

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**



КРАВЧЕНКО МАРИНА ВАСИЛІВНА

УДК 628.3:[628.339+628.35+532.546+58.072]

**НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕЛЕНИХ
КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ДОЩОВИМИ
СТОКАМИ В УРБАНІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

21.06.01 – екологічна безпека

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2024

Дисертація є рукопис

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

Наукова консультантка: докторка технічних наук, професорка
ТКАЧЕНКО ТЕТЯНА МИКОЛАЇВНА,
завідувачка кафедри технологій захисту
навколишнього середовища та охорони праці
Київського національного університету
будівництва і архітектури.

Офіційні опоненти: докторка технічних наук, професорка
ТРОХИМЕНКО ГАННА ГРИГОРІВНА,
завідувачка кафедри екології та природоохоронних
технологій Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова;

докторка технічних наук, професорка
ХРУТЬБА ВІКТОРІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА,
завідувачка кафедри екології та технологій захисту
навколишнього середовища
Національного транспортного університету;

докторка технічних наук, професорка
СТЕПОВА ОЛЕНА ВАЛЕРІЇВНА,
професорка кафедри прикладної екології та
природокористування Національного університету
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Захист відбудеться «14» листопада 2024 року об 11⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.11 із захисту дисертацій при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил України, 31, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил України, 31 або за посиланням:
<https://www.knuba.edu.ua/kravchenko-maryna-vasylivna/>

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.056.11
канд. техн. наук, доцент



Юлія БЕРЕЗНИЦЬКА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розширення міст, спричинене демографічними, економічними та соціальними змінами, є динамічним і складним процесом, який часто призводить до незворотних змін у навколишньому середовищі, впливаючи на трансформацію природного рослинного покриву. Зростання забудови збільшує площу непроникних поверхонь, як от будівлі, дороги, паркінги та інженерна інфраструктура, які слугують показниками рівня урбанізації та негативно впливають на екологічну якість міських територій. Це посилює поверхневий стік дощових вод, підвищує ризик міських повеней, знижує рівень інфільтрації та сприяє накопиченню забруднювачів у зливових водах. Крім того, зміни клімату порушують режими опадів у різних регіонах, що призводить до непередбачуваного збільшення їх обсягу та інтенсивності. У багатьох країнах світу, зокрема в Україні, ситуація ускладнюється через недостатню кількість дренажних систем для збору зливових стоків та обмежену ефективність існуючих каналізаційних систем, що призводить до тривалого заболочування місцевості. Окрім проблем в галузі управління зливовими водами, урбанізація сприяє утворенню міських теплових островів, погіршенню якості повітря, а також зміні структури й функціонування міста. Урбанізація міст змінює характеристики міського транспорту, що призводить до збільшення органічних забруднювачів, зокрема через викиди вихлопних газів, знос шин і гальм, а також витікання паливно-мастильних матеріалів, які забруднюють зливову воду нафтовими вуглеводнями. Суттєвий внесок у цю проблему на території України вносять і воєнні дії, наслідки яких спричиняють неконтрольований витік палива та нафтопродуктів у результаті горіння складів паливно-мастильних матеріалів, пересування та загоряння військової техніки і, безпосередньо, ведення бойових дій.

Вирішення проблем урбанізованого середовища вимагає зміни підходів до менеджменту води у сучасних містах та переходу від лише інженерних засобів відведення води до комбінованого застосування інженерних та природних механізмів у рамках концепції міста-губки. Одним з таких сучасних методів є застосування зелених конструкцій, які поєднують живі рослини з інженерними системами. Це дозволить ефективно збирати й покращувати якість дощових стоків з міських шляхів, запобігати підтопленням будівель і доріг, а також сприятиме покращенню стану річок в межах міст і надасть екологічні переваги, зокрема очищення повітря та наближення міського середовища до природного.

В Україні системні науково-технологічні розробки щодо зелених конструкцій як засобів-губок практично відсутні. Наявні дослідження здебільшого зосереджені на зелених покриттях та вертикальних системах озеленення. Окремі наукові праці, зокрема дослідження В.О. Петренка та А.О. Петренка (2016 р.), Г.В. Гетун та Б.М. Румянцева (2016 р.), Ю.О. Захарова (2021 р.) та Д.А. Кулакзиса (2022 р.), мають теоретичний характер або стосуються специфічних питань. Важливий внесок у цю галузь зробила професорка Тетяна Ткаченко, яка вперше перейшла від окремого вивчення певних ефектів до систематичних теоретичних та експериментальних досліджень, а саме: вивчення позитивних ефектів від зелених конструкцій (охолоджувальний ефект, секвестрація CO₂, теплоізоляція, шумопоглинання,

можливості організації шляхів міграції біоти, математичні моделі застосування асортименту рослин на зелених конструкціях у різних кліматичних зонах України), розробила та успішно впровадила конструкцію інтенсивних зелених покриттів з вітчизняних будівельних матеріалів. У подальшому це заклало основу для розроблення нормативної бази щодо впровадження зелених конструкцій в Україні. Дослідження щодо порівняно нового типу зелених конструкцій – дощових садів в Україні практично не ведуться, хоча мають великий попит у різних країнах світу. Впровадження дощових садів лише починається в окремих містах, як от Київ і Львів, і поки що не має достатнього наукового підґрунтя. Єдині значні наукові розробки у цій галузі представлені роботами Тетяни Ткаченко та Романа Глуценка, які присвячені дослідженню дощових садів-смуг як інноваційного методу поглинання та фільтрації дощового стоку з автошляхів відповідно до сучасної концепції міста-губки. Масове впровадження цих технологій в Україні стримується відсутністю нормативних документів, які регламентують їх класифікацію та надають чіткі рекомендації для впровадження зелених конструкцій на етапах проектування, будівництва та експлуатації.

Тому постає актуальна науково-технологічна проблема управління дощовими стоками, забрудненими паливно-мастильними матеріалами, в урбанізованому середовищі шляхом наукового обґрунтування та розроблення зелених конструкцій у рамках концепції міста-губки.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами і темами. Робота виконана відповідно до Указу Президента України №722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року», проекту «Стратегії формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року» і безпосередньо пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0122U001197, 0120U101145, 0117U003297).

Метою роботи є розроблення науково-технологічних основ використання зелених конструкцій для ефективного управління дощовими стоками в урбанізованому середовищі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасні природоорієнтовані рішення для покращення стійкості міст до затоплень, зокрема визначити роль зелених конструкцій у блакитно-зеленій інфраструктурі в комплексі з іншими елементами міського планування.

2. Упорядкувати та уточнити термінологію, здійснити систематизацію й розробити детальну класифікацію зелених конструкцій для визначення місця дощових садів у блакитно-зеленій інфраструктурі.

3. Розробити універсальну гідрологічну модель на основі закону Дарсі та рівняння Бернуллі, яка дозволяє описувати динаміку процесів у конструкції дощового саду в будь-який момент часу задля обґрунтування конструктивних особливостей та оптимізування параметрів системи.

4. Провести комплекс теоретичних і експериментальних досліджень фільтраційних властивостей дощових садів із рослинами та без них стосовно видалення нафтових вуглеводнів із зливових вод, а також дослідити часові та просторові характеристики їх розподілу й накопичення в експериментальних конструкціях. Оцінити вплив нафтових вуглеводнів на зміну гідравлічної провідності системи та на рослини виду *Physocarpus opulifolia Diabolo*.

5. Дослідити газообмін у рослинах, що використовуються в зелених конструкціях як засобах-губках з метою кількісного визначення їх здатності виділяти та поглинати кисень і вуглекислий газ, очищувати повітря від шкідливих речовин та виділяти летючі фітоорганічні речовини, для формування рекомендацій щодо вибору та догляду за рослинами.

6. Провести економічне оцінювання впровадження зелених конструкцій для управління зливовими водами, з урахуванням кліматичних умов України, що передбачає розрахунок еколого-економічного ефекту від збирання дощової води із зелених покриттів, резервуарів та дощових садів.

7. Розробити проєкт ДСТУ щодо принципів проєктування, будівництва та обслуговування конструкцій дощових садів для помірного клімату України, впровадивши конструкцію дощового саду в реальних умовах експлуатації.

Об'єктом дослідження є процес управління дощовими стоками з використанням зелених конструкцій.

Предметом дослідження є моделювання гідрологічних, фільтраційних та екологічних процесів у зелених конструкціях задля підвищення якості та зниження кількості міських стічних вод.

Методи дослідження. Розроблення класифікації зелених конструкцій здійснювалось на підставі поглибленого літературного аналізу наукових робіт і нормативних документів країн Європи. Фільтраційні процеси досліджували за допомогою методу обернено-фазової високоефективної рідинної хроматографії (ОФ-ВЕРХ) із застосуванням сучасних методів планування, виконання та оброблення результатів експериментів. Математичне моделювання гідрологічних процесів у дощових садах здійснювалося на основі закону Дарсі та рівняння Бернуллі. Для виконання розрахунків, побудови графіків, гістограм та діаграм використовували програмне забезпечення GIMP 2.99.18, SciLab версії 2024.0.0, Inkscape версії 1.3.2 та LibreOffice Calc.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому що:

уперше:

- науково обґрунтовано та розроблено математично-гідрологічну модель на основі закону Дарсі та рівняння Бернуллі, яка дозволяє описувати гідродинамічні процеси в конструкціях дощових садів і визначати умови та конструктивні особливості для їх ефективного функціонування при низькій та середній інтенсивності опадів без утворення водяного стовпа на поверхні;

- розроблено математично-гідрологічну модель, яка дозволяє описувати процеси проходження та насичення водою багатошарової конструкції дощового саду в будь-який момент часу дощових подій високої інтенсивності з урахуванням

висоти водяного стовпа та коефіцієнтів фільтрації шарів системи, а також проектувати конструкції з мінімізацією ризику переливу.

удосконалено:

- термінологію та класифікацію зелених конструкцій у контексті концепції міста-губки та блакитно-зеленої інфраструктури, що сприяє їхньому ефективному інтегруванню в урбоценоз згідно з принципами сталого розвитку, підвищенню якості життя та забезпеченню синергії з іншими елементами міського планування через екосистемний підхід;

- метод експериментального дослідження фільтраційних властивостей дощових садів для видалення нафтових вуглеводнів із зливових вод, шляхом врахування впливу рослин і здійснення поливання відповідно до режиму опадів, а також часові та просторові характеристики їх накопичення і розподілу в багатошаровій структурі конструкції з метою вирішення проблеми забруднення річок, підземних вод і ґрунтів паливно-мастильними матеріалами.

набули подальшого розвитку:

- метод дослідження газообміну для забезпечення можливості вивчення рослин з невеликою фотосинтетично активною біомасою шляхом підвищення вимог до герметичності газообмінної камери для кількісного визначення їх здатності очищувати повітря та впливати на екологічну ситуацію в містах.

Практичне значення отриманих результатів.

Удосконалена термінологія та розроблена класифікація зелених конструкцій дозволяють підвищити якість підготовки фахівців у галузі зеленого будівництва та розроблення зелених стандартів, а також підвищити рівень обізнаності виробників задля забезпечення правильної ідентифікації та вибору різних типів цих технологій.

Результати моделювання гідрологічних процесів у дощових садах, дослідження часових і просторових характеристик розподілу та накопичення нафтових вуглеводнів, ступеня толерантності та стійкості рослин, а також газообміну дозволяють розробити ефективні конструкції дощових садів з оптимально підібраним асортиментом рослин. Це забезпечує комплексне вирішення проблем затоплення, погіршення якості повітря та забруднення ґрунтово-водного середовища міст шляхом впровадження єдиного технічного рішення, яке може бути реалізоване як на рівні окремих житлових будинків або об'єктів підприємницької діяльності, так і за ініціативи місцевих державних адміністрацій та територіальних громад.

Проведене економічне оцінювання впровадження зелених конструкцій для управління зливовими водами в умовах клімату України підтвердило можливість швидкого та рівномірного відведення дощової води з водозбірних територій за мінімальних витрат, забезпечуючи додаткові фінансові переваги як для суспільства, так і для держави. Впровадження конструкції дощового саду в реальних умовах дало можливість розробити рекомендації та принципи проектування, будівництва й обслуговування дощових садів, адаптованих до кліматичних умов України. Результати дисертаційної роботи впроваджено в розроблення проєктів ДСТУ ХХХХ: 20ХХ «Захист довкілля. Зелені конструкції. Технічні умови», ДСТУ ХХХХ: 20ХХ «Захист довкілля. Зелені конструкції.

Методи визначення теплотехнічних та газообмінних характеристик рослинних шарів», СОУ OEM 08.002.41.032:20XX. Система екологічної сертифікації та маркування згідно з ДСТУ ISO 14024:2018 (ISO 14024:2018, IDT). Громадські будівлі. Екологічні критерії та метод оцінювання життєвого циклу на етапах проектування та будівництва, в діяльність ТОВ «Украгроінвест», ТОВ «Науково-екологічний центр «Зелений світ»», а також у науково-педагогічну діяльність Київського національного університету будівництва і архітектури.

Особистий внесок здобувачки. У дисертаційній роботі авторка науково обґрунтувала місце та роль зелених конструкцій у рамках концепції міста-губки та блакитно-зеленої інфраструктури, вдосконала термінологію і класифікацію цих конструкцій, провела валідацію розроблених гідрологічних моделей дощових садів, проаналізувала криві залежностей процесу інфільтрації від основних параметрів, удосконала методика дослідження фільтраційних властивостей у видаленні нафтових вуглеводнів із дощових вод, виконала аналіз результатів хроматографічного дослідження з обґрунтуванням висновків і рекомендацій, здійснила еколого-економічну оцінку впровадження зелених конструкцій в урбанізоване середовище для управління зливовою водою, а також розробила принципи проектування, будівництва і обслуговування дощових садів.

Конкретний внесок авторки дисертації в кожен наукову працю, опубліковану зі співавторами, наведено на с. 32-38.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на наукових міжкафедральних семінарах КНУБА (2020-2024 рр.), на наукових, науково-методичних конференціях і семінарах різного рівня, а саме: Матеріалознавство та інженерія, інноваційні технології в архітектурі та дизайні (м. Харків, Україна, 21-22 травня 2020 р.); Міжнародна конференція молодих фахівців «GeoTerrace» (м. Львів, 2021 – 2023 р.р.); 4-й Міжнародний симпозиум з наук про Землю, енергетику, навколишнє середовище та сталий розвиток (м. Джакарда, Індонезія, 26-27 серпня 2023 р.); 4-а Міжнародна конференція зі сталого майбутнього: Екологічні, технологічні, соціальні та економічні питання (м. Кривий Ріг, Україна, 22- 26 травня 2023 р.); Всесвітній конгрес з навколишнього середовища та водних ресурсів (м. Мілвокі, Вісконсин, США, 19–22 травня 2024 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми безпеки на транспорті, в енергетиці, інфраструктурі» (м. Херсон, 8-11 вересня 2021 р.); II та III Міжнародній науково-практичній конференції «Green construction» (м. Київ, КНУБА, 2023 та 2024 р.р.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічні проблеми сучасності» (м. Луцьк, ДонНТУ, 10 травня 2023 р.); International Scientific-Practical Conference of young scientists «Build-Master-Class-2023» (м. Київ, 2023 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» (м. Київ, 22-24 листопада 2023 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Енергоощадні машини і технології» (м. Київ, КНУБА, 22-24 травня 2024 р.).

Публікації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 39 наукових праць, серед яких: 12 статей у наукових виданнях, долучених до Переліку

наукових фахових видань України категорії Б; 1 – у науковому виданні України, долученого до Переліку наукових фахових видань України категорії А; 4 статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію, з них – 3 у періодичних виданнях квартилю Q1, що індексуються в наукометричній базі Scopus; 19 публікацій у збірниках матеріалів та доповідей українських і міжнародних науково-технічних конференцій; 3 звіти в рамках науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, депоновані в Національній репозитарій академічних текстів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, семи розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, що має 401 найменування, та двох додатків, викладена робота на 405 сторінках друкованого тексту, серед яких 295 сторінок основного тексту, 73 рисунки і 16 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір та актуальність теми дослідження, розкрито суть та сучасний стан наукової проблеми, сформульовано мету та основні завдання, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрито наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий внесок здобувача. Наведено відомості про апробацію, наукові публікації та впровадження результатів дослідження.

У **першому розділі** проаналізовано взаємозв'язок між процесом урбанізації та навколишнім середовищем з акцентом на подвійні наслідки цього процесу. Підкреслено, що урбанізація є однією з головних рушійних сил економічного зростання, підвищення конкурентоспроможності міст і розвитку інфраструктури, однак її надмірно швидкий розвиток може спричинити серйозні екологічні та соціальні проблеми, прискорюючи глобальні кліматичні зміни.

