

ІНТЕГРАЦІЯ ПРОНИКНИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТЬ У СИСТЕМИ СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ ДОЩОВИМИ СТОКАМИ В УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Розглянуто проблему зростання поверхневого стоку в умовах урбанізації та обмеженої ефективності традиційних систем водовідведення. Проаналізовано можливості застосування проникних дорожніх покриттів як елементу зеленої інфраструктури для регулювання кількості та якості дощових вод. Обґрунтовано доцільність інтеграції таких систем у міське середовище з урахуванням гідравлічних, екологічних та експлуатаційних факторів. Показано, що використання проникних покриттів дозволяє знизити обсяг поверхневого стоку, підвищити ефективність очищення дощових вод та зменшити навантаження на інженерні системи.

Ключові слова: дощовий стік, проникні покриття, зелена інфраструктура, урбанізація, стале водокористування

Вступ Інтенсивна урбанізація сучасних територій супроводжується докорінними змінами природного гідрологічного режиму, що насамперед проявляється у стрімкому збільшенні частки водонепроникних поверхонь. У міських умовах, де домінують асфальтобетонні покриття та щільна забудова, коефіцієнт стоку може досягати критичних значень 0,7–0,9. Це призводить до різкого підвищення пікових витрат під час дощових подій, що створює колосальне гідравлічне навантаження на існуючу інженерну інфраструктуру та часто спричиняє локальні підтоплення.

Окрім суто кількісних змін водного балансу, дощові стоки характеризуються значним рівнем техногенного забруднення, що формується внаслідок експлуатації міських територій. У складі поверхневого стоку ідентифікуються високі концентрації завислих речовин, нафтопродуктів, важких металів та специфічних органічних сполук. Ці забруднювачі є прямим наслідком активної транспортної діяльності та промислових процесів, що перетворює звичайні атмосферні опади на джерело потенційної екологічної небезпеки для водних екосистем.

Традиційні лінійні системи водовідведення, які десятиліттями були стандартом містобудування, орієнтовані на максимально швидке транспортування стоку за межі урбанізованої території. Проте такий підхід не забезпечує належного рівня очищення води та сприяє поступовій деградації природних водотоків, у які здійснюється скид. У зв'язку з цим виникає гостра потреба у перегляді стратегій управління водними ресурсами на користь децентралізованих систем, що базуються на принципах відновлення природного циклу.

Сучасні концепції сталого розвитку міст передбачають перехід до інтелектуальних систем управління дощовими водами, відомих як технології стійкого міського дренажу (SUDS). Головна філософія таких рішень полягає в імітації природних процесів водообігу безпосередньо в умовах антропогенного ландшафту. Це дозволяє не тільки регулювати обсяги води, а й сповільнювати швидкість потоку, забезпечуючи умови для інфільтрації та природного випаровування.

Інтеграція інженерних рішень та технологій зеленого будівництва стає базовою умовою формування стійких міських екосистем, здатних адаптуватися до глобальних змін клімату. Такі системи є багатофункціональними, оскільки вони одночасно виконують гідравлічну, очисну та екосистемну функції. На відміну від жорсткої інженерної

інфраструктури, рішення SUDS дозволяють створювати гнучке середовище, що мінімізує екологічний слід міської забудови [1].

Особливе місце у структурі стійкого дренажу займають проникні дорожні покриття, які поєднують у собі функціональність транспортної інфраструктури та інфільтраційну здатність природного ґрунту. Вони дозволяють вирішити проблему стоку в самому місці його виникнення, виступаючи при цьому як первинна ступінь очищення води від найбільш поширених забруднювачів. Використання таких поверхонь є критично важливим для зон з високим ступенем герметизації поверхні, таких як парковки, пішохідні зони та промислові майданчики.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю наукового обґрунтування інтеграції проникних покриттів у системи управління стоками з урахуванням специфічних кліматичних та експлуатаційних факторів. Розгляд цих технологій через призму екологічної безпеки та циркулярної економіки відкриває шлях до створення «розумних» міст, де інженерна думка працює в синергії з природними механізмами. Це дозволяє суттєво підвищити надійність міської інфраструктури при одночасному покращенні якості довкілля.

