

УДК 628.394: 504.4.054

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-6>

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЧИННИКІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКОТЕХНОЛОГІЙ

Пономаренко Євгеній Георгійович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри інженерної екології міст

Харківського національного університету імені О. М. Бекетова

ORCID ID: 0000-0001-7731-3919

Коваленко Юрій Леонідович,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,

доцент кафедри інженерної екології міст

Харківського національного університету імені О. М. Бекетова

ORCID ID: 0000-0002-2491-2309

Екотехнології очищення стічних вод є напрямом, що активно розвивається завдяки низьким експлуатаційним витратам і незалежністю від джерел енергії. Останнє робить їх ключовим підходом до очищення зворотних вод, що надходять із дифузних джерел. Особливо це стосується біогенних елементів, таких як азот і фосфор, оскільки їх надходження до природних водних об'єктів призводить до розвитку процесів антропогенного евтрофування. Одним із різновидів екотехнологій, що активно розвиваються останнім часом, є екологічні буфери. Однак, оскільки в основі цих технологій лежать природні процеси, їх ефективність суттєво залежить від зовнішніх чинників, особливо кліматичних. Передусім це стосується температури та опадів. У роботі на основі даних, отриманих дослідниками, проаналізовано залежність ефективності роботи основних компонентів екологічних буферів, таких як трав'яні, кущові та деревинні, від температури та опадів. Визначено, що в умовах Східної України інтенсивність опадів не надає лімітуючого впливу на ефективність очищення, а ключова роль належить температурі. Установлено, що зміни температури протягом вегетаційного періоду можуть призводити до двократного зниження ефективності. Запропоновано використовувати послідовну систему однотипних буферів. Надано рекомендації щодо визначення ключового технологічного параметра – ширини екологічного буферу. Показано, що ширина буферної смуги та кількість послідовних буферів пов'язані між собою. Через ефект насичення зі збільшенням ширини додавання більшої кількості буферів поспіль призводить до зростання сумарної необхідної ширини. Тому під час проектування слід прагнути до мінімізації числа послідовних буферів, забезпечуючи при цьому достатню ширину кожного буфера в межах ефективного діапазону.

Ключові слова: екотехнології, екологічний буфер, поверхневий стік, кліматичні чинники, ефективність очищення.

Ponomarenko Ievgenii, Kovalenko Yurii. Influence of climatic factors on the efficiency of surface runoff treatment using ecotechnologies

Ecotechnologies of wastewater treatment are an actively developing area due to low operating costs and independence from energy sources. The last ones make them a key approach for treatment water coming from diffuse sources. This is especially true for biogenic elements such as nitrogen and phosphorus, because their supply to natural water bodies leads to the increasing of anthropogenic eutrophication processes. One of the types of ecotechnologies that have been actively developing recently is ecological buffers. However, because these technologies are based on natural processes, their effectiveness significantly depends on external factors, especially climatic ones. First of all, this applies to temperature and precipitation. Based on the data obtained by the researchers, the paper analyzes the dependence of the efficiency of the main components of environmental buffers, such as grass, bush and wood, on temperature and precipitation. It is determined that in the conditions of Eastern Ukraine, the intensity of precipitation does not have a limiting effect on the efficiency of water treatment, and the key role belongs to temperature. It was found that temperature changes during the growing season can lead to a twofold decrease in efficiency. It is proposed to use a serial system of the same type of buffers. Recommendations are given for determining the width of the ecological buffer. It is shown that the design should strive to minimize the number of consecutive buffers, while ensuring sufficient width of each buffer within the effective range.

Keywords: ecotechnologies, ecological buffer, runoff, climatic factors, treatment efficiency.