Показано, що одним із ключових наслідків урбанізації міських територій є значне порушення природних гідрологічних процесів, спричинене збільшенням частки водонепроникних поверхонь, що призводить до змін у динаміці стоку та водного балансу. Підкреслено проблему забруднення зливових стоків паливно-мастильними матеріалами, що є наслідком збільшення міського транспортного потоку, заторів, зносу шин і гальм, а також неконтрольованих витікань палива та нафтопродуктів через воєнні дії на території України. Підкреслено важливість інтеграції зелених конструкцій в рамках концепції міста-губки та блакитно-зеленої інфраструктури (БЗІ) для комплексного вирішення мультидисциплінарних проблем урбанізованого середовища. Проаналізовано технологічні аспекти, переваги та недоліки функціонування зелених конструкцій дощових садів. Виявлено недосліджені проблеми від етапу проектування до особливостей експлуатації. Аналіз дозволив визначити перелік і зміст досліджень, спрямованих на підвищення ефективності управління обсягом і якістю зливових вод, а також на забезпечення додаткових функцій завдяки впровадженню зелених конструкцій.

У **другому розділі** проаналізовано досвід впровадження концепції міста-губки в різних країнах з акцентом на зелені конструкції. Визначено та обґрунтовано роль

і значення зелених конструкцій у рамках блакитно-зеленої інфраструктури, а також рівень їх інтегрування на різних масштабах урбанізованого середовища – від окремих житлових об'єктів до рівня територіальних громад і державних адміністрацій (рис. 1).

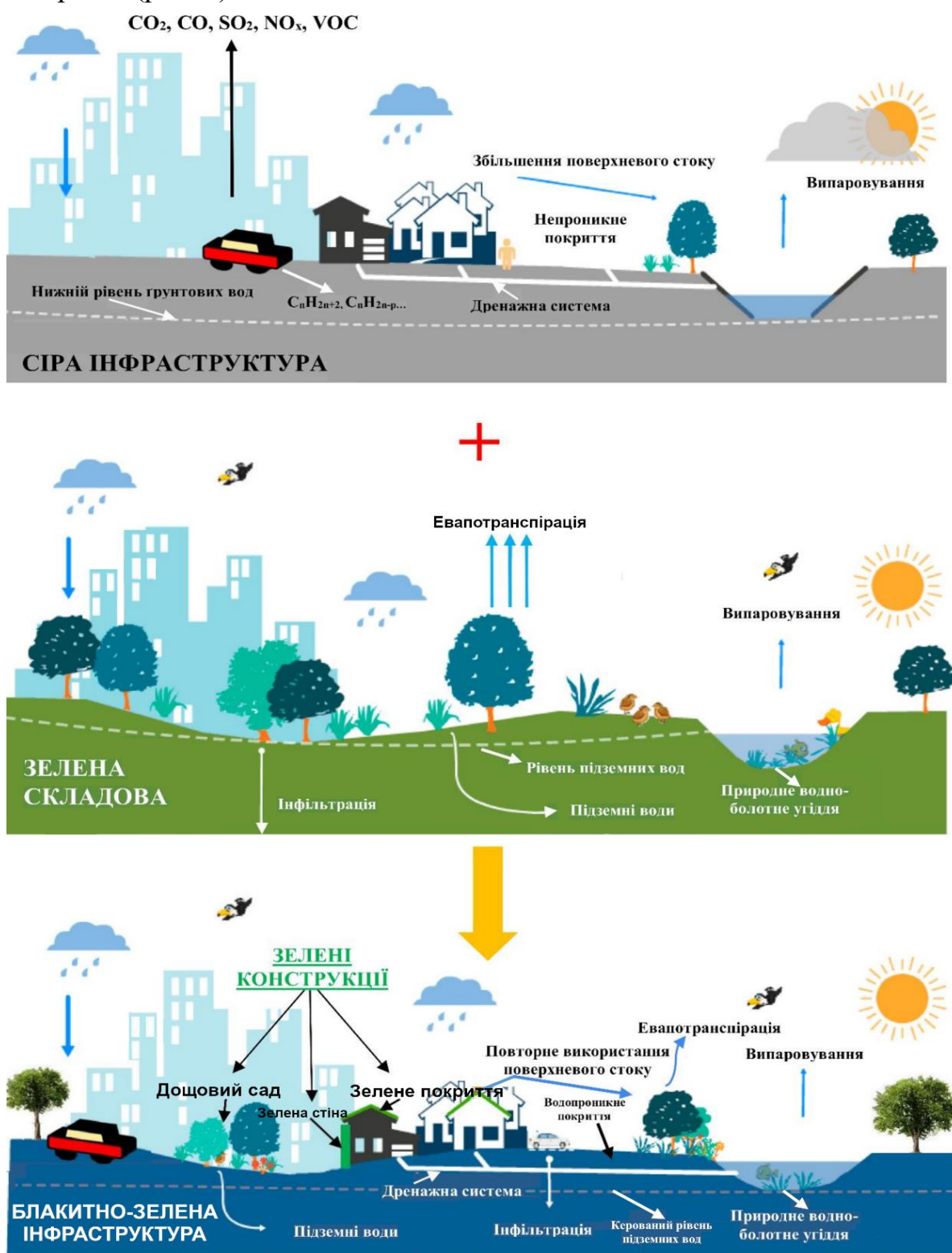


Рисунок 1. Природоохоронний підхід у вигляді поєднання сірої та зеленої інфраструктури

БЗІ містить природні елементи, як-от річки, водно-болотні угіддя та ліси, а також штучні елементи, зокрема зелені конструкції. У міському середовищі БЗІ

завжди поєднується із традиційними сірими дренажними системами, такими як транспортні (каналізаційні) мережі, сховища та очисні споруди, що забезпечує комплексний підхід до управління водними ресурсами. Підкреслено, що першою ланкою в ланцюгу вловлювання дощової води в системі БЗІ є зелені покриття. Вони першими за ходом дощової води сприймають і утримують її. Залишок частково потрапляє на зелені стіни, особливо при косих дощах. Частина води потрапляє на землю та дорожнє покриття і має бути поглинута зеленими зонами, водопроникними покриттями, екологічними паркувальними місцями та дощовими садами. У випадку відсутності дощової каналізації ці засоби-губки утворюють останню ланку в управлінні дощовими стоками. За наявності інженерних систем вони виступають передостанньою ланкою, завершуючи процес поглинання стоків перед їх остаточним відведенням.

Проведено детальний аналіз проблем удосконалення та класифікації зелених конструкцій, як це відображено в нормативній та науковій літературі. Виявлено термінологічні розбіжності та нечіткі визначення багатьох понять, а також відсутність систематичного підходу або повної класифікації різних видів зелених конструкцій у наявних нормативних документах країн Європи.

Проаналізовано проблеми інтегрування зелених конструкцій в Україні, серед яких основною є відсутність нормативних документів, що регламентують їх класифікацію та впровадження на етапах проектування, будівництва і експлуатації. На основі проведеного аналізу запропоновано комплекс заходів для розвитку та впровадження зелених конструкцій в Україні.

Упорядковано та уточнено термінологію, проведено систематизацію й розроблено детальну класифікацію зелених конструкцій. Науковий інтерес сьогодні зосереджений на таких типах зелених конструкцій, як зелені покриття, зелені стіни та дощові сади, що дозволяють забезпечувати комплексне вирішення проблем затоплення, погіршення якості повітря та забруднення ґрунтово-водного середовища міста за допомогою єдиного технічного рішення.

У **третьому розділі** проведено аналіз наявних гідрологічних моделей, представлених у науковій літературі, які дозволяють проектувати дощові сади з урахуванням конструктивних особливостей та прогнозувати їх поведінку в контексті управління зливовими водами. Встановлено, що більшість моделей потребують введення значної кількості вихідних даних і є складними для використання, що може призвести до великих похибок при проектуванні конструкцій дощових садів. Основними факторами, які впливають на швидкість інфільтрації в конструкціях дощових садів, є: склад ґрунтового середовища та товщина шарів конструкції, їх водоутримувальна здатність, значення коефіцієнта фільтрації, урахування висоти стовпа води на поверхні дощового саду та вибір площі конструкції. Окремо варто виділити зону заглиблення на поверхні дощового саду, призначену для збирання зливових стоків з водозбірної території та дощової води під час опадів.

Розроблено першу універсальну гідрологічну модель на основі закону Дарсі та рівняння Бернуллі, яка дозволяє описувати динамічні процеси в конструкції дощового саду на будь-якому етапі часу та розширює можливості розрахунку

витрат та подальшого витікання зливової води з системи. Модель враховує конструктивні особливості дощових садів, такі як глибина шарів та площа конструкції, а також параметри водоутримувальної здатності ґрунтових матеріалів. Модель може бути застосована для дощових опадів низької та середньої інтенсивності, коли водний стовп не утворюється на поверхні конструкції.

Для розширення можливостей визначення ключових факторів при проектуванні розмірів і характеристик дощових садів, а також для точнішого прогнозування процесів інфільтрації під час дощових подій високої інтенсивності, було розроблено іншу математичну модель, яка враховує висоту водяного стовпа та коефіцієнти фільтрації кожного шару конструкції. Для розробки універсальної гідрологічної моделі було виділено нескінченно-тонкий шар ґрунту або субстрату конструкції дощового саду між рівнями y та $y + dy$. Концептуальну схему дощового саду та пов'язаних з ним водних потоків показано на рисунку 2.

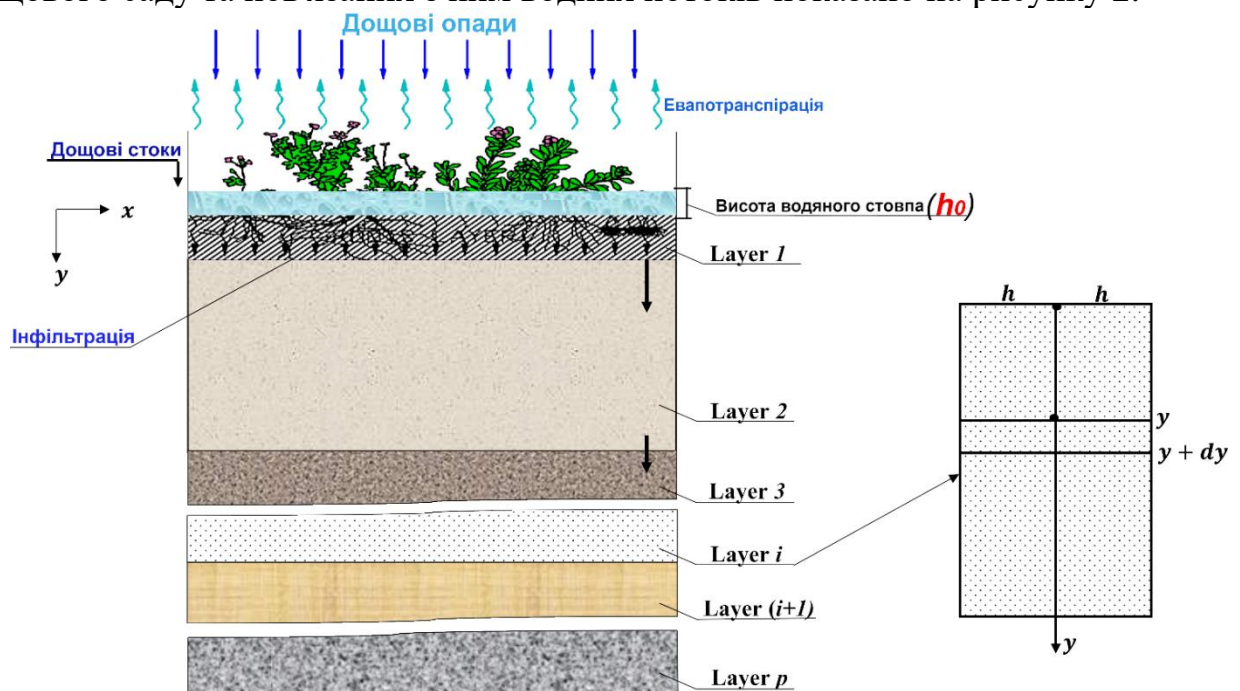


Рисунок 2. Концептуальна схема дощового саду та пов'язаних з ним водних потоків

Опис параметрів, долучених до гідрологічної моделі інфільтрації на основі закону Дарсі з урахуванням висоти стовпа води та коефіцієнта фільтрації наведено в таблиці 1.

Було прийнято, що з водозбірного басейну площею A_{bassin} , m^2 на поверхню конструкції дощового саду площею A_{sponge} , m^2 стікають дощові води, що мають середню швидкість надходження v_r , m/s . Між шарами ґрунтів відбувається спочатку насичення водою на рівні y , m , зі зростанням вологовмісту w , m^3/m^3 до насиченого стану w_{sat} , m^3/m^3 без просування потоку, а далі потік проходить транзитом через насичені шари без зміни швидкості, відповідно до рівняння нерозривності. Таким чином, задача спрощується до одновимірної.

$$v = k_f(y) \cdot dh(y_i)/dy \quad (1)$$

Таблиця 1. Параметри, долучені до гідрологічної моделі інфільтрації з урахуванням висоти стовпа води та коефіцієнта фільтрації

Параметр	Опис	Одиниця вимірювання
A_{bassin}	Площа водозбірного басейну	m^2
A_{sponge}	Площа конструкції дощового саду	m^2
A_{h_0}	Площа дощового саду, як функція від висоти h_0 від верхнього рівня	m^2
v_r	Швидкість надходження дощової води в систему	м/с
h_0	Висота водяного стовпа (HWC)	м
w	Початковий вологовміст ґрунтових сумішей	m^3/m^3
w_{sat}	Водоутримувальна здатність ґрунтових сумішей в насиченому стані	m^3/m^3
k_f	Коефіцієнт фільтрації ґрунтових сумішей	см/год
δ_j	Товщина j -го шару дощового саду	м
τ	Час насичення та заповнення дощового саду водою	с
y_i	Рівень глибини проникнення та насичення дощовою водою конструкції дощового саду на поточному часовому кроці τ	м
i, j, n, m	Шари конструкції дощового саду, починаючи з першого ($j=1$) і закінчуючи шаром ($m-1$), в якому відбувається насичення в конкретний момент часу	№

Процес проходження та насичення водою шару ґрунту з урахуванням висоти водяного стовпа h_0 на поверхні дощового саду описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} v = v_r \cdot \frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} - \frac{d(h_0 \cdot A_{h_0})}{A_{sponge} \cdot dr}, & y < y_i \\ v \cdot d\tau = w_{(y_i)} \cdot dy, & w_{(y_i)} < w_{sat}, y = y_i \\ v = 0, & y > y_i \end{cases} \quad (2)$$

Визначаємо положення y_i в момент часу τ з урахуванням висоти h_0 на поверхні конструкції:

$$y_i(\tau) = \frac{\frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} \cdot (\int_0^\tau v_r \cdot d\tau) - h_0(\tau) \cdot \frac{A_{h_0}(\tau)}{A_{sponge}}}{w_{sat}(y)} \quad (3)$$

Інтегруємо закон Дарсі від рівня y_a в шарі n_a до рівня y_b в шарі n_b з урахуванням HWC:

$$v_r \cdot \frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} - \frac{d(h_0 \cdot A_{h_0})}{A_{sponge} d\tau} = k_f(y) \cdot \frac{dh}{dy} \quad (4)$$

Враховуємо рівняння Бернуллі між рівнями y_a та y_b для нульового рівня на рівні y_b :

$$(y_b - y_a) + \frac{p_c(y_a)}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \frac{p_c(y_b)}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + \Delta h_{y_a - y_b} \quad (5)$$

На рівні y_i відбувається повне поглинання води без руху вниз, а на нескінченно малій відстані донизу води нема. Тому $p_c(y_i) = 0$. Статичний тиск при $y = 0$ знаходиться з рівняння Бернуллі для шару під верхнім рівнем стовпа води h_0

та для y з нульовим рівнем. На цьому рівні статичного тиску та втрат напору у вільному стовпі немає. Звідси знаходимо HWC на рівні заглиблення:

$$\frac{\Delta p_c(0)}{\rho g} + \frac{v_r^2}{2g} = h_0 + \frac{v_r^2}{2g} \quad (6)$$

Використовуючи рівняння (6) знаходимо HWC у зоні заглиблення на поверхні дощового саду:

$$h_0 = \frac{\Delta p_c(0)}{\rho g} \quad (7)$$

Після перетворень рівнянь (4) та (6) визначаємо висоту h_0 в кожен момент часу τ :

$$h_0 = \max \left(\left(v_r \cdot \frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} - \frac{d(h_0 \cdot A_{h_0})}{A_{sponge} d\tau} \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^{n-1} \frac{\delta_j}{k_{f,j}} + \frac{y_i - \sum_{j=1}^n \delta_j}{k_{f,n}} \right) - y_i, 0 \right) \quad (8)$$

Якщо всі шари насичені, то швидкість потрапляння води до ґрунту або дренажу, м/с, визначається:

$$v_{out} = v_r \cdot \frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} - \frac{d(h_0 \cdot A_{h_0})}{A_{sponge} d\tau} \quad (9)$$

Витрата води Q_{out} , м³/с, буде визначатись як:

$$Q_{out} = \left(v_r \cdot \frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} - \frac{d(h_0 \cdot A_{h_0})}{A_{sponge} d\tau} \right) \cdot A_{sponge} \quad (10)$$

Беручи до уваги рівняння (8), рівняння (3) можна записати:

$$y_{i,l+1} = \frac{\frac{A_{bassin}}{A_{sponge}} \cdot \int_{\tau_l}^{\tau_{l+1}} v_r \cdot d\tau - h_0(\tau_{l+1}) \cdot \frac{A_{h_0}(\tau_{l+1})}{A_{sponge}} + h_0(\tau_l) \cdot \frac{A_{h_0}(\tau_l)}{A_{sponge}}}{w_{sat}(y_l)} \quad (11)$$

Процес інфільтрації триватиме до тих пір, поки багатошарова структура дощового саду не досягне повного насичення і не заповниться водою. На підставі рівнянь (1) – (11) розроблено алгоритм та програмне забезпечення.

