131.Zachoval Z., Kněblová M., Roušar L., Rumann J., Šulc J. Discharge coefficient of a rectangular sharp-edged broad-crested weir. Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2014, 62(2), 145–149.
132.Zambrano M.C., González H.E.M., Tequia W.E.A. Three-dimensional numerical evaluation of hydraulic efficiency and discharge coefficient in grate inlets. Environmental Research, Engineering and Management. 2022, 78(4), 121–136. https://doi.org/10.5755/j01.erem.78.4.31243.

133.Zhuk V., Matlai I., Zavoiko B., Popadiuk I., Pavlyshyn V., Mysak I., Mysak P. Experimental hydraulic parameters of drainage grate inlets with a horizontal outflow in the broad-crested weir mode. Water Science & Technology. 2023, 88(3), 738–750. https://doi.org/10.2166/wst.2023.234.

134.Zhuk V., Matlai I., Popadiuk I., Vovk L., Rehush V. Discharge coefficient of broad-crested weirs as a function of the relative weir height for different weir lengths. Theory and Building Practice. 2020, 2(2), 63–68. https://doi.org/10.23939/jtbp2020.02.063.

135.Zhuk V., Mysak I., Petrushka K. Comparison of the methods of surface runoff modelling from the urbanized subcatchments for estimation of peak loads on the environment // Environmental Problems = Екологічні проблеми. 2020. Vol. 5, №1. P. 1–6. htpps://doi.org/10.23939/ep2020.01.001.

136.Zhuk V., Vovk L., Matlai I., Popadiuk I., Mysak I., Fasuliak V. Dependency between the total and effective imperviousness for residential quarters of the Lviv city. Journal of Ecological Engineering. 2020. Vol. 21 (5). p. 56–62 doi.org/10.12911/22998993/122191.

137.Zhuk V., Vovk L., Mysak P. Estimation of daily runoff coefficient of the pervious surfaces for the climate conditions of the city of Lviv. Environmental Problems = Екологічні проблеми. 2020. Vol. 5, №3. P. 136−142.

138.Zhuk V., Vovk L., Popadiuk I., Matlay I. Discharge coefficient of rectangular broad-crested weirs in narrow channels with high relative length of the threshold. Ecological Engineering & Environmental Technology. 2021. 22(6), 11−16. https://doi.org/10.12912/27197050/141877.

139.Zoppou C. Review of urban stormwater models. Environmental Modelling & Software. 2001, Vol 16. P. 195–231.

ДОДАТКИ

Додаток А. Список опублікованих праць за темою дисертації

Список публікацій здобувача:

– у наукових періодичних виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз:

1. Zhuk V., Matlai I., Zavoyko B., Popadiuk I., Pavlyshyn V., Mysak I., Mysak P. Experimental hydraulic parameters of drainage grate inlets with a horizontal outflow in the broad-crested weir mode. Water Science & Technology. 2023, Vol. 88, Iss. 3, P. 738–750. https://doi.org/10.2166/wst.2023.234. (Scopus, квартиль Q2, Web of Science). *Особистий внесок здобувача: отримано залежності коефіцієнта витрати водоприймачів у режимі ВШП від числа Фруда.*

2. Mysak I., Mysak P. Modern methods of hydraulic calculation of linear and point rain-receiving elements. Journal of the Balkan Tribological Association. 2023, Vol. 29, Iss. 4, P. 499–511. (Scopus, квартиль Q3). *Особистий внесок здобувача: виконано огляд аналітичних методів гідравлічного розрахунку дощоприймачів у різних режимах роботи.*

– у науковому фаховому видані України:

3. Zhuk V., Vovk L., Mysak P. Estimation of daily runoff coefficient of the pervious surfaces for the climate conditions of the city of Lviv. Environmental Problems = Екологічні проблеми. 2020. Vol. 5, №3. P. 136−142. https://doi.org/10.23939/ep2020.03.136 *Особистий внесок здобувача: виконано розрахунки значень коефіцієнтів стоку з водопроникних поверхонь різних типів.*

– розділи в колективних монографіях, виданих за кордоном:

4. Mysak P., Mysak I. Modeling of runoff hydrographs from the impervious subcatchments by using CFD. Improvement of Scientific Approaches to the Development of Engineering: Collective Monograph / International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2022. P. 92–102.

https://doi.org/10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.4.1.7. *Особистий внесок здобувача: проведено моделювання гідрографів дощового стоку, використовуючи обчислювальну гідродинаміку.*

5. Mysak P. Classification and calculation of discharge capacity of broad-crested weirs. Technical and Agricultural Sciences in Modern Realities: Problems, Prospects and Solutions: Collective Monograph / International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2023. P. 68–76. https://doi.org/10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.2.1.5.

– які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Патент № 153379. Дощоприймальний колодязь / В.М. Жук, О.В. Вербовський, В.І. Орел, П. В. Мисак; заявн. Національний університет "Львівська політехніка". – u202202739; заявл. 29.07.2022; опубл. 28.06.2023; Бюл. 26. *Особистий внесок здобувача: здійснено пошук прототипу, оформлення опису корисної моделі.*

7. Жук В.М., Мисак І.В., Мисак П.В. Гідрографи дощового стоку за модифікованим тривимірним секторним методом для кліматичних умов міста Львова. Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути [зб. наук. пр.]: матеріали V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. Київ, 2020. С. 332−338. *Особистий внесок здобувача: аналіз розрахункових гідрографів дощового стоку, отриманих для кліматичних умов м. Львова.*

8. Жук В.М., Мальований М.С., Тимчук І.С., Мисак І.В., Мисак П.В. Проблеми експлуатації дощоприймачів у загальносплавних системах водовідведення. І Міжнародна науково-практична конференція «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022»: тези доп., 26–27 травня 2022 р. / Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. С. 251–254. *Особистий внесок здобувача: проведено аналіз конструкційних особливостей дощоприймачів та розглянуто типові проблеми, які виникають при їх експлуатації.*

9. Мисак П.В., Жук В.М. Водопропускні гідравлічні характеристики водоприймальних елементів горизонтального типу. XX Міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання»: тези доп., 26–27 травня 2022 р. / Національний університет «Львівська політехніка», 2022. С. 265–267. *Особистий внесок здобувача: виконано математичну обробку експериментальних даних та аналіз отриманих напірно-витратних характеристик.*

10. Mysak P., Zhuk V. Discharge hydraulic characteristics of horizontal grate inlets. III Міжнародна науково-практична конференція «Theories, Methods and Practices of the Latest Technologies», Tokyo, Japan, 2022. P. 17–19. *Особистий внесок здобувача: проведено аналіз гідравлічних характеристик стрижневих дощоприймальних решіток.*

11. Мисак П.В., Маковський Є.С., Жук В.М. Транзитні напори та витрати при переході дощоприймачів з режиму водозливу у режим витікання крізь отвір. XXI Міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання»: тези доп., 25–26 травня 2023 р. / Національний університет «Львівська політехніка», 2023. С. 74–76. *Особистий внесок здобувача: виконано розрахунок транзитних напорів і витрат за умов двостороннього притоку поверхневого стоку для трьох типових дощоприймачів за нормативними методиками.*

12. Mysak P., Mysak I. The influence of the grate inlet on interception efficiency flow. Abstracts of XX International Scientific and Practical Conference "Ways of distance learning development in current conditions". Munich, Germany, 2023. P. 24–25. *Особистий внесок здобувача: виконано аналіз ефективності перехоплення поверхневого стоку дощоприймачами з решітками стрижневого типу.*

Додаток Б. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес НУ "Львівська політехніка"

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного університету «Львівська політехніка»
доц. Олег ДАВИДЧАК
«20» 02 2024 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи Мисака Павла Васильовича на тему «Методи гідравлічного розрахунку точкових дощоприймальних елементів» 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., доц. Жука В.М. склали акт про те, що результати дисертаційної роботи Мисака Павла Васильовича на тему «Методи гідравлічного розрахунку точкових дощоприймальних елементів», виконаної за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», використовуються та впроваджені 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 і практичних заняттях та при виконанні курсового проекту з дисципліни «Керування поверхневим стоком». Відповідно до робочої програми дисципліни впровадження відбулося за темою №8 «Класифікація, переваги та недоліки, конструктивні особливості споруд для регулювання поверхневого стоку», а також в методику гідравлічного розрахунку дощоприймачів при проектуванні мережі дощового водовідведення. Загальний обсяг аудиторних годин для денної форми навчання – 45, у т. ч. лекційні заняття – 30, практичні заняття – 15. Використання результатів наукових досліджень Мисака П.В. сприяє вдосконаленню підготовки фахівців ОКР «магістр» за 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології».

Голова науково-методичної ради ІБІС, к.т.н., доц. Оксана ПОЗНЯК

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

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

Додаток В. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
ФОП «STI»
Савчук Т.І.
«___» _____ 2024р.

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи Мисака Павла Васильовича на тему «Методи гідравлічного розрахунку точкових дощоприймальних елементів», виконаної на кафедрі гідротехніки та водної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

Цим актом підтверджується, що результати наукової роботи Мисака П.В. з методів гідравлічного розрахунку точкових дощоприймальних елементів передано **ФОП «STI»** для впровадження, при проектуванні системи дощового водовідведення для готельного комплексу в с. Поляниця Івано-Франківської області.

Важливим компонентом комплексної інженерної інфраструктури на забудованих територіях є системи дощового водовідведення. Від ефективності їх функціонування залежить рівень благоустрою забудованих територій. Правильне проектування таких мереж та правильний розрахунок пропускної здатності дощоприймача дозволяє запобігти підтопленню прилеглої території.

За результатами гідравлічного розрахунку точкових дощоприймальних елементів запропоновано розглядати їхню роботу у трьох різних режимах. Для обчислення пропускної здатності в кожному режимі, запропоновано використовувати відповідні коефіцієнти, які були визначені експериментальним шляхом. Такий підхід дозволив отримати точнішу величину пропускної здатності дощоприймачів, встановити оптимальну їх кількість, що запобігатиме ефективному відведенню дощових вод з території комплексу. Це дозволило скоротити затрати на будівельні матеріали при будівництві мережі, що в свою чергу підтверджує економічну ефективність даних розрахунків.

Цей акт не є підставою для взаємних фінансових розрахунків

Головний інженер **Смирнов О.С.**

Директор **Савчук Т.І.**

Додаток Г.

Протоколи дослідження гідравлічних характеристик дощоприймачів

Додаток Г.1

Протокол дослідження гідравлічної характеристики дощоприймача

Лабораторія гідравліки кафедри ГВІ, Національний університет "Львівська політехніка' 27.01.24

Дощоприймач Dy 200, Base 400x400 мм, без гідрозатвору, з ґратчастою решіткою.