Виклад основного матеріалу *Типологія та конструктивні особливості проникних покриттів* Сучасні технології сталого дренажу базуються на використанні матеріалів, що забезпечують безперешкодну інфільтрацію опадів у нижні шари дорожньої конструкції. Основним критерієм класифікації таких систем є їхня пористість та здатність витримувати розрахункові транспортні навантаження.

Пористий бетон та пористий асфальтобетон. Ці матеріали відрізняються від традиційних аналогів відсутністю або мінімальним вмістом дрібного заповнювача (піску). Структура формується за рахунок зчеплення крупного заповнювача вузьких фракцій цементним каменем або бітумним в'язучим, що створює мережу сполучених між собою пор. Об'єм відкритих пор у таких сумішах зазвичай становить від 15% до 25% [2]. Це дозволяє воді миттєво проходити крізь верхній шар, виключаючи формування калюж та аквапланування. Проте, через високу пустотність, міцність на стиск пористого бетону є нижчою за стандартний (зазвичай 10–20 МПа), що обмежує його застосування зонами з низькою інтенсивністю руху, пішохідними доріжками та паркінгами [3].

Модульні елементи та еко-плитка. Цей тип покриття передбачає використання стандартних або спеціалізованих бетонних блоків, між якими залишаються розширені шви (5–15 мм), заповнені дрібним гранітним відсівом або високопроникним піском. Інфільтраційна здатність системи в такому разі залежить не від пористості самого каменю, а від геометрії та заповнювача швів. Згідно з вітчизняними стандартами, такі вироби мають відповідати вимогам щодо морозостійкості та міцності, встановленим для тротуарних матеріалів [4].

Газонні решітки (пластикові та бетонні модулі). Комірчасті структури забезпечують максимальний коефіцієнт проникності (до 90% поверхні залишається відкритою). Пластикові модулі часто виготовляються з переробленого поліетилену високої щільності (HDPE), що відповідає принципам циркулярної економіки та забезпечує стійкість до агресивного середовища [5].

Тип покриття визначає лише верхній рівень системи, тоді як її ефективність значною мірою залежить від конструкції всього дорожнього одягу [6]. Типова структура проникного покриття суттєво відрізняється від традиційних герметичних аналогів наявністю розвиненої внутрішньої порожнистості та багатошарової будови (рис. 1).

Верхній шар забезпечує прийом та первинний розподіл атмосферних опадів. Під ним розташовується фільтруючий шар із дрібного щебеню, який виконує функцію затримання завислих частинок та попереднього очищення води. Основне функціональне навантаження припадає на акумулюючий шар, сформований із крупнофракційного щебеню (20–40 мм), у якому об'єм пор становить 30–40%. Цей шар виконує роль підземного резервуара, забезпечуючи тимчасове накопичення дощової води та її поступове відведення.

У нижній частині конструкції передбачається геотекстильний прошарок, який розділяє інженерні шари та природну ґрунтову основу, запобігаючи їх змішуванню та забезпечуючи стабільність фільтраційних характеристик системи. Через цей шар відбувається рівномірна інфільтрація очищеної води у ґрунт, що сприяє відновленню природного водного балансу території.