Коректність розроблених моделей перевірено розрахунками основних гідрологічних параметрів дощового саду в програмному забезпеченні Scilab на основі реальної дощової події, прийнятої як крайній випадок з екстремальною кількістю опадів 36 мм/год (рис. 3а). Характеристики ґрунтових матеріалів експериментально визначено за допомогою циліндричних колон, що імітують базову конструкцію дощового саду, яка складається з трьох основних шарів (рис. 3б).

Визначені величини водоутримувальної здатності w_{sat} та коефіцієнта фільтрації ґрунтових сумішей k_f були наступні:

- верхній ґрунтовий шар: $w_{sat1}=0,33$ м³/м³; $k_{f1}=7,0$ см/год;
- проміжний/інфільтраційний піщаний шар: $w_{sat2}=0,31$ м³/м³; $k_{f2}=45,0$ см/год;
- нижній гравійний шар: $w_{sat3}=0,1$ м³/м³; $k_{f3}=200,0$ см/год.

Було розраховано гідрологічну ефективність конструкції залежно від зміни товщини шарів та запропоновано оптимальне співвідношення площ, при якому конструкція дощового саду дозволяє повністю утримувати стік води при заданій

інтенсивності опадів (рис. 4). При цьому утворення *HWC* на поверхні конструкції не враховувалося.

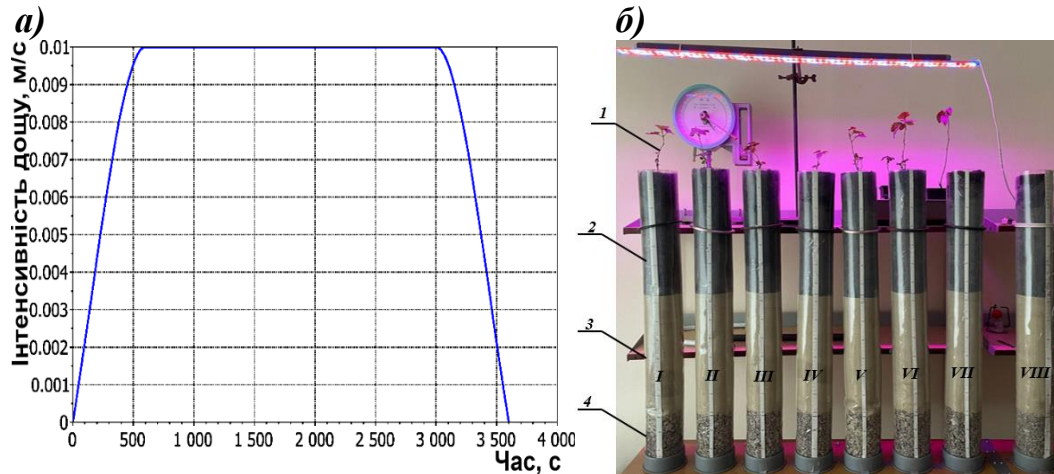


Рисунок 3. Визначення основних параметрів для моделювання процесів в дощових садах: а) крива зміни інтенсивності дощу з часом;

б) експериментальні фільтрувальні колони: *1* – рослини виду *Physocarpus opulifolia Diabolo*; *2* – шар природного супіщаного ґрунту з розмірами частинок <1 мм (густина 1,48 кг/дм³, пористість 52,1%, вміст вологи 3,7%); *3* – шар річкового піску з розмірами частинок 0,06-0,5 мм (густина 1,6 кг/дм³, пористість 39,3%, вміст вологи 6,0%); *4* – шар гравію з розмірами основних фракцій 5 – 7 мм та супутніх фракцій 1 – 3 мм

Результати моделювання показують (рис. 4а), що збільшення товщини верхнього ґрунтового шару δ_1 на 10 см дозволяє досягти оптимального співвідношення площ (A_{bassin}/A_{sponge}), а отже, і площі конструкції дощового саду.

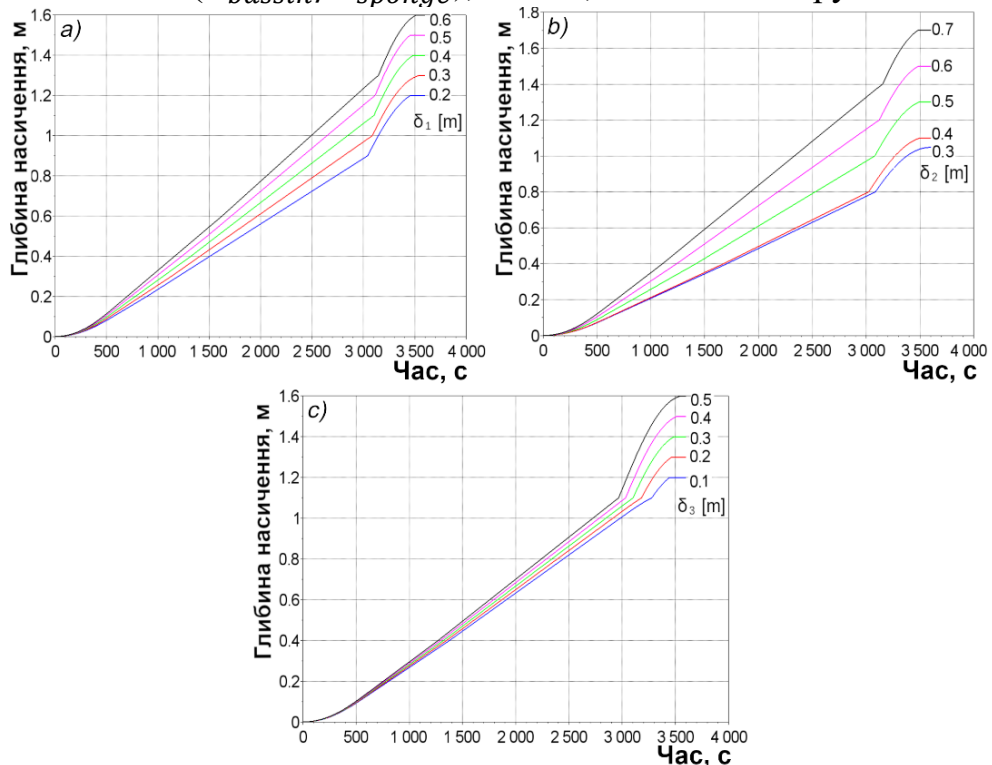


Рисунок 4. Криві зміни глибини насичення шарів конструкції дощового саду в часі залежно від товщини: а) верхнього ґрунтового шару (δ_1 , м); б) інфільтраційного шару (δ_2 , м); в) нижнього гравійного шару (δ_3 , м)

Згідно з рекомендаціями, розробленими в різних країнах, площа дощового саду має становити 4–10 % від площі території водозбірного басейну, з якої буде збиратися стік. Наприклад, при площі водозбірного басейну 100 м², найбільш доцільним значенням площі конструкції дощового саду буде 7 м², що для заданої інтенсивності дощової події можна досягнути при товщині шарів 0,6/0,7/0,3 м. При цьому дощовий сад буде повністю заповнено водою за 58 хвилин (3512 с) без переливу конструкції.

Збільшення товщини проміжного інфільтраційного шару δ_2 на кожні 10 см сприяє збільшенню часу до повного насичення та заповнення конструкції водою. Наприклад, для конструкції з товщиною шарів 0,4/0,7/0,3 м, повне насичення відбувається за $\tau = 58$ хвилин (3487 с) (рис. 4b). У цьому випадку площа конструкції становить 8,2% від площі водозбірного басейну, що також можна вважати ефективним показником. Як видно з кривих, наведених на рисунку 4с, зміна величини співвідношення площ зі зростанням δ_3 відбувається з невеликим кроком, тому регулювання товщини гравійного шару є не ефективним методом досягнення необхідного рівня утримання дощової води конструкцією.

За допомогою розробленої в рамках дисертаційного дослідження гідрологічної моделі було перевірено ефективність конструкцій дощових садів залежно від величини співвідношення площ. Розраховані методом моделювання параметри конструкцій та час заповнення системи водою представлені в таблиці 2.

Таблиця 2. Залежність ефективності утримання зливної води дощовими садами від величини співвідношення площ

Параметри	Дизайн дощового саду		
	Конструкція 1	Конструкція 2	Конструкція 3
H_{sponge} , м	0,7	1,3	1,3
δ_1 , м	0,3	0,6	0,4
δ_2 , м	0,1	0,3	0,7
δ_3 , м	0,3	0,4	0,2
A_{bassin} , м ²	100	100	100
A_{sponge} , м ²	19,2	9,7	8,4
A_{bassin}/A_{sponge}	5,2	10,7	11,9
τ , с	3399,9	3442,3	3465,6

Висота першої конструкції дощового саду становить 0,7 м. Співвідношення площ A_{bassin}/A_{sponge} було встановлено як 1,0; 3,0; 5,0, а також критичне значення 5,2, що відповідає повному наповненню конструкції водою за $\tau = 56$ хвилин (3399,9 с) (рис. 5а).

Висота другої та третьої конструкцій дощового саду становить 1,3 м в кожному випадку, але з різним співвідношенням товщини шарів. За результатами моделювання повне водонасичення другої конструкції дощового саду відбувається за час $\tau=57$ хвилин (3442,3 с) при співвідношенні площ 10,7 (рис. 5b). Повне водонасичення третьої конструкції відбувається за 57 хвилин (3465,6 с) при величині співвідношення площ 11,9 (рис. 5с). Як показують отримані результати моделювання, при однаковій загальній глибині другої та третьої конструкції

дощового саду повне водонасичення відбувається для різних площ, що можна пояснити різною товщиною інфільтраційних шарів, які є ключовими для процесу інфільтрації.

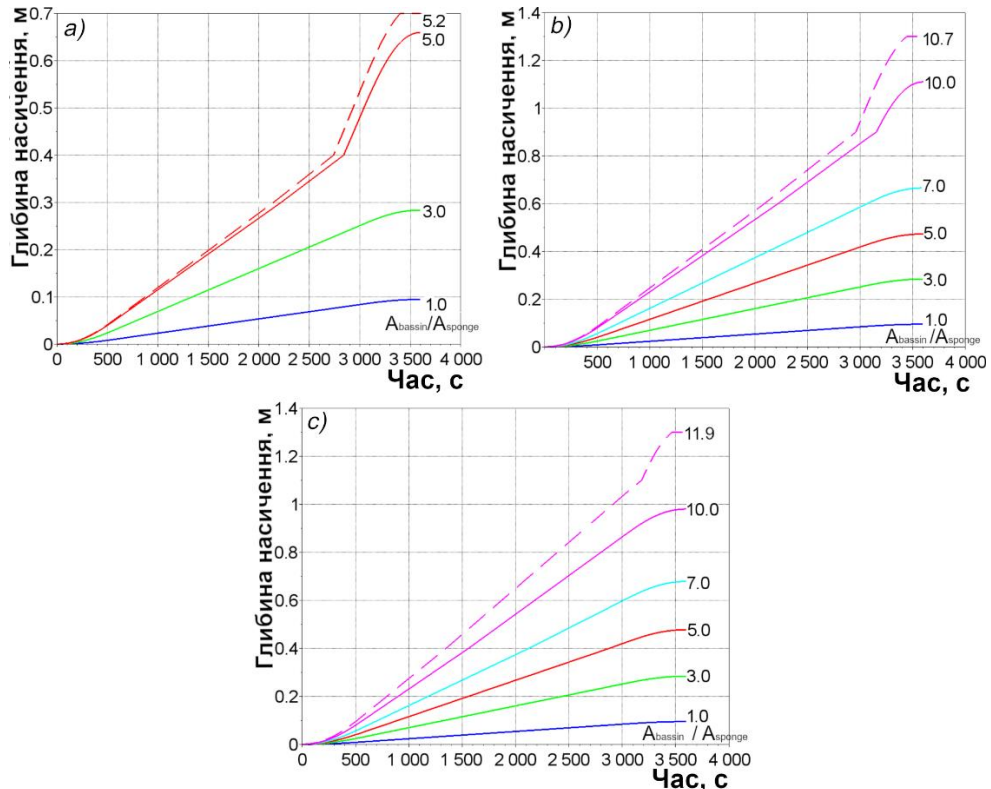


Рисунок. 5. Криві зміни глибини насичення шарів конструкції дощового саду в часі залежно від співвідношення площ A_{bassin}/A_{sponge} : а) першої; б) другої; в) третьої

Розроблення гідрологічної моделі з урахуванням висоти водяного стовпа дозволило отримати нові залежності глибини насичення дощового саду від часу, враховуючи коефіцієнти фільтрації всіх шарів конструкції. Порівняння результатів моделювання гідрологічної поведінки дощових садів з урахуванням і без урахування HWC при однакових параметрах конструкцій вказує на суттєву різницю, що показано на рисунку 6.

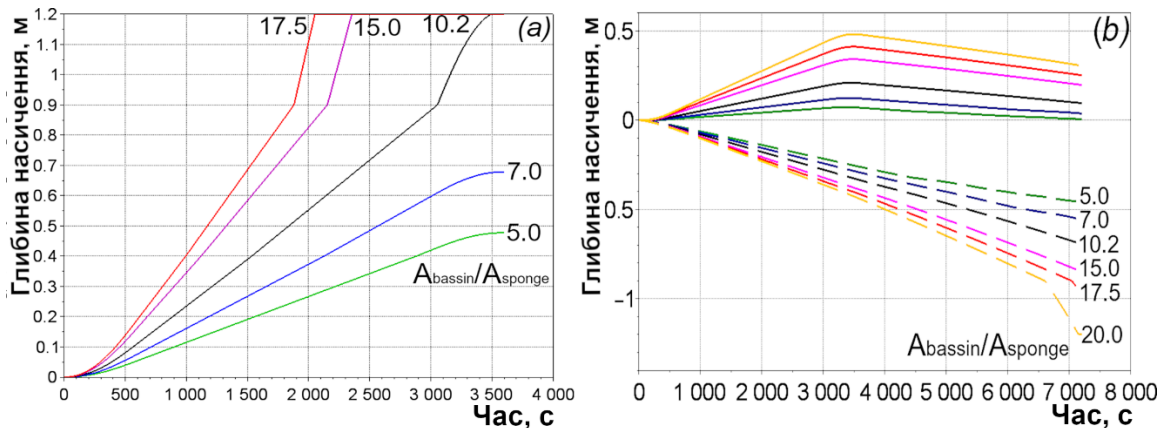


Рисунок. 6. Криві зміни глибини насичення дощового саду в часі: а) без урахування HWC та коефіцієнта фільтрації; б) з урахуванням HWC та коефіцієнта фільтрації

Як показано на рис. 6а, повне заповнення конструкції відбувається при величині співвідношення площ 10,2 за час $\tau = 58$ хв (3492,5 с). При цьому площа конструкції становить 9,8% від площі водозбірного басейну. Результати моделювання з урахуванням HWC показують (рис. 6б), що при співвідношенні площ $A_{bassin}/A_{sponge} = 10,2$ заповнення конструкції не відбувається. HWC на поверхні конструкції при цьому становить 0,16 м. Згідно з рис. 6б, початок повного насичення конструкції з урахуванням зони заглиблення 0,38 м відбувається при $A_{bassin}/A_{sponge} = 17,5$ за час $\tau = 1$ год 58 хв (7100,0 с).

З отриманих результатів випливає важливий висновок, що розроблення гідрологічної моделі з урахуванням HWC та коефіцієнта фільтрації ґрунтових шарів дозволяє підбирати значення заглиблення поверхневої зони для збору зливної води при проектуванні конструкції дощових садів. Це сприяє збільшенню часу повного насичення та заповнення системи водою, а також допомагає уникнути переливів і затоплень.

При заданих постійних величинах водоутримувальної здатності (0,33/0,33/0,1 м³/м³) та коефіцієнтів фільтрації (7/45/200 см/год) ґрунтових шарів дощового саду було розраховано гідрологічну ефективність конструкції з урахуванням HWC залежно від зміни товщини шарів, що представлено на рисунку 7. Величину співвідношення площ при моделюванні було прийнято постійною та рівною 15, що відповідає площі дощового саду 6,6 м² при площі водозбірного басейну 100 м².