Вступ. Поверхневий стік є одним з основних джерел забруднення поверхневих водних об'єктів. На відміну від міського поверхневого

стоку, вплив якого на якість води може бути знижений шляхом перехоплення системами зливової каналізації з подальшим очищенням

на міських очисних спорудах, стік із сільсько-господарських територій являє собою дифузне джерело надходження домішок, яке важко регулювати. Серед цих домішок переважають завислі речовини, пестициди, азотовмісні сполуки, фосфати, нафтопродукти та важкі метали. Надходження із сільськогосподарським стоком мінеральних форм азоту і фосфору є однією з провідних причин розвитку процесів антропогенного евтрофування водних екосистем. Одним із напрямів зниження впливу дифузного стоку, що нині активно розвивається, є використання захисних екологічних буферів. Це одна з найбільш природоорієнтованих практик управління якістю води в агроландшафтах.

Екологічний буфер – це комплекс смуг рослинності різного типу (дерева, чагарники, трава), що перешкоджають прямому потраплянню поверхневого стоку до водного об'єкта по рельєфу місцевості та водночас його очищують. Кожне з рослинних угруповань виконує специфічні функції щодо зміни кількості та якості поверхневого стоку.

Існуючі підходи до визначення технологічних параметрів екологічних буферів (тип буфера, його розміри) базуються, передусім, на характеристиках забруднень і геолого-географічних умовах місцевості. Окрім кліматичних параметрів, зазвичай ураховують лише кількість опадів, причому розглядають її лише з погляду впливу на обсяг поверхневого стоку. Водночас недостатньо вивчено вплив кліматичних чинників, насамперед температури та кількості опадів, на інтенсивність процесів вилучення забруднень компонентами екологічних буферів.

Оцінка впливу кліматичних чинників на технологічні параметри екологічних буферів є метою цієї роботи.

Методи та методика дослідження. Методи дослідження базуються на комплексному аналізі даних, отриманих дослідниками під час проектування і використання екологічних буферів. Серед кліматичних чинників, що впливають на інтенсивність очищення поверхневого стоку біоценозами екологічних буферів, найбільш суттєвими є температура повітря та кількість опадів. Розглянемо їхній вплив на прикладі вилучення фосфору – одного з типових компонентів поверхневого стоку, який зазвичай є лімітуючим елементом і визначає інтенсивність евтрофування водних об'єктів [5; 8].

Вплив *температури* на ефективність видалення фосфору рослинними (трав'яними, лісовими) і болотними буферами здійснюється через декілька механізмів:

– **біологічну активність.** Цей чинник є головним. У теплу пору року (весна – літо) активність рослинності зростає, що підвищує засвоєння фосфору. Водночас прискорення мінералізації органічної речовини за температур понад 30 °C може призводити до вивільнення фосфору, спричиняючи зворотний ефект очищення;

– **гідрологічні умови.** Температура опосередковано впливає на формування поверхневого стоку через інтенсифікацію випаровування води та поглинання її ґрунтом;

– **хімічні процеси.** За високої температури прискорюється десорбція фосфатів із ґрунту, особливо в анаеробних умовах.

Найбільша ефективність очищення досягається за температур ~25–35 °C, з оптимумом близько 30 °C. Вихід за межі цього інтервалу призводить до різкого зниження ефективності через біохімічні обмеження (анаеробні умови, інгібування мікробної активності).

Дану залежність можна описати рівнянням:

$$E(T) = E_{\max} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T - T_0}{S_T} \right)^2}, \quad (1)$$

де E – ефективність видалення фосфору;

T – температура, °C;

T_0 – температура, за якої ефективність максимальна, °C;

$E_{\max}$ – максимальна ефективність;

S_T – параметр, °C.

Для умов Харківської області, наприклад, можна прийняти $T_0 = 26$ °C, $S_T = 17$, а $E_{\max}$ дорівнює 0,65 для трав'яного буфера, 0,75 – для кущового, 0,85 – для деревинного. Такі величини вибрано на основі середньої температури вегетаційного періоду 25–26 °C, температурного оптимуму для мікробної активності (28 °C), а також припущення, що для умов Лівобережної України температурне «вікно» є вужчим порівняно з європейськими [7].

Вплив опадів має більш комплексний характер, аніж вплив температури. Він залежить від інтенсивності, тривалості, сезону та типу буфера і проявляється як у покращенні, так і в погіршенні ефективності [3; 9]. Основні механізми впливу опадів включають **об'єм стоку, ерозію ґрунту, вологість, сезонність**.