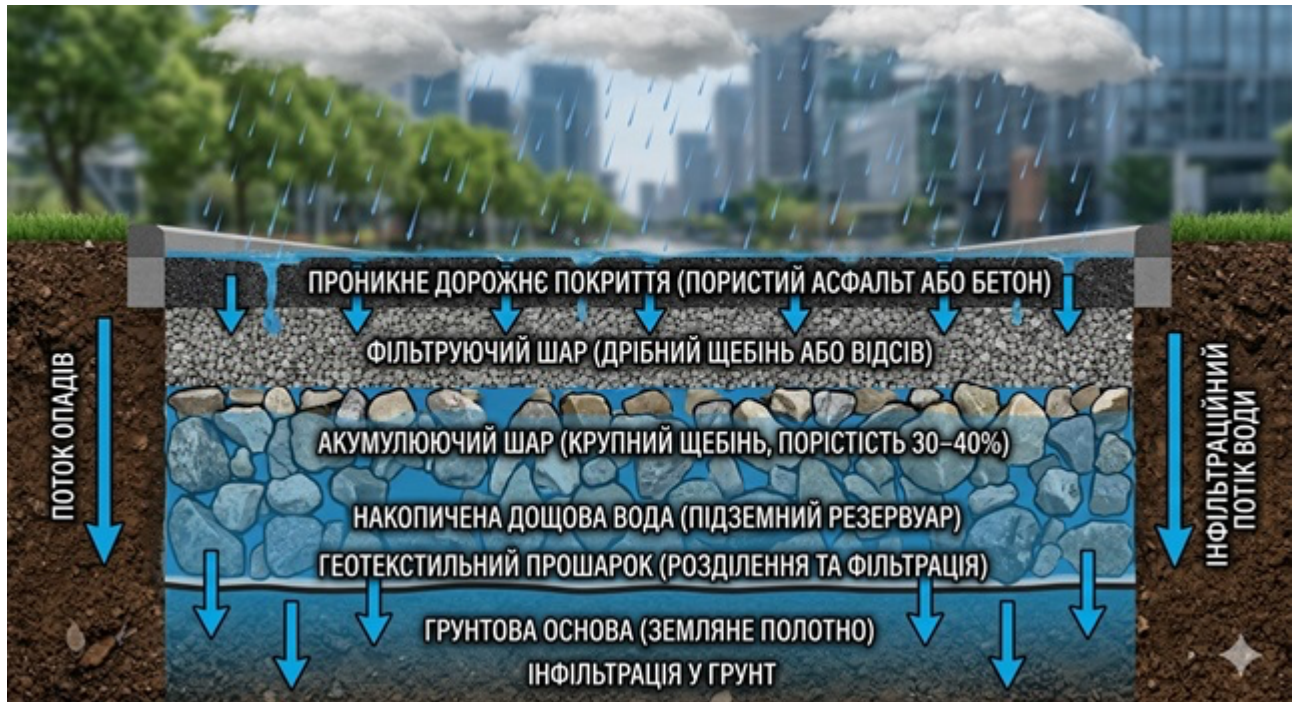


Рис. 1. Конструктивна схема проникного дорожнього покриття та механізм інфільтрації дощових вод

Така багатошарова конфігурація дозволяє поєднати функції водовідведення, акумулювання та очищення стоку. На відміну від традиційних покриттів, де вода швидко відводиться у зливову мережу, проникні системи забезпечують її затримку та поступове проникнення у ґрунт, що зменшує пікові навантаження на інженерні мережі та сприяє підвищенню екологічної стійкості урбанізованих територій.

Гідравлічна ефективність та моделювання динаміки стоку Ключовим показником спроможності проникних покриттів є їхня гідравлічна ефективність, яка визначається здатністю системи нівелювати пікові навантаження на міську каналізацію. На відміну від герметичних поверхонь, де до 95% опадів миттєво перетворюються на поверхневий стік, проникні системи трансформують цей процес за рахунок тимчасового акумулювання води у порах конструкції.

Гідравлічна робота системи базується на різниці між інтенсивністю опадів та швидкістю інфільтрації. Для нових покриттів швидкість просачування може досягати 2000–4500 мм/год, що в десятки разів перевищує параметри найбільш інтенсивних злив, зафіксованих в Україні [7]. Це означає, що за умови належного стану поверхні, весь об'єм дощової води поглинається конструкцією без формування калюж.

Математичне моделювання показує, що акумуляуючий шар із щебню товщиною 30 см із середньою пористістю 35% здатен утримувати до 105–120 літрів води на кожному квадратному метрі площі. Це дозволяє затримати стік від середньостатистичного дощу тривалістю 2–3 години, поступово відводячи його в ґрунт або зливову мережу з мінімальною витратою. Такий механізм дозволяє знизити пікове гідравлічне навантаження на колектори на 70–90%, що є критично важливим для запобігання підтопленням у щільно забудованих районах [8].