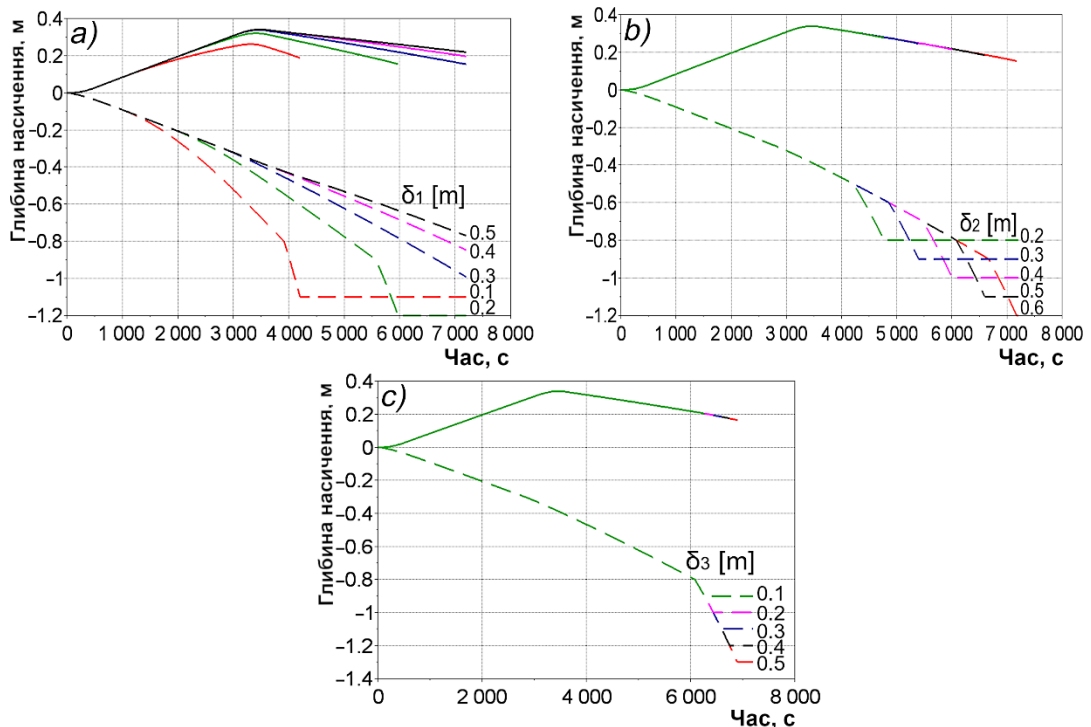


Рисунок. 7. Криві зміни глибини насичення шарів конструкції дощового саду та HWC в часі залежно від товщини: а) верхнього ґрунтового шару (δ_1 , м); б) проміжного інфільтраційного шару (δ_2 , м); с) гравійного шару (δ_3 , м)

З отриманих результатів видно, що збільшення товщини верхнього шару (δ_1) на 10 см дозволяє збільшити час, необхідний для повного насичення всіх шарів дощового саду та заповнення конструкції водою (рис. 7а). При товщині шару 0,1 м

повне заповнення конструкції водою спостерігається за час $\tau=1$ год 10 хв (4202,5 с). При цьому на поверхні дощового саду утворюється стовп води заввишки 0,262 м. Збільшення товщини шару на 10 см призвело до заповнення конструкції за 1 годину 39 хвилин (5975 с) та збільшення HWC до 0,321 м. При товщині шару $\delta_1=0,3; 0,4$ та $0,5$ м повного заповнення конструкції не спостерігається за 2 години (7200 с). Висота стовпа на поверхні при цьому збільшується не суттєво.

У процесі моделювання варіювали значення δ_2 від 0,2 до 0,6 м з кроком 10 см (рис. 7b). Результати моделювання показують, що криві зміни глибини насичення шарів конструкції дощового саду та HWC в часі змінюються прямо пропорційно до товщини проміжного інфільтраційного шару. Підвищення товщини δ_2 на 10 см збільшує час заповнення конструкції в середньому на 10 хв (601,25) с, при цьому HWC на поверхні конструкції залишається незмінною і дорівнює 0,34 м.

Криві зміни глибини насичення конструкції дощового саду в часі від товщини гравійного шару δ_3 (рис. 7c) демонструють повну відсутність впливу цього параметра на HWC . При зміні товщини шару δ_3 від 0,1 до 0,5 м HWC на поверхні дощового саду залишається не змінною та рівною 0,338 м, а час заповнення конструкції зростає в середньому на 2,5 хв (158 с). Товщина верхнього ґрунтового шару δ_1 має найбільший вплив на зміну HWC на поверхні дощового саду, порівняно з товщиною δ_2 та δ_3 .

Вплив коефіцієнта фільтрації ґрунтових шарів дощового саду на гідрологічну поведінку системи та HWC було досліджено за допомогою моделювання, яке проводили при співвідношенні площ $A_{bassin}/A_{sponge}=15$ та товщині верхнього ґрунтового, інфільтраційного та гравійного шарів 0,4; 0,5; 0,3 м відповідно (рис. 8).

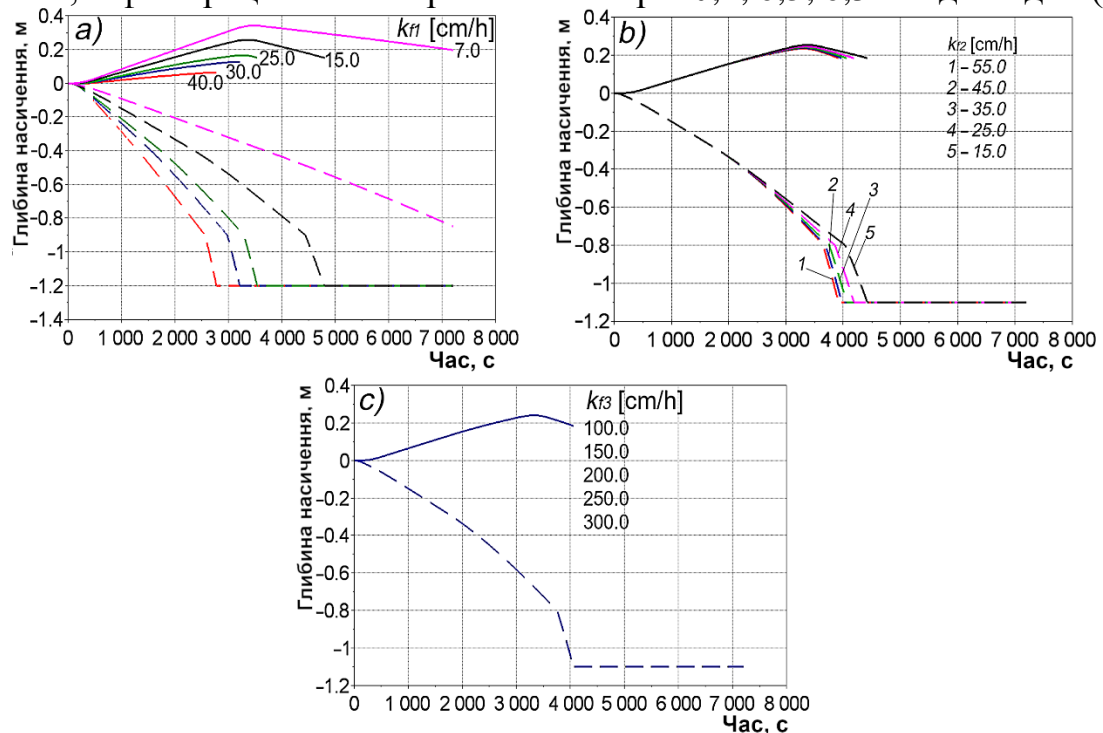


Рисунок 8. Криві зміни глибини насичення шарів конструкції дощового саду та HWC в часі залежно від коефіцієнта фільтрації: а) верхнього ґрунтового шару (k_{f1} , см/год); б) проміжного інфільтраційного шару (k_{f2} , см/год); в) нижнього гравійного шару (k_{f3} , см/год)

Як показано на рисунку 8а, найбільше збільшення продуктивності змодельованої конструкції дощового саду відзначається при значенні коефіцієнта фільтрації $k_{f1}=7,0$ см/год, коли повного насичення та заповнення конструкції дощовою водою не відбувається протягом 2 год (7200 с). Проте важливо врахувати, що в цьому випадку висота h_0 досягає найвищого значення серед усіх варіантів 0,342 м. Збільшення значення k_{f1} призводить до зменшення HWC на поверхні дощового саду, але одночасно скорочує час повного насичення та заповнення конструкції. Результати моделювання показують, що збільшення значення k_{f2} на кожні 10 см/год призводить до зменшення HWC на поверхні конструкції в середньому на 0,007 м та скорочення часу заповнення системи в середньому на 2 хвилини (рис. 8b), що свідчить про обмежений вплив k_{f2} на гідрологічну поведінку дощового саду порівняно з k_{f1} . У випадку моделювання зміни глибини насичення конструкції дощового саду та HWC в часі залежно від коефіцієнта фільтрації гравійного шару k_{f3} криві накладаються та мають однаковий характер (рис. 8с). При значеннях k_{f3} від 100,0 до 300,0 см/год конструкція дощового саду повністю насичується та заповнюється зливою водою за 1 год 7 хв (4045,5 с). При цьому на поверхні дощового саду утворюється стовп води заввишки 0,263 м.

Отже, результати моделювання показують, що гідрологічна поведінка, час насичення і заповнення дощового саду безпосередньо залежать від заглибленої зони на його поверхні для збору зливої води, а також від товщини та коефіцієнта фільтрації ґрунтових шарів конструкції. Причому, чим вище HWC на поверхні дощового саду, тим повільніше конструкція заповнюється.

У **четвертому розділі** представлено результати дослідження ефективності конструкцій дощових садів у видаленні нафтових вуглеводнів (НВ) із зливої води. Також досліджено часові та просторові характеристики розподілу й накопичення НВ в експериментальних конструкціях дощових садів. Вивчено вплив НВ на зміну гідравлічної провідності системи та на рослини виду *Physocarpus opulifolia Diabolo*. Для цього були використані експериментальні колони, що імітують конструкцію дощового саду (рис. 3b) та розроблена методика проведення експерименту.

Для експериментального дослідження в якості модельних НВ було обрано дизельне паливо (DF) та відпрацьовану двигунну оливу (UEO). Дощову подію імітували двічі на тиждень, зрошуючи кожен колонку приблизно 0,385 дм³ водопровідної води за одну подію. Цей підхід дозволяв колонам природним чином висихати між подіями дозування. Розрахунок об'єму модельних НВ, які вливалися в експериментальні колони, проводили відповідно до типового об'єму, який може вилитися під час аварійних ситуацій або поступово накопичуватись у навколишньому середовищі, наприклад, від миття автомобілів. Уводилося по 5 см³ DF та UEO двічі на тиждень в кожен експериментальну колонку площею 0,00785 м². Цей об'єм було обрано для моделювання критичного рівня забруднення, оскільки в перерахунок на 1 м² площі, об'єм кожного забруднювача становить 637,58 см³/м².

Експеримент з дослідження процесу затримання НВ фільтрувальними колонами було розпочато 13 листопада 2023 року і завершено 13 квітня 2024 року

(22 тижні). Контроль якості фільтрату здійснювався шляхом відбирання проб на виході із експериментальних колон з інтервалом що три місяці. Аналіз вихідних зразків DF та UEО, а також вмісту НВ у зразках фільтрату проводили методом обернено-фазової вискоефективної рідинної хроматографії (ОФ-ВЕРХ). Дослідження проводилося на системі Agilent 1100 (Agilent Technologies, Inc., Санта-Клара, Каліфорнія, США) з чотирьохканальною помпою та діодно-матричним детектором після попереднього фільтрування крізь фільтри іPure з нейлоною мембраною з діаметром пор 0,22 мкм. Для розділення речовин у зразках використовували хроматографічну колонку Zorbax SB C-18 4,6×250 мм з діаметром зерна 5 мкм. Щоб оцінити ефективність видалення НВ експериментальними колонами, що імітують конструкції дощових садів, було проаналізовано концентрацію їх компонентів у фільтратах на виході з колон і порівняно зі зразками вихідних модельних забруднювачів.

Для аналізу вертикального накопичення забруднювальних речовин через 6 місяців роботи експериментальних колон були відібрані проби верхнього шару ґрунту та проміжного шару піску. Проби було підготовлено за відповідною методикою та проаналізовано методом ОФ-ВЕРХ, аналогічно до аналізу вихідних модельних НВ та зразків фільтратів.

Сприйнятливість кожного зразку рослин до фітотоксичності оцінювали шляхом порівняння біомаси контрольних та оброблених рослин. Рослини, маса яких від маси контрольних зразків становила: менше 25% – сильно чутливі; від 25% до 50% – помірно чутливі; більше 50% – стійкі до стресу, викликаного забрудненнями модельних НВ. Було виміряно відносні швидкості зростання пагонів і коренів та індекс толерантності (ТІ), який розраховували як відношення між сухою надземною біомасою рослини у забрудненому НВ ґрунті до сухої надземної біомаси рослин у контрольному ґрунті.

На рис. 9 наведені хроматограми зразків вихідного DF (рис. 9а) та UEО (рис. 9б), розчинених у гексані в співвідношенні 1:40.

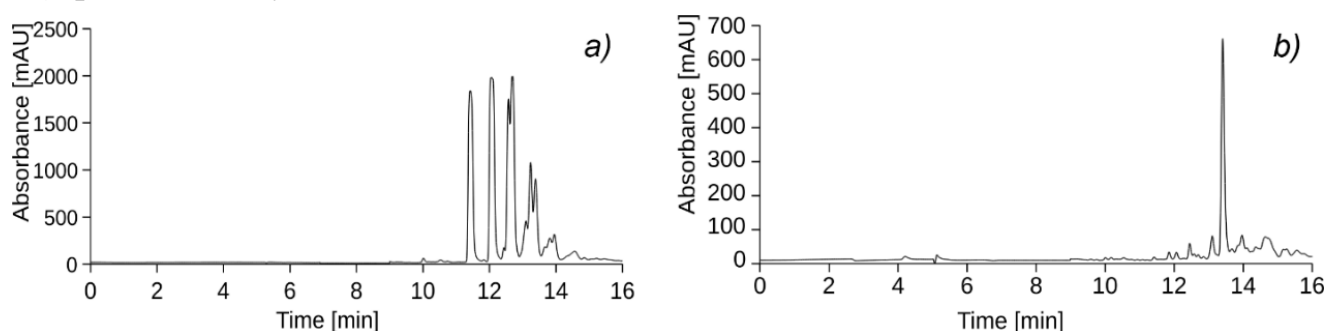


Рисунок. 9. Хроматограма вихідного DF (а) та UEО (б)

Для кожного піка хроматограми вихідного DF проведено аналіз відповідних УФ-видів спектрів, який дозволяє встановити природу складових речовин за їхнім УФ-поглинанням. Згідно із спектральними профілями було визначено, що піки хроматограми відповідають речовинам з класу алкілбензолів та алкенів. УФ-вид спектри піків в хроматограмі вихідної UEО свідчать про наявність різноманітних ненасичених похідних як з лінійною, так і циклічною структурами.

Після завершення 18 циклів поливання через 63 дні (дев'ять тижнів) з початку експерименту було проведено аналіз зразків води, яка пройшла через експериментальні колони, забруднені НВ (рис. 10).

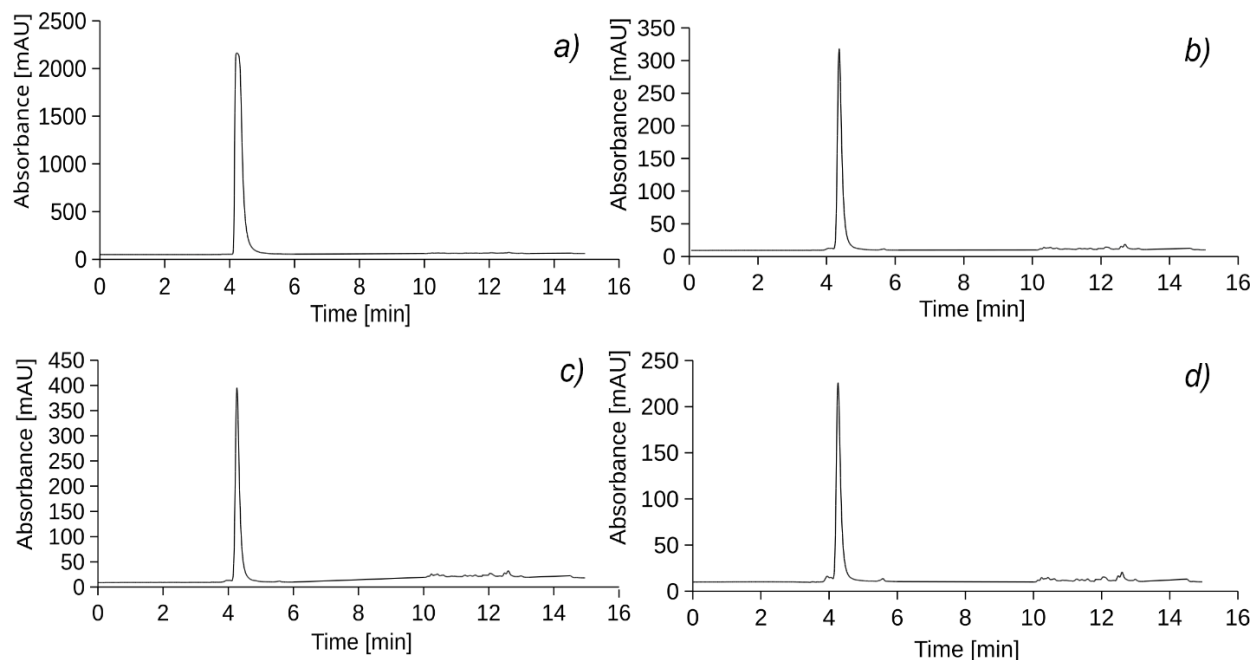


Рисунок. 10. Хроматограми фільтрату з експериментальних колон: а - зразок №1 (циліндр I); b – зразок №2 (циліндр VII); с – зразок №3 (циліндр V); d – зразок №4 (циліндр VIII)

Після завершення 44 циклів поливання через 154 дні (22 тижні) від початку експерименту було проаналізовано фільтрат №5 (рис. 11a) з колони I та фільтрат №6 (рис. 11b) з колони VI, щоб проаналізувати як змінився процес видалення модельних НВ з часом.

