

ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УДК 628.36

О.Я. ОЛІЙНИК, О.А. КОЛПАКОВА

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ З ДОСЛІДАМИ ПРИ ОЧИСТЦІ СТІЧНИХ ВОД НА КРАПЛИННИХ БІОФІЛЬТРАХ

***Анотація.** Наведені результати порівняльного співставлення запропонованих теоретичних розрахунків з дослідними даними, одержаними різними авторами при біологічній очистці стічних вод від органічних забруднень на краплинних біофільтрах з різним завантаженням. Результати теоретичних розрахунків в цілому добре узгоджуються з дослідними даними.*

***Ключові слова:** біологічна очистка, стічні води, краплинний біофільтр, концентрація органічних забруднень, завантаження.*

Останнім часом для забезпечення сучасних нормативних вимог необхідно проведення більш глибокої біологічної очистки стічних вод. Як показали існуючі дослідження, в цьому випадку найбільш ефективно вилучення органічних і інших забруднень відбувається на біофільтрах різних конструкцій за рахунок утворення високої концентрації біомаси в об'ємі біофільтра [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Ця біомаса утворюється на завантаженні у вигляді біоплівки і має значну концентрацію мікроорганізмів [1, 7, 8].

При цьому на практиці біологічної очистки стічних вод порівняно широкі розповсюдження одержали краплинні біофільтри, в яких, на відміну від затоплених фільтрів, стічна вода в ненасиченому середовищі стікає по поверхні завантаження із закріпленою біоплівкою, і таким чином в цьому випадку не потрібне влаштування додаткових систем (пристроїв) для забезпечення процесу очистки киснем. В якості завантаження приймаються різні пластини із полімерних матеріалів або частинок породи різних розмірів [2, 3, 4, 9, 10]. Приклади промислового використання краплинних фільтрів для очистки стічних вод наведені зокрема в роботах [1, 3, 11, 12]. Враховуючи недоліки існуючих досліджень, в роботі [13] сформульована і запропонована більш загальна і досконала математична модель вилучення органічних забруднень на краплинних фільтрах в умовах достатнього забезпечення аеробного процесу

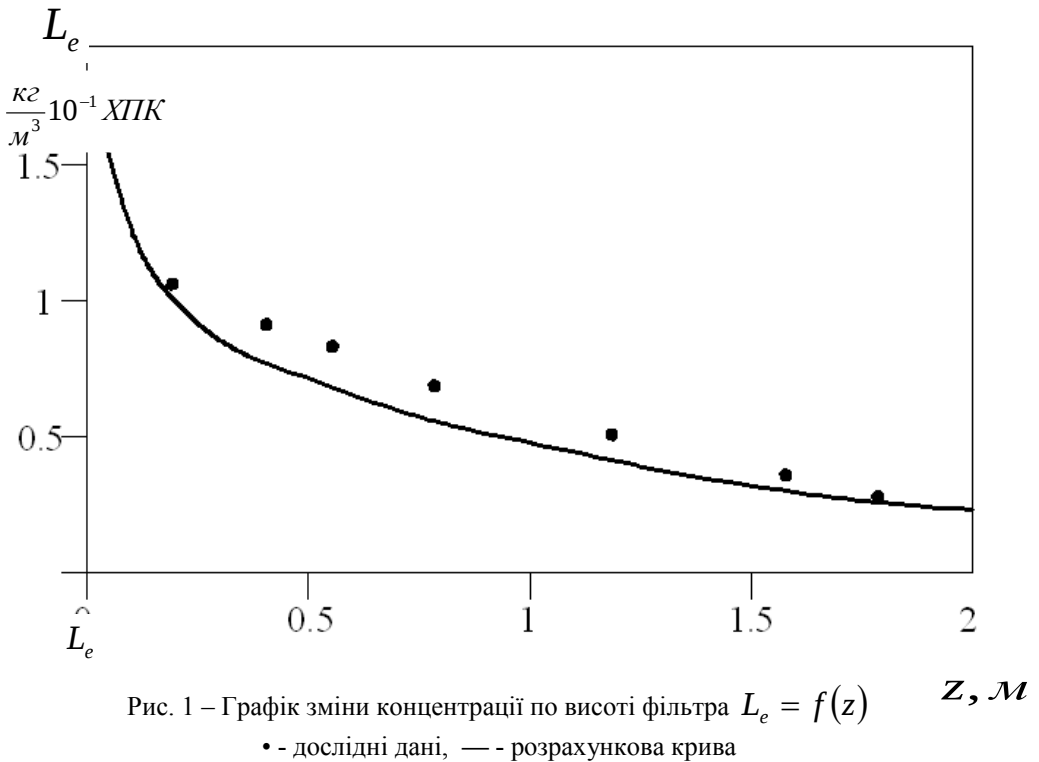
очистки киснем. На основі реалізації цієї моделі запропоновані інженерні методи розрахунку технологічних і конструктивних параметрів очистки на краплинних фільтрах [14, 15]. Запропоновані залежності для визначення зміни концентрацій забруднень по товщині біоплівки і по висоті біофільтра при різних можливих швидкостях (кінетик) реакцій вилучення органічних забруднень. Запропоновані також критерії і рекомендації, які дозволяють визначити доцільну і оптимальну активну товщину біоплівки, в межах якої відбувається майже повне вилучення поступаючих до неї забруднень. В роботі [15] для виконання розрахунків наведені необхідні рекомендації щодо вибору параметрів і коефіцієнтів, що входять в рівняння і залежності.