Серія №8 **Розміри водоприймального отвору 365x365 мм (12x12 комірок)**

$z_{1,0}$ =	**267**	мм	$T_{пов}$ =	15	°C	b =	**0,365**	м	L_w =	1,46	м	ε_1 =	0,8831	a =	0,553	м			
$z_{2,0}$ =	**258,5**	мм	$T_в$ =	15,5	°C	$\alpha_р$ =	1		ω_o =	0,1176	м^2	ε_0 =	0,735	r_1 =	0,479	м			

№	W, л	t_1, с	t_2, с	Q, л/с	z_1, мм	z_2, мм	h_1,мм	h_2,мм	h_{mid},мм	V_1, м/с	$V_1^2/2g$	$h_{p.cr}$,мм	h_p,мм	V_p, м/с	$V_p^2/2g$	0, мм	h_p/h	Fr_w	m	$Fr_{w.US}$	C_w
1	20	19,39	18,65	1,052	274	265,7	7	7,2	7,1	0,0009	0,0000	3,75	2,36	0,305	4,74	0,000	0,333	4,011	0,2718	**2,003**	**0,706**
2	40	33,78	33,88	1,182	274,2	266	7,2	7,5	7,35	0,0010	0,0000	4,06	2,67	0,303	4,68	0,000	0,364	3,498	0,2901	**1,870**	**0,754**
3	40	28,72	28,63	1,395	275	266,2	8	7,7	7,85	0,0011	0,0001	4,53	3,14	0,304	4,71	0,000	0,401	2,993	0,3101	**1,730**	**0,806**
4	40	27,31	27,35	1,464	275,1	266,3	8,1	7,8	7,95	0,0012	0,0001	4,68	3,33	0,301	4,62	0,000	0,419	2,776	0,3193	**1,666**	**0,830**
5	40	25,92	26,07	1,539	275,3	266,4	8,3	7,9	8,1	0,0013	0,0001	4,84	3,51	0,300	4,59	0,000	0,434	2,611	0,3264	**1,616**	**0,848**
6	40	25,12	25,11	1,593	276	267	9	8,5	8,75	0,0013	0,0001	4,95	3,35	0,325	5,40	0,000	0,383	3,221	0,3009	**1,795**	**0,782**
7	50	31,1	31,08	1,608	276,2	267,2	9,2	8,7	8,95	0,0013	0,0001	4,98	3,31	0,333	5,64	0,000	0,370	3,405	0,2937	**1,845**	**0,763**
8	50	23,06	23	2,171	277,1	268,1	10,1	9,6	9,85	0,0018	0,0002	6,09	4,66	0,319	5,19	0,000	0,473	2,228	0,3434	**1,493**	**0,892**
9	50	20,22	20,26	2,470	278	269	11	10,5	10,75	0,0020	0,0002	6,63	5,07	0,334	5,68	0,000	0,471	2,243	0,3427	**1,498**	**0,890**
10	50	23,2	22,52	2,187	277,5	268,9	10,5	10,4	10,45	0,0018	0,0002	6,12	4,32	0,347	6,13	0,000	0,413	2,839	0,3166	**1,685**	**0,823**
11	100	36,94	37,03	2,704	279	270	12	11,5	11,75	0,0022	0,0002	7,04	5,14	0,360	6,61	0,000	0,438	2,569	0,3282	**1,603**	**0,853**
12	100	34,29	34,2	2,920	279,5	270,9	12,5	12,4	12,45	0,0024	0,0003	7,42	5,36	0,373	7,09	0,000	0,431	2,642	0,3250	**1,625**	**0,844**
13	100	31,97	31,66	3,143	280	271,7	13	13,2	13,1	0,0025	0,0003	7,79	5,62	0,383	7,48	0,000	0,429	2,663	0,3241	**1,632**	**0,842**
14	100	30,01	30,1	3,327	280,4	272,1	13,4	13,6	13,5	0,0027	0,0004	8,09	5,90	0,386	7,60	0,000	0,437	2,574	0,3280	**1,605**	**0,852**
15	100	28,5	28,6	3,503	281	272,9	14	14,4	14,2	0,0028	0,0004	8,37	5,97	0,402	8,23	0,000	0,420	2,757	0,3201	**1,660**	**0,832**
16	100	27,84	27,06	3,643	281,3	273	14,3	14,5	14,4	0,0029	0,0004	8,59	6,23	0,400	8,17	0,000	0,433	2,620	0,3260	**1,619**	**0,847**
17	100	26,99	26,95	3,708	281,5	273,5	14,5	15	14,75	0,0030	0,0004	8,70	6,20	0,410	8,55	0,000	0,420	2,758	0,3200	**1,661**	**0,832**
18	100	25,9	26,17	3,841	281,9	273,9	14,9	15,4	15,15	0,0031	0,0005	8,90	6,32	0,416	8,83	0,000	0,417	2,794	0,3185	**1,672**	**0,828**
19	100	24,57	24,63	4,065	282,2	274,4	15,2	15,9	15,55	0,0033	0,0005	9,25	6,67	0,417	8,88	0,000	0,429	2,663	0,3241	**1,632**	**0,842**
20	100	23,31	22,97	4,322	282,5	275	15,5	16,5	16	0,0035	0,0006	9,63	7,07	0,419	8,93	0,000	0,442	2,525	0,3302	**1,589**	**0,858**
21	100	21,13	21,13	4,733	284,5	276,5	17,5	18	17,75	0,0038	0,0007	10,23	7,09	0,457	10,66	0,000	0,399	3,010	0,3094	**1,735**	**0,804**
22	200	39,37	39,42	5,077	284,75	277,5	17,75	19	18,375	0,0040	0,0008	10,72	7,54	0,461	10,83	0,000	0,410	2,873	0,3151	**1,695**	**0,819**
23	200	35,4	35,48	5,643	286	279	19	20,5	19,75	0,0045	0,0010	11,51	8,08	0,479	11,67	0,000	0,409	2,891	0,3144	**1,700**	**0,817**

Додаток Г.2

Протокол дослідження гідравлічної характеристики дощоприймача

Лабораторія гідравліки кафедри ГВІ, Національний університет "Львівська політехніка" 01.07.23

Дощоприймач Dy 200, Base 400x400 мм, без гідрозатвору, з ґратчастою решіткою. Решітка забита по контуру.

Серія №1 **Розміри водоприймального отвору 264x264 мм (8x8 комірок)**

$z_{1,0}$ = **281** мм $T_{пов}$ = 21,6 °C b= **0,264** м L_w = 1,056 м ε_1= 0,8968 a= 0,553 м

$z_{2,0}$ = **272,2** мм $T_в$ = 19,5 °C α_w= 1 ω_o= 0,0625 м^2 ε_0= 0,391 r_1 = 0,479 м

№	W, л	t_1, с	t_2, с	Q, л/с	z_1, мм	z_2, мм	h_1,мм	h_2,мм	h_{mid},мм	V_1, м/с	$V_1^2/2g$	$h_{p.cr}$,мм	h_p,мм	V_p, м/с	$V_p^2/2g$	0, мм	h_p/h	Fr_w	m	$Fr_{w.US}$	C_w
1	20	51,65	51,16	0,389	286,5	277	5,5	4,8	5,15	0,0003	0,0000	2,40	1,35	0,273	3,80	0,000	0,262	5,634	0,2251	**2,374**	**0,585**
2	20	48,51	49,01	0,410	286,5	277	5,5	4,8	5,15	0,0003	0,0000	2,49	1,44	0,270	3,71	0,000	0,280	5,155	0,2373	**2,270**	**0,616**
3	20	41,96	42,31	0,475	286,8	277,5	5,8	5,3	5,55	0,0004	0,0000	2,74	1,62	0,278	3,93	0,000	0,292	4,859	0,2454	**2,204**	**0,638**
4	20	36,84	36,01	0,549	287	278	6	5,8	5,9	0,0004	0,0000	3,02	1,84	0,282	4,06	0,000	0,312	4,403	0,2590	**2,098**	**0,673**
5	20	28,62	29,53	0,688	287	278,1	6	5,9	5,95	0,0006	0,0000	3,51	2,51	0,260	3,44	0,000	0,421	2,749	0,3204	**1,658**	**0,832**
6	30	37,4	37,95	0,796	287,7	278,5	6,7	6,3	6,5	0,0007	0,0000	3,87	2,80	0,270	3,70	0,000	0,430	2,646	0,3248	**1,627**	**0,844**
7	30	31,75	32,02	0,941	287,8	279,3	6,8	7,1	6,95	0,0008	0,0000	4,33	3,35	0,266	3,60	0,000	0,483	2,143	0,3472	**1,464**	**0,902**
8	30	27,62	28,85	1,063	288	279,8	7	7,6	7,3	0,0009	0,0000	4,69	3,89	0,259	3,41	0,000	0,533	1,753	0,3642	**1,324**	**0,946**
9	30	27,3	28,09	1,083	288,4	280	7,4	7,8	7,6	0,0009	0,0000	4,75	3,72	0,276	3,88	0,000	0,489	2,091	0,3495	**1,446**	**0,908**
10	30	23,96	25,04	1,224	288,8	280,6	7,8	8,4	8,1	0,0010	0,0001	5,16	4,18	0,277	3,92	0,000	0,516	1,873	0,3591	**1,369**	**0,933**
11	30	21,01	21,34	1,417	290	281	9	8,8	8,9	0,0012	0,0001	5,68	4,64	0,289	4,26	0,000	0,522	1,835	0,3607	**1,355**	**0,937**
12	40	29,35	29,63	1,356	289	281,4	8	9,2	8,6	0,0011	0,0001	5,52	4,57	0,281	4,03	0,000	0,531	1,768	0,3636	**1,330**	**0,945**
13	40	28,1	29,82	1,381	289,55	281,5	8,55	9,3	8,925	0,0011	0,0001	5,59	4,38	0,299	4,54	0,000	0,491	2,075	0,3502	**1,441**	**0,910**
14	40	24,74	25,4	1,596	290,9	282	9,9	9,8	9,85	0,0013	0,0001	6,15	4,80	0,315	5,05	0,000	0,487	2,104	0,3489	**1,451**	**0,907**
15	50	28,9	29,5	1,712	290,75	282,65	9,75	10,45	10,1	0,0014	0,0001	6,45	5,26	0,308	4,84	0,000	0,521	1,837	0,3606	**1,355**	**0,937**
16	50	25,45	25,7	1,955	291,75	283,5	10,75	11,3	11,025	0,0016	0,0001	7,04	5,76	0,321	5,26	0,000	0,522	1,828	0,3610	**1,352**	**0,938**
17	50	22,63	22,31	2,225	292,75	283,9	11,75	11,7	11,725	0,0018	0,0002	7,68	6,73	0,313	4,99	0,000	0,574	1,483	0,3747	**1,218**	**0,974**
18	50	21,26	22,4	2,290	293,25	284,5	12,25	12,3	12,275	0,0018	0,0002	7,83	6,37	0,340	5,90	0,000	0,519	1,851	0,3600	**1,361**	**0,935**
19	50	21,3	20,15	2,413	294	285	13	12,8	12,9	0,0019	0,0002	8,10	6,39	0,357	6,51	0,000	0,496	2,035	0,3520	**1,426**	**0,915**
20	50	18,3	18,75	2,699	294,5	286	13,5	13,8	13,65	0,0022	0,0002	8,73	7,17	0,357	6,48	0,000	0,525	1,810	0,3618	**1,345**	**0,940**
21	60	20,2	20,6	2,941	295,5	287,25	14,5	15,05	14,775	0,0024	0,0003	9,25	7,25	0,384	7,53	0,000	0,490	2,078	0,3501	**1,441**	**0,910**
22	60	17,65	17,2	3,443	297,65	288,75	16,65	16,55	16,6	0,0027	0,0004	10,27	7,89	0,414	8,71	0,000	0,475	2,210	0,3442	**1,487**	**0,894**
23	60	16,4	16,35	3,664	298,25	289,5	17,25	17,3	17,275	0,0029	0,0004	10,71	8,24	0,421	9,03	0,000	0,477	2,192	0,3450	**1,481**	**0,896**
24	60	14,6	14,23	4,162	299,75	290,5	18,75	18,3	18,525	0,0033	0,0006	11,66	9,23	0,427	9,30	0,000	0,498	2,015	0,3529	**1,419**	**0,917**
25	60	13,85	14,1	4,293	300	291,5	19	19,3	19,15	0,0034	0,0006	11,90	9,20	0,442	9,95	0,000	0,481	2,162	0,3463	**1,470**	**0,900**
26	70	16,02	15,7	4,414	301	291,5	20	19,3	19,65	0,0035	0,0006	12,12	9,25	0,452	10,40	0,000	0,471	2,247	0,3425	**1,499**	**0,890**
27	100	21,82	21,94	4,570	301,75	292,5	20,75	20,3	20,525	0,0036	0,0007	12,41	9,17	0,472	11,36	0,000	0,447	2,477	0,3323	**1,574**	**0,863**
28	100	21,29	21,32	4,694	301,75	293	20,75	20,8	20,775	0,0037	0,0007	12,63	9,41	0,472	11,36	0,000	0,453	2,414	0,3351	**1,554**	**0,871**
29	100	21,07	21,05	4,748	301,75	293	20,75	20,8	20,775	0,0038	0,0007	12,73	9,60	0,468	11,17	0,000	0,462	2,326	0,3390	**1,525**	**0,881**
30	100	20,69	20,58	4,846	302,5	293,5	21,5	21,3	21,4	0,0038	0,0007	12,90	9,50	0,483	11,91	0,000	0,444	2,508	0,3309	**1,584**	**0,860**
31	100	20,1	20,05	4,981	302,5	293,75	21,5	21,55	21,525	0,0039	0,0008	13,14	9,86	0,478	11,67	0,000	0,458	2,366	0,3372	**1,538**	**0,876**
32	100	19,17	19,26	5,204	303,5	294,5	22,5	22,3	22,4	0,0041	0,0009	13,53	9,99	0,494	12,42	0,000	0,446	2,487	0,3319	**1,577**	**0,862**
33	100	18,67	18,61	5,365	303,75	294,6	22,75	22,4	22,575	0,0042	0,0009	13,81	10,39	0,489	12,19	0,000	0,460	2,346	0,3381	**1,532**	**0,879**
34	100	18,28	18,24	5,476	304,9	295,25	23,9	23,05	23,475	0,0043	0,0009	14,00	10,14	0,512	13,34	0,000	0,432	2,631	0,3255	**1,622**	**0,846**
35	100	18,02	18,17	5,526	304,5	295,5	23,5	23,3	23,4	0,0043	0,0010	14,08	10,34	0,506	13,06	0,000	0,442	2,528	0,3300	**1,590**	**0,858**
36	200	36,21	36,07	5,534	304,5	295,5	23,5	23,3	23,4	0,0043	0,0010	14,09	10,36	0,506	13,04	0,000	0,443	2,517	0,3305	**1,587**	**0,859**
37	200	36,19	35,58	5,573	305	295,6	24	23,4	23,7	0,0044	0,0010	14,16	10,29	0,513	13,41	0,000	0,434	2,607	0,3266	**1,615**	**0,848**

