

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

КРАВЧУК ОЛЕКСАНДР АНДРІЙОВИЧ



УДК 628.112.3 : 628.112.13 : 628.396

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ
РОБОТИ ДРЕНАЖНИХ ТРУБОПРОВІДІВ СИСТЕМ
ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ**

Спеціальність 05.23.04 – Водопостачання, каналізація

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2026

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
ТКАЧУК ОЛЕКСАНДР АНДРІЙОВИЧ,
професор кафедри міського будівництва та господарства Національного університету водного господарства та природокористування.

доктор технічних наук, старший дослідник
ЯЦЮК МИХАЙЛО ВАСИЛЬОВИЧ,
директор Інституту водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України.

доктор технічних наук, доцент,
КАРАГЯУР АНДРІЙ СТЕПАНОВИЧ,
завідувач кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова.

Захист дисертації відбудеться 17 червня 2026 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, ауд. 319.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31 або за посиланням: <https://www.knuba.edu.ua/zahyst-doktorskoyi-dysertacziyi-kravchuka-oleksandra-andrijovycha/>

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.056.07
кандидат технічних наук, доцент



Тетяна АРГАТЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. У сучасних умовах якість води у відкритих водних джерелах України в багатьох випадках є незадовільною. Їх використання для потреб водопостачання населених пунктів і промислових підприємств суттєво ускладнюється і останнім часом стає досить проблематичним. Насамперед це пов'язано з досить великою вартістю очищення поверхневих вод. Тому цілком зрозуміла увага, яка приділяється проєктуванню і застосуванню водозабірних споруд з підземних джерел. Одними з найвідоміших і розповсюджених на практиці споруд для забору підземних вод, поряд із шахтними та трубчатими колодзями, є променеві і горизонтальні водозабори різних конструкцій.

Аналіз роботи даних споруд показує, що ефективність їх роботи в основному визначається якістю і специфічністю конструкції водоприймальних елементів, які зазвичай являють собою дренажні трубопроводи, в які вода надходить крізь бічну поверхню у фільтраційному режимі. Також дренажні трубопроводи застосовуються під час проєктування збірних і розподільчих систем для очистки стічних вод, роботи зрошувальних і дренажних систем. Відомо, що дані дренажні трубопроводи працюють у напірному режимі зі змінною витратою за своєю довжиною. Розробка і вдосконалення методик розрахунку їх конструктивних і фільтраційних параметрів дозволить забезпечити надійну роботу зазначених систем, раціональніше використовувати досить обмежені водні ресурси, оптимізувати розміри і конструкції самих споруд, забезпечити необхідну якість очистки води, що споживається і відводиться, і тим самим зробити суттєвий внесок у справу збереження здоров'я населення, охорони і раціонального використання поверхневих і підземних водних джерел. Тому проблему розробки сучасної, більш досконалої методики розрахунку зазначених споруд безумовно слід вважати актуальною. Її необхідно розв'язати із застосуванням основних положень теорії руху рідини зі змінною витратою в напірних трубопроводах, максимально використавши накопичений аналітичний матеріал та експериментальні дані, які враховують особливості руху рідини у напірних дренажних трубопроводах систем водопостачання та водовідведення. Також доцільно дослідити гідродинаміку потоків зі змінною витратою вздовж шляху і на цій основі розробити більш надійні та сучасні фізичні і математичні моделі для опису вивчаємих течій.

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

Робота виконувалась згідно держаних програм: «Концепція розвитку водного господарства України» та «Охорона навколишнього середовища і раціональне використання природних ресурсів України» і безпосередньо пов'язана з планами наукового напрямку кафедри водопостачання і водовідведення Київського національного університету будівництва і архітектури на замовлення Міністерства освіти і науки України (№

держреєстрації 0122U200386 «Забезпечення споживачів якісною питною водою в умовах сучасних викликів»).

Мета дисертаційної роботи полягає у науковому обґрунтуванні основних закономірностей руху рідини зі змінною витратою в напірних дренажних трубопроводах систем водопостачання та водовідведення, у яких зміна витрати вздовж шляху здійснюється через їх бічну поверхню у режимі фільтрації, і розробці на цій основі сучасних і досконалих методів розрахунку конструктивних і фільтраційних характеристик напірних збірних і розподільчих дренажних перфорованих трубопроводів.

Задачі дослідження:

- проаналізувати базові математичні моделі, за допомогою яких описується рух рідини зі змінною витратою в напірних дренажних трубопроводах систем водопостачання та водовідведення, у яких витікання і витікання рідини відбувається у режимі фільтрації;

- із застосуванням елементів теорії подібності визначити основні критерії, які характеризують рух рідини зі змінною витратою за довжиною трубопроводів, а також оцінити їх вплив на параметри досліджуваних потоків;

- оцінити вплив транзитної витрати та похилу прокладання напірних дренажних трубопроводів і поверхні рівня ґрунтових вод на параметри їх роботи;

- розробити порядок розрахунку напірних дренажних трубопроводів, який враховує зміну за довжиною діаметра трубопроводу та необхідний ступінь перфорації бічної поверхні, що забезпечують задані умови роботи;

- запропонувати методіку розрахунку ефективних конструктивних і фільтраційних характеристик напірних дренажних трубопроводів, у яких надходження або витікання рідини через бічні стінки за довжиною здійснюється у фільтраційному режимі;

- обґрунтувати структуру та особливості математичних моделей і на їх основі отримати аналітичні залежності для розрахунку напірних дренажних трубопроводів систем водопостачання та водовідведення, які працюють в ускладнених умовах, тобто за одночасного впливу на потік в дрени кількох змінних параметрів;

- провести експериментальні дослідження впливу конструктивних і фільтраційних характеристик напірних дренажних трубопроводів на умови їх роботи та на основі обробки отриманих даних запропонувати відповідні залежності для їх опису;

- розробити практичні рекомендації для розрахунку та проектування перфорованих дренажних труб у випадку їх застосування в променевих і горизонтальних водозаборах та інших спорудах систем водопостачання та водовідведення.

Об'єкт дослідження – напірні збірні і розподільчі перфоровані дренажні трубопроводи систем водопостачання та водовідведення з фільтраційним режимом зміни витрати за їх довжиною.

Предмет дослідження – основні гідравлічні характеристики руху рідини зі змінною витратою в напірних збірних і розподільчих перфорованих дренажних трубопроводах систем водопостачання та водовідведення.

Методи дослідження – фізичне і математичне моделювання основних параметрів руху основного потоку рідини у напірних дренажних трубопроводах систем водопостачання та водовідведення, які працюють за умов безперервного за довжиною приєднання і від'єднання рідини, що відбувається через бічні стінки у режимі фільтрації; застосування сучасних аналітичних, експериментальних і чисельних методів та надійного вимірювального обладнання для визначення ефективних гідравлічних, конструктивних і фільтраційних характеристик досліджуваних систем.

Наукова новизна одержаних результатів:

- на основі комплексних теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовано нові фундаментальні результати, які полягають в отриманні оригінальних аналітичних розв'язків вихідних диференціальних рівнянь і їх експериментальному підтвердженні, що дозволило удосконалити існуючі математичні моделі та методики розрахунку конструктивних і фільтраційних характеристик напірних дренажних трубопроводів систем водопостачання та водовідведення, у яких збір або роздача рідини через бічні стінки відбувається у фільтраційному режимі;

- вперше на основі отриманих аналітичних розв'язків вихідної системи диференціальних рівнянь, яка описує рух рідини зі змінною за довжиною витратою, одержано оригінальні математичні залежності для розрахунку параметрів напірних збірних та розподільчих дренажних трубопроводів за умови пропуску транзитної витрати, здійснено кількісну оцінку похибки, що виникає в розрахунках за умови її нехтуванням;

- вперше розроблено математичні моделі для випадку роботи напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводів за наявності прямого або зворотного похилу їх прокладання та похилу рівня ґрунтових вод і запропоновано їх розв'язки; оцінено величину похибки, яка вноситься в розрахунок кінцевої або початкової витрати похильного трубопроводу за умови неврахування цього похилу;

- проаналізовано та науково обґрунтовано вдосконалені математичні моделі, які описують рух рідини в напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводах постійного та змінного за довжиною діаметра, у яких збір або роздача рідини через бічні стінки здійснюється через шар фільтрувального матеріалу;

- вперше сформульовано поняття ефективних конструктивних і фільтраційних характеристик напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводів, які забезпечують задані умови роботи;

- вперше обґрунтовано структуру та особливості математичних моделей, які описують роботу напірних дренажних трубопроводів в ускладнених умовах, розроблено аналітичні залежності для розрахунку їх конструктивних і фільтраційних характеристик;

- запропоновано фізичні моделі напірних дренажних трубопроводів, на яких експериментально отримано емпіричні формули для визначення величини гідравлічного коефіцієнта тертя $\lambda_{др}$.

Практичне значення одержаних результатів.

На основі запропонованих математичних моделей, що описують рух рідини зі змінною витратою, розроблено методики розрахунку ефективних конструктивних і фільтраційних характеристик напірних дренажних трубопроводів систем водопостачання та водовідведення, які, зокрема, працюють в ускладнених умовах. Впроваджені в проектну практику емпіричні залежності для розрахунку параметрів зазначених трубопроводів, отримані на основі проведених експериментальних досліджень, дозволяють забезпечити надійний режим експлуатації відповідних інженерних споруд.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у компанії ТОВ «БК «Спецбудсервіс» для зниження рівня ґрунтових вод у долині р. Либідь м. Києва; на підприємстві «Сінто-сервіс» в проекті відводу ґрунтових вод з майданчика будівництва ТРЦ «Respublika Park», м. Київ; в ТОВ «Інститут комунальної інфраструктури» під час виконання «Підпроекту водопостачання м. Миколаєва – 2 МУК-211», в проекті №26-07.24/2 підземних горизонтальних водозабірних споруд м. Трускавець Львівської обл.; в ТОВ «ІНТЕР ЄВРО БІЗНЕС» під час розробки заходів щодо зменшення підтоплень ґрунтовими водами в с. Нові Петрівці Київської обл.; в проектах ТОВ «ПОБІ Вотер Інжиніринг» для відведення очищених господарсько-побутових і дощових вод на поля фільтрації у Бориспільському р-ні Київської обл, Самбірському р-ні Львівської обл. Окремі науково-методичні розробки впроваджені в Київському національному університеті будівництва та архітектури під час викладання навчальних курсів з дисциплін «Водопостачання та водовідведення», «Спеціальні питання гідравліки систем водопостачання та водовідведення», «Масопередача в спорудах систем водопостачання та водовідведення».

Наукова робота має суттєвий соціальний ефект, оскільки використання представлених методик розрахунку дренажних трубопроводів систем водопостачання та водовідведення сприяє поліпшенню якості питної води для населення та екологічного стану довкілля.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові ідеї, положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертації отримано, розроблено і сформульовано особисто здобувачем. Автором проаналізовано та науково обґрунтовано математичні моделі, які описують рух рідини зі змінною витратою в напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводах систем водопостачання та водовідведення, у яких надходження і витікання рідини через бічні стінки відбувається у фільтраційному режимі; отримано аналітичні залежності для розрахунку досліджуваних трубопроводів за умови пропуску транзитної витрати, за наявності похилу трубопроводу або похилу рівня ґрунтових вод; представлено методику розрахунку ефективних конструктивних і фільтраційних характеристик напірних дренажних

трубопроводів, які забезпечують заданий режим їх експлуатації; вперше розроблено і представлено методики розрахунку дренажних трубопроводів, які працюють в ускладнених умовах; виконано апробацію отриманих методик розрахунку на конкретних інженерних об'єктах. Ідеї співавторів наукових праць в дисертаційній роботі не використовувались.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень і головні положення дисертації доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на наступних міжнародних науково-практичних конференціях: «Енергія. Ресурси. Екологія» (ERE) (м. Київ, КНУБА, 2021, 2025 рр.); «Зелене будівництво» (м. Київ, КНУБА, 2023, 2024 рр.); «Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти», (м. Київ, НТУУ «КПІ», 2023, 2025 рр.); «БУД-МАЙСТЕР-КЛАС» (м. Київ, КНУБА, 29 листопада – 1 грудня 2023 р.); «Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології» (м. Одеса, ОДАБА, 13 – 14 грудня 2023 р.); «Інновації у будівництві» (м. Луцьк, ЛНТУ, 14 травня 2024 р.); «ЕкоКомфорт та актуальні питання в будівництві» (м. Львів, НУ «Львівська політехніка», 11 – 13 вересня 2024 р.); «Роль меліорації та водного господарства у забезпеченні сталого розвитку сільського господарства» (м. Київ, ІВПіМ НААН, 10 жовтня 2024 р.); «Scientific innovation: theoretical insights and practical impacts» (м. Неаполь, Італія, 13 – 15 січня 2025 р.); «Modern problems of science and technology», (м. Таллін, Естонія, 17 – 19 березня, 2025 р.).

Публікації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 42 наукові праці, серед яких: 5 статей у періодичних наукових виданнях, що індексуються в наукометричній базі Scopus; 1 монографія; 23 статті у наукових виданнях, які входять до Переліку наукових фахових видань України категорії Б; 13 публікацій у збірниках матеріалів та доповідей міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 397 найменувань і 4 додатків. Робота викладена на 289 сторінках основного тексту, включає 60 рисунків, 1 таблицю, всього 385 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі, визначено об'єкт, предмет та методи досліджень, охарактеризовано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про апробацію, наукові публікації та впровадження результатів дослідження.

У першому розділі проведено критичний аналіз теоретичних досліджень і методів розрахунку конструктивних і технологічних характеристик напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводів систем водопостачання та водовідведення, в яких приєднання і від'єднання рідини вздовж шляху через

бічні стінки здійснюється у фільтраційному режимі. Показано, що характер надходження (або витікання) рідини в трубопровід, разом з матеріалом стінок, в основному визначається сумісним впливом руху рідини всередині дрени та в навколишньому ґрунті.

Розглянуто основні приклади та способи застосування збірних і розподільчих дренажних трубопроводів в інженерній практиці. Зокрема при проектуванні підземних водозаборів систем водопостачання. Типові плани влаштування конструкцій променевих водозаборів наведено на рис. 1.

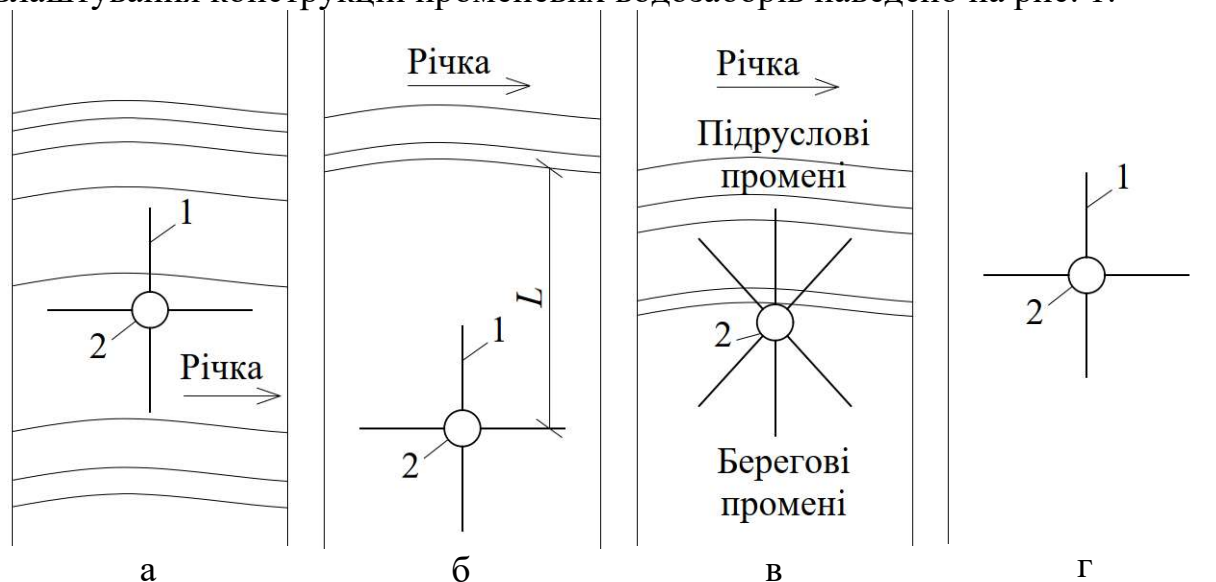


Рис. 1. Схеми влаштування променевих водозаборів у плані:
а) підрусловий; б) береговий; в) комбінований; г) водороздільний

Під час вирішення конкретних інженерних задач для опису руху рідини у наволодренному просторі розглядається так звана плоска задача, згідно з якою реальний просторовий фільтраційний потік замінюється плоским у вертикальному напрямку потоком рідини. Показано, що досить часто плоска фільтрація може бути замінена одновимірною, коли гідродинамічні характеристики фільтраційного потоку, тобто швидкість фільтрації і п'езометричний напір, є функціями однієї ординати.