Нижче наведені деякі результати проведеної верифікації і порівняльного аналізу запропонованих моделей і методів розрахунку з використанням експериментальних досліджень різних спеціалістів. Як зазначалось вище, важливим параметром при виконанні розрахунків є встановлення розрахункової товщини біоплівки. Нагадаємо, що біоплівка в цілому має складну гетерогенну структуру, вивченню якої, а також основних характеристик, процесів, що відбуваються в біоплівці, і т.п. присвячено багато робіт, зокрема [2, 7, 15, 16, 17, 18, 19]. В даному випадку розрахункова товщина біоплівки являє собою її активну товщину, яка складається із гетеротрофних мікроорганізмів, і формування її складових параметрів в значній мірі залежить від навантаження і гідравлічних умов у біофільтрах із закріпленим біоценозом. В роботах [2, 15] на підставі реалізації загальних рівнянь з визначення формування товщини біоплівки наведені конкретні залежності для визначення її активної частини з врахуванням процесів зростання біоплівки, розпаду біоплівки і швидкості відриву з її поверхні. При цьому зазначимо, що у біофільтрах із закріпленим біоценозом товщина біоплівки фільтра буде зменшуватись у зв'язку зі зменшенням концентрації забруднень, які вилучаються, а також із збільшенням питомої поверхні матеріалу завантаження. Запропоновані моделі і методи розрахунку в принципі дозволяють врахувати цю обставину. Проведений порівняльний аналіз теоретичних розрахунків з дослідними даними свідчить про те, що запропоновані моделі і розроблені методи розрахунку на основі прийнятих середньозважених постійних значень товщини біоплівки δ достатньо надійно і адекватно описують і відображають процеси очистки в цих випадках [1, 2, 7, 17, 18, 20]. Так, наприклад, в роботі [20] наведені широкі дослідження по вилученню органічних речовин на фільтрах із закріпленим біоценозом. При цьому порівняльними дослідженнями встановлено, що добре узгодження дослідних даних з розрахунковими одержимо при товщині біоплівки $\delta \approx 100$ мкм. Для цього випадку розрахунками встановлено, що осереднена товщина біоплівки складає $\delta = 117$ мкм.

Досить ґрунтовне лабораторне дослідження по вилученню органічних забруднень в очисному біофільтрі в умовах достатнього забезпечення аеробного процесу киснем проведено в роботі [21]. Побудований реактор (біофільтр) з полівінілхлориду висотою 2 м діаметром 0,2 м. Побутові стічні води подавались знизу в центральну частину колони, повітря надходило через отвори в основі колони. В якості завантаження використовували елементи відпрацьованого поліпропілену діаметром 2,3–2,7 мм, довжиною 4–6 мм, питомою площею поверхні завантаження складала $1160 \text{ м}^2/\text{м}^3$, пористість – 0,42.