Загалом помірні та рівномірні опади підтримують ефективну роботу буфера (забезпечуючи необхідну вологість і біоактивність), тоді як надмірні (зливові) чи різко сезонні надходження води перевантажують буфери і знижують ефективність очищення. Залежність ефективності очищення від інтенсивності опадів за своєю формою аналогічна до (2) (гауссова крива):

$$E(R) = E_{\max} e^{-\left(\frac{R-R_0}{S_R}\right)^2}, \quad (2)$$

де E – ефективність видалення фосфору;
 R – інтенсивність опадів, мм/доба;
 R_0 – інтенсивність опадів, за якої ефективність максимальна, мм/доба;
 $E_{\max}$ – максимальна ефективність;
 S_R – параметр, мм/доба.

Параметри моделі (2), визначені на основі даних польових досліджень [1; 2; 4], наведено в табл. 1.

Залежність ефективності очищення від інтенсивності опадів для буферів різного типу показує, що найбільш ефективне очищення відбувається за температур 25–30 °C та інтенсивності опадів близько 40–90 мм/місяць.

Таблиця 1

Тип буфера	$E_{\max}$	R_0	S_R
Трав'яний	65	55	48
Кущовий	75	65	64
Деревний	85	75	94

Результати. Аналіз середніх кліматичних даних по Харківській області за останні 10 років

(табл. 2) показує, що кількість опадів не має суттєвого впливу на ефективність очищення, оскільки протягом основного вегетаційного періоду (квітень–вересень) інтенсивність опадів перебуває в ефективному діапазоні.

На відміну від цього температурні показники повністю виходять за межі оптимального діапазону (рис. 1). На графіку штрихуванням виділено область оптимальних кліматичних параметрів.

Таким чином, для умов Східної України необхідно вносити відповідні коригування до проектних параметрів буферів. Згідно з табл. 2, найбільш несприятливі температурні умови в період вегетації припадають на квітень (середня температура – ~9 °C). Відповідно до рис. 2, ефективність очищення при цьому зменшується приблизно у 2,5 рази порівняно з оптимальними умовами. Основним технологічним параметром буфера, від якого залежить його ефективність, є ширина буферної смуги, тому логічним виглядає припущення про необхідність збільшення ширини. Однак численні польові дослідження показують, що залежність ефективності буфера від його ширини має суттєво нелінійний характер.

Таблиця 2

Середньомісячні показники температури та опадів для Харківської області

Місяць	Середня температура, °C	Середні опади, мм	Місяць	Середня температура, °C	Середні опади, мм
Січень	-4,5	35	Липень	20,5	67
Лютий	-3,0	30	Серпень	19,5	45
Березень	2,0	27	Вересень	14,0	45
Квітень	9,0	36	Жовтень	7,0	39
Травень	15,0	53	Листопад	1,0	41
Червень	19,0	59	Грудень	-2,5	3