Так, у роботах О.Я. Олійника і В.Л. Полякова під час розв'язання зовнішньої задачі руху рідини розглянуто профільну (одномірну) модель фільтрації до недосконалої дрени в однорідному ґрунті у вигляді:

$$T \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

де $T = km_c$; $m_c = m_{oc} + \frac{h_k - m_d}{L + 2\Phi}$; h_k – глибина води у водоймі; m_{oc} – середня глибина закладання дрени відносно водоупору; L – відстань від дрени до урізу води.

Поряд з точними теоретичними методами розрахунку усталеної фільтрації, окремі автори, наприклад М.Г. Хубларян, В.С. Кремез, С.Н. Антонцев тощо, завдяки застосуванню графічних методів, методів кінцевих

різниць, конформного відображення, фрагментів, варіаційних методів, розглядали так звані наближені теоретичні методи.

Схожий підхід, із застосуванням методу фільтраційних опорів, під час опису руху рідини в дренажному трубопроводі, який розташований під дном водойми, зокрема під рисовими чеками, застосовано авторами С.Н. Нумеровим та Ю.П. Борисовим. В подальшому його було обґрунтовано і удосконалено в роботах О.Я. Олійника та інших дослідників. Водночас автори розділяли зовнішній F_i та внутрішній Φ_i опори i -го променя довжиною l . Визначенню цих параметрів також присвячено роботи Н.Г. Пивовара, С.К. Абрамова, А.В. Романова, В.О. Майбороди тощо.

На підставі наведеного матеріалу можна обґрунтовано зробити загальний висновок, що використання методу фільтраційних опорів є доцільним, ефективним і перспективним, бо дозволяє практично без зменшення точності інженерних розрахунків значно спростити розв'язок задач фільтрації в складних гідрогеологічних і природних умовах.

Варто також зауважити, що в даний час авторами G. Cocchi, D. Citrini, F.-K. Falke тощо запропоновано ряд спрощених емпіричних залежностей для розрахунку зазначених систем.

У другому розділі проаналізовано сучасні теоретичні підходи, які застосовуються при описі руху рідини в напірних трубопроводах, що працюють зі змінною витратою вздовж шляху. Основою для такого аналізу є теорія руху рідини зі змінною витратою.

Як відомо, засновником теорії руху тіл зі змінною масою вважається І.В. Мещерський, який в кінці XIX і на початку XX століття опублікував ряд робіт, присвячених даній проблемі. Подальший розвиток теорії руху рідини зі змінною витратою в напірних трубопроводах пов'язаний з працями Н.Г. Малішевського, В.М. Маккавеева, І.М. Коновалова, G.S. McNown, J.H. Horlock тощо, які застосували основні закони механіки для опису цих процесів. Так, І.М. Коновалов, розглядаючи елементарний об'єм потоку рідини в стані динамічної рівноваги, вивів загальне рівняння одновимірного плавномірного неусталеного руху рідини зі змінною витратою вздовж шляху у вигляді:

$$\frac{1}{g} \int \frac{1-m}{\Omega} \frac{\partial Q}{\partial t} dx - \frac{1}{g} \int \frac{\partial V}{\partial t} dx + \frac{1}{2g} \int \frac{1-m}{\Omega^2} d(Q^2) + \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z + h_l = C(t), \quad (2)$$

де Q , V , P , Ω – відповідно, витрата, середня швидкість, п'єзометричний тиск і площа живого перерізу потоку на відстані x від початку труби;

$m = \frac{\theta}{V} = \frac{U_o \cos \varphi}{V}$ – проєкція швидкості руху приєднуваної (від'єднуваної)

маси U_o на вісь основного потоку; φ – кут, під яким відбувається від'єднання або приєднання струминки рідини до основного потоку; z – відстань від осі перерізу до площини зрівняння; h_l – втрати напору на гідравлічне тертя; $C(t)$ – деяка стала інтегрування у функції часу.

Для усталеного потоку, приймаючи $m = const$, після диференціювання залежності (2), для випадку прийняття втрат напору на елементарній ділянці за формулою Дарсі, вона буде мати вигляд:

$$\frac{dh}{dx} + \frac{n}{g} V \frac{dV}{dx} + \frac{\lambda}{2gD} V^2 = 0, \quad (3)$$

де $n = \alpha_0(2 - m)$; α_0 – коефіцієнт кількості руху (коефіцієнт Бусінеска).

Однак самого лише рівняння руху рідини зі змінною витратою недостатньо для опису цих явищ та отримання конкретних результатів. Зазвичай його доповнюють рівнянням нерозривності. За даними О.Я. Олійника, В.В. Пивовара, В.О. Майборода, М.Г. Хубларяна, І.І. Науменко, А.Ф. Дмитрієва, М.М. Хлапука, О.А. Ткачука, D. Claudio для усталеного потоку нестисливої рідини за її надходження в трубу або витікання з неї в режимі фільтрації, що має місце в дренажних трубопроводах підземних водозаборів систем водопостачання, його представляють у вигляді модифікованого рівняння фільтрації:

$$\frac{dQ}{dx} = \pm k_\phi \frac{\Delta H}{\bar{\Phi}}, \quad (4)$$

де k_ϕ – коефіцієнт фільтрації навколишнього ґрунту; $\bar{\Phi}$ – загальний фільтраційний опір дрени; ΔH – напір під дією якого відбувається втікання або витікання рідини в трубу. Знак «+» відповідає випадку приєднання частини об'єму до основного потоку, знак «-» – від'єднання.

У результаті розв'язку вихідної системи диференціальних рівнянь (3), (4) всі автори намагались отримати аналітичні залежності для розрахунку параметрів руху рідини зі змінною витратою в напірних дренажних трубопроводах. Однак, у зв'язку з труднощами математичного характеру, цього поки що досягти не вдалося. Тому для отримання конкретних результатів окремі автори під час аналізу цієї системи рівнянь застосовували певні припущення та спрощення. За даними Г.А. Петрова, І.М. Коновалова, Я.Т. Ненько, М.М. Андріяшева, А.І. Terrill R., Yuan S. тощо найбільш простим і поширеним з них вважається прийняття рівномірної зміни витрати рідини за довжиною дрени ($dQ/dx = const$). Також широко розповсюдженим вважається припущення щодо прийняття постійним за величиною діючого напору вздовж трубопроводу ($dH/dx = 0$). Дане питання проаналізовано в роботах А.І. Єгорова, І.М. Миркіса, В.А. Клячко, Д.М. Мінца, Т.А. Howell, А. Niler тощо. Багато дослідників у своїх працях, в тому числі Х.А. Навоян, В.В. Смилов, В.Н. Талієв, Z. Siwon тощо, під час вирішення цього питання намагались різним шляхом спростити рівняння (3). Зокрема, як це продемонстровано в роботах О.Я. Олійника, В.Л. Полякова, О.А. Василенка, Я.А. Тугая, С.В. Телими тощо, де розглядався варіант лінеаризації третього члена в рівнянні (3). Для трубопроводів відносно великої чи незначної довжини А.М. Грабовський, І.Є. Ідельчик, А.А. Федорець, G. Wallis тощо під час розв'язання цієї задачі нехтували, відповідно, другим або третім членом у вихідному рівнянні. Зважаючи на складність описаної задачі, Т.Г. Войнич-Сяножецький,

О.Я. Олійник, М.Г. Хубларян, В.Н. Талієв, В.О. Майборода, І.І. Науменко тощо пропонували її розв'язання на ЕОМ.

На основі проведеного в роботі аналізу літературних джерел з досліджуваного питання, можна зробити висновок, що дотепер загальноприйнятих точних аналітичних розв'язків вихідної системи диференціальних рівнянь (3), (4), у зв'язку зі складнощами математичного характеру, не запропоновано. Для існуючих часткових спрощених розв'язків автори, як правило, не оцінювали можливі похибки, які вносяться при цьому в кінцевий результат.

У третьому розділі проаналізовано вихідну математичну модель (3), (4) для випадку роботи напірного збірною дренажного трубопроводу, у якого втікання рідини з навколишнього ґрунту відбувається через бічні стінки в режимі фільтрації. Схему роботи таких труб наведено на рис. 2.

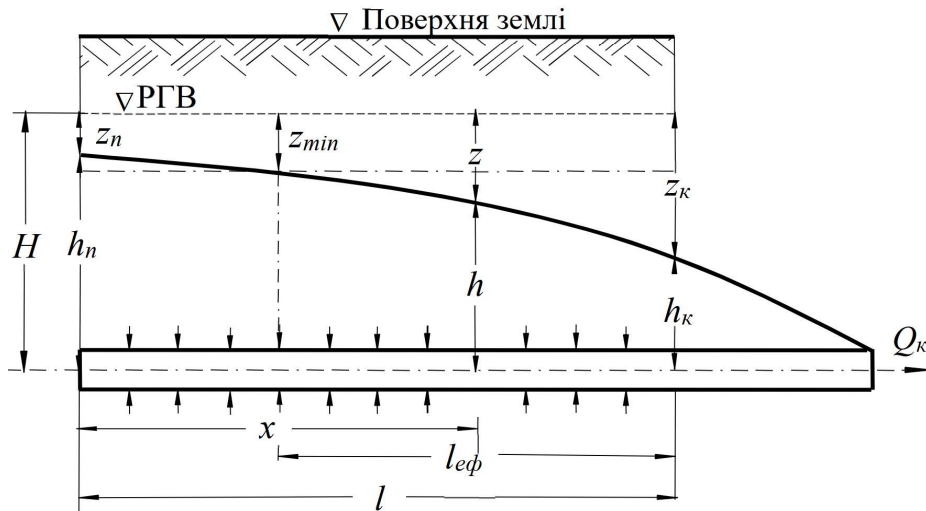


Рис. 2. Схема роботи напірного збірною дренажного трубопроводу

Шляхом введення нових змінних

$$\bar{V} = \frac{V}{\sqrt{gz_k}}; \quad \bar{x} = \frac{k_\phi x}{\Omega \Phi} \sqrt{\frac{z_k}{g}}; \quad \bar{z} = \frac{z}{z_k} \quad (5)$$

вихідна система рівнянь зводиться до безрозмірного вигляду:

$$-\frac{d\bar{z}}{d\bar{x}} + 2\bar{V} \frac{d\bar{V}}{d\bar{x}} + \zeta_{l_{зб}} A \bar{V}^2 = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{V}}{d\bar{x}} = \bar{z}, \quad (7)$$

де $\zeta_{l_{зб}} = \lambda_{зб} \frac{l}{D}$ – коефіцієнт опору збірною дренажного трубопроводу;

$A = \frac{1}{2\bar{x}_k} = \frac{\Omega \Phi}{2k_\phi l} \sqrt{\frac{g}{z_k}}$ – узагальнений параметр збірною дрени, який враховує її

конструктивні та фільтраційні характеристики.

У зв'язку із значною довжиною вивчаємих труб, другим членом в рівнянні (6), без суттєвої похибки, можна знехтувати. З огляду на це, у результаті аналізу вихідної системи рівнянь отримано такі розрахункові залежності:

- відносна швидкість руху рідини в довільному перерізі

$$\bar{V} = \bar{V}_{к.∞} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1-x/l}{4A\bar{V}_{к.∞}}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4A\bar{V}_{к.∞}}\right)^2} \right]; \quad (8)$$

- відносний перепад напорів у цьому ж перерізі

$$\bar{z} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1-x/l}{4A\bar{V}_{к.∞}}\right)^3}. \quad (9)$$

Під час дослідження роботи даних труб в дисертації до розгляду введено поняття умовного нескінченно довгого напірного збірною дренажного трубопроводу. Його також можна розглядати, як трубопровід конкретної довжини і діаметра, який має нескінченно малий фільтраційний опір або, що те ж саме, нескінченно велику просякненість бічних стінок. Очевидно, що цей трубопровід у кінцевому перерізі буде мати найбільшу пропускну спроможність (відносну швидкість) порівняно зі збірними дренажними трубопроводами з такими ж конструктивними і фільтраційними характеристиками, але конкретної кінцевої довжини. Величину цієї швидкості можна визначити зі співвідношення:

$$\bar{V}_{к.∞} = \sqrt[3]{\frac{3}{2\zeta_{зб} A}} \quad (10) \quad \text{або} \quad V_{к.∞} = \sqrt[3]{\frac{12k_{\phi}}{\lambda_{зб} \pi D \Phi} g z_{к}^2}, \text{ м/с.} \quad (11)$$

Оцінено вплив транзитної витрати на роботу збірника. Розроблено методику розрахунку його основних характеристик для цього випадку. Визначено граничну величину транзитної витрати, якою, не перевищуючи задану точність розрахунку $\delta = \bar{V}_{к.мп.∞} / \bar{V}_{к.∞} - 1$, можна знехтувати:

$$\bar{V}_{мп} \leq \bar{V}_{к} \sqrt[3]{(1 + \delta)^3} - 1, \quad (12)$$

де $\bar{V}_{к.мп.∞}$ – відносна швидкість в кінці нескінченно довгого напірного збірною дренажного трубопроводу у випадку одночасного пропуску по ньому транзитної витрати; $\bar{V}_{мп}$ – відносна швидкість, яка має місце за пропуску трубопроводом тільки транзитної витрати.

Під час роботи напірних збірних дренажних трубопроводів витрата за їх довжиною постійно збільшується. Очевидно, що за сталого діаметра труба буде використовуватись неефективно. Більш раціональним вважається варіант застосування трубопроводу змінного (такого, що збільшується) діаметра за довжиною. Так, для випадку сталої за величиною економічно найвигіднішої

відносної середньої швидкості руху основного потоку (\bar{V}), отримано залежність для опису закону зміни величини відносного діаметра за довжиною трубопроводу:

$$\bar{D} = \sqrt[3]{\left(3\zeta_{l_{зб.к}} A \bar{V}^2 \bar{x}\right)^2} \quad (13) \quad \text{або} \quad D = D_{\kappa} \sqrt[3]{\left(\frac{3}{z_{\kappa}} \zeta_{l_{зб.к}} \frac{V^2 x}{2g l}\right)^2}, \text{ м}, \quad (14)$$

$$\text{де } \zeta_{l_{зб.к}} = \lambda_{зб} \frac{l}{D_{\kappa}}; \quad \bar{D} = \frac{D}{D_{\kappa}}; \quad \bar{x} = \frac{k_{\phi} x}{\Omega_{\kappa} \bar{\Phi}} \sqrt{\frac{z_{\kappa}}{g}}; \quad A = \frac{\Omega_{\kappa} \bar{\Phi}}{2k_{\phi} l} \sqrt{\frac{g}{z_{\kappa}}}.$$

Індекс «к» означає, що даний параметр розраховано за його значенням в кінцевому перерізі.