Додаток Г.3

Протокол дослідження гідравлічної характеристики дощоприймача

Лабораторія гідравліки кафедри ГВІ, Національний університет "Львівська політехніка" 04.11.23

Дощоприймач Dy 200, Base 400x400 мм, без гідрозатвору, з гратчастою решіткою. Решітка забита по контуру.

Серія №2 **Розміри водоприймального отвору 199x199 мм (6x6 комірок)**

$z_{1,0}$ = **279,5** мм $T_{пов}$ = 18 °C b = **0,199** м L_w = 0,796 м ε_1 = 0,9020 a = 0,553 м

$z_{2,0}$ = **270,7** мм 8,8 $T_в$ = 18 °C α_w = 1 ω_o = 0,03572 м² ε_0 = 0,223 r_1 = 0,479 м

№	W, л	t_1, с	t_2, с	Q, л/с	z_1, мм	z_2, мм	h_1,мм	h_2,мм	h_{mid},мм	V_1, м/с	$V_1^2/2g$	$h_{p.cr}$,мм	h_p,мм	V_p, м/с	$V_p^2/2g$	θ, мм	h_p/h	Fr_w	m	$Fr_{w.US}$	C_w	C_{mix}
1	20	21,63	22	0,917	287,5	280	8	9,3	8,65	0,0007	0,0000	5,13	3,69	0,312	4,96	0,000	0,427	2,684	0,3232	**1,638**	**0,840**	
2	20	17,61	18,01	1,123	290	281	10,5	10,3	10,4	0,0009	0,0000	5,88	3,97	0,355	6,43	0,000	0,382	3,236	0,3003	**1,799**	**0,780**	
3	20	15,78	16,27	1,248	290,8	282,2	11,3	11,5	11,4	0,0010	0,0001	6,30	4,16	0,377	7,24	0,000	0,365	3,481	0,2908	**1,866**	**0,756**	
4	20	14,92	14,91	1,341	290	281,5	10,5	10,8	10,65	0,0011	0,0001	6,61	5,11	0,330	5,54	0,000	0,480	2,169	0,3460	**1,473**	**0,899**	
5	20	12,81	12,99	1,550	291,5	282,5	12	11,8	11,9	0,0013	0,0001	7,29	5,49	0,355	6,41	0,000	0,462	2,332	0,3387	**1,527**	**0,880**	
6	30	18,48	18,38	1,628	292,2	284	12,7	13,3	13	0,0013	0,0001	7,53	5,24	0,390	7,76	0,000	0,403	2,961	0,3115	**1,721**	**0,809**	
7	20	12,05	12,25	1,646	292,2	284	12,7	13,3	13	0,0013	0,0001	7,58	5,33	0,388	7,67	0,000	0,410	2,877	0,3150	**1,696**	**0,818**	
8	30	16,56	17,11	1,782	293	284,5	13,5	13,8	13,65	0,0014	0,0001	7,99	5,65	0,396	8,00	0,000	0,414	2,831	0,3169	**1,683**	**0,823**	
9	30	16,44	16,69	1,811	292,2	283,5	12,7	12,8	12,75	0,0015	0,0001	8,08	6,49	0,350	6,26	0,000	0,509	1,927	0,3568	**1,388**	**0,927**	
10	30	15,91	15,24	1,926	292,7	284,8	13,2	14,1	13,65	0,0015	0,0001	8,42	6,43	0,376	7,22	0,000	0,471	2,247	0,3426	**1,499**	**0,890**	
11	50	24,49	24,28	2,050	295	286	15,5	15,3	15,4	0,0016	0,0001	8,78	6,00	0,430	9,40	0,000	0,389	3,136	0,3043	**1,771**	**0,791**	
12	40	19,29	19,15	2,081	294,5	285,75	15	15,05	15,025	0,0017	0,0001	8,87	6,33	0,413	8,70	0,000	0,421	2,747	0,3205	**1,657**	**0,833**	
13	50	21,79	21,78	2,295	295,75	286,75	16,25	16,05	16,15	0,0018	0,0002	9,46	6,69	0,431	9,46	0,000	0,414	2,825	0,3172	**1,681**	**0,824**	
14	50	21,99	21,21	2,315	296,25	287,75	16,75	17,05	16,9	0,0018	0,0002	9,52	6,41	0,454	10,49	0,000	0,379	3,273	0,2988	**1,809**	**0,776**	
15	50	21,31	21,17	2,354	296	287,5	16,5	16,8	16,65	0,0019	0,0002	9,62	6,69	0,442	9,96	0,000	0,402	2,978	0,3108	**1,726**	**0,807**	
16	50	19,55	20	2,528	296,3	288	16,8	17,3	17,05	0,0020	0,0002	10,09	7,24	0,439	9,81	0,000	0,425	2,710	0,3221	**1,646**	**0,837**	
17	50	19,13	18,95	2,626	297,5	288,75	18	18,05	18,025	0,0021	0,0002	10,35	7,14	0,462	10,89	0,000	0,396	3,050	0,3078	**1,747**	**0,800**	
18	50	18,39	18,56	2,706	296,5	287,85	17	17,15	17,075	0,0022	0,0002	10,56	8,10	0,420	8,97	0,000	0,475	2,214	0,3440	**1,488**	**0,894**	
19	50	17,89	18,17	2,773	297,8	289	18,3	18,3	18,3	0,0022	0,0002	10,74	7,61	0,458	10,69	0,000	0,416	2,812	0,3177	**1,677**	**0,825**	
20	70	25,05	25,23	2,784	297,5	288,75	18	18,05	18,025	0,0022	0,0002	10,76	7,82	0,448	10,21	0,000	0,434	2,613	0,3263	**1,616**	**0,848**	
21	70	22,88	22,84	3,062	298,5	290	19	19,3	19,15	0,0024	0,0003	11,47	8,36	0,460	10,79	0,000	0,437	2,581	0,3277	**1,606**	**0,851**	
22	50	15,74	16,21	3,130	299	290,8	19,5	20,1	19,8	0,0025	0,0003	11,64	8,27	0,476	11,54	0,000	0,417	2,791	0,3186	**1,671**	**0,828**	
23	50	15,6	15,78	3,187	300	291	20,5	20,3	20,4	0,0025	0,0003	11,78	8,17	0,490	12,23	0,000	0,401	2,991	0,3102	**1,730**	**0,806**	
24	70	21,88	21,8	3,205	299,25	290,5	19,75	19,8	19,775	0,0025	0,0003	11,82	8,60	0,468	11,18	0,000	0,435	2,600	0,3269	**1,612**	**0,849**	
25	70	21,35	21	3,306	300	291	20,5	20,3	20,4	0,0026	0,0003	12,07	8,65	0,480	11,75	0,000	0,424	2,717	0,3218	**1,648**	**0,836**	
26	60	17,56	17,71	3,402	300,5	291,9	21	21,2	21,1	0,0027	0,0004	12,30	8,65	0,494	12,45	0,000	0,410	2,880	0,3148	**1,697**	**0,818**	
27	80	23,19	23,15	3,453	300,6	291,5	21,1	20,8	20,95	0,0027	0,0004	12,42	8,93	0,486	12,02	0,000	0,426	2,691	0,3229	**1,640**	**0,839**	
28	80	21,99	21,78	3,655	301,25	292	21,75	21,3	21,525	0,0029	0,0004	12,91	9,42	0,487	12,10	0,000	0,438	2,568	0,3283	**1,602**	**0,853**	
29	80	21,43	21,1	3,762	301,6	292,5	22,1	21,8	21,95	0,0030	0,0004	13,16	9,60	0,492	12,35	0,000	0,437	2,572	0,3281	**1,604**	**0,852**	
30	100	26,35	26,46	3,787	302	292,75	22,5	22,05	22,275	0,0030	0,0005	13,21	9,50	0,501	12,77	0,000	0,427	2,687	0,3231	**1,639**	**0,839**	
31	100	26,23	26,11	3,821	302,5	293,3	23	22,6	22,8	0,0030	0,0005	13,29	9,34	0,514	13,46	0,000	0,410	2,881	0,3148	**1,697**	**0,818**	
32	150	37,92	37,56	3,975	303	294	23,5	23,3	23,4	0,0031	0,0005	13,65	9,59	0,520	13,81	0,000	0,410	2,878	0,3149	**1,697**	**0,818**	
33	100	24,27	24,21	4,125	303	293,75	23,5	23,05	23,275	0,0032	0,0005	13,99	10,25	0,505	13,02	0,000	0,441	2,540	0,3295	**1,594**	**0,856**	
34	100	23,51	23,35	4,268	304	294,5	24,5	23,8	24,15	0,0033	0,0006	14,31	10,28	0,522	13,87	0,000	0,426	2,700	0,3225	**1,643**	**0,838**	
35	150	34,14	34,66	4,360	304,75	295,5	25,25	24,8	25,025	0,0034	0,0006	14,52	10,13	0,541	14,89	0,000	0,405	2,939	0,3124	**1,714**	**0,812**	
36	100	22,16	22,21	4,508	304,5	295,6	25	24,9	24,95	0,0035	0,0006	14,84	10,71	0,528	14,24	0,000	0,429	2,657	0,3244	**1,630**	**0,843**	
37	150	32,15	31,8	4,691	305,75	296,65	26,25	25,95	26,1	0,0037	0,0007	15,24	10,73	0,549	15,37	0,000	0,411	2,864	0,3155	**1,692**	**0,820**	
38	120	25,15	25,15	4,771	305,75	296,5	26,25	25,8	26,025	0,0037	0,0007	15,41	11,06	0,542	14,96	0,000	0,425	2,705	0,3223	**1,645**	**0,837**	
39	120	24,55	24,36	4,907	306	296,75	26,5	26,05	26,275	0,0038	0,0007	15,71	11,42	0,540	14,86	0,000	0,435	2,603	0,3268	**1,613**		**0,403**
40	150	30,43	30,55	4,920	306,5	297,5	27	26,8	26,9	0,0038	0,0007	15,73	11,10	0,557	15,80	0,000	0,413	2,847	0,3162	**1,687**		**0,395**
41	120	24,09	24,2	4,970	306,35	297,35	26,85	26,65	26,75	0,0039	0,0008	15,84	11,36	0,549	15,39	0,000	0,425	2,708	0,3222	**1,646**		**0,401**
42	200	39,34	39,26	5,089	307,65	297,8	28,15	27,1	27,625	0,0040	0,0008	16,09	11,29	0,566	16,33	0,000	0,409	2,892	0,3143	**1,701**		**0,398**
43	200	39,1	39,4	5,096	308	298,25	28,5	27,55	28,025	0,0040	0,0008	16,11	11,11	0,576	16,91	0,000	0,397	3,044	0,3080	**1,745**		**0,392**
44	200	39,3	39,15	5,099	307	297,6	27,5	26,9	27,2	0,0040	0,0008	16,11	11,56	0,554	15,64	0,000	0,425	2,704	0,3224	**1,644**		**0,405**
45	200	38,3	38,73	5,193	307,75	298,5	28,25	27,8	28,025	0,0040	0,0008	16,31	11,43	0,571	16,59	0,000	0,408	2,902	0,3139	**1,704**		**0,400**
46	200	38,25	38,51	5,211	307,5	299	28	28,3	28,15	0,0040	0,0008	16,35	11,43	0,573	16,72	0,000	0,406	2,926	0,3129	**1,711**		**0,399**
47	200	38,29	38,33	5,221	307,5	298,5	28	27,8	27,9	0,0041	0,0008	16,37	11,60	0,566	16,31	0,000	0,416	2,812	0,3177	**1,677**		**0,404**
48	200	37,28	37,16	5,373	307	298,5	27,5	27,8	27,65	0,0042	0,0009	16,69	12,30	0,549	15,35	0,000	0,445	2,496	0,3315	**1,580**		**0,419**
49	200	37,1	37,2	5,384	308,25	298,85	28,75	28,15	28,45	0,0042	0,0009	16,71	11,85	0,571	16,60	0,000	0,417	2,801	0,3182	**1,674**		**0,408**