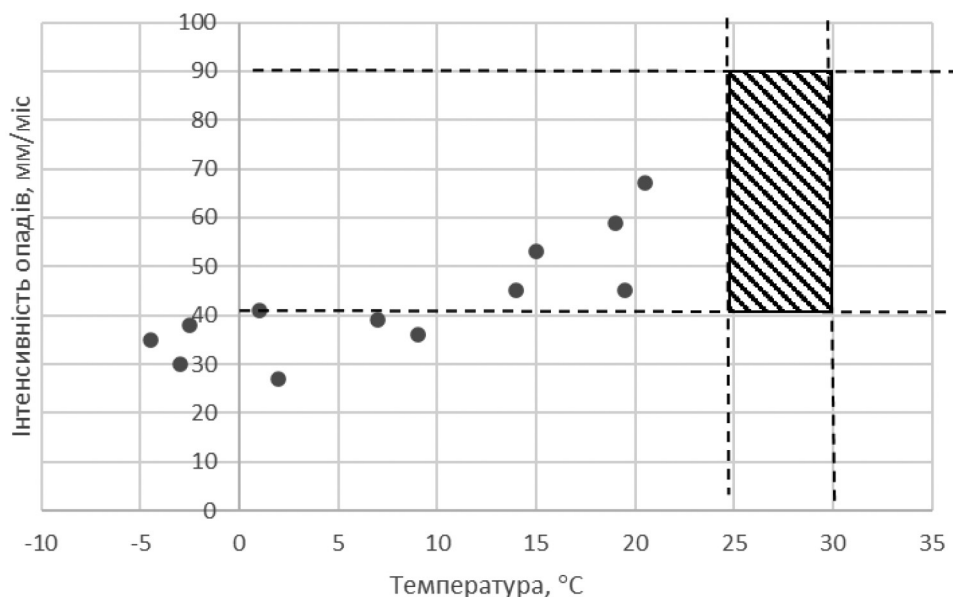


Рис. 1. Середньомісячні дані температури та опадів для Харківської області

Як показано у [6], відносно невеликої ширини буфера (до ~25 м) залежність ефективності від ширини носить експоненційний характер, але за подальшого збільшення ширини буфера ефективність може навіть знижуватися (рис. 2).

У таких умовах залежність ефективності вилучення фосфору від ширини буфера набуває характеру кривої з оптимумом:

$$E(W) = E_{\max} e^{-\left(\frac{W-W_0}{S_w}\right)^2}. \quad (3)$$

Для трав'яного буфера $E_{\max} = 0,65$, $W_0 = 30^\circ\text{C}$, $S_w = 18$.

Отже, зниження ефективності буфера через температурний чинник неможливо компенсувати лише збільшенням ширини буферної смуги. У такому разі необхідно застосовувати систему послідовно розташованих буферів одного чи різних типів.

Розглянемо випадок використання декількох послідовних буферів одного типу. Як показано на рис. 4, найбільш ефективне збільшення вилучення фосфору за рахунок ширини спостерігається на лінійній ділянці кривої за ширини 5–25 м. Розглянемо ситуацію, коли всі буфери мають однакову ширину W_T . Позначимо максимальну ефективність за ширини 25 м в оптимальних температурних умовах як E_{opt} . Тоді:

$$P_{\text{out}} = (1 - E_{\text{opt}}) \cdot P_{\text{in}}, \quad (4)$$

де P_{in} і P_{out} – величини концентрації фосфору на вході і виході буферу відповідно, г/м³.

За температурних умов, гірших за оптимальні, ефективність окремого буфера буде $E_T < E_{\text{opt}}$. Для досягнення такого самого сумарного ефекту очищення може знадобитися використання декількох послідовних буферів. У цьому разі:

$$P_{\text{out}} = (1 - E_T)^N \cdot P_{\text{in}}, \quad (5)$$

де N – кількість буферів.

Оскільки ми розглядаємо лінійний діапазон зміни ефективності від ширини буфера, можна записати:

$$E_T = k_T(T) \cdot (a \cdot W_T + b), \quad (6)$$

де a і b – параметри, що залежать від типу буфера;

$k_T(T)$ – коефіцієнт, що залежить від температури.

Тоді з урахуванням (1, 5, 6) отримаємо:

$$W_T = \frac{1 - \sqrt{(1 - E_{\text{opt}})}}{k_T \cdot a} - \frac{b}{a}. \quad (7)$$

Як видно з рис. 3, залежність ширини кожного буфера від кількості послідовних буферів є суттєво нелінійною.

Із практичного погляду цікавим є варіант, коли сумарна ширина буферів найменша. Для цього можна розглянути залежність сумарної ширини $\sum W_T = W_T \cdot N$ від кількості буферів N . Як видно (рис. 3), зі збільшенням N сумарна необхідна ширина буферів зростає. Тому під час проектування конфігурації буферної системи слід виходити з мінімально можливого числа послідовних буферів, достатнього для забезпечення потрібної ефективності, тобто ширини кожного буфера в межах 5–25 м відповідно до (7).