Введено до розгляду поняття ефективних конструктивних характеристик напірного збірного дренажного трубопроводу: ефективної довжини (l_{ef}) та ефективного діаметра (d_{ef}). Під ефективною довжиною розуміють мінімальну довжину ділянки труби заданого діаметра, на якій забезпечується надходження в неї необхідної витрати рідини. Під ефективним діаметром – найменший діаметр, який забезпечує задану кінцеву витрату за відомої довжини труби.

Як слідує із залежності (4), інтенсивність притоку до дрени в загальному випадку q залежить від коефіцієнта фільтрації ґрунту k_{ϕ} , фільтраційного опору дрени $\bar{\Phi}$ і перепаду напорів ΔH або z . За відомих із фільтраційних розрахунків величин $\bar{\Phi}$ і k_{ϕ} , мінімально допустиме значення q_{\min} буде визначатись величиною z_{\min} (на рис. 2 величина напору z , яка відділена пунктирною горизонтальною площиною). Таким чином, ефективно буде працювати тільки частина труби від кінцевого перерізу до точки перетину горизонтальної площини з п'єзометричною лінією. Очевидно, що проектувати збірні дренажні трубопроводи довжиною більшою ніж l_{ef} , буде нераціонально, оскільки та частина труби, яка перевищує l_{ef} (на рис. 2 частина труби ліворуч від точки перетину), буде працювати неефективно, тобто, не буде забезпечувати мінімально необхідну величину надходження витрати води q_{\min} . Водночас ефективне значення узагальненого параметра збірного дренажного трубопроводу A_{ef} слід розраховувати за формулою:

$$A_{ef.зб} = \frac{1}{4\bar{V}_{\kappa.\infty} \left(\frac{1}{\sqrt[3]{z_{n.ef}}} - 1 \right)} \quad \text{або} \quad A_{зб.ef} = \frac{1}{4\bar{V}_{\kappa.\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{\delta}} - 1 \right)}. \quad (15)$$

З (15) ефективна довжина збірного дренажного трубопроводу (м) буде:

$$l_{ef} = \sqrt[3]{\frac{3g\pi^2 \bar{\Phi}^2 D^5}{2\lambda_{зб} k_{\phi}^2 z_{\kappa}} \left(\frac{1}{\sqrt{\delta}} - 1 \right)}, \quad (16)$$

а ефективний діаметр (м):

$$D_{ef} = \sqrt[5]{\frac{2\lambda_{3\sigma} k_{\phi}^2 z_{\kappa} l^3}{3g\pi^2 \bar{\Phi}^2 \left(\frac{1}{\sqrt{\delta}} - 1\right)^3}}. \quad (17)$$

Проведено аналіз роботи напірних збірних дренажних трубопроводів для випадку їх прямого ($i > 0$) або зворотного ($i < 0$) похилу прокладання, за горизонтального ($\bar{I} = 0$), прямого ($\bar{I} > 0$) і зворотного ($\bar{I} < 0$) похилах рівня ґрунтових вод (РГВ).

У цьому випадку для збірного дренажного трубопроводу вихідна математична модель (6), (7) за допомогою якої описується даний процес, в безрозмірних змінних (5) набуде вигляду:

$$\frac{d\bar{z}_i}{d\bar{x}_i} = \zeta_{l_{3\sigma}} A_{3\sigma} \bar{V}_i^2 \mp B. \quad (18)$$

$$\frac{d\bar{V}_i}{d\bar{x}_i} = \bar{z}_i, \quad (19)$$

де $B = \frac{2l_i A I}{z_{\kappa.i}}$ – параметр, який комплексно враховує вплив похилу РГВ і дрени

на характеристики потоку; $I = \bar{I} - i$; індекс « i » біля змінних параметрів означає, що вони належать до трубопроводу, прокладеного з похилом; знак « $+$ » відповідає прямому похилу трубопроводу, знак « $-$ » – зворотному.

Встановлено, що параметри трубопроводів у цьому випадку можна розраховувати за залежностями (8), (9) за умови, що параметр $\bar{V}_{\kappa.\infty.i}$, який враховує величину відносної швидкості потоку в кінці нескінченно довгого похильного дренажного трубопроводу, визначається з кубічного рівняння:

$$\frac{2A\zeta_{l_{3\sigma}}}{3} \bar{V}_{\kappa.\infty.i}^3 \mp 2B\bar{V}_{\kappa.\infty.i} = 1. \quad (20)$$

Визначено умови, за яких напірні збірні дренажні трубопроводи слід відносити до похильних або малопохильних. Водночас, похильними вважаються труби, у яких похил перевищує за величиною граничне значення I_{gp} . В протилежному випадку труби вважаються малопохильними. Критерієм оцінки прийнято величину витрати в кінцевому перерізі. Граничне значення похилу I_{gp} , вплив якого, в межах прийнятої похибки δ , можна не враховувати в розрахунках, рекомендується знаходити за залежністю:

$$I_{gp} = \pm \frac{(1+\delta)^3 - 1}{1+\delta} \bar{E}, \quad (21)$$

де $\bar{E} = \frac{z_{\kappa.i}}{4l_i A \bar{V}_{\kappa.i}}$, $\delta = 1 - \frac{\bar{V}_{\kappa}}{\bar{V}_{\kappa.i}}$, \bar{V}_{κ} і $\bar{V}_{\kappa.i}$ – відповідно, відносна швидкість в кінці горизонтального і похильного збірного дренажного трубопроводу.

За заданої витрати в кінці збірного дренажного трубопроводу, а також його довжині (l) і діаметрі (D) необхідний ступінь перфорації бічних стінок дрени (S) можна розраховувати за формулою:

де $\zeta_{l_p} = \lambda_p \frac{l}{D}$ – коефіцієнт опору розподільчого дренажного трубопроводу;

$A_p = \frac{\Omega \bar{\Phi}}{2k_\phi l} \sqrt{\frac{g}{h_n}}$ – узагальнений параметр розподільчої дрени, який враховує її

конструктивні і фільтраційні характеристики; h_n – напір у початковому перерізі.

За аналогією зі збірними дренажними трубопроводами, другим членом в рівнянні (25) нехтуємо. З урахуванням цього, розрахункові залежності отримано у вигляді:

- відносна швидкість в довільному перерізі за довжиною напірної розподільчої дренажної труби:

$$\tilde{V} = \tilde{V}_{n.\infty} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{x/l}{4A_p \tilde{V}_{n.\infty}}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4A_p \tilde{V}_{n.\infty}}\right)^2} \right], \quad (27)$$

- відносний напір:

$$\tilde{h} = \frac{1}{\left(1 + \frac{x/l}{4A_p \tilde{V}_{n.\infty}}\right)^3}. \quad (28)$$

Після введення до розгляду поняття умовного нескінченно довгого напірного розподільчого дренажного трубопроводу, залежність для визначення максимальної швидкості в його початковому перерізі набуде вигляду:

$$\tilde{V}_{n.\infty} = \sqrt[3]{\frac{3}{2\zeta_{l_p} A_p}} \quad (29) \quad \text{або} \quad V_{n.\infty} = \sqrt[3]{\frac{12k_\phi}{\lambda_p \pi D \bar{\Phi}} g h_n^2}, \text{ м/с} \quad (30)$$

Для розподільчих трубопроводів також з'ясовано вплив транзитної витрати на їх роботу. Гранична величина транзитної витрати, якою, не перевищуючи задану точність розрахунку $\delta = \tilde{V}_{n.mp.\infty} / \tilde{V}_{n.\infty} - 1$, можна знехтувати, буде:

$$\tilde{V}_{mp} \leq \tilde{V}_n \sqrt[3]{(1 + \delta)^3 - 1}, \quad (31)$$

де $\tilde{V}_{n.mp.\infty}$ – відносна швидкість на початку нескінченно довгого напірного розподільчого дренажного трубопроводу у випадку одночасного пропуску транзитної витрати; \tilde{V}_{mp} – відносна швидкість, яка відповідає проходженню трубопроводом тільки транзитної витрати.

Водночас залежність для визначення характеру зміни діаметра розподільчого трубопроводу за умови забезпечення постійної швидкості руху рідини (\tilde{V}) за довжиною труби буде мати вигляд:

$$\tilde{D} = \sqrt[3]{\left[\frac{3}{2}\zeta_{l,p,n}\tilde{V}^2\left(1-\frac{x}{l}\right)\right]^2} \quad (32) \quad \text{або} \quad D = D_n \sqrt[3]{\left[\frac{3}{2}\zeta_{l,p,n}\frac{V^2}{2g}\left(1-\frac{x}{l}\right)\right]^2}, \text{ м,} \quad (33)$$

$$\text{де} \quad \zeta_{l,p,n} = \lambda_p \frac{l}{D_n}; \quad \tilde{D} = \frac{D}{D_n}; \quad \tilde{x} = \frac{k_\phi x}{\Omega_n \bar{\Phi}} \sqrt{\frac{h_n}{g}}; \quad A_p = \frac{\Omega_n \bar{\Phi}}{2k_\phi l} \sqrt{\frac{g}{h_n}}.$$

Індекс « n » означає, що даний параметр розраховано за його значенням у початковому перерізі трубопроводу.

Під час розгляду ефективних характеристик напірних розподільчих дренажних трубопроводів використаємо методику розрахунку, аналогічну збірним трубопроводам. Ефективне значення узагальненого параметра напірного розподільчого дренажного трубопроводу $A_{ef,p}$ слід визначати за залежністю:

$$A_{ef,p} = \frac{1}{4\tilde{V}_{n,\infty} \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\tilde{h}_{к.еф}}} - 1 \right)} \quad \text{або} \quad A_{ef,p} = \frac{1}{4\tilde{V}_{n,\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{\delta}} - 1 \right)}. \quad (34)$$

З (34) ефективна довжина напірного розподільчого дренажного трубопроводу (м) становить:

$$l_{ef} = \sqrt[3]{\frac{3g\pi^2\bar{\Phi}^2 D^5}{2\lambda_p k_\phi^2 h_n} \left(\frac{1}{\sqrt{\delta}} - 1 \right)}, \quad (35)$$

а ефективний діаметр (м):

$$D_{ef} = \sqrt[5]{\frac{2\lambda_p k_\phi^2 h_n l^3}{3g\pi^2\bar{\Phi}^2 \left(\frac{1}{\sqrt{\delta}} - 1 \right)^3}}. \quad (36)$$

Для похильних напірних розподільчих дренажних трубопроводів розрахунковими можуть слугувати залежності (27), (28). Водночас параметр $\tilde{V}_{n,\infty,i}$ визначається з кубічного рівняння:

$$\frac{2\zeta_{l_p} A_p \tilde{V}_{n,i,\infty}^3}{3} \mp 2B\tilde{V}_{n,i,\infty} = 1, \quad (37)$$

де $B = \frac{2l_i I A_p}{h_{n,i}}$ – параметр, який враховує вплив похилу на потік в дрени.

Як і для збірних трубопроводів граничне значення похилу I_{zp} рекомендується знаходити за залежністю:

$$I_{zp} = \pm \frac{(1+\delta)^3 - 1}{(1+\delta)} \tilde{T}, \quad (38)$$

де $\tilde{T} = \frac{h_n}{4A_p l_i \tilde{V}_{n,\infty}}$; $\delta \geq \frac{\tilde{V}_{n,\infty,i}}{\tilde{V}_{n,\infty}} - 1$.

Запропоновано методику розрахунку необхідного ступеня перфорації бічних стінок напірних розподільчих дренажних трубопроводів:

$$S = 0,36 \frac{k_{\phi}}{D\Phi} \sqrt{\frac{h_{сер}}{g}}. \quad (39)$$

Загальна кількість отворів на всій довжині напірного розподільчого дренажного трубопроводу розраховується за формулою, аналогічною (23).

У п'ятому розділі проведено аналіз характеристик напірних збірних і розподільчих дренажних труб систем водопостачання та водовідведення, які працюють в ускладнених умовах, а також запропоновано аналітичні залежності для розрахунку їх параметрів. Під ускладненими умовами в даній роботі мається на увазі експлуатація труб за одночасного впливу кількох змінних параметрів.

Варіант 1. Напірний похильний збірний дренажний трубопровід за наявності транзиту (рис. 4).

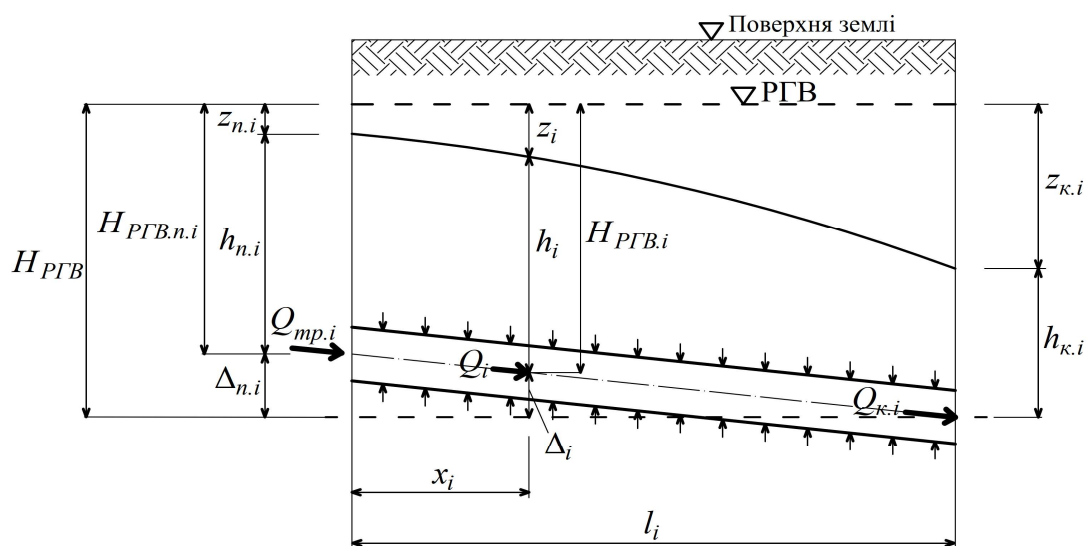


Рис. 4. Схема роботи напірного похильного збірного дренажного трубопроводу за наявності транзиту

У цьому випадку розрахункові формули отримано у вигляді:

- відносна швидкість в перерізі на відстані x

$$\bar{V}_{mp.\infty.i} = \bar{V}_{к.мп.\infty.i} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1 - x_i/l_i}{4A_{зб}\bar{V}_{к.мп.\infty.i}}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4A_{зб}\bar{V}_{к.мп.\infty.i}}\right)^2} \right]; \quad (40)$$

- відносний перепад напорів

$$\bar{z}_{mp.\infty.i} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1 - x_i/l_i}{4A_{зб}\bar{V}_{к.мп.\infty.i}}\right)^3}. \quad (41)$$

де $\bar{V}_{к.мп.\infty.i}$ – відносна витрата в кінці нескінченно довгого збірного похильного дренажного трубопроводу за пропуску транзитної витрати. Останню слід визначати з кубічного рівняння:

$$\frac{2A_{зб}\zeta_{l_{зб}}}{3}(\bar{V}_{к.мп.\infty.i}^3 - \bar{V}_{мп.\infty.i}^3) - 2B(\bar{V}_{к.мп.\infty.i} - \bar{V}_{мп.\infty.i}) = 1, \quad (42)$$

$$\text{де } A_{зб} = \frac{1}{2\bar{x}_к} = \frac{\Omega_i\bar{\Phi}}{2k_\phi l_i} \sqrt{\frac{g}{z_к}}; \quad B = \frac{2A_{зб}l_i}{z_{к.i}}; \quad \zeta_{l_{зб}} = \lambda_{зб} \frac{l_i}{D_i}.$$

Варіант 2. Напірні збірні дренажні трубопроводи змінного діаметра за наявності транзитної витрати (рис. 5).