Графічний аналіз динаміки водовідведення (рис. 2) наочно демонструє ефект гідравлічного демпфування, що забезпечується проникною конструкцією. Для традиційних герметичних поверхонь характерним є стрімке зростання витрати води майже відразу після початку опадів, що призводить до критичних пікових навантажень на колектори зливової каналізації.

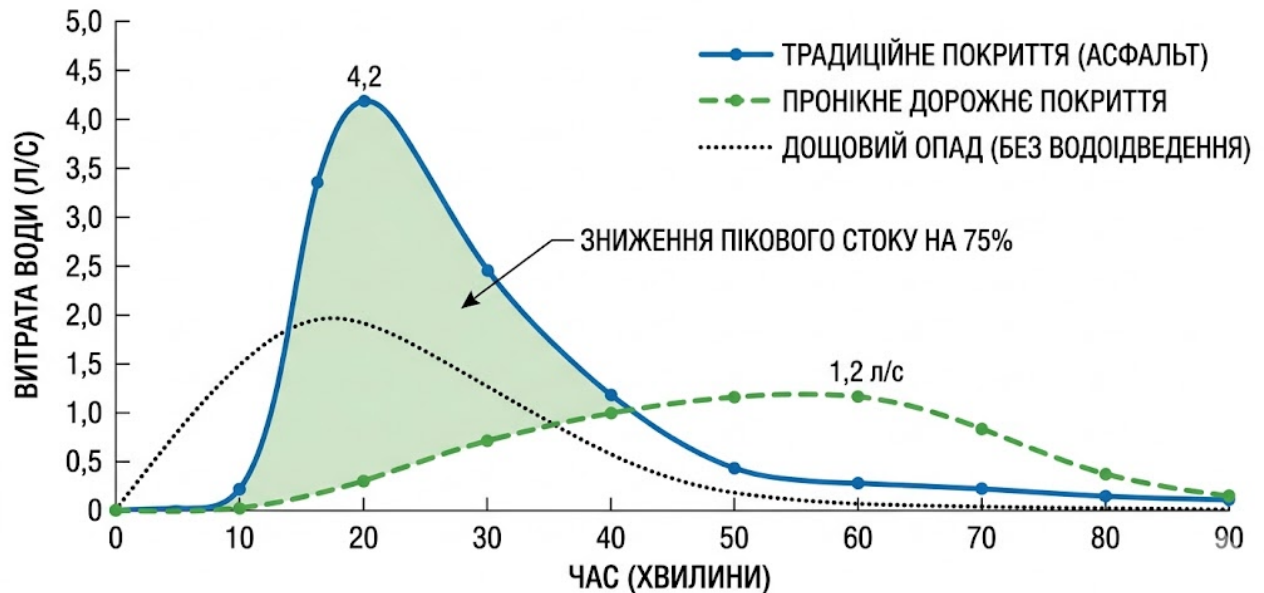


Рис. 2. Порівняльний гідрограф поверхневого стоку традиційного та проникного дорожнього покриття [9]

Натомість, проникне покриття трансформує гідрограф стоку: пікова витрата знижується на 70–85%, а час її настання (lag time) суттєво зміщується. Це пояснюється тим, що вода спочатку поглинається порами верхнього шару, а потім акумулюється в основі, звідки повільно інфільтрується в ґрунт. Такий підхід дозволяє перетворити «вибуховий» стік на керований і розтягнутий у часі процес, що мінімізує ризики підтоплення міських територій та ерозії ґрунтів [5].

Екологічний аспект: очищення стоку та термічне регулювання Проникні покриття (PPS) функціонують не лише як гідравлічні інженерні споруди, а й як інтегровані системи очищення води та регулювання мікроклімату. Згідно з комплексним оглядом [10], екологічний внесок PPS реалізується через два основні механізми: якісну трансформацію стоку та зниження температурного навантаження на урбанізоване середовище.