Побутові стічні води подавались знизу вверх. Витрата потоку становила – 0,2 л/хв., відношення повітря/рідина складало 10:1. Реактор працював в стабільному режимі, для видалення надлишкової біомаси промивка відбувалась кожен день. Температура стічної води підтримувалась 16,5–17,5 °С підігрівачем та ізоляцією реактора. Відбір проб виконували кожного ранку, за якими визначалось значення концентрації забруднень в одиницях ХПК та БПК очищення, яка складала від 75% до 90%. В період проведення експерименту умови вхідного потоку практично не змінювались. Значення концентрації розчиненого кисню змінювались від 5,2 до 8,6 мг/л, дослідження показали, що зазначені коливання не являються лімітуючим фактором. Для побудови профілю в реакторі, проби відбирали через постійний інтервал з вхідної труби, по довжині потоку та з вихідної труби. Дослідження проведені для різних вхідних концентрацій ХПК, які змінювались в межах $L_0 = 80 - 200$ мг/л (0,08 – 0,2) кг/м³. Більш детально методики проведення дослідів і їх обробки описані в роботі [21].

Для проведення порівняльного аналізу результатів теоретичних розрахунків з дослідними даними була використана методика розрахунку, яка наведена в роботі [15]. Згідно з цією методикою з використанням наведених і прийнятих вихідних даних було проведено визначення проміжних параметрів (параметри A , A^*), а потім використовуючи запропоновані в роботі [15] залежності для визначення зміни концентрації по висоті біофільтра з врахуванням обґрунтованих швидкостей реакції в біоплівці для даного випадку. На рис. 1 наведено порівняльний графік при вхідній концентрації $L_0 = 0,160$ кг·ХПК/м³.



Додатково відзначимо, що при виконанні розрахунків для побудови теоретичної кривої $L_e = f(z)$, зокрема згідно з роботою [15], було прийнято в дослідженнях значення витрати $Q = 0,024 \text{ м}^3/\text{год}$, питома площа поверхні завантаження $F_{\delta n} = 1160 \text{ м}^2/\text{м}^3$, а також у зв'язку з відносно значною площею поверхні $F_{\delta n}$, згідно з роботою [18], товщина біоплівки прийнята $\delta = 25\text{--}30 \text{ мкм}$. Інші необхідні вихідні дані прийняті на основі рекомендацій, наведених у відомих літературних джерелах. При цьому згідно з роботою [21] концентрація L_{en} замірялась в одиницях ХПК і БПК, а відношення БПК/ХПК в дослідях складало 0,45 для вхідного потоку і 0,20 – для вихідного потоку (у фільтраті). Із графіка рис. 1 розрахункові концентрації розташувались дещо нижче дослідних, але в цьому спостерігалось відносно добре узгодження між ними.

В літературі, зокрема [3, 4, 5, 6, 22], на підставі аналізу існуючих результатів досліджень запропоновано ряд емпіричних залежностей для розрахунку параметрів очистки стічних вод на біофільтрах. Основою цих досліджень є відома функціональна залежність концентрації стічної води на виході L_{es} (БПК₅) в залежності від ряду факторів, яка з деякими змінами в залежності від типу завантаження і інших чинників використовувалась різними спеціалістами очистки.

Так, в роботі [3] на основі обробки лабораторних і напівпромислових досліджень, з використанням також даних експлуатації виробничих споруд біофільтрів з площинним завантаженням запропоновані розрахунковий графік (рис. 2) і залежності для розрахунку концентрації в очищеній стічній воді (фільтраті) в одиницях БПК. Для визначення робочої висоти фільтра S при відомих заданих концентраціях L_{es} і інших параметрів також запропонована низка залежностей. У графік на рис. 2 і в запропоновані залежності входить узагальнений параметр η , який визначається за формулою

$$\eta = P \cdot S \cdot K_T / F, \quad (1)$$

де P – пористість завантажувального матеріалу, %; S – висота біофільтра, м; K_T – температурна константа; F – маса органічних забруднень по БПК₅, що надходять за добу на одиницю площі поверхні завантажувального матеріалу біофільтра, г/(м²·доб), яка визначається за формулою

$$F = \frac{L_0 q}{F_{\delta n}} = \frac{G}{F_{\delta n}} \quad (2)$$

де L_0 – вхідна концентрація забруднень в БПК, г/м³; q – об'ємне навантаження, м³/м³·доб; $F_{\delta n}$ – питома площа поверхні матеріалу завантаження, м²/м³; G – завантаження по гБПК/(м³·доб). Запропонованими залежностями рекомендується користуватись при $P = 93\text{--}96\%$, $F_{\delta n} = 90\text{--}110 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $L_0 = 200\text{--}250 \text{ мг/л}$.