Висновки. Установлено, що кліматичні чинники, передусім температура, суттєво впливають на ефективність очищення поверхневого стоку екологічними буферами. Вплив опадів має комплексний характер: помірні опади сприяють очищенню, а надмірні (зливи, талі води) знижують ефективність. У кліматичних умовах Східної України кількість опадів протягом вегетаційного

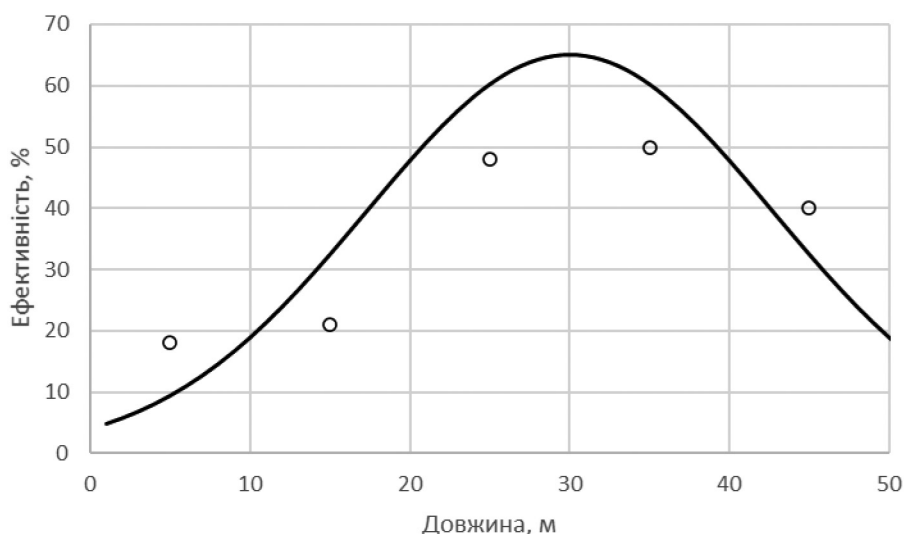


Рис. 2. Залежність ефективності очищення від ширини для трав'яного буфера

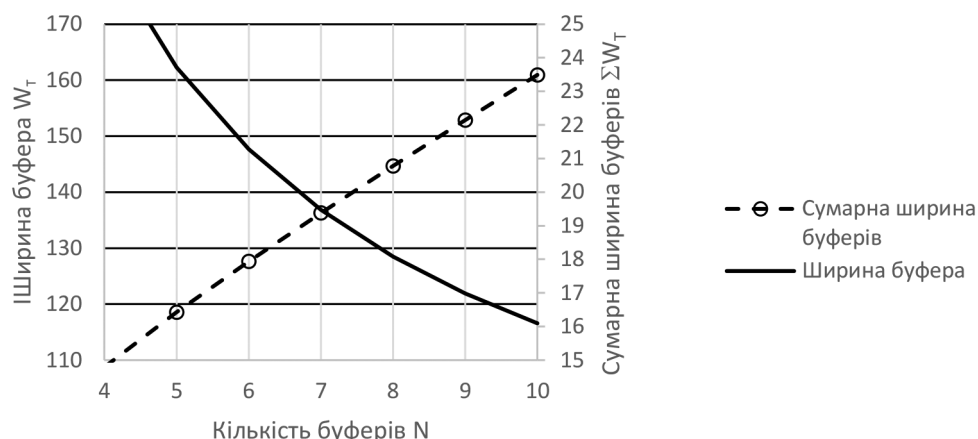


Рис. 3. Залежність ширини буфера і сумарної ширини буферів від кількості

сезону переважно перебуває в оптимальному діапазоні, тоді як температура часто виходить за межі оптимуму; зниження температури може призводити до більше ніж двократного падіння ефективності очищення. У такому разі доцільно застосовувати послідовну систему буферів для компенсації втрати ефективності. Показано, що ширина буферної смуги та кількість послідовних