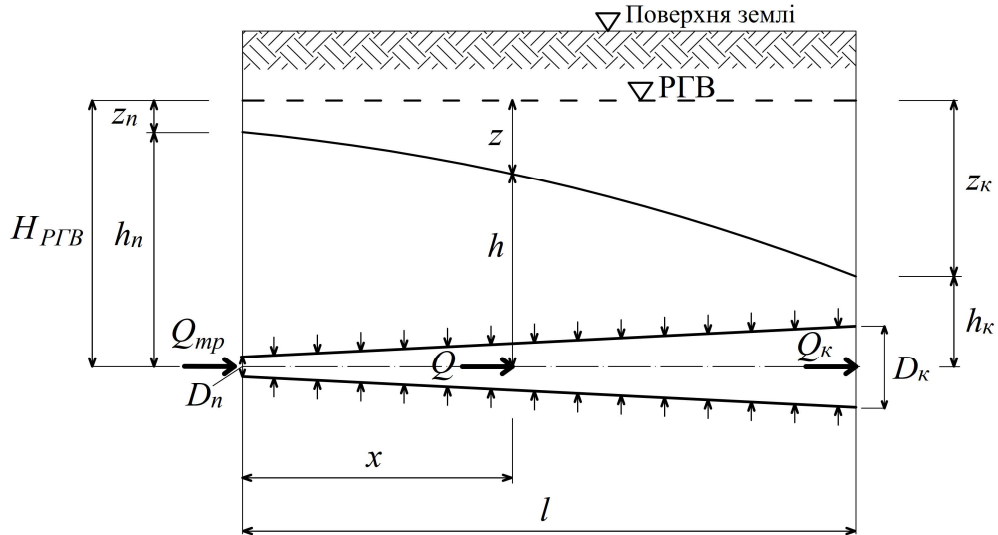


Рис. 5. Схема роботи напірного збірного дренажного трубопроводу змінного діаметра за наявності транзитної витрати

Зміна відносного діаметра за довжиною напірного збірного дренажного трубопроводу (\bar{D}) в даному випадку визначається з кубічного рівняння (43), відносний перепад напорів (\bar{z}):

$$\varphi^3 + 3\bar{D}_n\varphi - \frac{3}{4\bar{V}\sqrt{1-\bar{D}_n}}\bar{x} = 0; \quad (43)$$

$$\bar{z} = \sqrt{\frac{\bar{D} - \bar{D}_n}{1 - \bar{D}_n}}, \quad (44)$$

$$\text{де } \bar{x} = \frac{k_\phi x}{\Omega_\kappa \bar{\Phi}} \sqrt{\frac{z_\kappa}{g}}; \quad \bar{D} = \frac{D}{D_\kappa}; \quad \varphi = \sqrt{\bar{D} - \bar{D}_n}; \quad \bar{V} = \frac{V}{\sqrt{gz_\kappa}}.$$

Варіант 3. Напірні похильні збірні дренажні трубопроводи змінного перерізу (рис. 6).

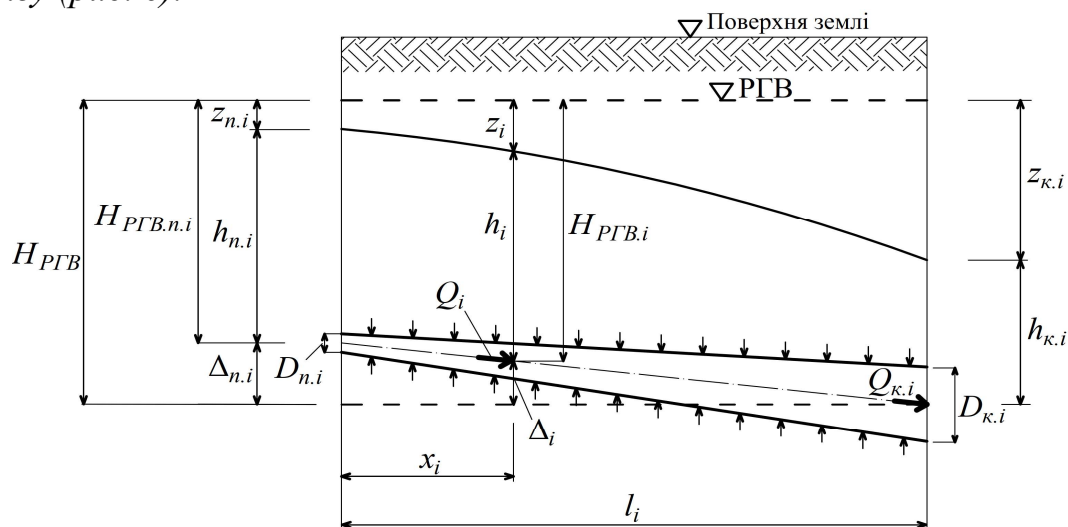


Рис. 6. Схема роботи напірного похильного збірного дренажного трубопроводу змінного перерізу

Зміна відносного діаметра за довжиною похильного збірного дренажного трубопроводу за різних значень відносного перепаду напорів \bar{z}_i :

$$\bar{D}_i = -a + \sqrt{a^2 + b\bar{z}_i^2}. \quad (45)$$

Зміна відносного перепаду напорів за довжиною трубопроводу:

$$\bar{x}_i = \frac{\sqrt{b}}{m} \left[a \ln \left| \frac{a}{\sqrt{a^2 + b\bar{z}_i^2} + \sqrt{b\bar{z}_i}} \right| + \sqrt{b\bar{z}_i} \right] = 0, \quad (46)$$

де $a = \frac{\lambda_{зб} V_i^2}{2gD_{к,i}}$; $b = \frac{2k_{\phi} z_{к,i}^2}{i\pi\Phi V_i D_{к,i}^2}$; $m = \frac{1}{2\bar{V}_i}$.

Варіант 4. Напірні похильні збірні дренажні трубопроводи змінного перерізу, які працюють за наявності транзиту (рис. 7).

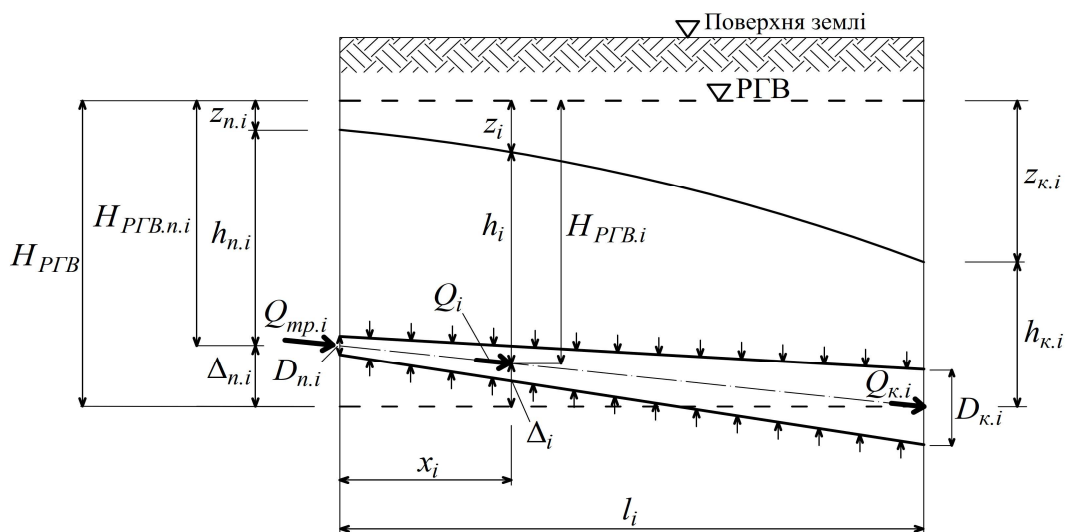


Рис. 7. Схема роботи напірного похильного збірного дренажного трубопроводу змінного перерізу за наявності транзиту

Зміна відносного діаметра за довжиною збірного похильного дренажного трубопроводу за різних значень відносного перепаду напорів \bar{z}_i :

$$\bar{D}_i = -a + \sqrt{a^2 + b(N + \bar{z}_i^2)}. \quad (47)$$

Зміна відносного перепаду напорів за довжиною трубопроводу:

$$\bar{x}_i = \frac{\sqrt{b}}{m} \left(a \ln \left| \frac{\sqrt{a^2 + bN}}{\sqrt{a^2 + b(N + \bar{z}_i^2)} + \sqrt{b}\bar{z}_i} \right| + \sqrt{b}\bar{z}_i \right), \quad (48)$$

де $m = \frac{1}{2\bar{V}_i}$; $N = D_{n.i} \frac{\lambda_{зб} \pi \bar{\Phi} V_i^3}{2gk_\phi z_{к.і}^2} + D_{n.i}^2 \frac{i\pi \bar{\Phi} V_i}{2k_\phi z_{к.і}^2}$.

Варіант 5. Напірний похильний розподільчий дренажний трубопровід за наявності транзиту (рис. 8).

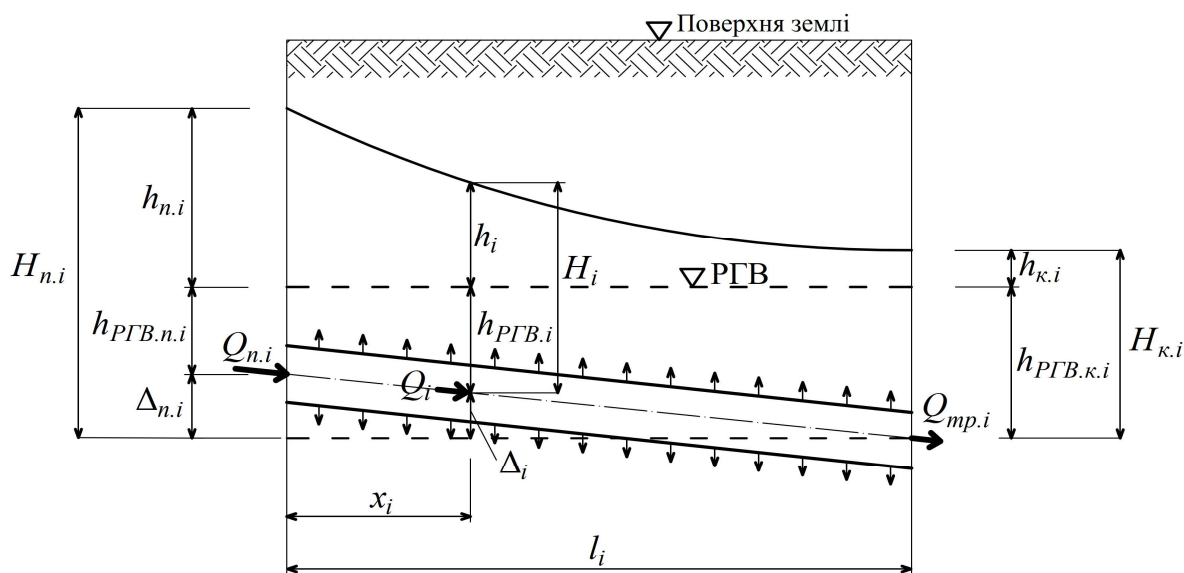


Рис. 8. Схема роботи напірного похильного розподільчого дренажного трубопроводу за наявності транзиту

У цьому випадку розрахункові формули отримано у вигляді:

- відносна швидкість в довільному перерізі

$$\tilde{V}_{mp.\infty.i} = \tilde{V}_{n.mp.\infty.i} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1 - x_i/l_i}{4A_p \tilde{V}_{n.mp.\infty.i}}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4A_p \tilde{V}_{n.mp.\infty.i}}\right)^2} \right]; \quad (49)$$

- відносний напір

$$\tilde{h}_{mp.\infty.i} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1 - x_i/l_i}{4A_p \tilde{V}_{n.mp.\infty.i}}\right)^3}. \quad (50)$$

де $\tilde{V}_{n.mp.i.\infty}$ – відносна швидкість (витрата) у початковому перерізі нескінченно довгого похильного розподільчого дренажного трубопроводу за пропуску транзитної витрати. Останню слід визначати з кубічного рівняння:

$$\frac{2A_p \zeta_{l_p}}{3} (\tilde{V}_{n.mp.i.\infty}^3 - \tilde{V}_{mp.i.\infty}^3) - 2B(\tilde{V}_{n.mp.i.\infty} - \tilde{V}_{mp.i.\infty}) = 1, \quad (51)$$

де $A_p = \frac{1}{2\tilde{x}_{n.i}} = \frac{\Omega_i \bar{\Phi}}{2k_\phi l_i} \sqrt{\frac{g}{z_\kappa}}$; $B = \frac{2A_p i l_i}{h_{n.i}}$; $\zeta_{l_p} = \lambda_p \frac{l_i}{D_i}$.

Варіант 6. Напірні розподільчі дренажні трубопроводи змінного перерізу за наявності транзиту (рис. 9).

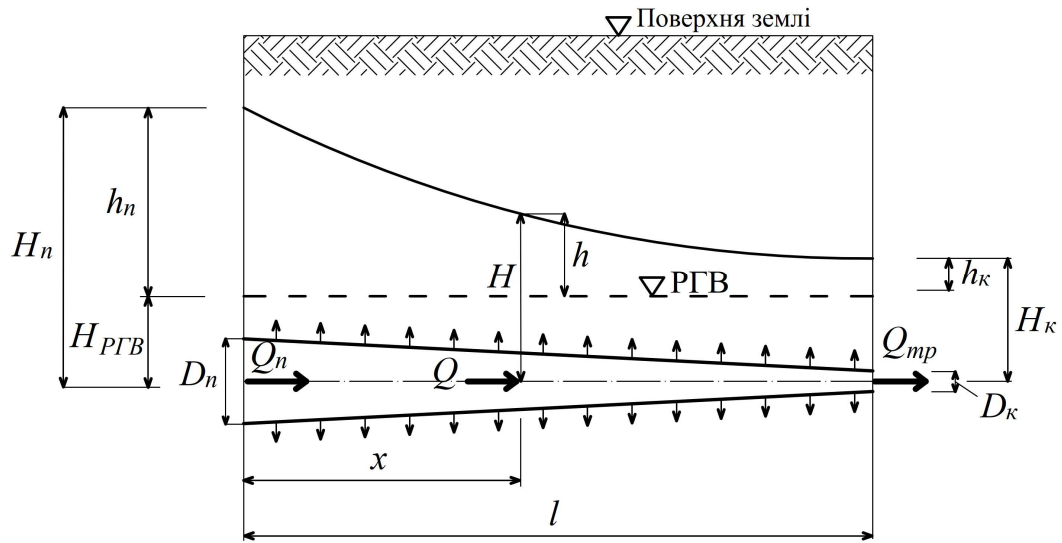


Рис. 9. Схема роботи напірного розподільчого дренажного трубопроводу змінного перерізу за наявності транзитної витрати

Зміна відносного діаметра і відносного напору за довжиною розподільчого дренажного трубопроводу визначаються за залежностями:

$$\varphi^3 + 3\tilde{D}_\kappa \varphi - \frac{3\zeta_{l_p.n} A \tilde{V}^2}{\sqrt{1 - \tilde{D}_\kappa}} (\tilde{x}_\kappa - \tilde{x}) = 0; \quad (52) \quad \tilde{h} = \sqrt{\frac{\tilde{D} - \tilde{D}_\kappa}{1 - \tilde{D}_\kappa}}, \quad (53)$$

де $\tilde{x} = \frac{k_\phi x}{\Omega_n \bar{\Phi}} \sqrt{\frac{h_n}{g}}$; $\tilde{D} = \frac{D}{D_n}$; $\varphi = \sqrt{\tilde{D} - \tilde{D}_\kappa}$; $\tilde{V} = \frac{V}{\sqrt{gh_n}}$.