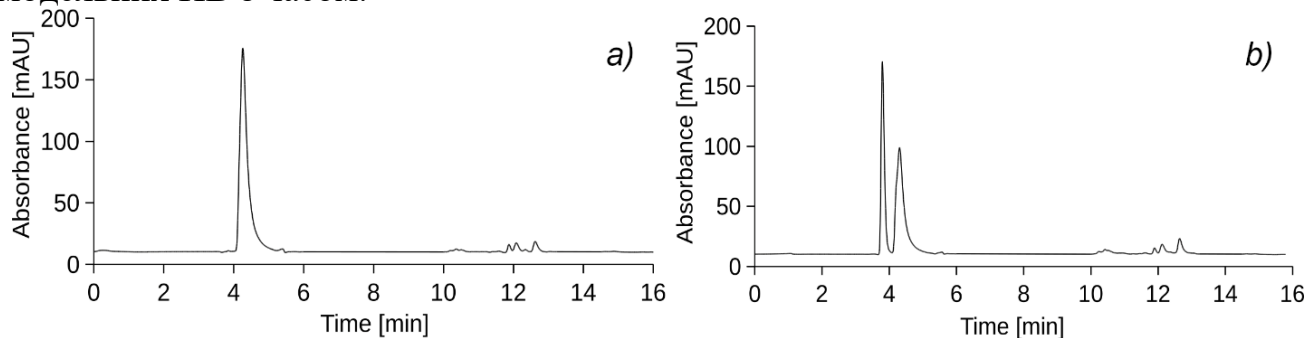


Рисунок. 11. Хроматограми фільтрату з експериментальних колон: а – зразок №5 (циліндр I); b – зразок №6 (циліндр VI)

На підставі результатів хроматографічного аналізу фільтрату з експериментальних колон, що піддавалися регулярному поливанню модельними НВ протягом усіх 62 циклів за 154 дні (22 тижні) експерименту, у зразках не виявлено компонентів DF або УЕО. Наведені дані дозволяють зробити висновок, що при заданих параметрах експериментальних колон, властивостях ґрунтових сумішей, дозуваннях забруднювачів та зливової води, ефективність видалення колонами обох модельних НВ становила 100%.

Хроматографічні профілі НВ у ґрунтових середовищах були досліджені у експериментальних колонах II та V з метою вивчення здатності ґрунту та піску утримувати та/або видаляти НВ з дощової води в просторі та часі, а також впливу тривалого накопичення забруднювачів.

Отримано хроматограми зразків витяжок з піщаного (рис. 12a) та ґрунтового шарів (рис. 12b) експериментальної колони II, яка піддавалася поливанню УЕО протягом 6 місяців (22 тижні) експерименту. Для кожного піку на хроматограмі було отримано відповідні УФ-вид спектри, які суттєво відрізняються від УФ-вид спектрів піків в хроматограмі вихідної УЕО. Це вказує на те, що компоненти оливи пройшли через серію хімічних перетворень після потрапляння в ґрунт.

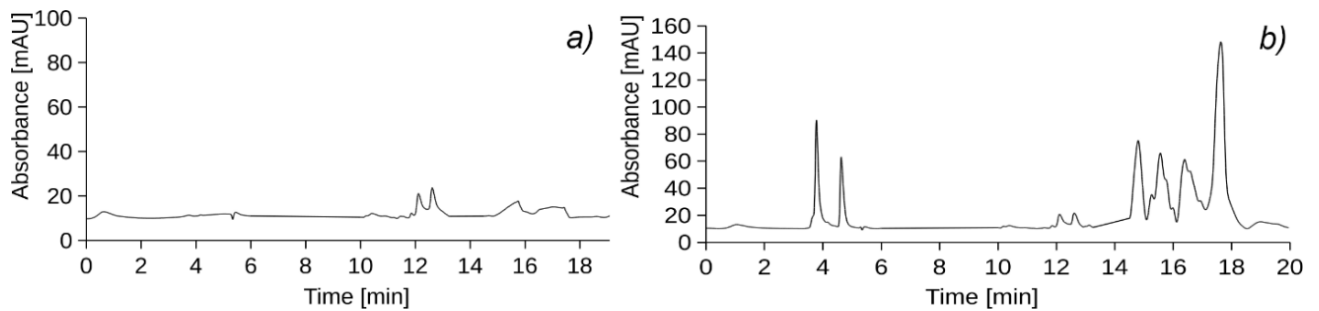


Рисунок. 12. Хроматограма витяжки з піщаного (а) та ґрунтового шару (б) циліндра II (полив УЕО)

На рисунку 13 представлено хроматограми зразків витяжок з піщаного (рис. 13a) та ґрунтового шарів (рис. 13b) експериментальної колони V, яка поливалася DF. Для кожного піку на хроматограмі було отримано відповідний УФ-вид спектр, аналіз якого свідчить, що компоненти DF піддалися хімічному перетворенню в ґрунті, що спричинило появу смуги поглинання з максимумами близько 225 нм. Це може бути пояснено формуванням кон'югованих систем подвійних зв'язків, які спричинили зміни в УФ-вид спектрах.

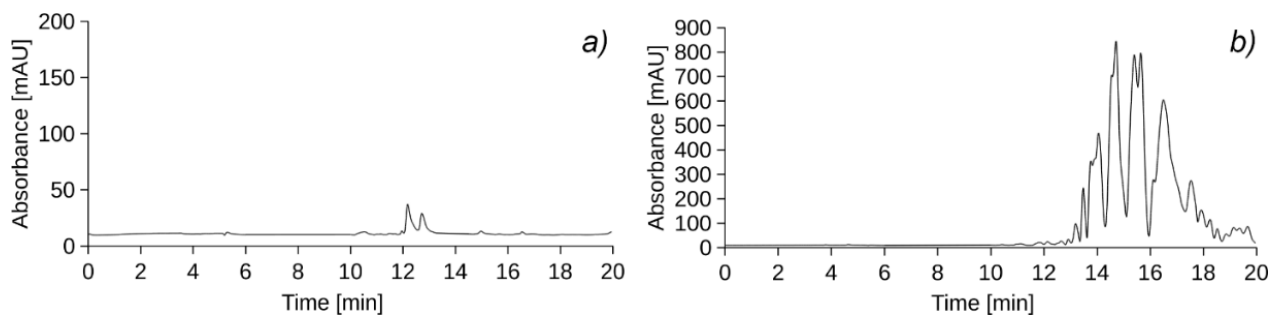


Рисунок. 13. Хроматограма витяжки з піщаного (а) та ґрунтового шару (б) циліндра V (полив DF)

Як видно з результатів експериментального дослідження, утримування 95% модельних НВ відбувається в поверхневому шарі ґрунтового середовища за рахунок процесу сорбції. Протягом експериментального дослідження компоненти DF і УЕО, які були внесені в ґрунтове середовище, пройшли біохімічне перетворення, що підтверджується змінами в УФ-вид спектрах. Окислювальні процеси можуть бути відповідальні за утворення кисневмісних функціональних груп, як от гідроксильні, карбонільні, епоксидні, карбоксильні, а також за можливе

скорочення вуглецевого скелету. Проте, час утримання нових речовин збільшився порівняно з вихідними компонентами, що свідчить про відсутність полярних груп та зростання розмірів молекул.

Отримані результати досліджень зміни гідравлічної провідності k (мм/год) з часом вказують на поступове засмічення експериментальних дощових садів НВ. Це проявлялося у затриманні просочування води всередині колон, особливо для тих, які піддавалися поливанню УЕО (табл. 3).

Таблиця 3. Середнє значення гідравлічної провідності k (мм/год) експериментальних колон через 10 та 22 тижні їх експлуатації при різних умовах

Номер експериментальних колон (наявність рослинності/тип модельних НВ)	Значення k через 10 тижнів, мм/год	Відсоток зниження k через 10 тижнів, %	Значення k через 22 тижні, мм/год	Відсоток зниження k через 22 тижні, %
I та II (з рослинністю/УЕО)	137	26	47	75
III та IV (з рослинністю/без поливання НВ)	180	2,7	157	15,1
V та VI (з рослинністю/DF)	163	12	112	40
VII (без рослинності/УЕО)	124	33	42	78
VIII (без рослинності/DF)	158	15	98	47

Значення гідравлічної провідності для всіх експериментальних колон на початку експерименту становило 185 мм/год. На момент завершення експерименту (22 тижні та 62 цикли поливання) значення k суттєво зменшилося для колон I, II та VII, у які вливали УЕО, на відміну від колон V, VI та VIII, які поливали DF. Це можна пояснити здатністю УЕО, на відміну від DF, змінювати гідрофільні властивості повітряно-дисперсного ґрунтового середовища на гідрофобні. Окремо варто обґрунтувати зміну гідравлічної провідності експериментальних колон III та IV, які були з рослинністю та не піддавалися поливанню жодним з модельних НВ, а лише водопровідною подою. Змодельований потік у колонах продемонстрував незначне зниження значень k на кінець експерименту, що вказує на поступове «забивання» систем дощових садів. На підставі отриманих результатів розроблено рекомендації щодо впровадження та обслуговування дощових садів у реальних умовах навколишнього середовища, зокрема на територіях з підвищеними рівнями нафтових забруднень, як от автозаправні станції, автостоянки та автомийки.

Результати контролю висоти пагонів зразків *Physocarpus opulifolius Diabolo* протягом 22 тижнів дослідження наведені на рисунку 14. За результатами (табл. 4) було отримано реакції досліджуваних зразків рослин на стрес від НВ у ґрунті, порівняно з контрольними рослинами.

Згідно з консервативною шкалою сприйнятливості, яка використовується для оцінки реакції рослин на нафтове забруднення в ґрунті, зразки *Physocarpus opulifolia Diabolo*, вирощені в колонах V та VI, виявилися найбільш стійкими, проявивши зниження розвитку на 2%, 6%, 12,5%, 18,8% та 19,6% на 2, 5, 8, 11 та 22 тижень досліджень, відповідно.

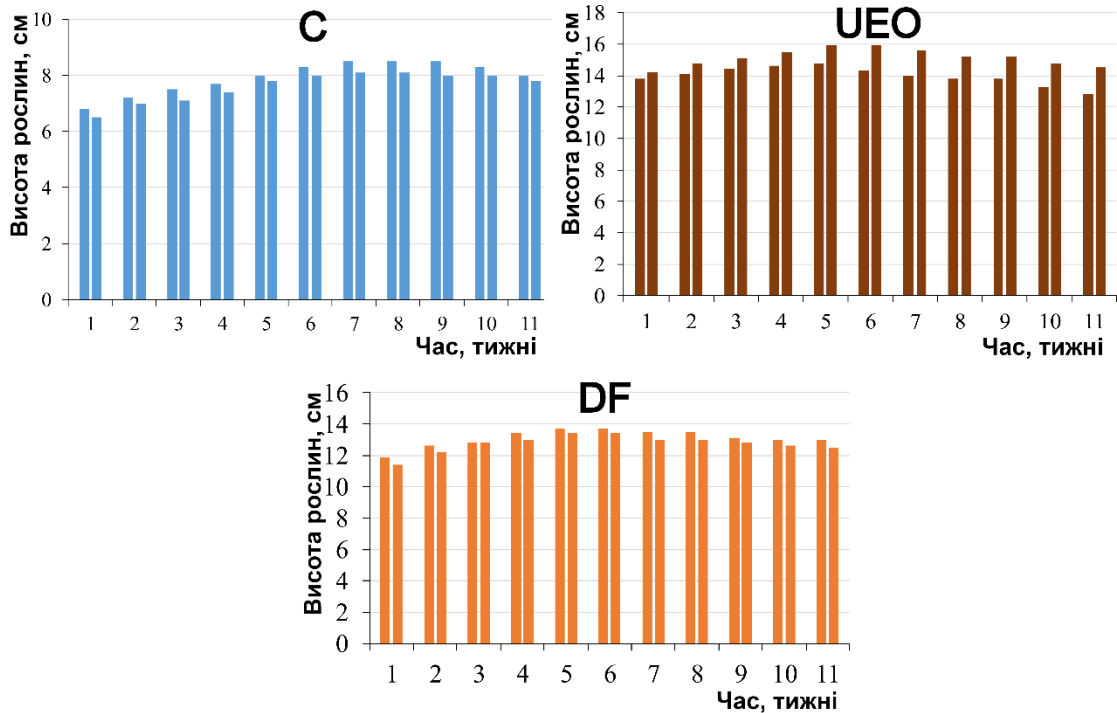


Рисунок. 14. Висота пагонів зразків *Physocarpus opulifolia Diabolo*, вирощених протягом 22 тижнів у контролі (С) та забрудненому UEO і DF ґрунті

Таблиця 4. Відносні швидкості зростання (RGR) та ступінь виживання (%) досліджуваних рослин у зразках ґрунту, забрудненого НВ

Вид НВ	Вплив НВ в ґрунті на RGR рослин		Виживання (%) досліджуваних рослин у зразках ґрунту, забрудненого НВ				
			Тиждень				
	Пагони	Коріння	2	5	8	11	22
Control	0,21±0,01	0,07±0,020	100	100	100	100	100
Diesel fuel	0,19±0,03	0,10±0,030	98	94	87,5	81,2	80,4
Used engine oil	0,16±0,04	0,05±0,036	90	87,5	75,1	56,3	43,8

Зниження розвитку рослин, вирощених у колонах I та II, які поливались UEO, становило 10%, 12,5%, 24,9%, 43,7% та 56,2% на 2, 5, 8, 11 та 22 тиждів досліджень, відповідно. Зразки *Physocarpus opulifolia Diabolo* були найменш чутливими до забруднення ґрунту DF у експериментальних циліндрах V та VI, тоді як висота пагонів та швидкість зростання *Physocarpus opulifolia Diabolo* найбільше піддалися впливу від забруднення UEO порівняно з незабрудненим ґрунтом (С). Крім того, коренева система на кінець експериментального дослідження була більш розвинена у зразків, які піддавалися впливу DF, порівняно з рослинами в колоні II, коренева система яких була повністю або частково некротичною, що підтверджується фотографіями на рисунку 15.

Виконано вимірювання маси пагонів та коренів зразків рослин (рис. 16), вирощених у ґрунті, забрудненому різними НВ та контрольному ґрунті на 4-й та 22-й тиждів експерименту.