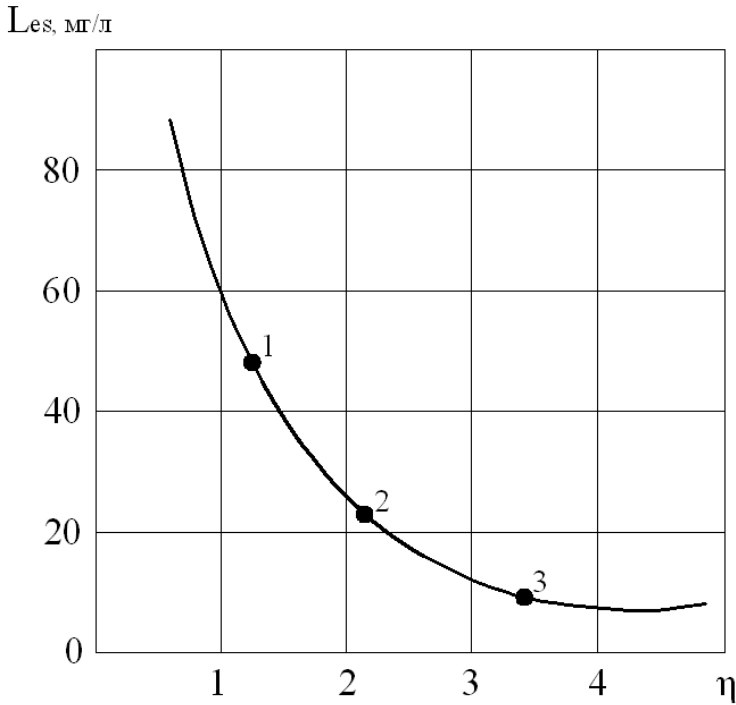


Рис. 2 – Залежність $L_{es} = f(\eta)$

Для визначення концентрації на виході з врахуванням рекомендацій [3] використаємо запропоновану нами розрахункову формулу [15]

$$L_{es} = L_0(1 - \lambda w_L \delta S) = L_0(1 - N), \quad (3)$$

де $\lambda = \frac{F_\delta}{QL_0} = \frac{F_{\delta n}}{q_{\phi 2} S}$, $q_{\phi 2} = \frac{Q}{V_\phi} L_0$ – об'ємне завантаження по органічному забрудненню, гБПК/(м³·доб); F_δ – площа поверхні біоплівки на одиницю висоти фільтра, м; V_ϕ – об'єм біофільтра, м³; Q – витрата, яка поступає безпосередньо на біофільтр з можливим врахуванням при необхідності рециркуляції, м³/доб; S – висота біофільтра, м. Згідно з [1] для полімерного завантаження приймається $F_{\delta n} = 100\text{--}200 \text{ м}^2/\text{м}^3$ і $q_{\phi 2} = (400\text{--}800) \text{ гБПК}/(\text{м}^3 \cdot \text{доб})$.

Одержані результати розрахунків по формулі (3) будуть повністю співпадати з дослідними даними, якщо прийняти на графіку рис. 2, побудованому в координатах $L_{es} = f(\eta)$, значення параметра N в точках 1 – $N = 0,5$, 2 – $N = 0,75$, 3 – $N = 0,9$.

В роботі [5] наведені результати чисельних лабораторних і напіввиробничих досліджень очистки міських і промислових стічних вод на біофільтрах з блоковим завантаженням із піноскла. При обробці результатів дослідів і побудові на їх основі розрахункових залежностей в основному були використані параметри, які з деяким доповненням запропоновані і враховані в попередній роботі [3]. Використовуючи дослідні дані, які наведені в роботі [5], на рис. 3 наведено порівняльний графік, побудований в координатах $L_{es} = f(B)$

результатів теоретичних розрахунків з дослідними даними. Як видно із рис. 3, результати розрахунків добре узгоджуються з дослідними даними. Розрахунки виконувались по залежності (5), при обчисленні параметра B використовувались вихідні дані, які наведені в роботі [5], а також в літературних джерелах.