Додаток Г.4

Протокол дослідження гідравлічної характеристики дощоприймача

Лабораторія гідравліки кафедри ГВІ, Національний університет "Львівська політехніка' 11.11.23

Дощоприймач Dy 200, Base 400x400 мм, без гідрозатвору, з ґратчастою решіткою. Решітка забита по контуру.

Серія №3 **Розміри водоприймального отвору 131x131 мм (4x4 комірки)**

$z_{1,0}$ = **278,5** мм $T_{пов}$ = 18 °C b= **0,131** м L_w = 0,524 м ε_1= 0,9105 a= 0,553 м

$z_{2,0}$ = **269,7** мм $T_в$ = 18 °C α_w= 1 ω_o= 0,01563 м^2 ε_0= 0,098 r_1 = 0,479 м

№	W, л	t_1, с	t_2, с	Q, л/с	z_1, мм	z_2, мм	h_1,мм	h_2,мм	h_{mid},мм	V_1, м/с	$V_1^2/2g$	$h_{p.cr}$,мм	h_p,мм	V_p, м/с	$V_p^2/2g$	0, мм	h_p/h	Fr_w	m	$Fr_{w.US}$	C_w	C_{mix}
1	20	40,15	40	0,499	286,7	278	8,2	8,3	8,25	0,0004	0,0000	4,52	2,70	0,353	6,36	0,000	0,327	4,721	0,2869	**2,173**	**0,745**	
2	20	36,97	36,61	0,544	287	278,1	8,5	8,4	8,45	0,0004	0,0000	4,79	2,93	0,354	6,40	0,000	0,346	4,373	0,3015	**2,091**	**0,783**	
3	20	31,01	30,55	0,650	287,8	279	9,3	9,3	9,3	0,0005	0,0000	5,39	3,36	0,369	6,95	0,000	0,361	4,139	0,3121	**2,034**	**0,811**	
4	20	25,77	25,66	0,778	288,8	280	10,3	10,3	10,3	0,0006	0,0000	6,08	3,84	0,386	7,61	0,000	0,373	3,963	0,3206	**1,991**	**0,833**	
5	20	19,37	19,45	1,030	291	282	12,5	12,3	12,4	0,0008	0,0000	7,33	4,64	0,424	9,15	0,000	0,374	3,944	0,3215	**1,986**	**0,835**	
6	20	16,83	16,67	1,194	292	283,1	13,5	13,4	13,45	0,0010	0,0000	8,09	5,19	0,439	9,82	0,000	0,386	3,780	0,3298	**1,944**	**0,857**	
7	20	13,91	13,86	1,440	294,1	285,5	15,6	15,8	15,7	0,0012	0,0001	9,17	5,74	0,479	11,68	0,000	0,366	4,068	0,3155	**2,017**	**0,820**	
8	40	22,98	23,01	1,740	296,6	287,8	18,1	18,1	18,1	0,0014	0,0001	10,40	6,43	0,517	13,60	0,000	0,355	4,233	0,3078	**2,058**	**0,800**	
9	40	21,12	21,35	1,884	298	289,2	19,5	19,5	19,5	0,0015	0,0001	10,96	6,66	0,540	14,84	0,000	0,342	4,453	0,2980	**2,110**	**0,774**	
10	40	17,93	17,66	2,248	300,8	292	22,3	22,3	22,3	0,0018	0,0002	12,33	7,40	0,580	17,12	0,000	0,332	4,626	0,2908	**2,151**	**0,756**	
11	40	17,15	17,26	2,325	301,5	293	23	23,3	23,15	0,0018	0,0002	12,61	7,48	0,593	17,91	0,000	0,323	4,786	0,2844	**2,188**	**0,739**	
12	40	16,51	16,21	2,445	302	293,2	23,5	23,5	23,5	0,0019	0,0002	13,04	7,85	0,594	18,00	0,000	0,334	4,587	0,2924	**2,142**	**0,760**	
13	70	25,01	25,15	2,791	303	294,6	24,5	24,9	24,7	0,0022	0,0002	14,25	8,84	0,603	18,51	0,000	0,358	4,190	0,3098	**2,047**	**0,805**	
14	70	24,95	24,4	2,837	302,8	294,5	24,3	24,8	24,55	0,0022	0,0003	14,40	9,06	0,598	18,21	0,000	0,369	4,021	0,3177	**2,005**	**0,826**	
15	100	35,05	35,06	2,853	304	295,2	25,5	25,5	25,5	0,0022	0,0003	14,46	8,84	0,615	19,31	0,000	0,347	4,366	0,3018	**2,090**	**0,784**	
16	100	34,95	34,87	2,865	303,8	295	25,3	25,3	25,3	0,0022	0,0003	14,50	8,94	0,611	19,04	0,000	0,354	4,257	0,3067	**2,063**	**0,797**	
17	100	34,43	34,88	2,886	304,1	295,3	25,6	25,6	25,6	0,0023	0,0003	14,57	8,94	0,616	19,34	0,000	0,349	4,328	0,3035	**2,080**	**0,789**	
18	100	32,72	32,54	3,065	305	296	26,5	26,3	26,4	0,0024	0,0003	15,16	9,37	0,624	19,84	0,000	0,355	4,232	0,3078	**2,057**	**0,800**	
19	100	32,04	32,3	3,108	305,2	296	26,7	26,3	26,5	0,0024	0,0003	15,31	9,51	0,624	19,85	0,000	0,359	4,175	0,3105	**2,043**	**0,807**	
20	100	31,38	31,41	3,185	306,1	297	27,6	27,3	27,45	0,0025	0,0003	15,56	9,52	0,639	20,79	0,000	0,347	4,368	0,3017	**2,090**	**0,784**	
21	100	30,76	30,67	3,256	306	297	27,5	27,3	27,4	0,0025	0,0003	15,79	9,78	0,635	20,55	0,000	0,357	4,201	0,3093	**2,050**	**0,804**	
22	100	29,8	29,62	3,366	306,5	298	28	28,3	28,15	0,0026	0,0003	16,14	9,97	0,645	21,17	0,000	0,354	4,249	0,3070	**2,061**	**0,798**	
23	100	28,03	28,12	3,562	307,6	298,4	29,1	28,7	28,9	0,0028	0,0004	16,76	10,44	0,651	21,59	0,000	0,361	4,134	0,3124	**2,033**	**0,812**	
24	100	27,25	27,28	3,668	308,1	299,2	29,6	29,5	29,55	0,0028	0,0004	17,09	10,63	0,659	22,11	0,000	0,360	4,161	0,3111	**2,040**	**0,808**	
25	100	26,28	26,24	3,808	309	300	30,5	30,3	30,4	0,0029	0,0004	17,53	10,87	0,669	22,79	0,000	0,357	4,195	0,3095	**2,048**	**0,804**	
26	100	25,67	25,53	3,906	310	301	31,5	31,3	31,4	0,0030	0,0005	17,83	10,92	0,683	23,76	0,000	0,348	4,352	0,3025	**2,086**	**0,786**	
27	100	24,34	24,33	4,109	310,3	301,2	31,8	31,5	31,65	0,0032	0,0005	18,44	11,53	0,680	23,58	0,000	0,364	4,090	0,3144	**2,022**	**0,817**	
28	100	23,82	23,72	4,207	311	301,8	32,5	32,1	32,3	0,0032	0,0005	18,73	11,67	0,688	24,13	0,000	0,361	4,137	0,3122	**2,034**	**0,811**	
29	100	23,39	23,55	4,261	312	303	33,5	33,3	33,4	0,0033	0,0005	18,89	11,54	0,705	25,33	0,000	0,345	4,391	0,3007	**2,095**	**0,781**	
30	150	34,24	34,21	4,383	312	302,8	33,5	33,1	33,3	0,0034	0,0006	19,25	11,96	0,699	24,93	0,000	0,359	4,169	0,3107	**2,042**	**0,807**	
31	150	33,76	33,84	4,438	312,2	303,5	33,7	33,8	33,75	0,0034	0,0006	19,41	12,01	0,705	25,34	0,000	0,356	4,220	0,3084	**2,054**	**0,801**	
32	150	33,57	33,42	4,478	313	303,6	34,5	33,9	34,2	0,0034	0,0006	19,53	12,01	0,711	25,79	0,000	0,351	4,293	0,3051	**2,072**	**0,793**	
33	150	32,55	32,55	4,608	312,8	303,4	34,3	33,7	34	0,0035	0,0006	19,90	12,49	0,704	25,26	0,000	0,367	4,043	0,3167	**2,011**		**0,545**
34	150	31,91	31,95	4,698	313,1	304,2	34,6	34,5	34,55	0,0036	0,0007	20,16	12,62	0,710	25,72	0,000	0,365	4,075	0,3152	**2,019**		**0,547**
35	150	31,63	31,53	4,750	314	304,6	35,5	34,9	35,2	0,0036	0,0007	20,31	12,60	0,719	26,38	0,000	0,358	4,188	0,3099	**2,046**		**0,543**
36	150	31,14	30,99	4,829	314,2	304,9	35,7	35,2	35,45	0,0037	0,0007	20,53	12,78	0,721	26,51	0,000	0,360	4,149	0,3117	**2,037**		**0,548**
37	150	30,73	30,68	4,885	314,8	305,1	36,3	35,4	35,85	0,0037	0,0007	20,69	12,84	0,726	26,86	0,000	0,358	4,183	0,3101	**2,045**		**0,548**
38	150	30,06	30,08	4,988	315	305,8	36,5	36,1	36,3	0,0038	0,0007	20,98	13,04	0,730	27,17	0,000	0,359	4,169	0,3107	**2,042**		**0,553**
39	150	29,01	29,06	5,166	316	306,8	37,5	37,1	37,3	0,0039	0,0008	21,48	13,30	0,741	27,99	0,000	0,357	4,207	0,3090	**2,051**		**0,557**
40	200	37,58	37,52	5,326	317,2	308	38,7	38,3	38,5	0,0040	0,0008	21,92	13,46	0,755	29,08	0,000	0,350	4,322	0,3038	**2,079**		**0,556**