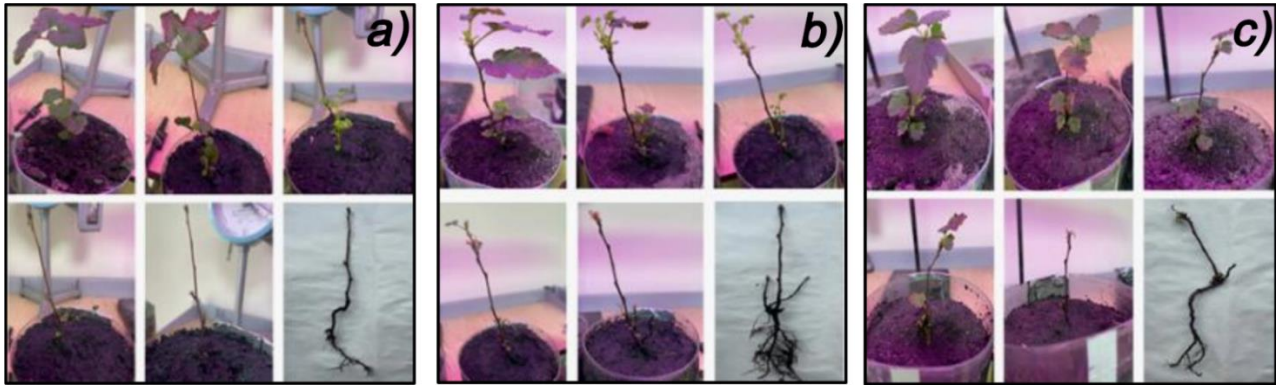


Рисунок. 15. Досліджувані зразки *Physocarpus opulifolia Diabolo* з експериментальних колон, які поливались UEO (a) та DF (b), а також контроль C (c), на 2, 5, 8, 11 та 22 тиждень досліджень

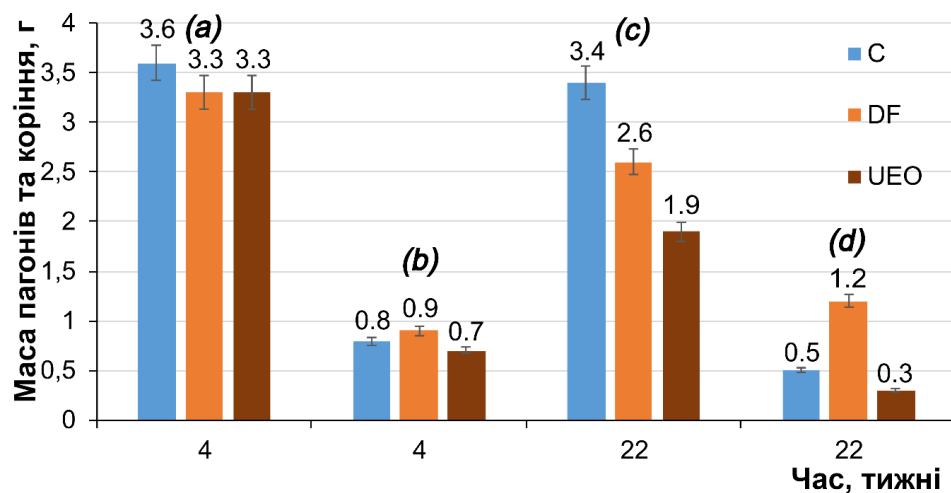


Рисунок. 16. Маса пагонів (a, c) та коріння (b, d) рослин (г) на 4 та 22 тиждень досліджень

На 4-му тижні досліджень зниження сухої маси пагонів було однаковим для зразків, вирощених на ґрунті, забрудненому DF та UEO. Суха маса пагонів була на 8,4% нижчою порівняно з контролем. На 22-му тижні експерименту найслабший інгібуючий ефект на суху масу пагонів спостерігався для зразків, вирощених на ґрунті, забрудненому UEO. Суха маса пагонів була на 24% та 44% нижчою для зразків, вирощених на ґрунті, забрудненому DF та UEO, відповідно, порівняно з контролем. На 4-й і 22-й тижні найбільшу масу коренів мали зразки, вирощені в ґрунті, забрудненому DF, за ними слідували рослини, вирощені в контрольному незабрудненому ґрунті. Найбільшу чутливість проявили зразки, вирощені в ґрунті, що піддавався поливанню UEO.

Індекс толерантності (ТІ) показав, що зразки *Physocarpus opulifolia Diabolo*, вирощені на ґрунті, забрудненому DF, зростали навіть краще, ніж у контрольній групі (ТІ>1,03). Це свідчить про повну толерантність цього виду рослин до забруднення DF. Помірно толерантними до забруднення виявились зразки, вирощені на ґрунті, забрудненому UEO, зі значенням ТІ=0,75. Результати вказують на те, що рослини *Physocarpus opulifolia Diabolo* є толерантним видом для

використання в конструкціях дощових садів, основною функцією яких є очищення води від НВ.

У п'ятому розділі було досліджено газообмін в рослинах, що передбачало кількісне визначення їх здатності виділяти та поглинати кисень і вуглекислий газ, а також очищувати повітря від шкідливих речовин та виділяти летючі фітоорганічні речовини задля правильного урахування впливу рослин на екологічну ситуацію в урбанізованих містах. Для цього було висунуто гіпотезу, що 1) зелені конструкції як засоби-губки, що представляють урбанізоване середовище, покращують якість повітря, порівняно з територіями без них; 2) ступінь видалення забруднювальних речовин з повітря безпосередньо пов'язаний з об'ємом і структурою рослинності, яка представляє зелені конструкції.

Експеримент проводився в газообмінній камері, яка адаптована для відтворення зовнішніх умов урбанізованого середовища та дослідження рослин з невеликою фотосинтетичною масою за розробленою методикою (рис. 17).

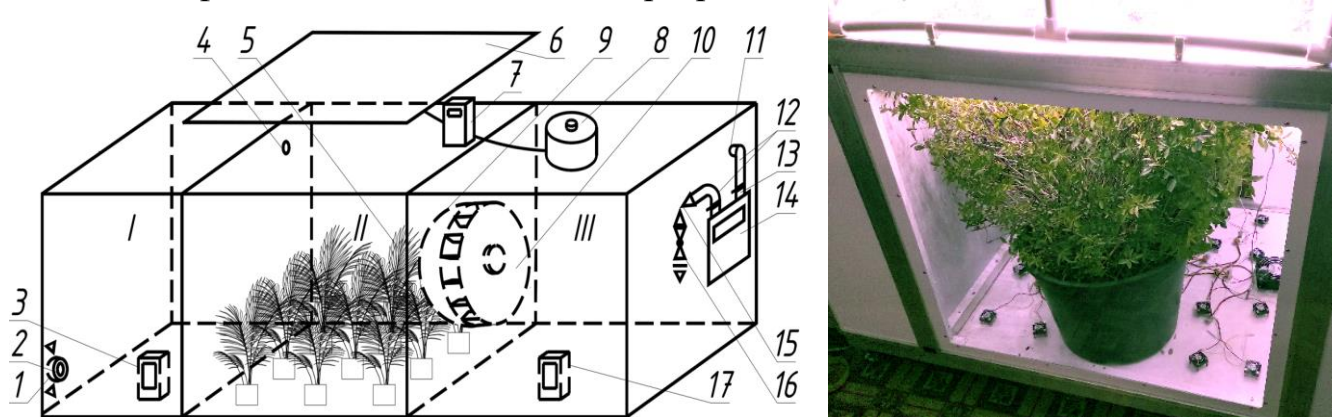


Рисунок 17. Газообмінна камера: I – приймальна камера (300×1000×1000(h)); II – камера газообміну (1000×1000×1000(h)); III – вихідна камера (1000×1000×1000(h)); 1 – захисна сітка на вході; 2 – вхідний отвір (Ø 15); 3 – газоаналізатор; 4 – отвір для перетікання (Ø 15); 5 – рослини; 6 – панель освітлення повноспектровими світлодіодними фітолампами; 7 – реле напруги з вольтметром; 8 – регулятор освітлення; 9 – захисна сітка на вході до вентилятора; 10 – вентилятор-змішувач; 11 – отвір виходу повітря; 12 – трубопроводи; 13 – фільтр; 14 – лічильник газу; 15 – кран регульовальний; 16 – кран кульовий; 17 – газоаналізатор

Матеріалом для досліджень слугувала *бирючина звичайна (Ligustrum vulgare L.)* – високорослий прямозростаючий кущ зі щільною кроною до 4-5 м висоти, який легко піддається формуванню і є стійким до умов вирощування в урбанізованих середовищах.

Густину повітря обчислювали:

$$\rho = \frac{P_b}{286,9 \cdot T} \cdot \frac{1+d}{1+1,6085744 \cdot d} = \frac{P_b}{286,9 \cdot (273,15+t)} \cdot \frac{1+d}{1+1,6085744 \cdot d} \quad (12)$$

Тиск насиченої пари визначали за модифікованою формулою Бака, Па, після елементарних спрощень без втрати точності:

$$Psat = EF \times \begin{cases} 611,15 \cdot e^{\left(23,85455 - \frac{T}{333,7}\right) \cdot \left(1 - \frac{279,82}{T+6,67}\right)} = 611,15 \cdot e^{\left(23,036 - \frac{t}{333,7}\right) \cdot \frac{t}{t+279,82}}, & T < 273,15K, t < 0^{\circ}C; \\ 611,21 \cdot e^{\left(19,84282 - \frac{T}{234,5}\right) \cdot \left(1 - \frac{257,14}{T-16,01}\right)} = 611,21 \cdot e^{\left(18,678 - \frac{t}{234,5}\right) \cdot \frac{t}{t+257,14}}, & T \geq 273,15K, t \geq 0^{\circ}C, \end{cases} \quad (13)$$

Вологовміст повітря визначали за температурою та показами гігрометра – відносною вологістю φ , %, або температурою точки роси T_d , K, або t_d , $^{\circ}C$:

$$d = \frac{0,623 \cdot P_{sat} \cdot \varphi}{P_b - P_{sat} \cdot \varphi} = \frac{0,623 \cdot P_{sat,d}}{P_b - P_{sat,d}} \quad (14)$$

Ступінь поглинання вуглекислого газу ΔG_{CO_2} , г/с, розраховували:

$$\Delta G_{CO_2} = 0,0015197 \cdot (Y_{in} - Y_{out}) \cdot G \quad (15)$$

Виділення кисню оцінювалось відповідно до реакції фотосинтезу бруто $6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \uparrow$, г/с:

$$\Delta G_{O_2} = 0,72709 \cdot \Delta G_{CO_2} \quad (16)$$

Поглинання шкідливих домішок s або часток певного розміру, мкг/с, мг/с, розраховувалось:

$$\Delta G_s = (q_{in}/\rho_{in} - q_{out}/\rho_{out}) \cdot G = (q'_{in} - q''_{in}) \cdot G \quad (17)$$

Дослідження проводились при атмосферному тиску 1000 гПа і при значеннях концентрації CO_2 в приміщенні 400 ppm та 1025 ppm.

Розрахунки ступеню поглинання CO_2 та виділення O_2 проводились за формулами (15) та (16), результати яких представлені в таблиці 5.

Таблиця 5. Ступінь поглинання вуглекислого газу та виділення кисню рослинами виду *Ligustrum vulgare L.*

	Поглинання вуглекислого газу		Виділення кисню	
	г/с	г/год	г/с	г/год
при освітленні	-1,127E-05	-0,040	-8,196E-06	-0,029
в темряві	-8,785E-07	-0,003	-6,388E-07	-0,002

Рослини очищують повітря цілодобово. Однак, під час активного фотосинтезу рослини насичують повітря киснем, а в період лише дихання – вторинно забруднюють його CO_2 . Фотосинтетично активною біомасою *Ligustrum vulgare L.* є достатньо дрібне листя по периметру куща. Внутрішня частина куща складається зі щільної стеблової системи, яка не фотосинтезує. Результати дослідження дозволяють зробити висновок, що в рослинах *Ligustrum vulgare L.* переважають процеси виділення вуглекислого газу замість його поглинання. Розрахунки ступеню поглинання $PM_{2,5}$, PM_{10} , формальдегіду (НСНО) та загальних летких органічних сполук (TVOC) проводився за формулою (17), результати яких представлені в таблиці 6.

Результати дослідження при максимальному освітленні показали ступінь поглинання $PM_{2,5}$ та PM_{10} кущами *Ligustrum vulgare L.* $8,84 \cdot 10^{-5} \dots 1,5 \cdot 10^{-4}$ мкг/с, що дозволяє зробити висновок про ефективне поглинання досліджуваними рослинами твердих частинок, діаметром до 2,5 та до 10 мкм з повітря.

Таблиця 6. Ступінь поглинання домішок та часток певного розміру рослинами виду *Ligustrum vulgare L.*

Поглинання PM2,5,		Поглинання PM10,		Поглинання формальдегіду,		Поглинання ЛОР,	
мкг/с	мкг/год	мкг/с	мкг/год	г/с	г/год	г/с	г/год
8,868E-05	0,319	8,840E-05	0,318	-1,125E-05	-0,040	-2,442E-06	-0,008
1,5 E-04	0,537	1,4 E-04	0,535	5,057E-07	0,002	-2,973E-06	-0,010

Цікавим результатом є збільшення концентрації загальних летких органічних сполук (TVOC) у вихідному відсіку, що свідчить не про ступінь поглинання, а про активне виділення рослинами летких фітоорганічних речовин обсягом 2,442...2,973 мкг/с. Важливо зазначити, що підвищення концентрації TVOC не завжди є негативним явищем. Виділення рослинами летких органічних сполук є важливим засобом самозахисту та приваблювання корисних комах. Крім того, ці сполуки корисні для людини, оскільки очищують повітря від бактерій і створюють приємний аромат.

На основі результатів дослідження було підтверджено висунуті в розділі гіпотези, а також зроблено висновок, що частота та ефективність процесів фотосинтезу й дихання *Ligustrum vulgare L.* тісно пов'язані з розмірами стебел та площею листової поверхні. Таким чином, важливу роль у ефективності поглинання вуглекислого газу відіграє правильне формування кущів та чагарників під час обрізання, що сприяє розвитку листя і покращує умови для фотосинтезу.

Шостий розділ присвячений економічному оцінюванню використання зелених конструкцій для управління зливовими водами з урахуванням кліматичних умов України. Було розраховано екологічний та економічний ефект від збору дощової води із зелених покриттів порівняно з традиційною покрівлею, а також проведено аналіз соціально-економічних вигод, які зелені покриття дають протягом свого життєвого циклу, за допомогою методу чистої приведеної вартості (NPV).

Розрахунки еколого-економічного ефекту проводилися за рівняннями:

$$EE = (A \cdot P \cdot R) - (A \cdot P \cdot \Psi), \quad (18)$$

$$E_c E = EE \cdot C, \quad (19)$$

де EE – екологічний ефект, що залежить від об'єму води, який утримується зеленим покриттям, м³/рік; $E_c E$ – економічний (екологічний) ефект, що дорівнює грошовій вигоді від утриманої води на зеленому покритті, USD/рік; A – площа поверхні зеленого покриття, м²; P – середньорічна кількість опадів, м; R – середній ступінь утримання води зеленим покриттям, що прийнято для розрахунків 60%; Ψ – коефіцієнт стоку для забудованих територій, прийнятий для розрахунків 0,95; C – середня вартість води, USD/м³.

У розрахунках вжито припущення, що площа зелених покриттів становить до 1% від площі обраних міст України, оскільки відсутні дані щодо територій, зайнятих цими конструкціями в Україні або в містах, обраних для аналізу (Київ, Харків, Дніпро, Львів).

За результатами розрахунків, представленими в таблиці 7, екологічний ефект EE коливається в межах 394 000 м³ у місті Дніпро та 450 000 м³ у Харкові до 567 000 м³ у Києві та 647 000 м³ у Львові. Результати залежать в основному від обраної площі зелених покриттів, яка була найнижчою в місті Дніпро (1,47 млн м²) і найвищою в місті Києві (2,50 млн м²), а також від показника середньорічної кількості опадів, який є найвищим у місті Львові (740 мм). Отже, середнє значення екологічного ефекту EE стосовно затримання води в проаналізованих містах становить 515 000 м³.

Таблиця 7. Результати розрахунків екологічного EE та економічного ефекту E_{CE}

Місто України	Екологічний ефект EE , тис. м ³	Економічний ефект E_{CE} , тис. USD
Київ	567	459,27
Харків	450	279,00
Дніпро	394	330,96
Львів	647	452,90

Подібно до екологічного ефекту EE , значення економічного ефекту E_{CE} утримання води, розраховане на 1000 доларів США, було найвищим у Києві та Львові. Так само найнижчий показник був у містах Дніпро та Харків. Середній показник E_{CE} для цих чотирьох міст становив 380 500 доларів США.

Як показують результати економічного аналізу, як інтенсивні, так і екстенсивні зелені покриття мають позитивне значення чистої приведеної вартості. Проте інтенсивні зелені покриття є більш рентабельними, зокрема завдяки додатковим перевагам створення рекреаційних просторів. Середній показник NPV на 1 м² інтенсивного зеленого покриття більш ніж у 10 разів перевищує середній NPV на 1 м² екстенсивного зеленого покриття.

Для визначення економічної ефективності зелених конструкцій проведені імітаційні дослідження управління зливовими водами в контексті концепції сталого розвитку: (1) збирання дощової води в резервуари з подальшим повторним використанням та (2) впровадження дощових садів для зменшення обсягу зливових вод. Було проведено оцінювання їхньої ефективності з урахуванням двох факторів: зниження обсягу зливого стоку та зменшення плати за скидання стоків у каналізаційну систему.

Було розраховано максимальну інтенсивність опадів для 15-хвилинних подій у районах з річною кількістю опадів $P < 800$ мм, до яких належить територія України. За методикою, наведеною в розділі, з урахуванням максимальної інтенсивності опадів на території України, було розраховано об'єм накопичувального резервуара та визначено величину плати за послуги централізованого водовідведення відповідно до вимог щодо скидання стоків.

Результати розрахованого економічного ефекту від управління зливовими водами за допомогою резервуара для збору води показали, що з урахуванням проектного строку резервуара в 20 років економія на рахунках за воду на 20-й рік становитиме близько 1314 євро за умови відсутності коливань тарифів. Економічний ефект від управління зливовими водами на прикладі дощового саду ґрунтується на розрахункових максимальних обсягах дощових опадів та

гідрологічній ефективності конструкцій. Подібно до резервуарів для збирання води, інвестиції в будівництво дощового саду можуть окупитися протягом одного року. Якщо припустити, що строк ефективного використання проєкту складе 8–10 років (після чого може знадобитися відновлення проникності ґрунту), накопичена економія на тарифах становитиме від 965,6 до 1207 євро.

Отже, резервуар для збору зливної води є вигідним рішенням, незважаючи на його високу вартість, однак конструкція дощового саду є економічно вигіднішою та ефективнішою в процесі управління зливовими водами. Отримані результати свідчать, що утримання дощової води зеленими конструкціями є екологічно та економічно вигідним протягом усього строку їх експлуатації.