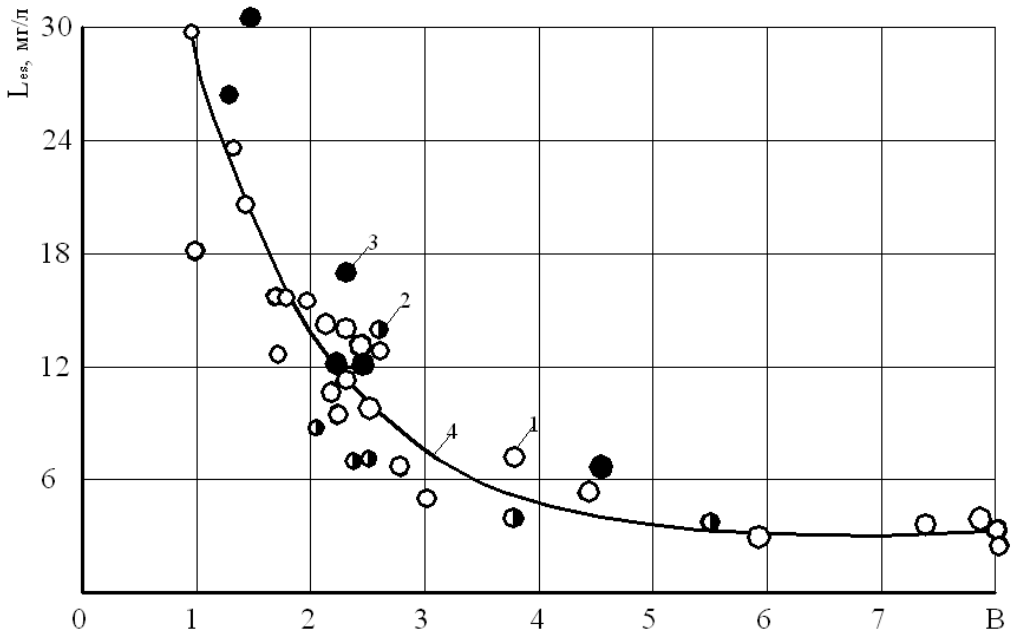


Рис. 3 – Графік залежності $L_{es} = f(B)$ 1 – лабораторні дослідження; 2 – промислові дослідження, проведені в осінніх умовах; 3 – те ж в зимових умовах; 4 – теоретична крива

Для проведення порівняльного аналізу використаємо також результати експериментальних досліджень, одержаних і наведених в роботах [23, 24]. Так, в роботі [23] проведені експериментальні дослідження на напіввиробничих установках з метою визначення оптимального виду завантажувального матеріалу. Установки виконані із сталевих труб з внутрішнім діаметром 0,8 м, висота шару завантажувального матеріалу – 3,8 м, а загальний об'єм завантаження – $1,9 \text{ м}^3$.

Експериментальні дослідження біофільтрів проводились із завантаженням двох типів. Завантаження першого типу виконано у виді окремих секцій з полівінілхлориду товщиною 2 мм. Питома площа поверхні завантаження складала $105 \text{ м}^2/\text{м}^3$, пористість 90%, об'ємна вага $110 \text{ кг}/\text{м}^3$. Завантаження другого типу – гофровані листи $500 \times 500 \text{ мм}$, з висотою гофри 60 мм, питома площа поверхні складала $80 \text{ м}^2/\text{м}^3$, пористість 96%, об'ємна вага $40 \text{ кг}/\text{м}^3$. Повітря надходило знизу-вверх природним шляхом, стічна вода розподілялась по поверхні завантаження зверху-вниз за допомогою реактивного зрошувача. Більш детальна інформація щодо цих досліджень наведена в роботі [23].

Враховуючи можливий тип реакції вилучення забруднень в біоплівці, розрахунками одержані такі значення концентрації L_{es} у фільтраті: в 1-му випадку $L_{es} = 10,5 \text{ мг}/\text{л}$ БПК₅, $L_{es} = 16,6 \text{ мг}/\text{л}$ БПК₅; в другому випадку

$L_{es} = 11,6$ мг/л БПК₅, $L_{es} = 20$ мг/л БПК₅. Результати наведених досліджень були використані при проектуванні і побудові очисних споруд, до складу яких входять біофільтри, завантажені азбестоцементними та поліетиленовими листами [23].