Варіант 7. Напірні похильні розподільчі дренажні трубопроводи змінного перерізу (рис. 10).

Зміна відносного діаметра за довжиною похильного розподільчого дренажного трубопроводу за різних значень відносного перепаду напорів \tilde{h}_i :

$$\tilde{D}_i = -\tilde{a} + \sqrt{\tilde{a}^2 + \tilde{b} \tilde{h}_i^2} \quad (54)$$

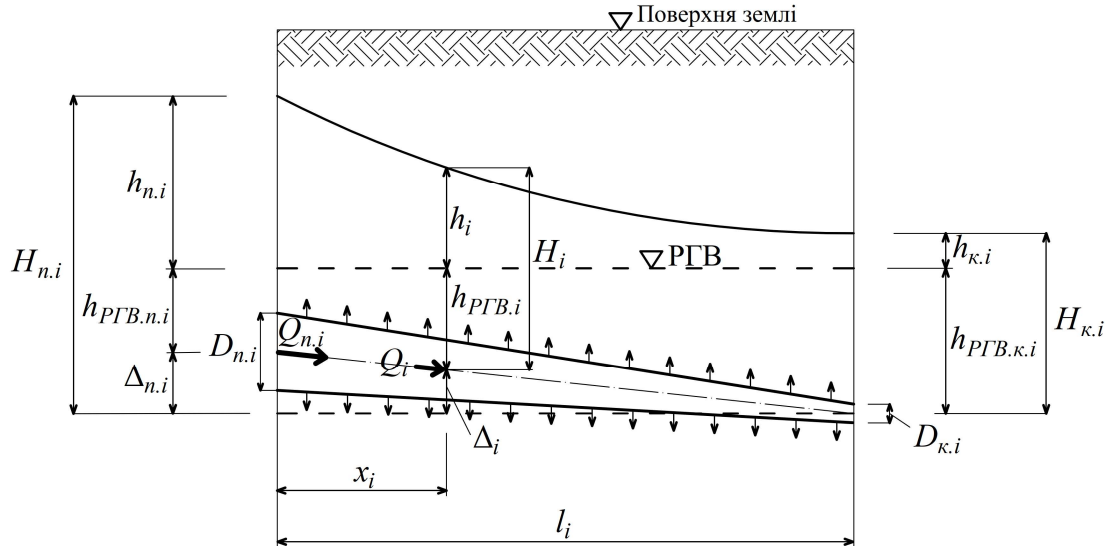


Рис. 10. Схема роботи напірного похильного розподільчого дренажного трубопроводу змінного діаметра

Зміна відносного напору за довжиною трубопроводу:

$$\tilde{x}_k - \tilde{x} = \frac{\sqrt{\tilde{b}}}{m} \left[\tilde{a} \ln \left| \frac{\sqrt{\tilde{a}^2 + \tilde{b}\tilde{h}_i^2} + \sqrt{\tilde{b}\tilde{h}_i}}{\tilde{a}} \right| - \sqrt{\tilde{b}\tilde{h}_i} \right], \quad (55)$$

де $\tilde{a} = \frac{\lambda_p V_i^2}{2gD_{n,i}}$; $\tilde{b} = \frac{2k_\phi h_{n,i}^2}{i\pi\Phi V_i D_{n,i}^2}$; $m = \frac{1}{2\tilde{V}_i}$.

Варіант 8. Напірні розподільчі дренажні трубопроводи змінного діаметра, які працюють при наявності похилу і транзиту (рис. 11).

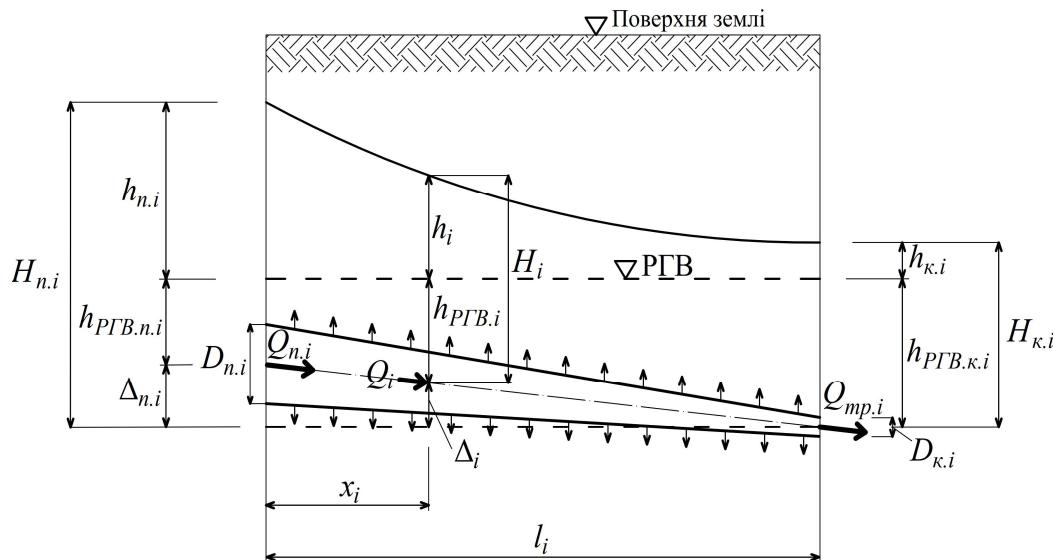


Рис. 11. Схема роботи напірного похильного розподільчого дренажного трубопроводу змінного перерізу за наявності транзиту

Зміна відносного діаметра за довжиною розподільчого похильного дренажного трубопроводу за різних значень відносного перепаду напорів \tilde{h}_i :

$$\tilde{D}_i = -\tilde{a} + \sqrt{\tilde{a}^2 + \tilde{b}(M + \tilde{h}_i^2)}. \quad (56)$$

Зміна відносного перепаду напорів за довжиною трубопроводу:

$$\tilde{x}_k - \tilde{x} = \frac{\sqrt{\tilde{b}}}{m} \left[\tilde{a} \ln \left| \frac{\sqrt{\tilde{a}^2 + \tilde{b}M + \tilde{b}\tilde{h}_i^2} + \sqrt{\tilde{b}\tilde{h}_i}}{\sqrt{\tilde{a}^2 + \tilde{b}M}} \right| - \sqrt{\tilde{b}\tilde{h}_i} \right], \quad (57)$$

$$\text{де } M = D_{\kappa.i} \frac{\lambda_p \pi \bar{\Phi} V_i^3}{2gk_\phi h_{n.i}^2} + D_{\kappa.i}^2 \frac{i\pi \bar{\Phi} V_i}{2k_\phi h_{n.i}^2}.$$

У шостому розділі проаналізовано умови проведення експериментальних досліджень автором та іншими дослідниками. Розглянуто конструкцію експериментальної установки, яку запроєктовано таким чином, щоб в ході експерименту можливо було визначити найбільш суттєві параметри вивчаємого процесу в максимально широкому діапазоні зміни його параметрів. Для проектування експериментальної установки активно залучались методи і положення теорії подібності. Визначено основні критерії подібності, які характеризують досліджуваний процес за умови руху рідини зі змінною витратою вздовж шляху. З'ясовано, що для можливості використання і узагальнення експериментальних даних різних дослідників необхідно, щоб при їх отриманні на дослідних установках забезпечувався турбулентний режим руху основного потоку в досліджуваних напірних трубопроводах. Водночас необхідно дотримуватись геометричної подібності і подібності гідравлічних характеристик потоку у відповідних перерізах природи та моделі. Також необхідною умовою подібності є забезпечення фізичної подібності середовищ, в яких протікає явище, тобто в'язкості і густини рідини.

З урахуванням цього вихідну систему рівнянь (3), (4) для відповідного модельного потоку можна представити у вигляді:

$$\alpha_H dH \mp \alpha_V \alpha_U \frac{B}{g} V dV + \alpha_\lambda \alpha_V^2 \lambda_p \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g} = 0 \quad (58)$$

$$\alpha_V dV = \alpha_U \frac{\sqrt{gh}}{A}, \quad (59)$$

де α_u , α_u , α_λ – відповідні масштаби моделювання.

Як показали дослідження, умови взаємодії основного і змінюваного потоків залежать від співвідношення їх швидкостей U_o/V , а також від фільтраційних характеристик навколишнього ґрунту і матеріалу стінок трубопроводу і можуть характеризуватись величиною коефіцієнта фільтрації k_ϕ , фільтраційного опору $\bar{\Phi}$ і гідравлічного коефіцієнта тертя λ . Встановлено, що достатньою умовою подібності, а отже, й можливості порівняння, перерахунку та використання результатів інших авторів, разом зі збереженням однакового режиму руху, є забезпечення рівності в них значень коефіцієнтів опору ζ , λ і конструктивного параметра A .

Розглянуто питання планування експериментів. Згідно з розробленим планом було змонтовано експериментальну установку, схему якої наведено на

рис. 12. Для визначення досліджуваних параметрів використовувалось відповідне вимірювальне обладнання.

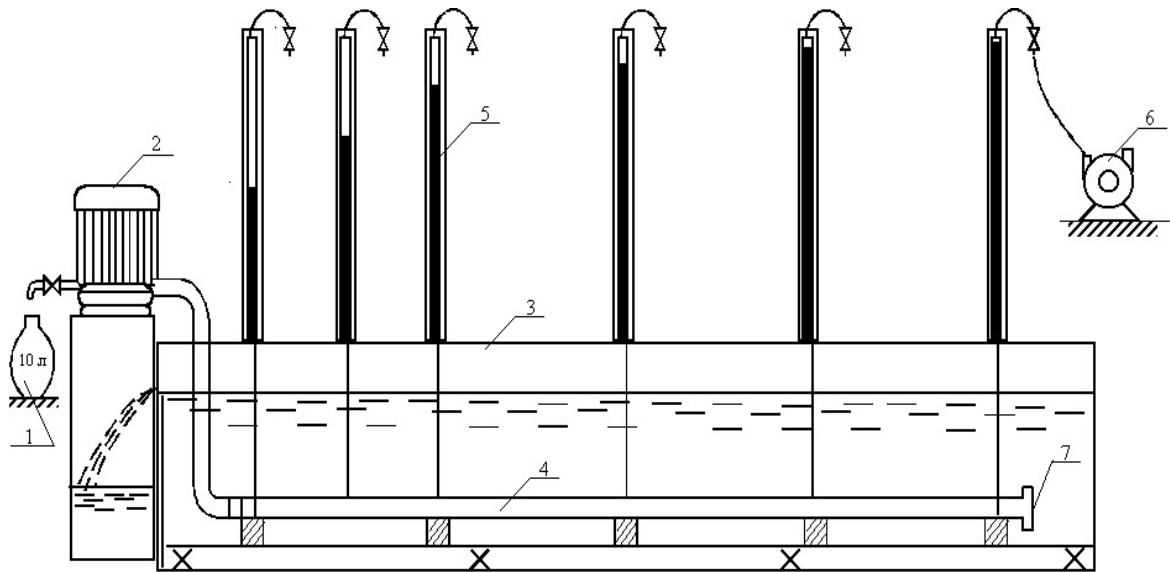


Рис. 12. Схема гідралічної експериментальної установки:
1 – мірний об'єм; 2 – насос; 3 – гідралічний лоток; 4 – досліджуваний трубопровід; 5 – п'єзометри; 6 – вакуум-насос; 7 – заглушка

До складу експериментальної установки входить гідралічний лоток з параметрами $L \times B \times H = 10 \text{ м} \times 0,6 \text{ м} \times 0,5 \text{ м}$. На висоті 0,1 м від дна лотка було прокладено досліджувану сталеву трубу діаметром $D = 22 \times 3,0 \text{ мм}$ загальною довжиною $L = 9,0 \text{ м}$. Довжина перфорованої частини труби складала 8,0 м. Стінки труби були перфоровані отворами діаметром $d_o = 0,003 \text{ м}$. В кожному перерізі приймалось по чотири отвори, відстань між цими перерізами становила 0,1 м. Для забезпечення фільтраційного режиму втікання (витікання) води в трубу її перфоровані стінки обмотувались необхідною кількістю шарів тканинного матеріалу різної фільтруючої спроможності.

Під час обробки експериментальних даних було оцінено величину похибок вимірювань. Здійснено перевірку отриманих даних на відтворюваність за критерієм Кохрена і адекватність за критерієм Фішера.

У цьому розділі представлено і проаналізовано результати особистих експериментальних досліджень напірних збірних і розподільчих перфорованих дренажних трубопроводів. Під час розгляду окремих питань у цьому розділі наведено експериментальні дані інших авторів, якщо отримані результати відповідають реальній картині течії, а вимірювання виконано з належною точністю та достовірністю

На початку експериментальних досліджень на гідралічному стенді було визначено загальний фільтраційний опір досліджуваних трубопроводів за залежністю:

$$\Phi = \frac{z_n + z_k}{2Q_k} l, \quad (60)$$

де Q_k – витрата в кінцевому перерізі труби; z_n і z_k – перепад напорів, відповідно, в початковому і кінцевому перерізі труби; l – довжина всього трубопроводу.

Окремі результати щодо визначення фільтраційного опору дослідного трубопроводу за його обгортання різними шарами фільтрувального матеріалу і різних значеннях комплексного параметра $\bar{x}_k = 1/2A$ представлено на рис. 13.

З графіків слідує, що за різних величин конструктивного параметра A більшим значенням фільтраційного опору відповідають менші витрати рідини, які надійшли всередину дренажного трубопроводу через його бічну поверхню.

Одними з основних параметрів, що вимірювались під час експериментів, були витрата та швидкість в кінці збірної та на початку розподільчого дослідних трубопроводів за різного ступеня перфорації і фільтруючого опору поверхні їх бічних стінок. Аналіз даних на рис. 14 і рис. 15 підтверджує висновок, що під час роботи напірних збірних дренажних трубопроводів витрата в них не може нескінченно зростати. Завжди існує певна межа верхньої витрати, яка в першу чергу залежить від діаметра трубопроводу D , фільтраційного опору труби Φ , а також конструктивного параметра A . Слід також зазначити, що в дослідному трубопроводі практично завжди зберігався турбулентний режим руху. Відповідний графік наведено на рис. 16.