У **сьомому розділі** розроблено принципи проєктування, будівництва та обслуговування конструкцій дощових садів із застосуванням гідрологічної моделі, представленої в третьому розділі, яка дозволяє прогнозувати їхні конструктивні особливості.

Дощові сади набули популярності в багатьох країнах, проте в Україні вони ще не стали звичною практикою. Для подолання цього бар'єру запропоновано детальні рекомендації щодо вибирання місця розташування дощових садів, проєктування їх оптимальних розмірів, визначення критеріїв для ґрунтових матеріалів, а також запропоновано стратегії підбирання рослин і особливості обслуговування. Розроблення рекомендацій було зосереджено на проєктуванні дощових садів для управління зливовими водами, з урахуванням гідрологічних характеристик системи і кліматичних особливостей, зокрема частоти та інтенсивності опадів.

Запропоновано асортимент рекомендованих багаторічних автохтонних та інтродукованих видів рослин для дощових садів, найбільш стійких до умов урбанізованого середовища України. Під час будівництва дощових садів необхідно враховувати передбачувану якість зливної води та можливі джерела забруднення у водозбірному басейні. Для дощових садів, розташованих у місцевостях з підвищеним ризиком витоку паливно-мастильних матеріалів (автозаправки, місця для паркування), рекомендується підбирати рослинність, стійку до забруднювачів нафтового походження. Наприклад, можна використовувати рослину *Physocarpus opulifolia Diabolo*.

Розроблені рекомендації були враховані при проєктуванні та будівництві пілотного дощового саду, що підтверджується актом впровадження, здійсненим у рамках дисертаційного дослідження. Конструкцію було зведено навесні 2024 року, і вона була введена в експлуатацію наприкінці літа. Етапи будівництва дощового саду відображені на рисунку 18.

Конструкцію дощового саду площею 2,55 м² було впроваджено для вловлювання зливових стоків з даху площею 52,0 м² через водостічну трубу. У конструкції передбачено зону заглиблення на 200 мм для накопичення зливної води та утворення водяного стовпа. Верхній шар природного ґрунту є сумішшю органічного ґрунту, піску та супіску, що створює сприятливі умови для розвитку рослин. Товщина цього шару визначається залежно від водопроникності ґрунту та стійкості рослин до підтоплення і становить 200 мм.



Рисунок. 18. Етапи будівництва пілотної конструкції дощового саду в Київській області

Середній шар крупнозернистого піску завтовшки 300 мм виконує функцію підвищення водопроникності верхнього шару ґрунту, оскільки є ключовим для інфільтрації. Нижній дренажний шар складається із середнього та крупного гравію, а його товщина становить 300 мм, що відповідає рекомендованим параметрам для забезпечення належного дренажу. Дренажну систему в конструкції не було передбачено, оскільки інфільтраційна здатність конструкції дозволяє пропустити достатню кількість води. Всі конструктивні параметри були визначені шляхом моделювання гідрологічного процесу за допомогою розробленої моделі інфільтрації.

ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технологічну проблему управління дощовими стоками, забрудненими паливно-мастильними матеріалами, в урбанізованому середовищі шляхом наукового обґрунтування та розроблення зелених конструкцій у рамках концепції міста-губки.

2. На основі аналізу літературних джерел визначено, що урбанізація є однією з головних рушійних сил економічного зростання та розвитку. Однак, швидка урбанізація спричиняє серйозні екологічні та соціальні проблеми, зокрема прискорення глобальних кліматичних змін. Урбанізація значно підвищує частоту та інтенсивність екстремальних погодних явищ з негативними змінами динаміки стоку та водного балансу, а також епізодів забруднення зливових стоків паливно-мастильними матеріалами. Тому нормалізація управління дощовими водами є першочерговим завданням для міст, а інтегрування зелених конструкцій у рамках концепції міста-губки та блакитно-зеленої інфраструктури є важливим заходом комплексного вирішення мультидисциплінарних проблем урбоценозів.

3. На підставі аналізу принципів концепції міста-губки визначено роль та місце зелених конструкцій у системі блакитно-зеленої інфраструктури, де першою

ланкою в ланцюгу вловлювання дощової води є зелені покриття, які перші сприймають і утримують дощову воду. У разі відсутності дощової каналізації дощові сади формують останню ланку в управлінні дощовими водами. Удосконалена термінологія та розроблена класифікація зелених конструкцій дозволяє чітко та послідовно класифікувати різні види зелених конструкцій відповідно до їхніх основних характеристик та функціональних особливостей в рамках блакитно-зеленої інфраструктури.

4. Розроблена універсальна гідрологічна модель, що ґрунтується на законі Дарсі, дозволила розрахувати основні гідрологічні параметри конструкції дощового саду на основі реальної дощової події, прийнятої як крайній випадок з максимальною кількістю опадів 36 мм/год. Основним шаром конструкції дощового саду в процесі інфільтраційного проникнення є проміжний інфільтраційний шар. Результати моделювання показали, що для дощового саду з однаковою глибиною 1,3 м, але з різною товщиною ґрунтових шарів, повне водонасичення досягається за 58 хвилин при співвідношенні площ 11,9 та за 57 хвилин при співвідношенні 10,7, відповідно.

5. Результати моделювання за розробленою гідрологічною моделлю з урахуванням висоти водяного стовпа та коефіцієнтів фільтрації показали, що глибина зони заглиблення на поверхні дощового саду критично впливає на процеси накопичення зливового стоку та переливання конструкції. Збільшення товщини верхнього шару на кожні 100 мм та зменшення коефіцієнта фільтрації підвищують час заповнення конструкції та збільшують висоту стовпа до 0,341 м. Зміна товщини інфільтраційного та гравійного шарів впливає лише на час заповнення без зміни висоти стовпа. Найменший вплив на висоту стовпа має нижній гравійний шар, що підтверджує його роль лише як дренажного елемента.

6. На основі експериментальних даних обернено-фазової високоефективної рідинної хроматографії встановлено, що конструкції дощових садів є ефективними для очищення зливових потоків від нафтових вуглеводнів, зокрема дизельного пального та відпрацьованої двигунної оливи. Видалення забруднювальних речовин досягає 100% протягом 22 тижнів дослідження. Результати хроматографічного аналізу виявили гідрофільну сполуку з низькою концентрацією (<10 мг/см³) у фільтраті з експериментальної колони І (з рослинністю), яку поливали відпрацьованою двигунною оливою. За часом утримання та УФ-спектром речовина не відповідає компонентам дизельного палива чи оливи. Це свідчить про перетворення нафтових вуглеводнів у ґрунті.

7. Експериментальні дослідження показали, що 95% модельних нафтових вуглеводнів утримуються у поверхневому шарі ґрунту. Компоненти дизельного палива та відпрацьованої двигунної оливи зазнають хімічних перетворень у ґрунті та піщаному шарі, що спричиняє появу смуг поглинання з максимумом близько 225 нм та в області 250–300 нм, відповідно, завдяки формуванню кон'югованих систем. Хімічні зміни спричинили збільшення гідрофобності компонентів, що підтверджується порушенням гідравлічної провідності та збільшенням часу перебування води в колонах. Це дозволило розробити практичні рекомендації щодо впровадження та обслуговування дощових садів у реальних умовах, зокрема на

територіях з інтенсивним забрудненням, як от автозаправні станції, автостоянки та автомийки.

8. Результати експериментальних досліджень з фільтраційними колонами показали, що рослини *Physocarpus opulifolia Diabolo* є толерантним видом у дощових садах для очищення води від нафтових вуглеводнів. Всі зразки виживали в забрудненому ґрунті, проте толерантність варіювалася залежно від типу забруднювача. Найвищу толерантність рослини продемонстрували до дизельного пального (ТІ=1,03), а толерантність до відпрацьованої двигунної оливи була помірною (ТІ=0,75). Зростання та розвиток рослин, поливаних дизельним паливом, менше пригнічувалися. Формувалися нові пагони та листя, а коренева система краще розвинулася порівняно з рослинами, поливаними відпрацьованою оливою.

9. На основі результатів дослідження газообміну в рослинах виду *Ligustrum vulgare L.* підтверджено, що зелені конструкції як засоби-губки в урбанізованих середовищах також покращують якість повітря, і що ефективність видалення забруднювальних речовин з повітря пов'язана з об'ємом і структурою рослинності в цих конструкціях. При цьому важливо правильно доглядати за рослинами для уникнення формування великої нефотосинтетичної стовбурової маси з незначною масою листя. Подібне формування призвело до дисбалансу фотосинтетичної та дихальної активності з виділенням вуглекислого газу 11,27 мкг/с з двох кущів. При максимальному освітленні ступінь поглинання часток РМ_{2,5} та РМ₁₀ *Ligustrum vulgare L.* була суттєвою і становила від $8,84 \cdot 10^{-5}$... $1,5 \cdot 10^{-4}$ мкг/с.

10. Економічний аналіз використання зелених конструкцій в урбанізованому середовищі показав, що затримання дощової води цими технологіями є екологічно та економічно доцільним. Підтверджено необхідність їх широкого впровадження в містах України з підтриманням державних ініціатив. Екологічний ефект (ЕЕ) від впровадження зелених покриттів коливається від 394 000 м³ води у Дніпрі до 647 000 м³ у Львові, з середнім значенням 515 000 м³, що залежить від площі конструкції і середньорічної кількості опадів. Економічний аналіз управління зливовими водами на прикладі дощового саду показав, що за строк ефективного використання проєкту в 8–10 років накопичена економія на тарифах за скидання стоків у каналізаційну систему становитиме від 965,6 до 1207 євро.

11. Впровадження конструкції дощового саду площею 2,55 м² у реальних умовах для вловлювання зливових стоків з даху площею 52 м² дозволило розробити загальні рекомендації та принципи проєктування, будівництва й обслуговування дощових садів, адаптованих для помірного клімату України, які стали частиною проєктів ДСТУ Б В.Х.Х-__ХХ:202Х «Захист довкілля. Зелені конструкції. Технічні умови», ДСТУ ХХХХ: 20ХХ «Захист довкілля. Зелені конструкції. Методи визначення теплотехнічних та газообмінних характеристик рослинних шарів», СОУ ОЕМ 08.002.41.032:20ХХ. Система екологічної сертифікації та маркування згідно з ДСТУ ISO 14024:2018 (ISO 14024:2018, IDT). Запропонований стійкий до урбанізованого середовища асортимент багаторічних автохтонних та інтродукованих рослин різних життєвих форм для дощових садів, що дозволяє обирати рослинність з урахуванням важливих факторів, як от потенціал для покращення якості води та гідрологічні показники дощового саду.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Наукові публікації, які відображають основні наукові результати докторської дисертації

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

1. **Kravchenko M.**, Trach Y., Trach R., Tkachenko T., Mileikovskiy V. Improving the Efficiency and Environmental Friendliness of Urban Stormwater Management by Enhancing the Water Filtration Model in Rain Gardens. *Water*. 2024, 16 (10), 1316. <https://doi.org/10.3390/w16101316> (*Scopus, Q1*).

Особистий внесок здобувачки полягає у перевірці ефективності моделі проходження та насичення водою шарів системи дощового саду в певний момент часу та втрати напору вертикального фільтраційного потоку.

2. **Kravchenko M.**, Trach Y., Trach R., Tkachenko T., Mileikovskiy V. Behaviour and Peculiarities of Oil Hydrocarbon Removal from Rain Garden Structures. *Water*. 2024, 16 (13), 1802. <https://doi.org/10.3390/w16131802> (*Scopus, Q1*).

*Особистий внесок здобувачки полягає у проведенні дослідження часових та просторових характеристик розподілу і накопичення нафтових вуглеводнів у експериментальних конструкціях дощових садів. Авторкою було вивчено вплив нафтових вуглеводнів на рослини виду *Physocarpus opulifolia Diabolo*.*

3. **Kravchenko M.**, Wrzesiński G., Pawluk K., Lendo-Siwicka M., Markiewicz A., Tkachenko T., Mileikovskiy V., Zhovkva O., Szymane S., Piechowicz K. Improving Urban Stormwater Management Using the Hydrological Model of Water Infiltration by Rain Gardens Considering the Water Column. *Water*. 2024, 16 (16), 2339. <https://doi.org/10.3390/w16162339> (*Scopus, Q1*).

Особистий внесок здобувачки полягає у проведенні валідації розробленої математичної моделі та аналізі отриманих розрахункових кривих, які прогнозують продуктивність дощових садів залежно від основних конструктивних параметрів: висоти водяного стовпа, співвідношення площі водозбору до площі споруди, товщини ґрунтового шару та коефіцієнта фільтрації ґрунту.

4. Bondarenko D., Matiakh S., Surzhyk T., Sheiko I., **Kravchenko M.** Development trends of solar power engineering based on the materials of the scientific and practical conference «Renewable energy and energy efficiency in the 21st century» 2024. *Vidnovlyvana Energetika*. 2024. 3(78). P. 76-83. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83) (*Scopus, Q4*).

Особистий внесок здобувачки полягає в дослідженні можливостей інтеграції сонячних енергетичних систем із зеленими конструкціями, зокрема зеленими покриттями, та в аналізі варіантів їх впровадження в умовах сучасного урбанізованого простору.

Статті у наукових фахових виданнях України

5. Гунченко О.М., Волошкіна О.С., **Кравченко М.В.**, Корінний В.І. Система менеджменту екологічної безпеки – як одна із складових енергетичної ефективності. *Екологічна безпека та природокористування*. 2020. 4 (36). С. 5–19. DOI: [10.32347/2411-4049.2020.4.5-19](https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.5-19)

Особистий внесок здобувачки полягає в обґрунтуванні основних етапів організації системи екологічної безпеки при звичайному стані навколишнього середовища.

6. Василенко Л.О., Березницька Ю.О., **Кравченко М.В.**, Шевченко О.С., Цьома Т.О. Забруднення поверхневих вод фосфатами та важкими металами. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2022. 38. С. 4 – 17. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.38.4-17>

Особистий внесок здобувачки полягає в дослідженні сучасних даних щодо джерел та інтенсивності надходження, вмісту, перетворення і впливу фосфатів та важких металів на водні організми та поверхневі водні об'єкти.

7. Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О., **Кравченко М.В.** Вплив «зелених» покрівель на управління дощовими водами: огляд наукових досліджень та перспективи використання. *Екологічна безпека та природокористування*. 2023. 46(2). С. 35–53. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.35-53>

Особистий внесок здобувачки полягає у розробці аналітичного імовірнісного підходу до дослідження характеристик зеленого покриття для управління зливовими водами шляхом оцінки функції розподілу ймовірностей стоку.

8. **Кравченко М.В.**, Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О. Модифікація «зеленої» покрівлі з використанням технічних рішень для зменшення негативного впливу зливових вод в міських умовах. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2023. 43. С. 16–28. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.16-28>

Особистий внесок здобувачки полягає в обґрунтуванні ефективності інноваційного поєднання зеленого покриття з іншими системами для зменшення негативного впливу зливових вод.

9. Ткаченко Т.М., **Кравченко М.В.**, Василенко Л.О. Вплив «зелених» покрівель на якість дощового стоку у міському середовищі. *Геохімія техногенезу*. 2023. 9(37). С. 65–71. DOI: [10.32782/geotech2023.37.10](https://doi.org/10.32782/geotech2023.37.10)

Особистий внесок здобувачки полягає в розробці схеми циркуляції забруднювальних речовин у системі зеленого покриття та проведенні аналізу потенціалу різних факторів, які можуть виступати як джерела або поглиначі забруднювальних речовин.

10. **Кравченко М.В.**, Ткаченко Т.М. Проблеми удосконалення термінології та сучасної класифікації «зелених» конструкцій для створення українських «зелених» стандартів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2023. 4(493). С. 194–204. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).26](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).26)

Особистий внесок здобувачки полягає в упорядкуванні та уточненні термінології в галузі зелених конструкцій та у розробці схеми класифікації для «Вертикальних систем озеленення», «Горизонтальних систем озеленення» та «Кінетичних (мобільних) систем озеленення».

11. **Кравченко М.В.**, Ткаченко Т.М. Розрахунок еколого-економічного ефекту від збирання дощової води «зеленими» покрівлями. *Екологічна безпека та природокористування*. 2024. 49(1). С. 34–48. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411->

[4049.2024.1.34-48](#)

Особистий внесок здобувачки полягає у проведенні економічного аналізу соціально-вартісних вигод, які зелені покрівлі забезпечують протягом свого життєвого циклу, із застосуванням методу чистої приведеної вартості.

12. Ткаченко Т.М., **Кравченко М.В.**, Василенко Л.О., Шумбар К.В., Щербак А.І., Зозуля С. Зелені конструкції в урбанізованому середовищі: вивчення впливу «зелених» дахів на якість дощової води та інші екологічні параметри. бібліографічний огляд. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2024. 46. С. 48–64. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.46.48-64>

Особистий внесок здобувачки полягає у проведенні аналізу найбільш цитованих наукових досліджень щодо впливу систем зелених покривів на управління зливовими стоками. Авторкою виділено ключові фактори, які визначають вплив зелених покривів на якість дощового стоку.