В результаті проведених досліджень були одержані такі осереднені дані очистки від органічних забруднень, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати досліджень, одержані в роботі [23]

Показники	Розмірність	1-й випадок		2-й випадок	
		L_0	L_{es}	L_0	L_{es}
$Q_{навант.}$	м ³ /м ³ ·доб	-	20,29	-	20,49
БПК ₅	мг/л	80	13	78	13
БПК _{повн}	мг/л	111	18,5	105	19
ХПК	мг/л	174	52	210	69

В роботі [24] наведені результати досліджень, проведених на біофільтрі з м'яким пластмасовим завантаженням. Досліди проводились як в лабораторних, так і в напіввиробничих умовах. В якості завантаження застосовувалась рулонна, гофрована та перфорована вінілпластова плівка. Товщина плівки 0,4 мм, висота гофри 2,5 мм, діаметр отворів 2,8 мм. Загальна площа поверхні отворів складала 60% від поверхні плівки.

Лабораторна модель біофільтра мала об'єм 10 дм³ при висоті шару завантаження 1,6 м. Пористість завантажувального матеріалу складає 98%, а питома площа поверхні вінілпластової плівки з врахуванням отворів досягла 350 м²/м³. Досліди проводились з навантаженням 3 м³/м³ на добу. Величина БПК₅ очищеної стічної води в середньому складала 8 мг/л при БПК₅ неочищеної – 105 мг/л. Біологічна плівка наростала рівномірно на завантажувальному матеріалі, перекриваючи при цьому отвори перфорації.

Напіввиробничі дослідження проводились на установці з внутрішнім діаметром 0,8 м та висотою шару завантаження 3,5 м. Розподілення стічної рідини по поверхні біофільтра виконувалось реактивним зрошувачем. Загальний об'єм матеріалу завантаження складає 1,76 м³. Завантаження представляло ряд вертикальних полотен з вінілпластової та перфорованої плівки. Об'ємна вага завантажувального матеріалу досягла 6,0 кг/м³ при пористості 99% та питомій площі поверхні 40 м²/м³. Дослідження продовжувались більше 5 місяців, проводились на господарсько-побутовій воді та складались з двох серій дослідів. В першій серії дослідів навантаження складало 4 м³/м³ на добу, а по БПК_{повн} – 600 г/м³ на добу. Ефект вилучення забруднень при цьому складав в середньому по БПК_{повн} – 87%; по завислим речовинам – 90%.

У другій серії досліджень навантаження було збільшене до 9 м³/м³ на добу, а навантаження по БПК_{повн} – 1,2 кг/м³ на добу. Ефект очистки при цьому складав в середньому по БПК_{повн} – 87%; по завислим речовинам – 90%.

Усереднені значення показників неочищеної та очищеної стічної рідини наведені в таблиці 2, відповідно на рис. 4 показана залежність ефекту вилучення забруднень від величини навантаження по БПК₅, одержана в дослідях і в результаті виконаних розрахунків.

Таблиця 2. Показники роботи біофільтра з м'яким пластмасовим завантаженням [24]

Показники	Розмірність	1-ша серія дослідів		2-га серія дослідів	
Навантаження	м ³ /м ³ доб.	-	4,0	-	9,0
БПК ₅	мг/л	125	14	105	12
БПК _{повн}	мг/л	150	20	134	18
ХПК	мг/л	193	88	182	74
Завислі речовини	мг/л	130	12	123	11
Окислювальність	мг/л	57	22	47	15