Додаток Г.5

Протокол дослідження гідравлічної характеристики дощоприймача

Лабораторія гідравліки кафедри ГВІ, Національний університет "Львівська політехніка" 18.11.23

Дощоприймач Dy 200, Base 400x400 мм, без гідрозатвору, з гратчастою решіткою. Решітка забита по контуру.

Серія №4 **Розміри водоприймального отвору 98x98 мм (3x3 комірки)**

$z_{1,0}$ = **277,5** мм $T_{пов}$ = 16,8 °C b = **0,098** м L_w = 0,392 м ε_1 = 0,9200 a = 0,553 м

$z_{2,0}$ = **268,7** мм $T_в$ = 17 °C α_w = 1 ω_o = 0,00884 м^2 ε_0 = 0,055 r_1 = 0,479 м

№	W, л	t_1, с	t_2, с	Q, л/с	z_1, мм	z_2, мм	h_1,мм	h_2,мм	h_{mid},мм	V_1, м/с	$V_1^2/2g$	$h_{p.cr}$,мм	h_p,мм	V_p, м/с	$V_p^2/2g$	0, мм	h_p/h	Fr_w	m	$Fr_{w.US}$	C_w	C_{mix}	C_o
1	20	48,66	49,61	0,407	286	277,1	8,5	8,4	8,45	0,0003	0,0000	4,79	3,25	0,319	5,20	0,000	0,385	3,198	0,3018	**1,788**	**0,784**		
2	20	43,04	42,2	0,469	286,1	277,2	8,6	8,5	8,55	0,0004	0,0000	5,27	4,01	0,298	4,54	0,000	0,469	2,262	0,3418	**1,504**	**0,888**		
3	20	33,14	33,92	0,596	287,1	279	9,6	10,3	9,95	0,0005	0,0000	6,18	4,78	0,319	5,17	0,000	0,480	2,167	0,3461	**1,472**	**0,899**		
4	20	31,97	31,6	0,629	287,8	279,1	10,3	10,4	10,35	0,0005	0,0000	6,40	4,92	0,327	5,43	0,000	0,475	2,211	0,3442	**1,487**	**0,894**		
5	20	29,58	30,28	0,668	288,8	279,9	11,3	11,2	11,25	0,0005	0,0000	6,67	4,79	0,356	6,46	0,000	0,426	2,700	0,3225	**1,643**	**0,838**		
6	20	24,33	24,12	0,826	290	281	12,5	12,3	12,4	0,0007	0,0000	7,68	5,90	0,357	6,50	0,000	0,475	2,207	0,3443	**1,485**	**0,895**		
7	30	32,14	32,05	0,935	291,2	282,2	13,7	13,5	13,6	0,0008	0,0000	8,34	6,30	0,378	7,30	0,000	0,463	2,317	0,3394	**1,522**	**0,882**		
8	30	29,43	29,69	1,015	291,8	283	14,3	14,3	14,3	0,0008	0,0000	8,81	6,71	0,386	7,59	0,000	0,469	2,263	0,3418	**1,504**	**0,888**		
9	30	28,81	28,83	1,041	292	282,9	14,5	14,2	14,35	0,0008	0,0000	8,96	6,99	0,380	7,36	0,000	0,487	2,108	0,3487	**1,452**	**0,906**		
10	40	35,75	36,13	1,113	293	284	15,5	15,3	15,4	0,0009	0,0000	9,37	6,99	0,406	8,41	0,000	0,454	2,407	0,3354	**1,551**	**0,871**		
11	40	32,21	32,56	1,235	294	285	16,5	16,3	16,4	0,0010	0,0000	10,04	7,57	0,416	8,83	0,000	0,462	2,333	0,3387	**1,527**	**0,880**		
12	40	29,05	29,07	1,376	295,9	286,8	18,4	18,1	18,25	0,0011	0,0001	10,79	7,73	0,454	10,52	0,000	0,423	2,723	0,3215	**1,650**	**0,835**		
13	50	33,13	33,63	1,498	296,4	287,4	18,9	18,7	18,8	0,0012	0,0001	11,42	8,50	0,450	10,30	0,000	0,452	2,423	0,3347	**1,557**	**0,869**		
14	50	32	32,1	1,560	297	288	19,5	19,3	19,4	0,0012	0,0001	11,73	8,68	0,459	10,72	0,000	0,447	2,472	0,3325	**1,572**	**0,864**		
15	50	29,27	29,47	1,702	298	289	20,5	20,3	20,4	0,0013	0,0001	12,43	9,31	0,466	11,09	0,000	0,456	2,382	0,3365	**1,543**	**0,874**		
16	50	28,49	28,49	1,755	298,9	290	21,4	21,3	21,35	0,0014	0,0001	12,69	9,15	0,489	12,20	0,000	0,429	2,666	0,3240	**1,633**	**0,842**		
17	50	26,71	26,98	1,863	299,9	290,9	22,4	22,2	22,3	0,0015	0,0001	13,20	9,47	0,502	12,83	0,000	0,425	2,710	0,3221	**1,646**	**0,837**		
18	70	34,45	34,67	2,025	301,2	292,4	23,7	23,7	23,7	0,0016	0,0001	13,96	9,95	0,519	13,75	0,000	0,420	2,765	0,3197	**1,663**	**0,831**		
19	50	24,61	24,39	2,041	301	292,4	23,5	23,7	23,6	0,0016	0,0001	14,03	10,13	0,514	13,47	0,000	0,429	2,662	0,3242	**1,631**	**0,842**		
20	100	46,77	46,82	2,137	303	294	25,5	25,3	25,4	0,0017	0,0001	14,47	9,88	0,552	15,52	0,000	0,389	3,142	0,3040	**1,773**	**0,790**		
21	100	44,01	43,45	2,287	303,8	294,8	26,3	26,1	26,2	0,0018	0,0002	15,14	10,52	0,555	15,68	0,000	0,401	2,983	0,3105	**1,727**	**0,807**		
22	70	27,54	27,38	2,549	305	296	27,5	27,3	27,4	0,0020	0,0002	16,27	11,73	0,555	15,67	0,000	0,428	2,673	0,3237	**1,635**	**0,841**		
23	100	37,79	38,03	2,638	305,2	296,5	27,7	27,8	27,75	0,0020	0,0002	16,65	12,17	0,553	15,58	0,000	0,439	2,560	0,3286	**1,600**	**0,854**		
24	100	35,36	35,32	2,830	306,7	297,9	29,2	29,2	29,2	0,0022	0,0002	17,45	12,68	0,569	16,52	0,000	0,434	2,606	0,3266	**1,614**	**0,849**		
25	100	32,48	32,68	3,069	308,3	300	30,8	31,3	31,05	0,0024	0,0003	18,42	13,25	0,591	17,80	0,000	0,427	2,687	0,3231	**1,639**	**0,839**		
26	100	30,62	30,61	3,266	310	301,2	32,5	32,5	32,5	0,0025	0,0003	19,20	13,73	0,607	18,77	0,000	0,422	2,734	0,3211	**1,653**	**0,834**		
27	100	28,98	28,85	3,458	311,5	302,1	34	33,4	33,7	0,0027	0,0004	19,95	14,30	0,617	19,40	0,000	0,424	2,713	0,3220	**1,647**		**0,635**	
28	100	27,92	28,12	3,569	312,5	303	35	34,3	34,65	0,0027	0,0004	20,37	14,47	0,629	20,18	0,000	0,418	2,790	0,3187	**1,670**		**0,637**	
29	100	27,05	26,96	3,703	313,5	304,2	36	35,5	35,75	0,0028	0,0004	20,87	14,70	0,643	21,05	0,000	0,411	2,864	0,3155	**1,692**		**0,640**	
30	100	26,74	26,44	3,761	313,7	304,7	36,2	36	36,1	0,0029	0,0004	21,09	14,86	0,646	21,24	0,000	0,412	2,858	0,3158	**1,691**		**0,644**	
31	150	39,58	39,65	3,786	314,1	305,1	36,6	36,4	36,5	0,0029	0,0004	21,19	14,81	0,652	21,70	0,000	0,406	2,931	0,3127	**1,712**		**0,641**	
32	150	37,85	37,67	3,972	315,1	306,8	37,6	38,1	37,85	0,0030	0,0005	21,88	15,20	0,667	22,65	0,000	0,402	2,980	0,3107	**1,726**		**0,649**	
33	150	37,18	37,48	4,018	316,1	307,1	38,6	38,4	38,5	0,0030	0,0005	22,04	15,14	0,677	23,36	0,000	0,393	3,085	0,3063	**1,757**		**0,645**	
34	200	48,43	47,97	4,149	317,4	308	39,9	39,3	39,6	0,0031	0,0005	22,52	15,34	0,690	24,26	0,000	0,387	3,162	0,3032	**1,778**		**0,648**	
35	200	46,63	46,82	4,280	318	309,1	40,5	40,4	40,45	0,0032	0,0005	22,99	15,66	0,697	24,80	0,000	0,387	3,168	0,3030	**1,780**		**0,654**	
36	200	45,68	45,75	4,375	320,5	311,5	43	42,8	42,9	0,0033	0,0005	23,33	15,12	0,738	27,78	0,000	0,352	3,676	0,2836	**1,917**		**0,631**	
37	200	43,66	43,83	4,572	321	312	43,5	43,3	43,4	0,0034	0,0006	24,02	15,87	0,735	27,53	0,000	0,366	3,470	0,2912	**1,863**		**0,651**	
38	200	42,71	42,83	4,676	323,2	315	45,7	46,3	46	0,0035	0,0006	24,39	15,39	0,775	30,61	0,000	0,335	3,977	0,2730	**1,994**		**0,629**	
39	200	40,96	41,22	4,867	327	318	49,5	49,3	49,4	0,0036	0,0007	25,05	15,15	0,820	34,25	0,000	0,307	4,523	0,2553	**2,127**			**0,560**
40	200	39,73	39,69	5,037	329,5	320,5	52	51,8	51,9	0,0037	0,0007	25,63	15,13	0,849	36,77	0,000	0,291	4,863	0,2453	**2,205**			**0,565**
41	200	39,13	39,16	5,109	331	322	53,5	53,3	53,4	0,0037	0,0007	25,87	15,02	0,868	38,38	0,000	0,281	5,111	0,2385	**2,261**			**0,565**
42	200	38,5	38,49	5,195	332	323	54,5	54,3	54,4	0,0038	0,0007	26,16	15,09	0,878	39,31	0,000	0,277	5,209	0,2358	**2,282**			**0,569**
43	200	37,59	37,85	5,302	334	325	56,5	56,3	56,4	0,0039	0,0008	26,52	15,01	0,901	41,39	0,000	0,266	5,515	0,2280	**2,348**			**0,570**
44	200	37,1	37,16	5,386	335,5	326,8	58	58,1	58,05	0,0039	0,0008	26,80	14,94	0,920	43,11	0,000	0,257	5,771	0,2218	**2,402**			**0,571**
45	200	36,78	36,73	5,441	336,5	327,5	59	58,8	58,9	0,0039	0,0008	26,98	12,91	1,075	58,90	0,000	0,219	9,123	0,2192	**3,020**			**0,573**
46	10	63	65,95	5,542	341,5	331	64	62,3	63,15	0,0040	0,0008	27,31	12,70	1,113	63,15	0,000	0,201	9,945	0,2011	**3,154**			**0,563**
47	10	45,5	45,78	5,606	340	332	62,5	63,3	62,9	0,0040	0,0008	27,52	12,87	1,111	62,90	0,000	0,205	9,773	0,2046	**3,126**			**0,571**
48	10	38,86	38,47	5,645	340	331,5	62,5	62,8	62,65	0,0041	0,0008	27,65	12,99	1,109	62,65	0,000	0,207	9,647	0,2073	**3,106**			**0,576**
49	20	50,32	50,52	5,783	340,7	331,5	63,2	62,8	63	0,0042	0,0009	28,10	13,27	1,112	63,00	0,000	0,211	9,496	0,2106	**3,081**			**0,589**
50	20	42,49	42,82	5,855	344	334,5	66,5	65,8	66,15	0,0042	0,0009	28,33	13,11	1,139	66,15	0,000	0,198	10,091	0,1982	**3,177**			**0,582**
51	20	32,07	32,07	6,010	345	337	67,5	68,3	67,9	0,0043	0,0009	28,83	13,28	1,154	67,90	0,000	0,196	10,223	0,1956	**3,197**			**0,589**
52	30	38,49	38,73	6,163	349,5	341	72	72,3	72,15	0,0043	0,0010	29,32	13,22	1,190	72,15	0,000	0,183	10,919	0,1832	**3,304**			**0,586**
53	30	32,72	32,62	6,305	352	343	74,5	74,3	74,4	0,0044	0,0010	29,76	13,31	1,208	74,40	0,000	0,179	11,178	0,1789	**3,343**			**0,591**
54	30	31,17	31,17	6,349	353	345	75,5	76,3	75,9	0,0044	0,0010	29,90	13,27	1,220	75,90	0,000	0,175	11,438	0,1749	**3,382**			**0,589**
55	30	26,26	25,88	6,537	362	353	84,5	84,3	84,4	0,0045	0,0010	30,49	12,96	1,287	84,40	0,000	0,154	13,025	0,1535	**3,609**			**0,575**
56	30	25,05	25,25	6,579	362,5	353,5	85	84,8	84,9	0,0045	0,0010	30,62	13,00	1,291	84,90	0,000	0,153	13,057	0,1532	**3,613**			**0,577**