Процес очищення відбувається шляхом фізичного відфільтровування часток у порах покриття та адсорбції забруднювачів у щелепній основі. Дослідження [11], підтверджують, що PPS здатні ефективно утримувати завислі речовини, важкі метали та нафтопродукти. Зокрема, наявність геотекстильного шару всередині «пирога» сприяє розвитку мікроорганізмів, які забезпечують біодеградацію масел та вуглеводнів, що потрапляють на поверхню від автотранспорту. Окрім хімічних забруднювачів, PPS виступають бар'єром для патогенів, значно знижуючи концентрацію бактерій (наприклад, *E. coli*) у стоках, що особливо важливо для захисту міських екосистем.

Важливою перевагою проникних систем є їхня здатність до охолодження міського повітря. На відміну від традиційного асфальту, який акумулює сонячне тепло, пориста структура PPS сприяє випаровуванню вологи, накопиченої в нижніх шарах. Це дозволяє суттєво знизити температуру поверхні в літній період, що є критичним фактором для сталого розвитку сучасних міст в умовах глобальних кліматичних змін [10].

Оцінка ефективності проникних покриттів у системах управління дощовими стоками Ефективність функціонування проникних покриттів у системах сталого дренажу визначається їх здатністю забезпечувати інфільтрацію дощових вод, зменшення обсягів

поверхневого стоку та покращення якості води. Ключовим параметром є співвідношення між інтенсивністю атмосферних опадів та інфільтраційною здатністю покриття.

Для оцінки працездатності системи доцільно використовувати умову балансу:

$$I \leq K_f$$

де I – інтенсивність дощу, м/с;

K_f – коефіцієнт фільтрації конструкції покриття, м/с.

У випадку, якщо інтенсивність опадів перевищує інфільтраційну здатність системи ($I > K_f$), формується частковий поверхневий стік. Таким чином, ефективність проникного покриття безпосередньо залежить від правильного підбору його конструкції відповідно до кліматичних умов.

Об'єм води, що може бути акумульований у дренажному шарі, визначається за залежністю:

$$V = n \cdot h \cdot A$$

де n – пористість шару (0,30–0,40);

h – товщина дренажного шару, м;

A – площа покриття, м².

Для типової конструкції при $n = 0,35$, $h = 0,30$ м та площі 1000 м², об'єм акумулювання становить:

$$V = 0,35 \cdot 0,30 \cdot 1000 = 105 \text{ м}^3$$

що відповідає затриманню дощової події інтенсивністю 30–40 мм без формування поверхневого стоку, що підтверджує високу ефективність таких систем для умов помірного клімату.

Крім гідравлічних характеристик, важливим є показник очищення дощових вод. За результатами досліджень, проникні покриття забезпечують зниження концентрацій:

- завислих речовин – на 80–95%;
- нафтопродуктів – на 60–90%;
- важких металів – на 40–70%.

Ці показники досягаються за рахунок поєднання процесів механічної фільтрації, сорбції та біологічного розкладу забруднювачів у порах конструкції. Разом з тим, ефективність системи може знижуватись у процесі експлуатації внаслідок замулювання порового простору, що призводить до зменшення коефіцієнта фільтрації на 30–50%. У зв'язку з цим необхідним є врахування фактору деградації при проєктуванні та передбачення заходів технічного обслуговування.

Обґрунтування адаптивного підходу Аналіз ефективності проникних покриттів показує, що їх застосування не може бути універсальним для всіх умов експлуатації. Гідравлічні, конструктивні та екологічні характеристики системи суттєво залежать від типу об'єкта, інтенсивності атмосферних опадів та складу забруднень.

Запропонований адаптивний підхід (рис. 3) передбачає диференційований вибір конструкції проникного покриття залежно від функціонального призначення території. Для зон із низьким транспортним навантаженням доцільним є використання газонних решіток або модульних систем, що забезпечують максимальну інфільтрацію. Для територій із середнім навантаженням ефективними є покриття з еко-плитки, які поєднують міцність та водопроникність. У випадку транспортних магістралей доцільно застосовувати пористий асфальтобетон у поєднанні з посиленими дренажними шарами.