буферів пов'язані між собою. Через ефект насичення зі збільшенням ширини додавання більшої кількості буферів поспіль призводить до зростання сумарної необхідної ширини. Тому під час проектування слід прагнути до мінімізації числа послідовних буферів, забезпечуючи при цьому достатню ширину кожного буфера в межах ефективного діапазону (5–15 м).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Abu-Zreig M., Rudra R. P., Whiteley H. R., Lalonde M. N., Kaushik N. K. Phosphorus removal in vegetated filter strips. *J. Environ. Qual.* 2003. 32. 613–619. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2003.6130>
2. Zak Dominik, Kronvang Brian, Carstensen Mette V. Nitrogen and Phosphorus Removal from Agricultural Runoff in Integrated Buffer Zones. *Environ. Sci. Technol.* 2018. 52. 11. 6508–6517.
3. Liu X. et al. Performance of riparian buffers under variable rainfall conditions. *Journal of Environmental Management.* 2019. 243. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.985870>
4. Mathieu Nsenga kumwimba, Salma Akter et al. Nutrient and sediment retention by riparian vegetated buffer strips: Impacts of buffer length, vegetation type, and season. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2024. 369. 109050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109050>
5. Mayer P.M., Reynolds S.K., McCutchen M.D., Canfield T.J. Meta-analysis of nitrogen removal in riparian buffers. *Journal of Environmental Quality.* 2007. 36(4). 1172–1180. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0462>
6. Miao K., Dai W., Xie Z., Li C., Ye C. Effect of Grass Buffer Strips on Nitrogen and Phosphorus Removal from Paddy Runoff and Its Optimum Widths. *Agronomy.* 2023. 13(12). 2980. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13122980>
7. Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment.* 2007. 380(1–3). 48–65.
8. Zabronsky H. M. et al. Efficacy of Riparian Buffers in Phosphorus Removal: A Meta-Analysis. *Frontiers in Water.* 2022. 4. 882560. DOI: [10.3389/frwa.2022.882560](https://doi.org/10.3389/frwa.2022.882560)
9. Zhang X., et al. Buffer effectiveness in reducing phosphorus loss: A review. *Environmental Management.* 2010. 46. 19–31.

REFERENCES:

1. Abu-Zreig, M., Rudra, R. P., Whiteley, H. R., Lalonde, M. N., & Kaushik, N. K. (2003). Phosphorus removal in vegetated filter strips. *J. Environ. Qual.*, 32, 613–619. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2003.6130>
2. Zak Dominik, Kronvang Brian, Carstensen Mette V. (2018). Nitrogen and Phosphorus Removal from Agricultural Runoff in Integrated Buffer Zones. *Environ. Sci. Technol.*, 52, 11, 6508–6517.
3. Liu, X. et al. Performance of riparian buffers under variable rainfall conditions. (2019). *Journal of Environmental Management.*, 243, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.985870>
4. Mathieu Nsenga kumwimba, Salma Akter et al. (2024). Nutrient and sediment retention by riparian vegetated buffer strips: Impacts of buffer length, vegetation type, and season. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 369, 109050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109050>

5. Mayer, P. M., Reynolds, S. K., McCutchen, M. D., & Canfield, T.J. (2007). Meta-analysis of nitrogen removal in riparian buffers. *Journal of Environmental Quality*, 36(4), 1172–1180. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0462>
6. Miao, K., Dai, W., Xie, Z., Li, C., & Ye, C. (2023) Effect of Grass Buffer Strips on Nitrogen and Phosphorus Removal from Paddy Runoff and Its Optimum Widths. *Agronomy*, 13(12), 2980. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13122980>
7. Vymazal, J. (2007) Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1–3), 48–65.
8. Zabronsky H. M. et al. (2022) Efficacy of Riparian Buffers in Phosphorus Removal: A Meta-Analysis. *Frontiers in Water*, 4, 882560. DOI: <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.882560>
9. Zhang, X., et al. (2010) Buffer effectiveness in reducing phosphorus loss: A review. *Environmental Management*, 46, 19–31.