Додаток Г.6

Протокол дослідження гідравлічної характеристики дощоприймача

Лабораторія гідравліки кафедри ГВІ, Національний університет "Львівська політехніка" 25.11.23

Дощоприймач Dy 200, Base 400x400 мм, без гідрозатвору, з ґратчастою решіткою. Решітка забита по контуру

Серія №5 **Розміри водоприймального отвору 65x65 мм (2x2 комірки)**

$z_{1,0}$ = **276** мм $T_{пов}$ = 16 °C b = **0,065** м L_w = 0,26 м ε_1 = 0,8807 a = 0,553 м

$z_{2,0}$ = **267** мм $T_в$ = 16,5 °C α_w = 1 ω_o = 0,0037 м^2 ε_0 = 0,023 r_1 = 0,479 м

№	W, л	t_1, с	t_2, с	Q, л/с	z_1, мм	z_2, мм	h_1,мм	h_2,мм	h_{mid},мм	V_1, м/с	$V_1^2/2g$	$h_{p.cr}$,мм	h_p,мм	V_p, м/с	$V_p^2/2g$	θ, мм	h_p/h	Fr_w	m	$Fr_{w.US}$	C_w	C_{mix}	C_o
1	20	49,05	48,53	0,410	286,1	277,7	10,1	10,7	10,4	0,0003	0,0000	6,33	4,72	0,334	5,68	0,000	0,454	2,402	0,3356	**1,550**	**0,872**		
2	20	38,5	38,48	0,520	287,7	279	11,7	12	11,85	0,0004	0,0000	7,41	5,80	0,344	6,05	0,000	0,490	2,085	0,3498	**1,444**	**0,909**		
3	20	31,75	32,35	0,624	289,8	280,5	13,8	13,5	13,65	0,0005	0,0000	8,37	6,34	0,379	7,31	0,000	0,464	2,309	0,3398	**1,520**	**0,883**		
4	20	27,53	27,39	0,728	290,4	281,8	14,4	14,8	14,6	0,0006	0,0000	9,28	7,51	0,373	7,09	0,000	0,514	1,887	0,3585	**1,374**	**0,931**		
5	20	21,92	22,1	0,909	292,8	284	16,8	17	16,9	0,0007	0,0000	10,76	8,73	0,400	8,17	0,000	0,516	1,872	0,3591	**1,368**	**0,933**		
6	50	53,8	54,12	0,927	293	284,2	17	17,2	17,1	0,0007	0,0000	10,90	8,87	0,402	8,23	0,000	0,519	1,857	0,3598	**1,363**	**0,935**		
7	20	21,22	21,34	0,940	293	284,2	17	17,2	17,1	0,0007	0,0000	11,00	9,16	0,395	7,94	0,000	0,535	1,735	0,3650	**1,317**		**0,643**	
8	50	49,58	50,42	1,000	294,5	285,5	18,5	18,5	18,5	0,0008	0,0000	11,47	8,83	0,436	9,67	0,000	0,477	2,190	0,3451	**1,480**		**0,632**	
9	50	44,85	45,14	1,111	295,5	286,2	19,5	19,2	19,35	0,0009	0,0000	12,30	9,95	0,429	9,40	0,000	0,514	1,888	0,3585	**1,374**		**0,672**	
10	50	39,3	39,33	1,272	297	288,1	21	21,1	21,05	0,0010	0,0001	13,46	11,03	0,443	10,02	0,000	0,524	1,815	0,3616	**1,347**		**0,707**	
11	50	37,64	38,33	1,316	298	289,5	22	22,5	22,25	0,0010	0,0001	13,77	10,58	0,478	11,67	0,000	0,476	2,206	0,3444	**1,485**		**0,692**	
12	50	34,57	35,81	1,421	299,55	290,7	23,55	23,7	23,625	0,0011	0,0001	14,49	10,97	0,498	12,66	0,000	0,464	2,309	0,3398	**1,520**		**0,704**	
13	50	34,61	35,35	1,429	299,5	290,65	23,5	23,65	23,575	0,0011	0,0001	14,55	11,12	0,494	12,45	0,000	0,472	2,239	0,3429	**1,496**		**0,709**	
14	50	30,46	29,87	1,658	303	294,25	27	27,25	27,125	0,0013	0,0001	16,06	11,52	0,553	15,60	0,000	0,425	2,708	0,3222	**1,646**		**0,715**	
15	50	29	29,57	1,707	303,5	294,75	27,5	27,75	27,625	0,0013	0,0001	16,38	11,78	0,558	15,85	0,000	0,426	2,692	0,3229	**1,641**		**0,723**	
16	50	27,67	28,26	1,788	309	300,5	33	33,5	33,25	0,0014	0,0001	16,89	10,23	0,672	23,02	0,000	0,308	4,499	0,2561	**2,121**		**0,629**	
17	50	27,48	27,33	1,824	305,5	296,1	29,5	29,1	29,3	0,0014	0,0001	17,12	12,07	0,581	17,23	0,000	0,412	2,856	0,3159	**1,690**		**0,729**	
18	50	24,55	24,63	2,033	310,5	301,75	34,5	34,75	34,625	0,0016	0,0001	18,40	11,65	0,671	22,98	0,000	0,336	3,945	0,2740	**1,986**			**0,663**
19	100	47,95	48,59	2,072	315	306,5	39	39,5	39,25	0,0016	0,0001	18,64	10,63	0,749	28,62	0,000	0,271	5,382	0,2313	**2,320**			**0,634**
20	50	22,5	22,46	2,224	315	305,5	39	38,5	38,75	0,0017	0,0001	19,54	11,75	0,728	27,00	0,000	0,303	4,593	0,2532	**2,143**			**0,686**
21	100	41,59	40,77	2,428	324,5	316	48,5	49	48,75	0,0018	0,0002	20,72	10,83	0,863	37,92	0,000	0,222	7,005	0,1959	**2,647**			**0,667**
22	100	39,31	38,97	2,555	329	319,5	53	52,5	52,75	0,0019	0,0002	21,43	10,84	0,907	41,91	0,000	0,205	7,736	0,1831	**2,781**			**0,675**
23	100	36,85	36,97	2,709	333,75	325	57,75	58	57,875	0,0020	0,0002	22,29	10,85	0,961	47,03	0,000	0,187	8,670	0,1690	**2,944**			**0,683**
24	100	35,74	35,38	2,812	340,5	331,25	64,5	64,25	64,375	0,0020	0,0002	22,85	10,52	1,028	53,85	0,000	0,163	10,236	0,1495	**3,199**			**0,672**
25	150	52,52	52,89	2,846	338,5	329,5	62,5	62,5	62,5	0,0020	0,0002	23,03	10,88	1,006	51,62	0,000	0,174	9,493	0,1582	**3,081**			**0,691**
26	100	34,19	34,17	2,926	344,5	335	68,5	68	68,25	0,0021	0,0002	23,46	10,58	1,064	57,67	0,000	0,155	10,904	0,1425	**3,302**			**0,679**
27	100	31,72	31,75	3,151	357	348	81	81	81	0,0022	0,0002	24,65	10,29	1,178	70,71	0,000	0,127	13,744	0,1187	**3,707**			**0,672**
28	100	30,21	30,65	3,286	363	353,5	87	86,5	86,75	0,0022	0,0003	25,35	10,32	1,225	76,43	0,000	0,119	14,809	0,1117	**3,848**			**0,677**
29	100	28,86	28,69	3,475	374,5	364	98,5	97	97,75	0,0023	0,0003	26,31	10,20	1,311	87,55	0,000	0,104	17,170	0,0987	**4,144**			**0,674**
30	100	27,48	27,57	3,633	384	378	108	111	109,5	0,0024	0,0003	27,10	10,00	1,397	99,50	0,000	0,091	19,898	0,0871	**4,461**			**0,666**
31	100	26,95	26,91	3,713	390,5	378,75	114,5	111,75	113,125	0,0024	0,0003	27,50	10,04	1,422	103,08	0,000	0,089	20,529	0,0847	**4,531**			**0,670**
32	100	26,02	26,13	3,835	398	383	122	116	119	0,0025	0,0003	28,10	10,09	1,462	108,91	0,000	0,085	21,586	0,0811	**4,646**			**0,675**
33	100	25,23	25,37	3,953	406,75	394,75	130,75	127,75	129,25	0,0025	0,0003	28,67	9,94	1,530	119,31	0,000	0,077	24,017	0,0739	**4,901**			**0,667**

Додаток Г.7

Протокол дослідження гідравлічної характеристики дощоприймача

Лабораторія гідравліки кафедри ГВІ, Національний університет "Львівська політехніка" 09.12.23

Дощоприймач Dy 200, Base 400x400 мм, без гідрозатвору, з гратчастою решіткою. Решітка забита по контуру.