13. Tkachenko T., Mileikovskiy V., **Kravchenko M.** Research of gas exchange and air purification processes by plants of the common privet (*Ligustrum vulgare L.*) species. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2023. 14(2). P. 28-37. <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2023.28>

*Особистий внесок здобувачки полягає у проведенні дослідження газообміну в рослинах виду *Ligustrum vulgare L.*, яке включає кількісне визначення їх здатності виділяти та поглинати кисень і вуглекислий газ, очищати повітря від шкідливих речовин та виділяти летючі фітоорганічні сполуки.*

14. **Кравченко М.В.**, Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О. Дослідження впливу основних параметрів дощового саду на його гідрологічні показники методом моделювання. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2024. 1. С. 166–176. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2024.1\(494\).23](https://doi.org/10.15589/znp2024.1(494).23)

Особистий внесок здобувачки полягає в розробці конструкційної схеми дощового саду, з акцентом на основні елементи, а також у побудові та аналізі залежностей між ефективністю утримання дощової води і змінами основних параметрів конструкції.

15. **Кравченко М.В.**, Ткаченко Т.М. Розробка методів кількісної оцінки ефективності конструкції дощового саду у контексті управління дощовими водами. *Екологічна безпека та природокористування*. 2024. 50(2). С. 19–35. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.19-35>

Особистий внесок здобувачки полягає у розробці методів кількісної оцінки гідрологічної ефективності конструкцій дощових садів для управління зливовою водою.

16. **Kravchenko M.**, Tkachenko T. Analysis of alternative approaches to stormwater management and prospects for their implementation in Ukraine. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2024. 15(1). P. 53-63. <https://doi.org/10.69628/esbur/1.2024.53>

Особистий внесок здобувачки полягає у проведенні розрахунку економічного ефекту від використання резервуара для збору дощової води та конструкції дощового саду.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

17. Fedorenko S., Vasylenko L., Bereznytska Yu., **Kravchenko M.** Environmental management as a component of Ukraine's modern economy: Management under the conditions of martial law. *Construction of Optimized Energy Potential*. 2022. Vol. 11. Issue 1. P. 195–202. DOI: <https://doi.org/10.17512/bozpe.2022.11.22>

Особистий внесок здобувачки полягає у розробці комплексу науково-обґрунтованих рекомендацій щодо впровадження принципів екологічного менеджменту в природокористуванні України, зокрема стосовно управління зливовими стоками.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

18. Hunchenko O., Voloshkina O., Korduba I., **Kravchenko M.**, Stefanovych P. The conceptual framework of sustainable development and the role of environmental and technogenic safety in achieving it. *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020)*. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 907*, 2020, pp. 1–9. DOI: [10.1088/1757-899X/907/1/012080](https://doi.org/10.1088/1757-899X/907/1/012080) (*Scopus*).

Особистий внесок здобувачки полягає у визначенні напрямків формування ризиків та зниження рівня техногенної і екологічної небезпеки для будівельної галузі через впровадження та інтеграцію зелених конструкцій.

19. **Kravchenko M.**, Bereznytska Y., Hunchenko O., Vasylenko L., Haba K. The theoretical calculation of activity coefficients in the use of baromembrane methods for water treatment. *Conference Proceedings, International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021»*, Oct 2021, Volume 2021, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3028> (*Scopus*).

Особистий внесок здобувачки полягає у вдосконаленні методу теоретичного розрахунку коефіцієнтів активності компонентів водних розчинів для підвищення ефективності процесів очистки води.

20. **Kravchenko M.**, Bereznytska Y., Vasylenko L., Fedorenko S. Theoretical calculation of the activity coefficients of dilute aqueous solutions taking into account factors of electrical nature. *Conference Proceedings, International Conference of Young Professionals “GeoTerrace-2022”*, 3-5 October 2022, Lviv, Ukraine, Volume 2022, pp. 1–5. DOI: [10.3997/2214-4609.2022590044](https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590044) (*Scopus*).

Особистий внесок здобувачки полягає у розробці методу розрахунку середнього коефіцієнта активності розбавлених водних розчинів, зокрема для доочистки технічної води, зібраної дощовими садами, з урахуванням впливу електричних факторів.

21. Tkachenko T., Mileikovskiy V., **Kravchenko M.**, Konovaliuk V. Simulation of Illumination and Wind Conditions for Green and Fed Cities Using CFD Software. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 4th International Symposium of Earth, Energy, Environmental Science, and Sustainable Development (JESSD 2023)*, 26/08/2023 - 27/08/2023 Jakarta, Indonesia. Vol. 1275. DOI: [10.1088/1755-1315/1275/1/012014](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1275/1/012014) (*Scopus*).

Особистий внесок здобувачки полягає в обґрунтуванні ролі зелених конструкцій як перспективного підходу до екологічного, енергоефективного та орієнтованого на добробут людини зеленого будівництва.

22. **Kravchenko M.**, Bereznytska Y., Vasylenko L., Fedorenko S. Comparative analysis of dilute aqueous solutions activity coefficients: experimental data and theoretical calculations. *Conference Proceedings, International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2023"*, 2-4 October 2023, Lviv, Ukraine, Volume 2023, pp. 1–5. DOI: [10.3997/2214-4609.2023510061](https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510061) (*Scopus*).

Особистий внесок здобувачки полягає у вдосконаленні методу розрахунку коефіцієнтів активності розбавлених водних розчинів з урахуванням гідратації іонів.

23. Tkachenko T., Mileikovskiy V., Konovaliuk V., **Kravchenko M.**, Satin I. Biotechnical approach for a continuous simultaneous increase of indoor and outdoor air quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023. Vol. 1254 (1):012074. DOI: [10.1088/1755-1315/1254/1/012074](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012074) (*Scopus*).

Особистий внесок здобувачки полягає у проведенні детального аналізу даних про біоритми рослин, включаючи вивчення їх сезонних циклів, впливу зовнішніх факторів на фізіологічні процеси, а також впливу біоритмів на ефективність рослин в екологічних системах.

24. Tkachenko T., **Kravchenko M.**, Voloshkina O., Mileikovskiy V., Sipakov R., Tkachenko O. Evaluating Rain-Garden Bands: Filtration Properties and Implications for Urban Water Management. *World Environmental and Water Resources Congress*, 2024. DOI: [10.1061/9780784485477.085](https://doi.org/10.1061/9780784485477.085) (*Scopus*).

Особистий внесок здобувачки полягає у розробці схеми процесів видалення паливно-мастильних матеріалів за допомогою експериментальних фільтраційних колон та у створенні методики для визначення відносної швидкості зростання і толерантності досліджуваних рослин.

25. **Кравченко М.В.** Якість питної води – як важливий фактор екологічної безпеки життєдіяльності та здоров'я людини. *Актуальні проблеми безпеки на транспорті, в енергетиці, інфраструктурі: матеріали I міжнародної науково-практичної конференції*, 8-11 вересня 2021. Випуск 1. Херсон: Морський інститут імені контр-адмірала Ф.Ф. Ушакова, 2021. С. 372–376.

26. Ткаченко Т.М., **Кравченко М.В.**, Мілейковський В.О. Вплив «зелених» покрівель на управління дощовими водами: огляд наукових досліджень та перспективи використання. *Green Construction (Зелене будівництво): матеріали II міжнародної науково-практичної конференції*. Київ: КНУБА, 2023. С. 97–102.

Особистий внесок здобувачки полягає у розробці методики для визначення обсягу відтоку дощової води з поверхні зелених покрівель та у створенні системи заходів для їх розвитку і впровадження в Україні.

27. **Кравченко М.В.**, Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О. Модифікація «зеленої» покрівлі з використанням технічних рішень для зменшення негативного впливу зливових вод в міських умовах. *Green Construction (Зелене будівництво): матеріали II міжнародної науково-практичної конференції*. Київ: КНУБА, 2023. С. 103–108.

Особистий внесок здобувачки полягає у розрахунку ступеня утримання дощового стоку залежно від інтенсивності опадів для різних типів покрівель.

28. Ткаченко Т.М., **Кравченко М.В.**, Василенко Л.О. Вплив «зелених» покрівель на якість дощового стоку у міському середовищі. *Green Construction (Зелене будівництво)*: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції. Київ: КНУБА, 2023. С. 108–113.

Особистий внесок здобувачки полягає в ідентифікації та обґрунтуванні факторів, що впливають на якість стоку із зелених покриттів.

29. **Кравченко М.В.**, Василенко Л.О. Дослідження процесів в системі «модельний розчин – мембрана – вода» з використанням зворотноосмотичних мембран різних виробників. *Екологічні проблеми сучасності*: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, 10 травня 2023. Луцьк: Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м. Луцьк, 2023. С. 28–32.

Особистий внесок здобувачки полягає в проведенні аналізу технологічних рішень для очищення води в джерелах водопостачання та водних об'єктах від забруднювачів різного походження.

30. **Кравченко М.В.** Моделювання процесу управління дощовою водою на «зелених» покрівлях: огляд наукових статей. *Екологічні проблеми сучасності*: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, 10 травня 2023. Луцьк: Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м. Луцьк, 2023. С. 64–68.

31. **Кравченко М.В.**, Ткаченко Т.М. Роль «зелених» конструкцій у зменшенні викидів CO₂ в урбанізованих містах. *Екологічні проблеми сучасності*: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, 10 травня 2023. Луцьк: Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м. Луцьк, 2023. С. 82–86.

Особистий внесок здобувачки полягає в розробці методики для визначення кількості вуглецю, що зв'язується внаслідок поглинання CO₂ рослинами в процесі фотосинтезу в рамках зелених конструкцій.

32. Ткаченко Т.М., **Кравченко М.В.** Порівняльний аналіз ефективності різних типів «зелених» конструкцій в поглинанні CO₂ залежно від типу рослинності та субстрату. *Екологічні проблеми сучасності*: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, 10 травня 2023. Луцьк: Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м. Луцьк, 2023. С. 94–98.

Особистий внесок здобувачки полягає в теоретичному обґрунтуванні ключових факторів, через які зелені покриття сприяють вирішенню проблеми надмірної концентрації CO₂ в атмосфері.

33. Щербак А., Ткаченко Т., **Кравченко М.** Ефективність процесу очищення повітря та поглинання CO₂ кущами Бірючини звичайної (*Ligustrum vulgare* L.). *International Scientific-Practical Conference of young scientists «Build-Master-Class-2023»*. 2023. С. 287–288.

Особистий внесок здобувачки полягає в удосконаленні методики комплексного кількісного дослідження зелених конструкцій як засобів-губок з урахуванням супутніх позитивних ефектів на повітряне середовище.

34. Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О., **Кравченко М.В.** Перспективи розроблення державних «зелених» стандартів. *Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія»*, Київ, 22-24 листопада 2023. С. 23–24.

Особистий внесок здобувачки полягає у проведенні аналізу поточного стану державних стандартів у сфері екологічного будівництва та виявлення прогалів і потреб щодо впровадження зелених конструкцій.

35. **Кравченко М.В.**, Ткаченко Т.М. Розробка методів кількісного оцінювання ефективності конструкції дощового саду в контексті управління дощовими водами. *Green Construction (Зелене будівництво)*: матеріали III міжнародної науково-практичної конференції. Київ: КНУБА, 2024. С. 176–181.

Особистий внесок здобувачки полягає в розробці математичних залежностей розрахунку основних параметрів конструкції дощового саду.

36. Ткаченко Т., Мілейковський В., **Кравченко М.**, Вакуленко Д. Перші українські стандарти зеленого будівництва, їх унікальність і подальший розвиток. Енергоощадні машини і технології: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 22-24 травня 2024 р. Київ: КНУБА, 2024. С. 210 – 212.

Особистий внесок здобувачки полягає в обґрунтуванні місця та ролі зелених конструкцій у сфері зеленого будівництва при розробці державних стандартів.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

37. Остаточний звіт «Дослідження впливу стічних вод на урбоценози та управління їхньою кількістю і якістю зеленими конструкціями» НДДКР «Управління дощовими стічними водами з використанням зелених конструкцій» (ДОН: 0224U001821). <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0224U001821/>

38. Проміжний звіт «Розроблення теоретичних підходів, експериментальних методів і дослідних стендів» НДДКР «Створення перспективних технологій формування безпечного середовища будівель поєднанням зелених конструкцій, фітодизайну та інженерних систем» (державний обліковий номер: 0223U000498). <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0223U000498/>

39. Остаточний звіт «Виконання експериментальних досліджень та розроблення нормативних рекомендацій» НДДКР «Створення перспективних технологій формування безпечного середовища будівель поєднанням зелених конструкцій, фітодизайну та інженерних систем» (державний обліковий номер: № 0224U001505). <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0224U001505/>

АНОТАЦІЯ

Кравченко М.В. Науково-технологічні основи використання зелених конструкцій для ефективного управління дощовими стоками в урбанізованому середовищі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 «Екологічна безпека». – Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 2024.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-технологічної проблеми управління дощовими стоками, забрудненими паливно-мастильними

матеріалами, в урбанізованому середовищі шляхом наукового обґрунтування та розроблення зелених конструкцій у рамках концепції міста-губки.

В роботі визначено і обґрунтовано роль та значення зелених конструкцій у контексті концепції міста-губки та блакитно-зеленої інфраструктури. Розроблено математично-гідрологічні моделі на основі закону Дарсі та рівняння Бернуллі, які описують гідродинамічні процеси в багатошарових конструкціях дощових садів за різної інтенсивності опадів, враховуючи висоту водяного стовпа та коефіцієнт фільтрації. Моделі перевірено шляхом моделювання гідрологічних характеристик дощового саду на основі одиничної дощової події критичної інтенсивності (36 мм/год).

Експериментально досліджено ефективність дощових садів щодо видалення нафтових вуглеводнів, а також вивчено поведінку цих забруднювачів всередині системи. Досліджено зміну гідравлічної провідності ґрунтового середовища експериментальних зразків дощових садів у динаміці часу. Розраховано індекси толерантності та стійкості рослин виду *Physocarpus opulifolia Diabolo* до впливу дизельного палива та відпрацьованої двигунної оливи. Кількісно визначено здатність рослин виду бирючини звичайної (*Ligustrum vulgare L.*) виділяти та поглинати O_2 і CO_2 та досліджено ефективність очищення повітря від $PM_{2,5}$ та PM_{10} .

Розраховано екологічно-економічний ефект від впровадження зелених покриттів, проведено економічний аналіз управління зливовими водами на прикладі дощового саду. Розроблено рекомендації та принципи проектування, будівництва і обслуговування дощових садів в урбанізованому середовищі.

Ключові слова: зелені конструкції, урбанізоване середовище, класифікація, дощові сади, управління дощовими водами, блакитно-зелена інфраструктура, інфільтрація, гідрологічні процеси, фільтраційні властивості, газообмін у рослинах.

ANNOTATION

Kravchenko M.V. Scientific and technological bases of using green structures for effective management of rainwater runoff in an urban environment. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the Doctor of Technical Sciences degree in the speciality 21.06.01 «Environmental Safety». – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to solving the urgent scientific and technological problem of managing rainwater runoff contaminated with fuels and lubricants in the urban environment through scientific substantiation and development of green structures within the concept of a sponge city.

The paper defines and substantiates the role and importance of green structures in the context of the sponge city concept and blue-green infrastructure. Mathematical and hydrological models based on Darcy's law and Bernoulli's equation have been developed to describe hydrodynamic processes in multilayer rain garden structures at different rainfall intensities, taking into account the height of the water column and the filtration

coefficient. The models were tested by simulating the hydrological characteristics of a rain garden based on a single rain event of critical intensity (36 mm/h).

The effectiveness of the rain gardens in removing petroleum hydrocarbons was experimentally investigated, as well as the behaviour of these pollutants within the system. The results of the reversed-phase high-performance liquid chromatography indicate the absence of petroleum hydrocarbon components in the filtrates of all experimental columns, which suggests 100% removal of these substances from stormwater. It was found that 95% of the pollutants are retained in the surface layer of the soil environment through the sorption process, which led to a change in hydraulic conductivity over time.

The ability of plants of the common privet species (*Ligustrum vulgare L.*) to release and absorb O₂ and CO₂ was quantified, and the efficiency of air purification from PM_{2,5} and PM₁₀ was investigated to properly take into account the impact of plants in the process of their selection for urban landscaping. The results of the experiment showed that privet bushes are inefficient for absorbing carbon dioxide in an urban environment, so plants with a significant proportion of photosynthetically active biomass and fast-growing plants should be preferred.

The environmental effect of green coverings was calculated, which ranges from 394,000 m³ of water in Dnipro to 647,000 m³ in Lviv, with an average of 515,000 m³. The economic impact per US\$1,000 was highest in Kyiv and Lviv, and lowest in Dnipro and Kharkiv, with an average for the four cities of US\$380,500. An economic analysis of stormwater management using the example of a rain garden was carried out, which showed that throughout effective use of the project of 8-10 years, the accumulated savings on tariffs for discharging wastewater into the sewer system will range from 965,6 to 1207 euros.

Key words: green structures, urban environment, classification, rain gardens, rainwater management, blue-green infrastructure, infiltration, hydrological processes, filtration properties, gas exchange in plants.