Ключовим елементом адаптації є врахування інтенсивності опадів. При високих значеннях інтенсивності необхідно збільшувати товщину акумулюючого шару або

передбачати додаткові дренажні елементи. Також важливим є врахування типу забруднень, що визначає склад та гранулометрію фільтруючих матеріалів.

Схема обґрунтування адаптивного вибору проникних дорожніх покриттів залежно від умов експлуатації наведена на рисунку 3.

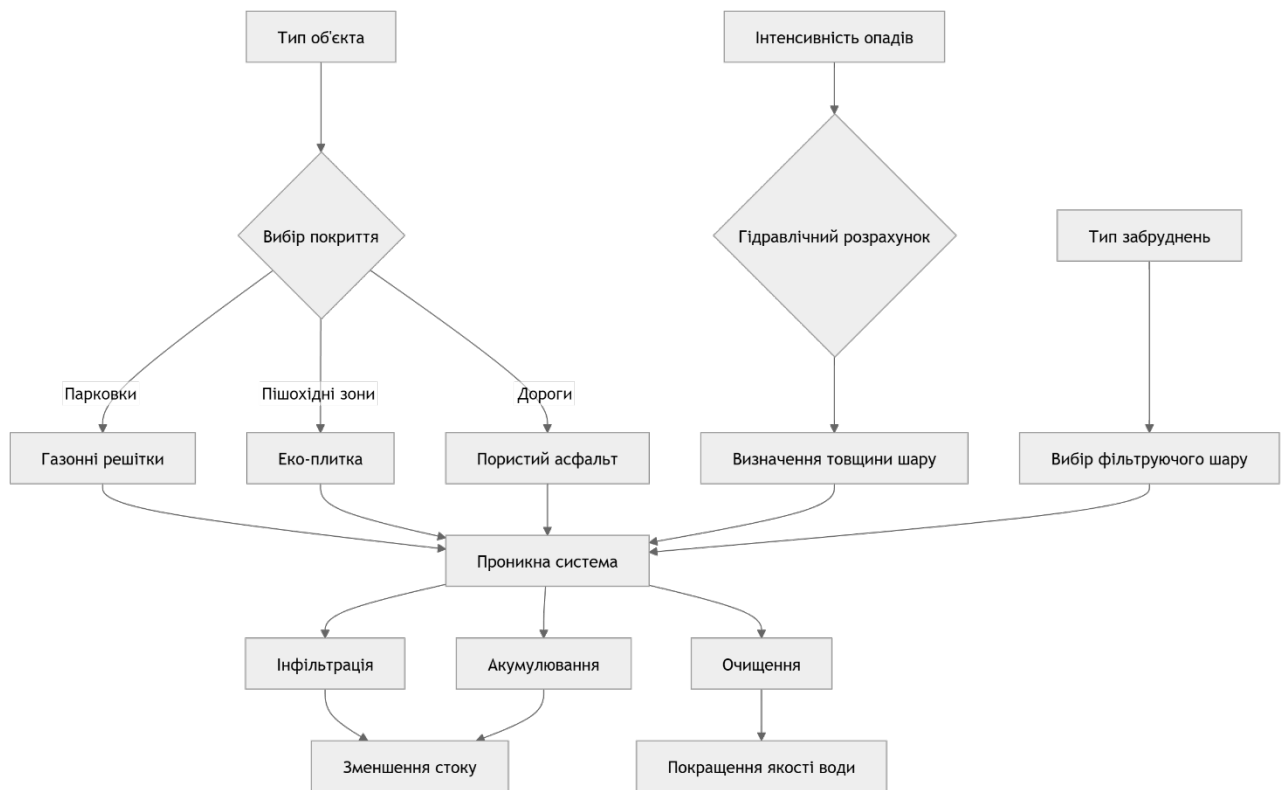


Рис. 3. Схема обґрунтування адаптивного вибору проникних дорожніх покриттів залежно від умов експлуатації

Запропонована схема відображає логіку адаптивного вибору проникних покриттів залежно від типу об'єкта, інтенсивності атмосферних опадів та характеристик забруднень, що дозволяє узгодити конструктивні параметри системи з реальними умовами експлуатації. Її реалізація забезпечує комплексний ефект – зменшення обсягів поверхневого стоку, акумулювання дощових вод та підвищення ефективності їх очищення, що є основою для формування стійких систем водовідведення.