Серія №6 **Розміри водоприймального отвору 98x65 мм (3x2 комірки)**

$z_{1,0}$ = **264,5** мм $T_{пов}$ = 15,5 °C b = **0,098** м L_w = 0,326 м ε_1 = 0,6166 a = 0,553 м

$z_{2,0}$ = **256,3** мм $T_в$ = 15,5 °C α_w = 1 ω_o = 0,00592 м^2 ε_0 = 0,037 r_1 = 0,479 м

№	W, л	t_1, с	t_2, с	Q, л/с	z_1, мм	z_2, мм	h_1,мм	h_2,мм	h_{mid},мм	V_1, м/с	$V_1^2/2g$	$h_{p.cr}$,мм	h_p,мм	V_p, м/с	$V_p^2/2g$	0, мм	h_p/h	Fr_w	m	$Fr_{w.US}$	C_w	C_{mix}	C_o
1	20	30,3	30,78	0,655	276,3	268,8	11,8	12,5	12,15	0,0005	0,0000	7,44	10,16	0,198	1,99	0,000	0,836	0,393	0,3386	**0,627**	**0,880**		
2	20	24,29	22,8	0,849	277,7	269,9	13,2	13,6	13,4	0,0007	0,0000	8,85	9,79	0,266	3,61	0,000	0,730	0,738	0,3792	**0,859**	**0,985**		
3	30	33,01	34,66	0,887	278,9	270,7	14,4	14,4	14,4	0,0007	0,0000	9,10	11,60	0,235	2,80	0,000	0,805	0,484	0,3553	**0,695**	**0,923**		
4	30	27,66	29,51	1,050	280	271,9	15,5	15,6	15,55	0,0008	0,0000	10,18	11,67	0,276	3,88	0,000	0,751	0,664	0,3748	**0,815**	**0,974**		
5	40	33,49	34,49	1,177	281,1	273	16,6	16,7	16,65	0,0009	0,0000	10,99	12,15	0,297	4,50	0,000	0,730	0,740	0,3793	**0,860**	**0,986**		
6	50	39,28	38,78	1,281	282,1	274,1	17,6	17,8	17,7	0,0010	0,0001	11,63	13,15	0,299	4,55	0,000	0,743	0,693	0,3767	**0,832**	**0,979**		
7	40	31,28	30,8	1,289	282	274	17,5	17,7	17,6	0,0010	0,0001	11,68	12,52	0,316	5,08	0,000	0,711	0,812	0,3822	**0,901**	**0,993**		
8	50	36,63	37,79	1,344	282,4	274,6	17,9	18,3	18,1	0,0011	0,0001	12,01	12,88	0,320	5,22	0,000	0,712	0,810	0,3821	**0,900**	**0,993**		
9	50	35,15	34,82	1,429	283,9	275,7	19,4	19,4	19,4	0,0011	0,0001	12,51	15,11	0,290	4,29	0,000	0,779	0,568	0,3663	**0,754**	**0,952**		
10	50	30,69	32,08	1,593	285	277	20,5	20,7	20,6	0,0013	0,0001	13,45	15,60	0,313	5,00	0,000	0,757	0,642	0,3731	**0,801**	**0,969**		
11	50	28,16	27,06	1,811	287,8	279,7	23,3	23,4	23,35	0,0014	0,0001	14,65	18,99	0,293	4,36	0,000	0,813	0,460	0,3515	**0,678**		**0,642**	
12	50	27,82	26,34	1,846	289	281	24,5	24,7	24,6	0,0014	0,0001	14,84	20,83	0,272	3,77	0,000	0,847	0,362	0,3314	**0,601**		**0,622**	
13	50	25,92	25,5	1,945	290	281,8	25,5	25,5	25,5	0,0015	0,0001	15,37	21,62	0,276	3,88	0,000	0,848	0,359	0,3307	**0,599**		**0,632**	
14	50	23,27	23,6	2,134	291	282,5	26,5	26,2	26,35	0,0017	0,0001	16,34	21,72	0,301	4,63	0,000	0,824	0,426	0,3454	**0,653**		**0,671**	
15	100	43,44	46,8	2,216	292,1	284,15	27,6	27,85	27,725	0,0017	0,0002	16,76	23,44	0,290	4,29	0,000	0,845	0,366	0,3325	**0,605**		**0,662**	
16	50	20,47	20,9	2,417	291,1	284	26,6	27,7	27,15	0,0019	0,0002	17,76	20,45	0,363	6,70	0,000	0,753	0,655	0,3742	**0,810**		**0,737**	
17	100	40,7	40,91	2,451	292,5	284,5	28	28,2	28,1	0,0019	0,0002	17,93	22,32	0,337	5,78	0,000	0,794	0,518	0,3603	**0,720**		**0,722**	
18	100	37,06	37,6	2,679	294,8	286,5	30,3	30,2	30,25	0,0021	0,0002	19,02	24,53	0,335	5,72	0,000	0,811	0,466	0,3526	**0,683**		**0,733**	
19	100	34,31	33,97	2,929	298	289,5	33,5	33,2	33,35	0,0022	0,0003	20,19	28,16	0,319	5,19	0,000	0,844	0,368	0,3331	**0,607**		**0,727**	
20	100	32,48	33,21	3,045	299,75	291,5	35,25	35,2	35,225	0,0023	0,0003	20,72	30,42	0,307	4,80	0,000	0,864	0,316	0,3189	**0,562**		**0,716**	
21	100	31,47	31,34	3,184	302,2	294	37,7	37,7	37,7	0,0024	0,0003	21,35	33,32	0,293	4,38	0,000	0,884	0,263	0,3012	**0,513**		**0,700**	
22	100	30,35	30,51	3,286	304	295,85	39,5	39,55	39,525	0,0025	0,0003	21,80	35,39	0,285	4,14	0,000	0,895	0,234	0,2896	**0,483**		**0,689**	
23	100	30,19	30,34	3,304	303,75	296	39,25	39,7	39,475	0,0025	0,0003	21,88	35,27	0,287	4,21	0,000	0,893	0,239	0,2917	**0,489**		**0,693**	
24	100	29,16	29,17	3,429	307	299	42,5	42,7	42,6	0,0026	0,0003	22,42	38,87	0,271	3,73	0,000	0,912	0,192	0,2701	**0,438**			**0,633**
25	100	28,44	28,65	3,503	309	300,25	44,5	43,95	44,225	0,0026	0,0004	22,75	40,67	0,264	3,56	0,000	0,920	0,175	0,2609	**0,418**			**0,635**
26	100	27,92	27,98	3,578	310	301	45,5	44,7	45,1	0,0027	0,0004	23,07	41,54	0,264	3,56	0,000	0,921	0,171	0,2587	**0,414**			**0,642**
27	100	27,21	27,47	3,658	311,5	303	47	46,7	46,85	0,0027	0,0004	23,41	43,45	0,258	3,40	0,000	0,927	0,156	0,2498	**0,395**			**0,644**
28	100	27,15	27,22	3,678	313,5	304,5	49	48,2	48,6	0,0027	0,0004	23,50	45,46	0,248	3,14	0,000	0,935	0,138	0,2378	**0,372**			**0,636**
29	100	26,36	26,44	3,788	316	307,3	51,5	51	51,25	0,0028	0,0004	23,96	48,30	0,241	2,95	0,000	0,942	0,122	0,2261	**0,349**			**0,638**
30	100	25,85	25,89	3,865	318	309,15	53,5	52,85	53,175	0,0028	0,0004	24,29	50,35	0,236	2,83	0,000	0,947	0,112	0,2183	**0,335**			**0,639**
31	100	25,4	25,89	3,899	320	310,75	55,5	54,45	54,975	0,0028	0,0004	24,43	52,31	0,229	2,66	0,000	0,952	0,102	0,2095	**0,319**			**0,634**
32	100	24,92	24,93	4,012	322	313	57,5	56,7	57,1	0,0029	0,0004	24,90	54,50	0,226	2,60	0,000	0,954	0,095	0,2036	**0,309**			**0,640**
33	100	24,3	24,09	4,133	325,75	316,75	61,25	60,45	60,85	0,0030	0,0005	25,40	58,45	0,217	2,40	0,000	0,961	0,082	0,1907	**0,286**			**0,639**
34	100	23,72	23,82	4,207	327,75	320,3	63,25	64	63,625	0,0030	0,0005	25,70	61,37	0,210	2,25	0,000	0,965	0,073	0,1815	**0,271**			**0,636**
35	100	23,36	23,46	4,272	331	321,9	66,5	65,6	66,05	0,0030	0,0005	25,96	63,91	0,205	2,14	0,000	0,968	0,067	0,1743	**0,259**			**0,634**
36	100	22,88	22,91	4,368	334,4	326	69,9	69,7	69,8	0,0031	0,0005	26,35	67,81	0,198	1,99	0,000	0,972	0,059	0,1640	**0,242**			**0,630**
37	150	33,84	33,67	4,444	336,35	328,35	71,85	72,05	71,95	0,0031	0,0005	26,66	70,02	0,195	1,93	0,000	0,973	0,055	0,1595	**0,235**			**0,632**
38	150	32,91	33,08	4,546	341,5	333	77	76,7	76,85	0,0032	0,0005	27,06	75,09	0,186	1,76	0,000	0,977	0,047	0,1478	**0,216**			**0,625**
39	150	32,06	31,97	4,685	344,25	336,75	79,75	80,45	80,1	0,0032	0,0005	27,61	78,39	0,183	1,71	0,000	0,979	0,044	0,1431	**0,209**			**0,631**
40	150	31,46	31,7	4,750	347,75	338,5	83,25	82,2	82,725	0,0033	0,0005	27,87	81,08	0,180	1,65	0,000	0,980	0,041	0,1382	**0,201**			**0,630**
41	150	30,69	30,56	4,898	350,7	341,6	86,2	85,3	85,75	0,0034	0,0006	28,44	84,12	0,179	1,63	0,000	0,981	0,039	0,1351	**0,197**			**0,638**
42	150	30,26	30,39	4,946	353,5	344	89	87,7	88,35	0,0034	0,0006	28,63	86,79	0,175	1,56	0,000	0,982	0,036	0,1304	**0,189**			**0,634**
43	150	29	28,94	5,178	368	358,5	103,5	102,2	102,85	0,0034	0,0006	29,52	101,61	0,156	1,25	0,000	0,988	0,025	0,1087	**0,157**			**0,615**
44	150	27,52	27,54	5,449	378	368,5	113,5	112,2	112,85	0,0035	0,0006	30,54	111,71	0,150	1,14	0,000	0,990	0,020	0,0995	**0,143**			**0,618**

Додаток Г.8

Протокол дослідження гідравлічної характеристики дощоприймача

Лабораторія гідравліки кафедри ГВІ, Національний університет "Львівська політехніка" 16.12.23

Дощоприймач Dy 200, Base 400x400 мм, без гідрозатвору, з гратчастою решіткою. Решітка забита по контуру.