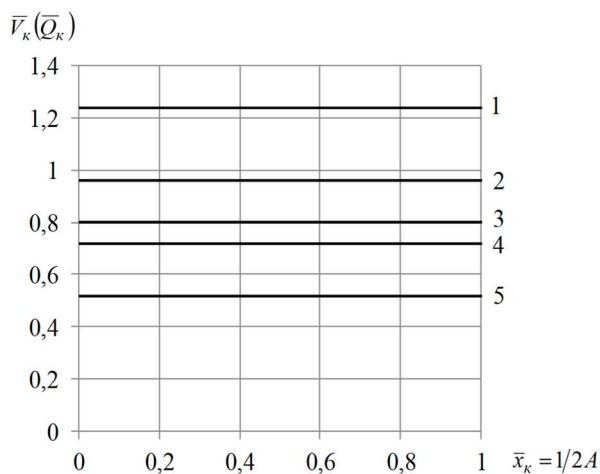


Рис. 13

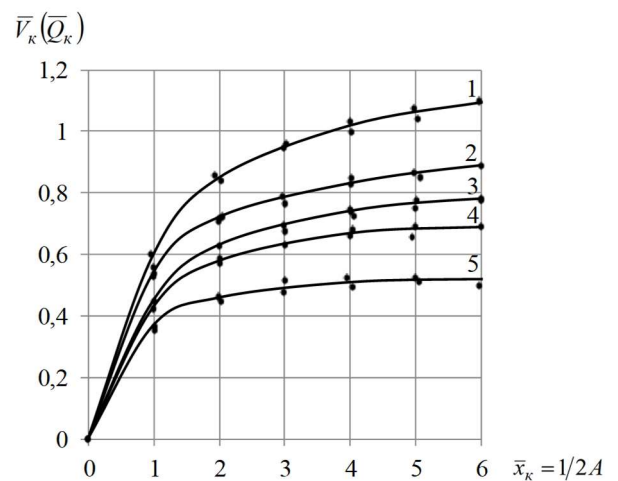


Рис. 14

Рис. 13. Визначення фільтраційного опору дослідних трубопроводів:
Рис. 14. Графік зміни відносної швидкості в кінцевому перерізі збірної дренажного трубопроводі \bar{v}_k залежно від конструктивного параметра A :

$$1 - \Phi = 730 \text{ с/м}; 2 - \Phi = 1630 \text{ с/м}; 3 - \Phi = 2710 \text{ с/м}; \\ 4 - \Phi = 3850 \text{ с/м}; 5 - \Phi = 8640 \text{ с/м}$$

Велику серію вимірювань було присвячено визначенню інтенсивності зміни відносної витрати за довжиною збірників і розподільників. Наведено окремі характерні результати вимірювань зміни відносної швидкості \bar{v}/\bar{v}_k (\tilde{v}/\tilde{v}_n) за довжиною збірної (рис. 17 а, б) і розподільчого (рис. 18 а, б) напірних дренажних трубопроводів за різних значень їх відносної довжини l/D і фільтраційного опору Φ .

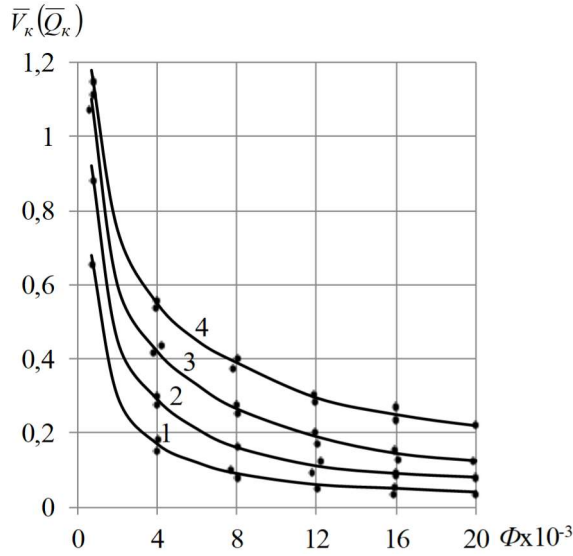


Рис. 15

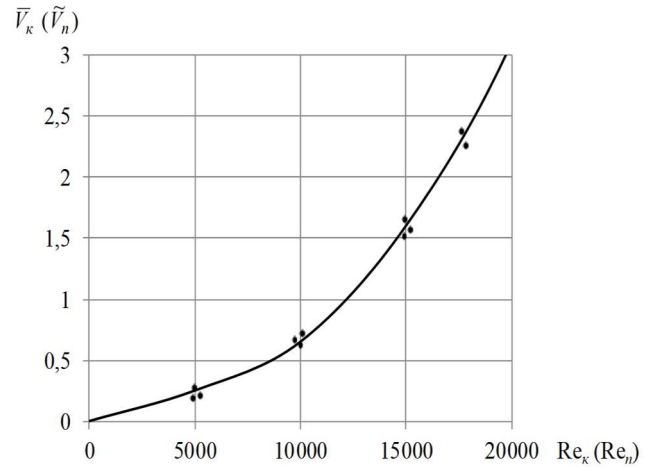
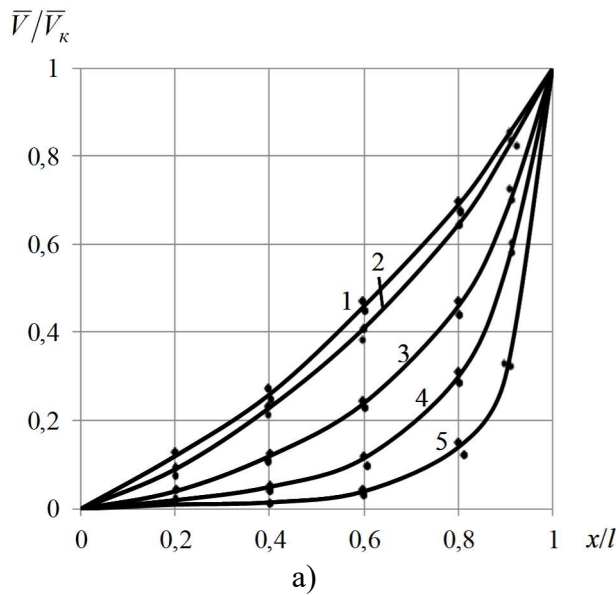


Рис. 16

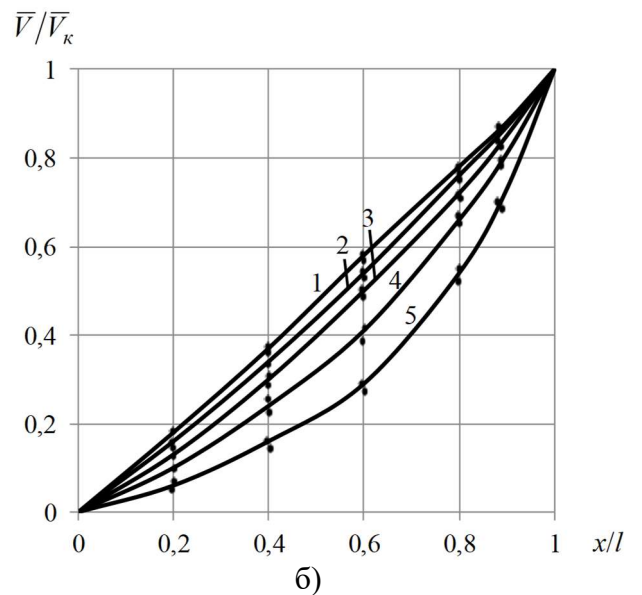
Рис. 15. Графік зміни відносної швидкості в кінці збірної дренажного трубопроводу \bar{V}_k залежно від фільтраційного опору Φ :

1 – $l/D = 62,5$; 2 – $l/D = 125$; 3 – $l/D = 250$; 4 – $l/D = 500$

Рис. 16. Залежність \bar{V}_k (\tilde{V}_n) від числа Рейнольдса потоку в кінцевому (початковому) перерізі дренажної труби



а)



б)

Рис. 17. Зміна відносної витрати (швидкості) за довжиною збірних дренажних трубопроводів з фільтраційним опором:

а) $\Phi = 730$ с/м; б) $\Phi = 8640$ с/м;

1 – $l/D = 62,5$; 2 – $l/D = 125$; 3 – $l/D = 250$; 4 – $l/D = 500$; 5 – $l/D = 1000$

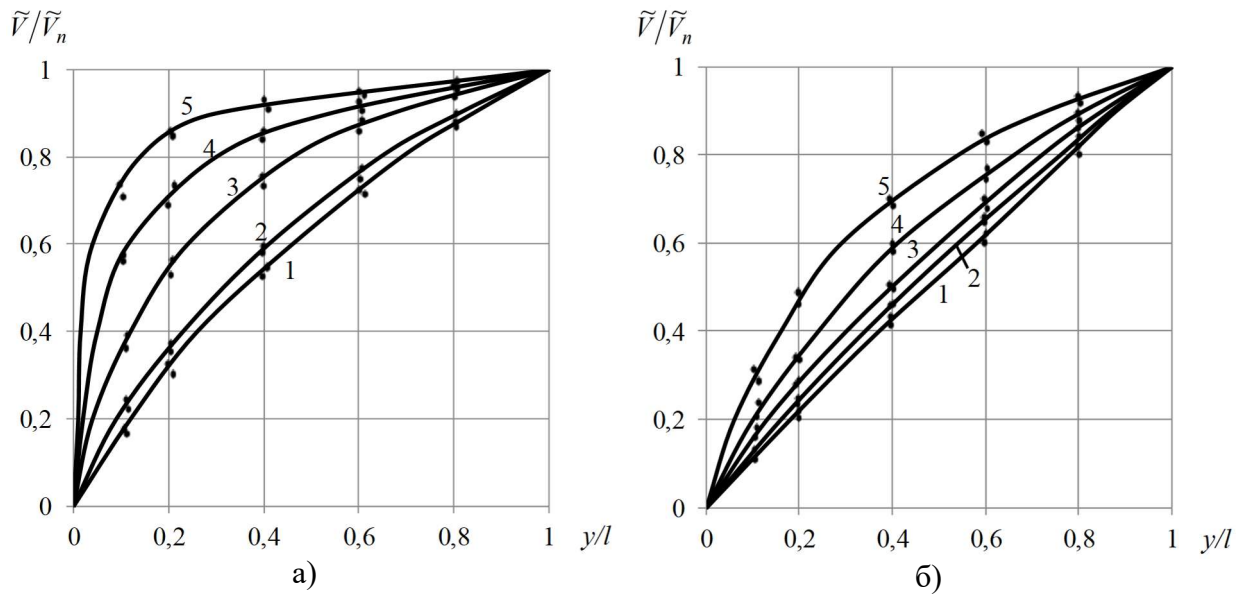


Рис. 18. Зміна відносної витрати (швидкості) за довжиною розподільчих дренажних трубопроводів з фільтраційним опором:
 а) $\Phi = 730$ с/м; б) $\Phi = 8640$ с/м;
 1 – $l/D = 62,5$; 2 – $l/D = 125$; 3 – $l/D = 250$; 4 – $l/D = 500$; 5 – $l/D = 1000$

Наведені графіки підтверджують той факт, що інтенсивність приєднання рідини до дренажного збірника трубопроводу і від'єднання для розподільного відбувається нерівномірно за їх довжиною. У початкових перерізах збірника вона є мінімальною, збільшується за довжиною дрени і досягає свого максимального значення у кінцевих перерізах. Протилежна картина спостерігається у розподільчих трубопроводів: в початкових перерізах вона максимальна, а в кінцевих – мінімальна. Водночас труби з більшим фільтраційним опором мають меншу нерівномірність притоку (відтоку) рідини вздовж шляху. І за значень $\Phi > 30000$ с/м (коефіцієнті фільтрації $k_{\phi} < 3$ м/доб.) має місце практично рівномірне приєднання (від'єднання) рідини вздовж напірного дренажного трубопроводу.

Встановлено, що чисельно зміна інтенсивності притоку рідини за довжиною збірника зручно характеризується співвідношенням між швидкістю її втікання через бічні стінки $U_o = dQ/dS = dQ/\pi D dx$ в даному перерізі трубопроводу до середньої швидкості потоку в цьому ж перерізі $V = Q/\Omega$, а саме U_o/V . Причому, чим більшим буде дане співвідношення, тим вплив змінюваної витрати на основний потік буде суттєвішим, і тим більшим буде деформування епюр осереднених швидкостей в досліджуваному перерізі, а також будуть збільшуватись втрати напору під час руху рідини. Наприклад, на рис. 19 наведено залежність зміни даного співвідношення для збірника різної відносної довжини з фільтраційним опором $\Phi = 8640$ с/м.

Аналогічну залежність відношення U_o/V від числа Рейнольдса у відповідному перерізі основного потоку представлено на рис. 20.

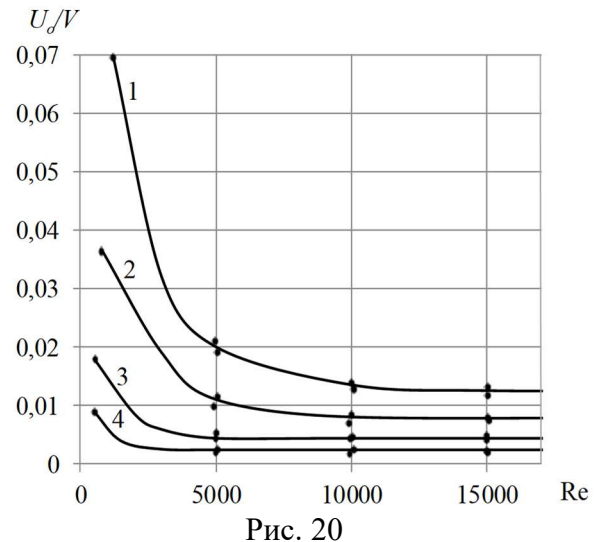
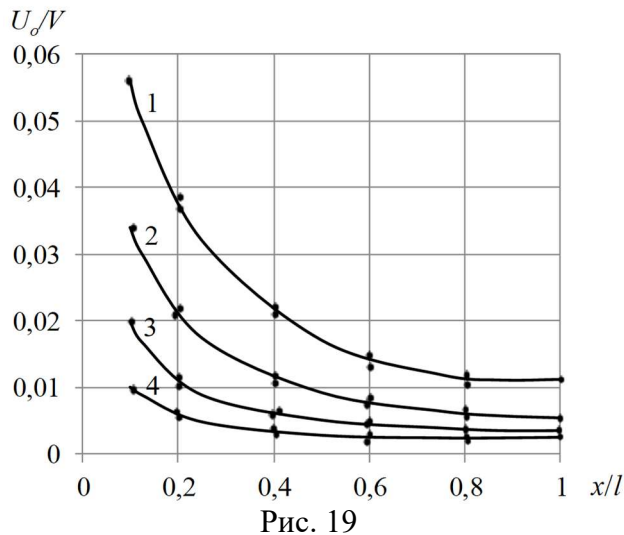


Рис. 19. Зміна відношення U_o/V в перерізах збірника при $\Phi = 8640$ с/м:
 Рис.20. Зміна відношення U_o/V в перерізах збірника від числа Рейнольдса:
 1 – $l/D = 62,5$; 2 – $l/D = 125$; 3 – $l/D = 250$; 4 – $l/D = 500$

Аналізуючи графіки зміни відношення U_o/V , наведені на рис. 19 і рис. 20, можна зробити висновок, що його інтенсивна зміна відбувається тільки на початкових ділянках збірника при $\bar{x}/\bar{x}_k = x/l \leq 0,4$, що має місце за чисел Рейнольдса основного потоку в трубопроводі $Re \leq 6000$. При збільшенні відношення $\bar{x}/\bar{x}_k = x/l > 0,4$ або $Re > 6000$ параметр U_o/V набуває практично постійних значень і залежить в основному від відносної довжини l/D (коефіцієнта опору $\zeta_l = \lambda l/D$) трубопроводу. Вказані співвідношення відповідають даним, наведеним на рис. 21.

Отримані результати підтверджують висновок, що із зменшенням параметра $\bar{x}_k = 1/2A$, величина гідравлічного коефіцієнта тертя збірного трубопроводу $\lambda_{зб}$ має збільшуватись. І, навпаки, при збільшенні $\bar{x}_k = 1/2A$, коефіцієнт $\lambda_{зб}$ буде зменшуватись. Для розподільників ситуація має аналогічний характер.