Висновок Таким чином, інтеграція проникних дорожніх покриттів у системи сталого управління дощовими стоками в урбанізованих територіях дозволяє забезпечити оптимальне поєднання гідралічної ефективності, довговічності конструкції та екологічної безпеки міського середовища.

– встановлено, що впровадження проникних дорожніх покриттів як елементу систем сталого управління дощовими стоками забезпечує зниження обсягів поверхневого стоку на 50–90% та суттєве зменшення пікових навантажень на інженерні системи водовідведення в урбанізованих територіях;

– доведено, що багатошарова конструкція проникних дорожніх покриттів у складі систем сталого дренажу забезпечує не лише інфільтрацію, але й ефективне очищення дощових стоків із досягненням ступеня видалення основних забруднювачів до 90%;

– Запропоновано розрахунковий підхід до оцінки ефективності інтеграції проникних дорожніх покриттів у системи управління дощовими стоками, що базується на співвідношенні інтенсивності опадів та фільтраційної здатності конструкції, а також враховує її акумулюючий потенціал.

Використані джерела:

1. Душкін, С. С. (2024). Зелене будівництво та інженерні системи. *Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Green Construction»*. Київ: КНУБА, 455–459.
2. Nejem, J. K., & Akhtar, M. N. (2025). An experimental study of permeable asphalt pavement incorporating recycled concrete coarse aggregates. *Sustainability*, 17(16), 7323. <https://doi.org/10.3390/su17167323>
3. Abousnina, R., Aljuaydi, F., Benabed, B., Almabrok, M. H., & Vimonsatit, V. (2025). A state-of-the-art review on the influence of porosity on the compressive strength of porous concrete for infrastructure applications. *Buildings*, 15(13), 2311. <https://doi.org/10.3390/buildings15132311>
4. Moretti, L., Altobelli, L., Cantisani, G., & Del Serrone, G. (2025). Permeable interlocking concrete pavements: A sustainable solution for urban and industrial water management. *Water*, 17(6), 829. <https://doi.org/10.3390/w17060829>
5. Das, A. J., & Ali, M. (2025). Multiscale evaluation of recycled plastic corrugated panels for sustainable construction. *Buildings*, 15(14), 2423. <https://doi.org/10.3390/buildings15142423>
6. ДБН В.2.3-4:2015. (2015). Автомобільні дороги. Частина I: Проектування. Частина II: Будівництво. Київ: Мінрегіон України. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=62131
7. Al-Rubaei, A. M., Viklander, M., & Blecken, G. T. (2015). Long-term hydraulic performance of stormwater infiltration systems. *Urban Water Journal*, 12(8), 660–671. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.949796>
8. Dooge, J. C. I., & Keane, R. (1975). Mathematical simulation of runoff from small plots of undrained and drained peat at Glenamoy, Ireland. In *Hydrology of marsh-ridden areas: Proceedings of the Minsk Symposium* (pp. 369–374). UNESCO Press. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000015972>
9. Ciriminna, D., Ferreri, G. B., Noto, L. V., & Celauro, C. (2022). Numerical comparison of the hydrological response of different permeable pavements in urban area. *Sustainability*, 14(9), 5704. <https://doi.org/10.3390/su14095704>
10. Franco, E., Ghisi, E., Vaz, I. C. M., & Thives, L. P. (2025). Permeable pavements: An integrative review of technical and environmental contributions to sustainable cities. *Water*, 17(22), 3323. <https://doi.org/10.3390/w17223323>
11. Monrose, J., & Tota-Maharaj, K. (2016). Permeable pavements as low impact development practices for urban runoff mitigation and sustainable stormwater management within the built environment for the Caribbean. In *25th Annual Caribbean Water and Wastewater Association Conference & Exhibition* (pp. 1–15). Trinidad and Tobago.