Серія №7 **Розміри водоприймального отвору 131x65 мм (4x2 комірки)**

$z_{1,0}$ = **263,8** мм $T_{пов}$ = 16 °C b = **0,131** м L_w = 0,392 м ε_1 = 0,4589 a = 0,553 м

$z_{2,0}$ = **255,5** мм $T_в$ = 16,5 °C α_w = 1 ω_o = 0,00788 м² ε_0 = 0,049 r_1 = 0,479 м

№	W, л	t_1, с	t_2, с	Q, л/с	z_1, мм	z_2, мм	h_1,мм	h_2,мм	h_{mid},мм	V_1, м/с	$V_1^2/2g$	$h_{p.cr}$,мм	h_p,мм	V_p, м/с	$V_p^2/2g$	θ, мм	h_p/h	Fr_w	m	$Fr_{w.US}$	C_w	C_{mix}	C_o
1	20	36,29	37,32	0,543	274,9	266,6	11,1	11,1	11,1	0,0004	0,0000	5,81	3,62	0,383	7,48	0,000	0,326	4,136	0,2676	**2,034**	**0,695**		
2	20	27,64	27,81	0,721	276	267,7	12,2	12,2	12,2	0,0006	0,0000	7,01	4,84	0,380	7,36	0,000	0,397	3,037	0,3083	**1,743**	**0,801**		
3	30	37,55	37,75	0,797	276,2	268	12,4	12,5	12,45	0,0006	0,0000	7,50	5,51	0,369	6,94	0,000	0,442	2,521	0,3303	**1,588**	**0,858**		
4	30	35,2	33,67	0,871	277	268,9	13,2	13,4	13,3	0,0007	0,0000	7,96	5,79	0,384	7,51	0,000	0,435	2,594	0,3271	**1,611**	**0,850**		
5	30	30,78	29,74	0,991	278	270	14,2	14,5	14,35	0,0008	0,0000	8,67	6,41	0,395	7,94	0,000	0,446	2,480	0,3322	**1,575**	**0,863**		
6	30	27,57	27,58	1,088	279,1	270,8	15,3	15,3	15,3	0,0009	0,0000	9,23	6,79	0,409	8,51	0,000	0,444	2,504	0,3311	**1,583**	**0,860**		
7	30	24,74	24,07	1,229	280,7	272	16,9	16,5	16,7	0,0010	0,0000	10,01	7,30	0,429	9,40	0,000	0,437	2,573	0,3280	**1,604**	**0,852**		
8	40	28,99	29,39	1,370	281,3	273	17,5	17,5	17,5	0,0011	0,0001	10,76	8,17	0,428	9,33	0,000	0,467	2,284	0,3409	**1,511**	**0,886**		
9	40	27,42	27,24	1,464	282	274,1	18,2	18,6	18,4	0,0012	0,0001	11,24	8,45	0,442	9,95	0,000	0,459	2,355	0,3377	**1,535**	**0,877**		
10	50	32,76	32,66	1,529	282,7	274,75	18,9	19,25	19,075	0,0012	0,0001	11,57	8,60	0,453	10,47	0,000	0,451	2,435	0,3342	**1,560**	**0,868**		
11	50	30,72	30,79	1,626	283,2	275,2	19,4	19,7	19,55	0,0013	0,0001	12,06	9,21	0,450	10,34	0,000	0,471	2,247	0,3425	**1,499**	**0,890**		
12	50	29,11	29,27	1,713	284,4	276	20,6	20,5	20,55	0,0014	0,0001	12,49	9,30	0,470	11,25	0,000	0,453	2,419	0,3349	**1,555**	**0,870**		
13	50	26,56	26,21	1,895	285,7	277,2	21,9	21,7	21,8	0,0015	0,0001	13,36	10,08	0,479	11,72	0,000	0,462	2,325	0,3391	**1,525**	**0,881**		
14	50	25,43	25,84	1,950	286,55	278,5	22,75	23	22,875	0,0015	0,0001	13,61	9,84	0,506	13,04	0,000	0,430	2,650	0,3247	**1,628**	**0,844**		
15	50	24,53	24,53	2,038	288,5	280,1	24,7	24,6	24,65	0,0016	0,0001	14,02	9,55	0,544	15,10	0,000	0,388	3,160	0,3033	**1,778**	**0,788**		
16	50	23,52	23,69	2,118	288	279,8	24,2	24,3	24,25	0,0017	0,0001	14,38	10,35	0,522	13,90	0,000	0,427	2,688	0,3230	**1,640**	**0,839**		
17	100	41,35	42,39	2,388	289,2	281,2	25,4	25,7	25,55	0,0019	0,0002	15,58	11,68	0,522	13,87	0,000	0,457	2,375	0,3368	**1,541**	**0,875**		
18	50	20,49	20,7	2,428	289,5	281,5	25,7	26	25,85	0,0019	0,0002	15,75	11,79	0,525	14,06	0,000	0,456	2,384	0,3364	**1,544**	**0,874**		
19	100	38	37,95	2,633	291	283	27,2	27,5	27,35	0,0020	0,0002	16,63	12,41	0,541	14,94	0,000	0,454	2,409	0,3353	**1,552**		**0,631**	
20	100	35,62	35,68	2,805	292,2	284,5	28,4	29	28,7	0,0022	0,0002	17,35	12,82	0,558	15,88	0,000	0,447	2,478	0,3323	**1,574**		**0,640**	
21	100	32,78	32,63	3,058	294,05	285,75	30,25	30,25	30,25	0,0024	0,0003	18,37	13,68	0,570	16,57	0,000	0,452	2,423	0,3347	**1,556**		**0,662**	
22	100	31,65	31,75	3,155	295	286,65	31,2	31,15	31,175	0,0024	0,0003	18,76	13,77	0,584	17,40	0,000	0,442	2,527	0,3301	**1,590**		**0,663**	
23	100	30,32	30,46	3,291	296	287,5	32,2	32	32,1	0,0025	0,0003	19,29	14,14	0,594	17,96	0,000	0,441	2,540	0,3295	**1,594**		**0,671**	
24	100	30,17	30,41	3,301	296,1	287,75	32,3	32,25	32,275	0,0025	0,0003	19,34	14,11	0,597	18,17	0,000	0,437	2,576	0,3279	**1,605**		**0,670**	
25	100	29,03	29,12	3,439	297	288	33,2	32,5	32,85	0,0026	0,0004	19,87	14,70	0,597	18,15	0,000	0,448	2,468	0,3327	**1,571**		**0,686**	
26	100	28,11	28,15	3,555	298,5	289,5	34,7	34	34,35	0,0027	0,0004	20,31	14,55	0,623	19,80	0,000	0,424	2,722	0,3216	**1,650**		**0,678**	
27	100	27,95	28	3,575	298,5	290,1	34,7	34,6	34,65	0,0027	0,0004	20,39	14,50	0,629	20,15	0,000	0,419	2,778	0,3192	**1,667**		**0,676**	
28	100	27,22	27,35	3,665	300	291,25	36,2	35,75	35,975	0,0028	0,0004	20,73	14,36	0,651	21,62	0,000	0,399	3,012	0,3093	**1,736**		**0,667**	
29	100	26,89	26,87	3,720	300,5	292	36,7	36,5	36,6	0,0028	0,0004	20,94	32,16	0,295	4,44	0,000	0,879	0,276	0,3060	**0,525**		**0,666**	
30	100	26,56	26,51	3,769	301	292,75	37,2	37,25	37,225	0,0029	0,0004	21,12	32,86	0,293	4,36	0,000	0,883	0,265	0,3022	**0,515**		**0,663**	
31	100	25,95	25,94	3,854	302	293,5	38,2	38	38,1	0,0029	0,0004	21,44	14,43	0,682	23,67	0,000	0,379	3,282	0,2985	**1,812**		**0,663**	
32	100	25,65	25,61	3,902	302,5	294	38,7	38,5	38,6	0,0030	0,0004	21,61	34,31	0,290	4,29	0,000	0,889	0,250	0,2963	**0,500**		**0,662**	
33	100	25,18	25,24	3,967	303	295	39,2	39,5	39,35	0,0030	0,0005	21,85	35,12	0,288	4,23	0,000	0,892	0,241	0,2927	**0,491**		**0,660**	
34	100	24,69	24,68	4,051	304,25	296	40,45	40,5	40,475	0,0031	0,0005	22,16	14,47	0,714	26,01	0,000	0,357	3,596	0,2865	**1,896**		**0,656**	
35	100	24,24	24,12	4,136	306	297	42,2	41,5	41,85	0,0031	0,0005	22,47	14,37	0,734	27,48	0,000	0,343	3,826	0,2782	**1,956**		**0,647**	
36	100	23,82	23,87	4,194	307	298,5	43,2	43	43,1	0,0031	0,0005	22,68	14,21	0,753	28,89	0,000	0,330	4,066	0,2699	**2,017**		**0,637**	
37	100	23,05	23,04	4,339	309	300,5	45,2	45	45,1	0,0032	0,0005	23,20	14,22	0,778	30,88	0,000	0,315	4,342	0,2609	**2,084**			**0,586**
38	100	22,51	22,54	4,440	311	302,25	47,2	46,75	46,975	0,0033	0,0006	23,56	14,10	0,803	32,87	0,000	0,300	4,662	0,2511	**2,159**			**0,587**
39	100	22,18	22,27	4,499	312	303	48,2	47,5	47,85	0,0033	0,0006	23,77	14,11	0,814	33,74	0,000	0,295	4,784	0,2476	**2,187**			**0,590**
40	100	21,94	21,85	4,567	313	305	49,2	49,5	49,35	0,0034	0,0006	24,01	13,99	0,833	35,36	0,000	0,283	5,056	0,2399	**2,249**			**0,589**
41	100	21,46	21,35	4,672	316	307	52,2	51,5	51,85	0,0034	0,0006	24,37	13,79	0,864	38,06	0,000	0,266	5,519	0,2279	**2,349**			**0,588**
42	100	20,96	20,93	4,774	317,75	309,5	53,95	54	53,975	0,0035	0,0006	24,73	13,70	0,889	40,27	0,000	0,254	5,879	0,2193	**2,425**			**0,589**
43	100	20,39	20,47	4,895	319,6	311,5	55,8	56	55,9	0,0036	0,0006	25,14	13,73	0,910	42,17	0,000	0,246	6,145	0,2133	**2,479**			**0,594**
44	200	40,25	40,23	4,970	321	312,5	57,2	57	57,1	0,0036	0,0007	25,40	13,75	0,922	43,35	0,000	0,241	6,307	0,2098	**2,511**			**0,596**
45	200	39,52	39,71	5,049	323	314,5	59,2	59	59,1	0,0037	0,0007	25,67	13,64	0,944	45,46	0,000	0,231	6,668	0,2024	**2,582**			**0,595**
46	200	39,07	38,99	5,124	325,5	316,5	61,7	61	61,35	0,0037	0,0007	25,92	13,49	0,969	47,86	0,000	0,220	7,096	0,1942	**2,664**			**0,593**
47	200	38,57	38,63	5,181	326	317,25	62,2	61,75	61,975	0,0037	0,0007	26,11	13,56	0,975	48,41	0,000	0,219	7,140	0,1934	**2,672**			**0,597**
48	200	38,05	38,05	5,256	326,5	318	62,7	62,5	62,6	0,0038	0,0007	26,37	13,69	0,980	48,91	0,000	0,219	7,147	0,1933	**2,673**			**0,602**
49	200	37,52	37,52	5,330	330	322	66,2	66,5	66,35	0,0038	0,0007	26,61	13,33	1,020	53,02	0,000	0,201	7,953	0,1796	**2,820**			**0,593**
50	200	36,67	36,63	5,457	333	325,5	69,2	70	69,6	0,0039	0,0008	27,03	13,24	1,052	56,36	0,000	0,190	8,515	0,1712	**2,918**			**0,593**