Під час проведення експериментів одним із важливих питань було з'ясування впливу транзитного потоку на основний потік у збірних і розподільчих трубопроводах. Наприклад, на рис. 22 представлено типові результати вимірювань характеру зміни витрати вздовж дослідного збірного трубопроводу з відносною довжиною $l/D = 125$ за пропуску ним відносної транзитної витрати $\bar{V}_{mp} = \bar{Q}_{mp} = Q_{mp} / \Omega \sqrt{gz_k} = 0,5$ і $0,2$.

З графіка слідує, що на початкових ділянках збірника приєднання рідини вздовж шляху практично не відбувається і на цій ділянці труби проходить тільки транзитна витрата. Приєднання рідини здійснюється тільки на кінцевих ділянках збірника. Причому, більшій відносній транзитній витраті \bar{Q}_{mp} відповідає більша частина збірника, на якій приєднання витрати майже не відбувається.

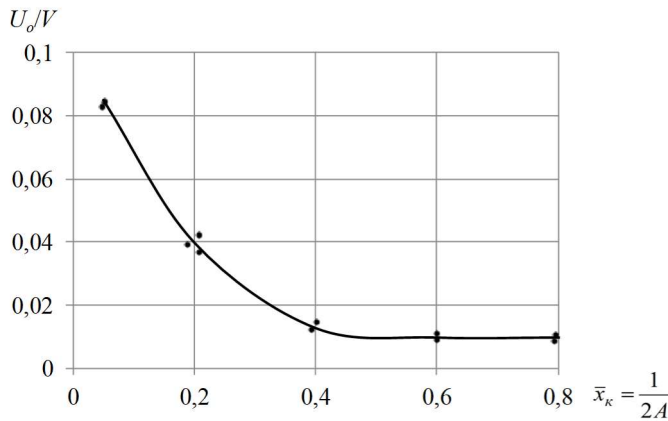


Рис. 21

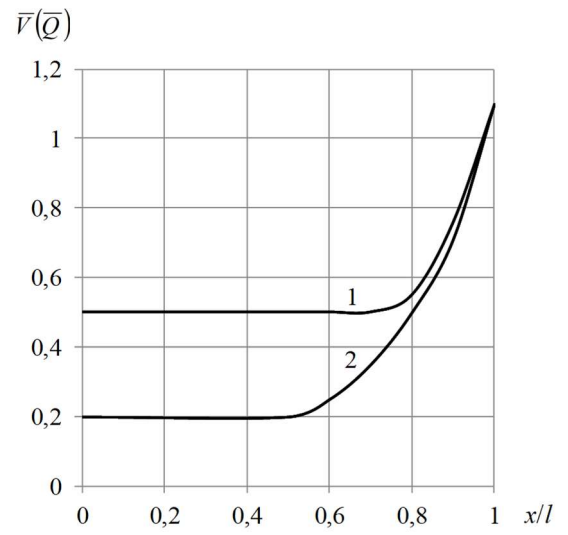


Рис. 22

Рис. 21. Залежність U_o/V від параметра $\bar{x}_k = 1/2A$

Рис. 22. Залежність характеру надходження приєднуваної витрати в збірний трубопровід при наявності транзитної витрати:

$$1 - \bar{V}_{mp} = \bar{Q}_{mp} = 0,5; 2 - 0,2$$

Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень вивчаємих трубопроводів показав, що на їх роботу суттєво впливає обґрунтоване визначення величини гідравлічного коефіцієнта тертя λ . Це питання є особливо актуальним під час розрахунку відносно довгих напірних дренажних трубопроводів.

Величина гідравлічного коефіцієнта тертя λ_{op} в дренажних трубопроводах, які працюють з приєднанням або від'єднанням рідини вздовж шляху, може бути визначена за графіком на рис. 23. На цьому графіку крива 1 відповідає значенням λ_0 для досліджуваних трубопроводів із суцільними стінками. З цією кривою практично співпадають дані вимірів для випадку роботи розподільчого трубопроводу. Крива 2 отримана для цих же труб і відображає зміну вивчаємого коефіцієнта для збірного трубопроводу. Аналіз графіків свідчить, що притік рідини вздовж досліджуваного трубопроводу суттєво збільшує втрати енергії (напору) в ньому за невеликих чисел Рейнольдса ($Re < 6000$), а відповідно, і величину гідравлічного коефіцієнта тертя при цьому $\lambda_{зб}$. За більших чисел Re основного потоку вплив приєднуваної витрати на величину коефіцієнта $\lambda_{зб}$ стає несуттєвим.

Для практичних розрахунків величини $\lambda_{зб}$ в цьому випадку в даній роботі рекомендується використовувати залежність:

$$\lambda_{зб} = \beta_{зб} \lambda_0, \quad (61)$$

де $\beta_{зб}$ – дослідний поправочний коефіцієнт, величину і форму представлення якого кожен з авторів подавав як функціональну залежність від різних факторів. Причому, значення цього коефіцієнта приймалися як постійними (β), так і змінними ($\beta_{зм}$) за довжиною труби; λ_0 – значення гідравлічного коефіцієнта тертя для даних труб за рівномірного руху рідини.

Водночас значення коефіцієнта λ_0 можна розраховувати за відомими залежностями. Характер зміни осередненого за довжиною трубопроводу коефіцієнта $\beta_{зб}$, який входить в (61), отримано в роботі на основі обробки дослідних даних, представлено на рис. 24. Показано, що в загальному випадку його величина залежить від конструктивних і фільтраційних характеристики системи «трубопровід-грунт».

Як слідує з рис. 24, величина $\beta_{зб} > 1$ має місце тільки при $\bar{x}_k < 0,4$ (або $A > 1,25$). За більших значень \bar{x}_k коефіцієнт $\beta_{зб} = 1$ і впливом приєднуваної рідини на величину λ в інженерних розрахунках можна знехтувати. Дана ситуація має місце за чисел Рейнольдса основного потоку $Re > 6000$. Обробка результатів дозволила рекомендувати наступну емпіричну формулу для визначення розшукуваного коефіцієнта:

$$\beta_{зб} = 0,78\bar{x}_k^{-0,28} = 0,94A^{0,28}, \quad (62)$$

яка справедлива в межах $0,05 \leq \bar{x}_k \leq 0,4$ або $1,25 \leq A \leq 10$.

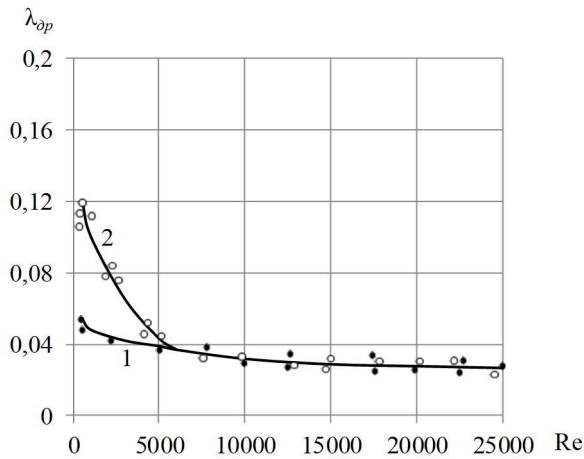


Рис. 23

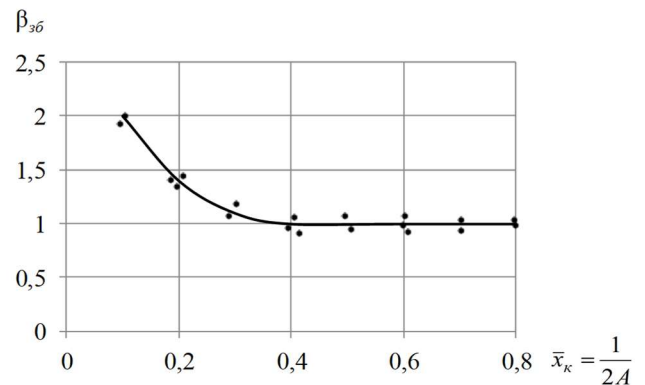


Рис. 24

Рис. 23. Залежність гідравлічного коефіцієнта тертя $\lambda_{др}$ від числа Рейнольдса Re : 1 – випадок від'єднання рідини вздовж шляху; 2 – випадок приєднання рідини

Рис. 24. Графік залежності $\beta_{зб}$ від параметра $\bar{x}_k = 1/2A$

Для випадку роздачі рідини дренажними трубопроводами в режимі фільтрації, як показали існуючі дослідження, а також результати проведених у роботі вимірювань, впливом від'єднуваної витрати на величину даного коефіцієнта в розрахунках можна знехтувати. Ця обставина пояснюється тим, що величина гідравлічного коефіцієнта тертя λ для таких труб в основному залежить від їх типу, якості прокладки і способів з'єднання між собою. Вплив же змінюваної витрати, порівняно з останніми, не такий суттєвий.

У додатках наведено методики та приклади інженерного розрахунку реальних напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводів.

Представлено список опублікованих праць за темою дисертації та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У роботі вирішено важливу науково-практичну проблему розвитку водного господарства, а саме: підвищення ефективності і надійності роботи напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводів систем водопостачання та водовідведення, в яких надходження і витікання рідини здійснюється в режимі фільтрації.

2. На основі запропонованих і уточнених математичних моделей руху рідини зі змінною витратою, розроблено надійні методи розрахунку параметрів напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводів, що дозволяє підвищити точність та практичну цінність отриманих результатів.

3. Обґрунтовано застосування основних критеріїв подібності для аналізу та узагальнення дослідних даних різних авторів, зокрема: число Рейнольдса (Re), коефіцієнт опору трубопроводу ($\zeta_l = \lambda l/D$), гідравлічний коефіцієнт тертя (λ), узагальнений параметр (A).

4. Оцінено вплив транзитної витрати на величину розрахункових параметрів напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводів. Визначено величину похибки, яка вноситься в розрахунки за умови нехтування транзитом.

5. Наведено методики розрахунку напірних похильних збірних та розподільчих дренажних трубопроводів. Визначено граничні значення похилу труб і рівня ґрунтових вод, за яких їх впливом можна знехтувати, а також оцінено величину похибки, що виникає в кінцевих результатах розрахунків за таких умов.

6. Розроблено методику розрахунку змінного за величиною діаметра напірних дренажних трубопроводів за умови забезпечення за довжиною дрени заданої середньої швидкості руху рідини, що дозволило проєктувати їх для роботи в оптимальних режимах.

7. На основі аналізу запропонованих математичних моделей отримано розрахункові формули для визначення необхідного ступеня перфорації бічної поверхні дренажних труб двосторонньої дії, який забезпечує оптимальний режим роботи дрен, що суттєво розширює межі їх застосування.

8. Введено поняття і запропоновано методику розрахунку ефективних конструктивних характеристик напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводів, зокрема їх довжини та діаметра, що забезпечують необхідну інтенсивність подачі або відведення рідини.

9. Обґрунтовано структуру та особливості математичних моделей і на їх основі отримано аналітичні залежності для розрахунку напірних дренажних трубопроводів систем водопостачання та водовідведення, які працюють в

ускладнених умовах, тобто за одночасного впливу на потік в дрені кількох змінних параметрів.

10. Розроблено фізичні моделі напірних дренажних трубопроводів, які працюють зі змінною витратою вздовж шляху у фільтраційному режимі, на яких експериментально досліджено інтегральні характеристики і кінематику потоків. На основі встановленого механізму взаємодії між основними і змінюваними потоками, визначено причини збільшення втрат напору порівняно з режимом рівномірного руху рідини.

11. На основі обробки отриманих експериментальних даних запропоновано зручні емпіричні залежності для розрахунку гідравлічного коефіцієнта тертя λ напірних збірних дренажних трубопроводів, доведено, що за чисел Рейнольдса $Re < 6000$ вплив змінної витрати призводить до збільшення коефіцієнта λ в 1,2 – 2 рази порівняно з рухом рідини з постійною витратою. Для розподільчих трубопроводів в інженерних розрахунках ефектом збільшення величини коефіцієнта λ можна знехтувати.

12. Результати досліджень та запропоновані методики розрахунку впроваджено під час проектування систем збірних і розподільчих дренажних трубопроводів в ТОВ «БК «Спецбудсервіс», на підприємстві «Сінто-сервіс», в ТОВ «Інститут комунальної інфраструктури», ТОВ «ІНТЕР ЄВРО БІЗНЕС», ТОВ «ПОБІ Вотер Інжиніринг».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science

1. Kravchuk A., Kochetov G., **Kravchuk O.** Improving the calculation of collecting perforated pipelines for water treatment structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, No. 10(108). P. 23–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216366> (**Scopus Q3**).

Здобувачем проведено розрахунок збірних перфорованих трубопроводів за вдосконаленою методикою.

2. Cherniuk V., Hnativ R., **Kravchuk O.**, Orel V., Bihun I., Cherniuk M. The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6, No. 7(114). P. 93–103. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852> (**Scopus Q2**).

Здобувачем проаналізовано існуючі методики розрахунку напірних розподільчих трубопроводів.

3. Kravchuk A., Cherniuk V., **Kravchuk O.**, Airapetian T. Assessing the value of the hydraulic friction factor in pipelines working with a flow connection along the path. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 7, No. 7(119). P. 61–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265670> (**Scopus Q3**).

Здобувачем виконано розрахунок гідравлічного коефіцієнта тертя за дослідними даними.

4. Kravchuk A., Cherniuk V., Kochetov G., **Kravchuk O.**, Airapetian T. Determination of the particularities of the hydraulic friction factor variation of collecting drainage pipelines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 6, No. 7(126). P. 33–38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.292258> (*Scopus Q3*).

Здобувачем виконано обробку експериментальних даних по визначенню гідравлічного коефіцієнта тертя збірних дренажних трубопроводів.

5. Cherniuk V., **Kravchuk O.**, Fasuliak V., Cherniuk M. Improvement of modeling of laminar flows in pressure collector-pipelines. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2024. Vol. 120, No. 2. P. 182–196. <https://doi.org/10.37934/arfmts.120.2.182196> (*Scopus Q3*).

Здобувачем виконано розрахунок коефіцієнта Дарсі збірних трубопроводів за дослідними даними.

Монографія

6. Кравчук А.М., Чернишев Д.О., **Кравчук О.А.** Гідравліка напірних перфорованих трубопроводів очисних споруд систем водопостачання та водовідведення: монографія. Київ: КНУБА, 2021. 204 с.

Здобувачем проведено обробку експериментальних даних щодо визначення характеристик напірних перфорованих трубопроводів, в тому числі виконано побудову необхідних графічних залежностей.

Статті у наукових фахових виданнях України категорії Б

7. Кравчук А.М., Кочетов Г.М., **Кравчук О.А.** Проектування трубопроводів для рівномірного збору води вздовж шляху. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2020. Вип. 33. С. 34–40. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.33.34-40>

Здобувачем виконано розрахунки конкретних збірних трубопроводів, які використовуються в реальних спорудах.

8. **Кравчук О.А.**, Кравчук О.Я. Оцінка впливу різного роду втрат напору на характеристики роботи збірних трубопроводів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2020. Вип. 34. С. 19–24. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.34.19-24>

Здобувачем здійснено розрахунок втрат напору у збірних трубопроводах різної довжини.

9. **Kravchuk O.A.** Particularities of hydraulic calculation of collecting prepressure drainage pipelines. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2021. Вип. 83, P. 130-138. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2021-83-130-138>

10. **Кравчук О.А.** До гідравлічного розрахунку напірних дренажних трубопроводів, які працюють в режимі роздачі. *Комунальне господарство міст*. 2021. Вип. 163. С. 68–74. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-3-163-68-74>

11. Кравчук А.М., Кочетов Г.М., **Кравчук О.А.** Визначення коефіцієнтів Бусінеска і Коріюліса для трубопроводів, що працюють з приєднанням витрати вздовж шляху. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2021. Вип. 36. С. 11–17. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.36.11-17>

Здобувачем проведено розрахунки величини коефіцієнтів Бусінеска і Коріюліса даних потоків.

12. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.** Оцінка впливу транзитної витрати на характеристики збірних дренажних трубопроводів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2021. Вип. 37. С. 42–46. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.37.42-46>

Здобувачем виконано порівняння величин основного і транзитного потоків.

13. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.** Визначення характеристик розподільчих дренажних трубопроводів при пропуску транзитної витрати. *Науковий вісник будівництва*. 2021. Вип. 3(105). С. 123–129. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-123-129>

Здобувачем розроблено методику оцінки параметрів потоку при пропуску транзитної витрати.

14. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.** Оцінка впливу похилу на характеристики напірних збірних дренажних трубопроводів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2022. Вип. 40. С. 26–30. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.40.26-30>

Здобувачем проведено розрахунок параметрів похильних збірних дренажних трубопроводів.

15. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.**, Ломако А., Кравчук О.Я. Зміна параметрів збірних дренажних трубопроводів при пропуску транзитної витрати. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2022. Вип. 41. С. 52–58. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.41.52-58>

Здобувачем обґрунтовано методику оцінки параметрів збірних дренажних трубопроводів при пропуску транзитної витрати.

16. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.** Вплив величини похилу на розрахункові параметри збірних дренажних трубопроводів. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2022. Вип. 2. С. 88–96. <http://doi:10.31650/2786-6696-2022-2-88-96>

Здобувачем запропоновано математичну модель, яка описує рух рідини в похильних збірних дренажних трубопроводах.

17. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.**, Ломако А., Кравчук О.Я. Оцінка впливу транзитної витрати на характеристики розподільчих дренажних трубопроводів. *Містобудування та територіальне планування*. 2023. Вип. 82. С. 213–219. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.82.213-219>

Здобувачем розроблено методику розрахунку розподільчих дренажних трубопроводів при пропуску транзитної витрати.

18. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.** Розрахунок розподільчих дренажних трубопроводів, прокладених з похилом. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2023. Вип. 42. С. 35–41. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.35-41>

Здобувачем запропоновано методику розрахунку розподільчих дренажних трубопроводів, прокладених з похилом.

19. Кравчук А., **Кравчук О.**, Чабанюк Р., Кравчук О. До методики розрахунку розподільчих дренажних трубопроводів при наявності похилу рівня ґрунтових вод. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2023. Вип. 45. С. 39–43. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.39-43>

Здобувачем запропоновано математичну модель, яка описує рух рідини в розподільчих дренажних трубопроводах за наявності похилу рівня ґрунтових вод.

20. Кравчук А., **Кравчук О.** Визначення ефективних конструктивних характеристик збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2023. Вип. 13. С. 149–159. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.149-159>

Здобувачем розроблено методику розрахунку ефективних конструктивних характеристик збірних дренажних трубопроводів.

21. Кравчук А., **Кравчук О.**, Барладіна В., Перебийніс В. Розрахунок горизонтальних збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем при наявності похилу рівня ґрунтових вод. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2023. Вип. 102. С. 58–64. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0501>

Здобувачем запропоновано математичну модель, яка описує рух рідини в збірних дренажних трубопроводах за наявності похилу рівня ґрунтових вод.

22. Кравчук А., **Кравчук О.**, Чабанюк Р., Кравчук О. Визначення характеру зміни діаметра розподільчого дренажного трубопроводу вздовж шляху. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2024. Вип. 46. С. 14–19. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.46.14-19>

Здобувачем розроблено методику розрахунку розподільчого дренажного трубопроводу змінного діаметра.

23. Кравчук А., **Кравчук О.**, Возний О. Особливості роботи напірних похильних збірних дренажних трубопроводів за наявності похилу рівня ґрунтових вод. *Технічні науки та технології*. 2024. Вип. 1(35). С. 302–310. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-302-310](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-302-310)

Здобувачем запропоновано методику розрахунку збірних похильних дренажних трубопроводів, які працюють за наявності похилу рівня ґрунтових вод.

24. Кравчук А.М., Кочетов Г.М., **Кравчук О.А.**, Самченко Д.М. Розрахунок горизонтальних розподільчих дренажних трубопроводів, які працюють за наявності похилу рівня ґрунтових вод. *Сучасні технології та методи розрахунків в будівництві*. 2024. Вип. 21. С. 113–120. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-12)

Здобувачем запропоновано методику розрахунку розподільчих похильних дренажних трубопроводів, які працюють за наявності похилу рівня ґрунтових вод.

25. Кравчук А., **Кравчук О.** Визначення необхідного ступеня перфорації поверхні стінок збірних дренажних трубопроводів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2024. Вип. 47. С. 29–34. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.47.29-34>

Здобувачем розроблено методику розрахунку необхідного ступеня перфорації стінок збірних дренажних трубопроводів.

26. Кравчук А., **Кравчук О.**, Возний О., Кравчук О. Особливості роботи збірних трубопроводів при наявності транзиту і похилу рівня ґрунтових вод. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2024. Вип. 48. С. 26–32. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.48.26-32>

Здобувачем запропоновано оригінальну методику розрахунку збірних дренажних трубопроводів, які працюють за наявності транзиту і похилу рівня ґрунтових вод.

27. **Кравчук О.** Розрахунок необхідної інтенсивності перфорації бічної поверхні розподільчих дренажних трубопроводів. *Комунальне господарство міст*. 2025. Т. 1, №189. С. 238–242. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-238-242>

28. **Kravchuk O.**, Kravchuk O. Determination of the optimal average fluid velocity in the sections of a variable-diameter collecting drainage pipeline. *Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini*. 2025. No 106. P. 5–11. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2025.106.0101>

Здобувачем запропоновано методику визначення середньої швидкості збірних дренажних трубопроводів змінного діаметра.

29. **Кравчук О.**, Кравчук А. Розрахунок збірних дренажних трубопроводів змінного перерізу. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2025. Вип. 52. С. 39–45. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.52.39-45>

Здобувачем запропоновано методику визначення основних параметрів роботи збірних дренажних трубопроводів змінного діаметра.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

30. Kravchuk A., **Kravchuk O.**, Velychko S., Airapetian T. Calculation of effective parameters of distribution drainage pipelines. *Proceedings of EcoComfort 2024. EcoComfort 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Cham*. 2024. Vol. 604. P. 331–340. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_29 (**Scopus Q4**).

Здобувачем розроблено методику розрахунку ефективних конструктивних параметрів розподільчих дренажних трубопроводів.

31. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.** Визначення гідравлічного коефіцієнта тертя λ_{36} для напірних збірних перфорованих трубопроводів. *Екологія. Ресурси. Енергія (ERE): тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції*. Київ, КНУБА, 24–26 листопада 2021 р. С. 17.

Здобувачем проведено математичну обробку експериментальних даних по визначенню гідравлічного коефіцієнта тертя $\lambda_{зб}$.

32. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.** Розрахунок розподільчих дренажних трубопроводів, прокладених з похилом. *Зелене будівництво (Green Construction)*: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, КНУБА, 13–14 квітня 2023 р. С. 472–476.

Здобувачем запропоновано методику оцінки впливу похилу на роботу збірних дренажних трубопроводів.

33. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.** Забезпечення ефективних умов роботи збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем. *Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти*: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, НТУУ «КПІ», 9–10 жовтня 2023 р. С. 96–98.

Здобувачем запропоновано методику розрахунку збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем.

34. **Кравчук О.**, Чабанюк Р. Вдосконалення методики розрахунку збірних дренажних трубопроводів. *БУД-МАЙСТЕР-КЛАС-2023*: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених. Київ, КНУБА, 29 листопада – 1 грудня 2023 р. С. 237–238.

Здобувачем запропоновано вдосконалений варіант методики розрахунку збірних дренажних трубопроводів.

35. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.**, Чабанюк Р.А. Визначення ефективної довжини напірних розподільчих дренажних трубопроводів. *Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Одеса, ОДАБА, 13–14 грудня 2023 р. С. 44–46.

Здобувачем запропоновано аналітичні залежності для розрахунку довжини напірних розподільчих дренажних трубопроводів.

36. Кравчук А.М., **Кравчук О.А.**, Барладіна В.А., Возний О.Т. Аналіз умов роботи розподільчих дренажних трубопроводів змінного діаметра. *Green Construction (Зелене будівництво)*: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, КНУБА, 16–17 квітня 2024 р. С. 181–184.

Здобувачем розроблено методику визначення змінного діаметра розподільчих дренажних трубопроводів.

37. **Кравчук О.А.**, Возний О.Т. Розрахунок горизонтальних розподільчих дренажних трубопроводів, які працюють при наявності похилу рівня ґрунтових вод. *Інновації у будівництві*: тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених. Луцьк, ЛНТУ, 14 травня 2024 р. С. 43–45.

Здобувачем оцінено вплив похилу рівня ґрунтових вод на результати розрахунку горизонтальних розподільчих дренажних трубопроводів.

38. **Кравчук О.**, Кострич Б. Розрахунок оптимального діаметра збірного дренажного трубопроводу при заданій довжині. *Роль меліорації та водного*

господарства у забезпеченні сталого розвитку сільського господарства: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених. Київ, ІВПіМ НААН, 10 жовтня 2024 р. С. 26–28.

Здобувачем запропоновано методику розрахунку оптимального діаметра збірних дренажних трубопроводів.

39. **Kravchuk O.** Methodology for calculating the side walls perforation in distribution drainage pipelines. *Scientific innovation: theoretical insights and practical impacts: proceedings of the 1st International scientific and practical conference.* Naples, Italy, January 13–15, 2025. P. 240–242.

40. **Kravchuk O.,** Kravchuk A., Voznyi O. Determination of the effective length of collecting drainage pipelines. *Modern problems of science and technology: proceedings of the 2nd International scientific and practical conference.* Tallinn, Estonia, March 17–19, 2025. P. 240–242.

Здобувачем запропоновано методику інженерного розрахунку конкретних параметрів напірних збірних дренажних трубопроводів.

41. **Кравчук О.А.,** Кравчук А.М. Методика розрахунку ступеня перфорації бічних стінок збірних дренажних трубопроводів. *Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції.* Київ, НТУУ «КПІ», 20–21 листопада 2025 р. С. 103–105.

Здобувачем запропоновано методику розрахунку ступеня перфорації бічних стінок збірних дренажних трубопроводів.

42. **Кравчук О.,** Кравчук А. Розрахунок збірних дренажних трубопроводів змінного перерізу. *Енергія. Ресурси. Екологія (ERE): тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції.* Київ, КНУБА, 3–5 грудня 2025 р. С. 57.

Здобувачем запропоновано методику визначення основних параметрів роботи збірних дренажних трубопроводів змінного діаметра.

АНОТАЦІЯ

Кравчук О.А. Розвиток наукових основ забезпечення ефективної роботи дренажних трубопроводів систем водопостачання та водовідведення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.04 «Водопостачання, каналізація». – Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 2026.

Дисертацію присвячено науковому обґрунтуванню і розробці нових, більш надійних і досконалих, математичних моделей і методів розрахунку конструктивних і технологічних параметрів напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводів систем водопостачання та водовідведення. На основі проведеного аналізу математичних моделей отримано нові, більш точні і зручні у використанні, аналітичні розв'язки для випадків збору і роздачі рідини вздовж шляху для випадку проходження рідини через стінки трубопроводу у фільтраційному режимі. При цьому введено поняття умовного

нескінченно довгого дренажного трубопроводу або трубопроводу кінцевої довжини з нескінченною фільтраційною спроможністю своїх бічних стінок. Розроблено методику розрахунку основних характеристик даних трубопроводів за пропуску транзитної витрати. Проаналізовано раціональний варіант застосування дренажних трубопроводів змінного (такого, що збільшується або зменшується) діаметра за довжиною. Введено до розгляду поняття ефективних параметрів збірних і розподільчих дренажних трубопроводів, під якими розуміють ділянки труби, на яких інтенсивність втікання або витікання рідини буде не меншою ніж технологічно задана. Визначено умови, за яких трубопроводи слід відносити до похильних або малопохильних. Обґрунтовано граничне значення похилу I_{gr} , вплив якого, в межах прийнятої похибки δ , можна не враховувати в розрахунках. Запропоновано методику розрахунку необхідного ступеня перфорації бічних стінок дрени. Проаналізовано умови роботи напірних дренажних трубопроводів, які працюють в ускладнених умовах, тобто за одночасного впливу на потік в дрени кількох змінних параметрів. Встановлено умови моделювання досліджуваних трубопроводів. Визначено, що основними критеріями подібності можуть слугувати: критерій Рейнольдса (Re); коефіцієнт опору (ζ_l); гідравлічний коефіцієнт тертя (λ); узагальнений параметр (A). Проаналізовано значний об'єм експериментальних даних, як особисто автора, так і інших дослідників щодо визначення основних гідравлічних характеристик вивчаємих потоків. Отримано емпіричну залежність для визначення величини гідравлічного коефіцієнта тертя $\lambda_{зб}$. Представлено зручні для використання, більш надійні методики розрахунку напірних збірних і розподільчих дренажних трубопроводів. Наведено приклади їх розрахунку.

Ключові слова: напірні збірні і розподільчі дренажні трубопроводи, втрати напору, фільтрація, фільтраційний опір, гідравлічний коефіцієнт тертя, математичні моделі, ефективні характеристики.

ABSTRACT

Kravchuk O.A. Development of scientific foundations for ensuring the effective operation of drainage pipelines in water supply and wastewater systems. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the speciality 05.23.04 «Water Supply and Sewerage». – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the scientific substantiation and development of new, more reliable and advanced mathematical models and methods for calculating the structural and technological parameters of pressure collecting and distributing drainage pipelines of water supply and wastewater systems. Based on the conducted analysis of mathematical models, new, more accurate and convenient analytical solutions have been obtained for cases of fluid collection and distribution along the path for fluid passage through the pipeline walls in filtration mode. At the same time,

the concept of a conditional infinitely long drainage pipeline or a pipeline of finite length with infinite filtration capacity of its side walls was introduced. A methodology for calculating the main characteristics of these pipelines during the passage of transit flow has been developed. A rational variant of using drainage pipelines of variable (increasing or decreasing) diameter along the length was analyzed. The concept of effective parameters of collecting and distributing drainage pipelines was introduced into consideration, understood as pipe sections where the intensity of fluid inflow or outflow was no less than the technologically specified one. Conditions under which pipelines should be classified as sloped or slightly sloped were determined. The limit value of the slope I_{th} , the influence of which, within the accepted error δ , can be neglected in calculations, has been substantiated. A methodology for calculating the required degree of perforation of the drain side walls was proposed. Operating conditions of pressure drainage pipelines working in complicated conditions, i.e., under the simultaneous influence of several variable parameters on the flow in the drain, were analyzed. Modeling conditions for the investigated pipelines were established. It was determined that the following could serve as the main similarity criteria: Reynolds criterion (Re); resistance coefficient (ζ_l); hydraulic friction factor (λ); generalized parameter (A). A significant volume of experimental data, both by the author personally and by other researchers, regarding the determination of the main hydraulic characteristics of the studied flows has been analyzed. An empirical dependence for determining the value of the hydraulic friction factor λ_{col} was obtained. More reliable methodologies for calculating pressure collecting and distributing drainage pipelines, convenient for use, have been presented. Examples of their calculation were provided.

Keywords: pressure collecting and distributing drainage pipelines, head losses, filtration, filtration resistance, hydraulic friction factor, mathematical models, effective characteristics.