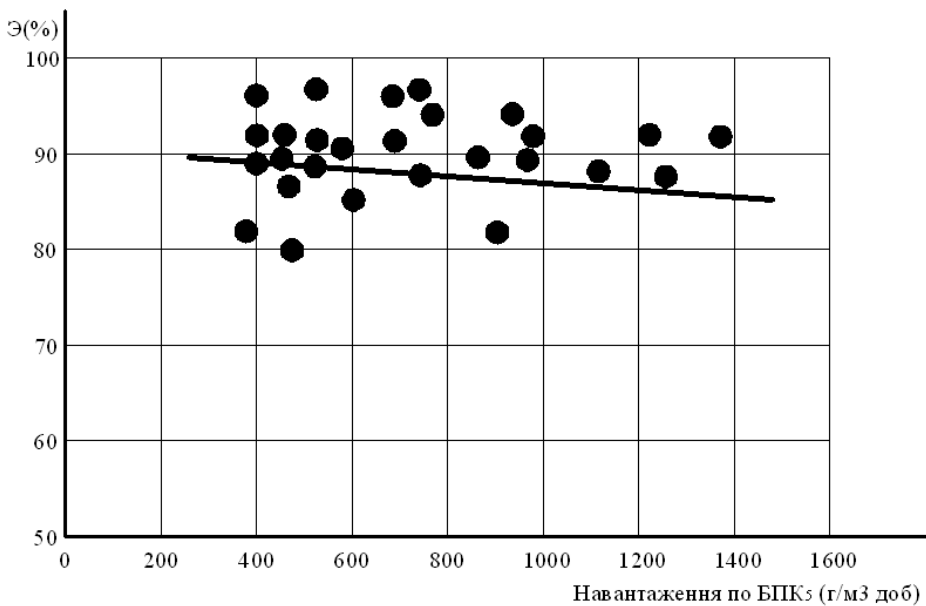


Рис. 4 – Залежність ефекту очистки від навантаження по БПК₅

• - дослідні дані, — - розрахункова пряма

У напіввиробничих умовах біологічна плівка, як і на лабораторній моделі, рівномірно покривала завантажувальний матеріал, отвори перфорації при цьому досить швидко заростали.

Як бачимо в обох останніх випадках [23, 24], одержані досить задовільні результати порівняльного співставлення розрахункових і дослідних даних. Тому на основі проведених досліджень доцільно буде зробити висновок, що запропоновані матеріали завантаження можуть з успіхом використовуватись у біофільтрах.

В роботі [25] з метою оцінки існуючих експериментальних залежностей, використані дослідні дані, які представлені в таблиці 3 і в перерахованих координатах $Les = f(B)$ на рис. 5, що дозволяє провести порівняльну оцінку запропонованих теоретичних розрахунків з дослідними даними. Розрахунки виконувались з використанням залежності [15]

$$\bar{L}_e = \frac{L_e}{L_0} = e^{-B\bar{z}} = e^{-\tilde{z}}, \quad B = \frac{A_*}{Q}, \quad A_* = K_L F_{\delta s} (1 - A), \quad F_{\delta s} = F_{\delta} \cdot S, \quad \bar{z} = \frac{z}{S} \quad (4)$$

яка при визначенні концентрації на виході із біофільтра (фільтраті) при $\bar{z} = 1$ ($z = S$) має вигляд

$$L_{eS} = L_0 e^{-B} = L_0 e^{-\tilde{S}} \quad B = \tilde{S} = \frac{A_*}{Q} \quad (5)$$

Тут L_0 – вхідна концентрація ОЗ, мг/л; S – робоча висота фільтра, м; F_{δ} – площа поверхні завантаження на одиницю висоти фільтра, м; K_L – коефіцієнт переносу в рідинній плівці, м/год; A – параметр, який визначається згідно з [15]. Для обчислення параметра B використовувались вихідні дані, які наведені в роботі [25], а також взяті із літературних джерел. Хоча маємо, особливо при більших значеннях $\bar{L}_{eS}$, деяке розходження дослідних даних з розрахунковими, в цілому можна вважати задовільним співпадання дослідних даних з розрахунковими.

Таблиця 3. Дослідні дані по очистці стічних вод в біофільтрі [25]

$q, \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{доб}$	$S, \text{ м}$	$L_0, \text{ мг/л БПК}$	$L_{eS}, \text{ мг/л БПК}$
2,5	0,61	121,6	18,9
2,5	1,14	121,6	29,9
2,5	1,68	121,6	10,1
2,5	2,21	121,6	10,9
2,5	0,61	129,6	23,2
2,5	1,14	129,6	19,2
2,5	1,68	129,6	13,6
2,5	2,21	129,6	11,9
4,637	0,61	118,0	27,7
4,637	1,14	118,0	22,1
4,637	1,68	118,0	14,1
4,637	2,21	118,0	12,9
4,646	0,61	122,4	34,9
4,646	1,14	122,4	23,0
4,646	1,68	122,4	17,1
4,646	2,21	122,4	13,3
6,466	0,61	138,4	47,0
6,466	1,14	138,4	31,1
6,466	1,68	138,4	25,0
6,466	2,21	138,4	19,1
6,578	0,61	115,2	45,0
6,578	1,14	115,2	40,1
6,578	1,68	115,2	22,3
6,578	2,21	115,2	16,0
9,423	0,61	103,2	37,2

Продовження таблиці 3

9,423	1,14	103,2	32,7
9,423	1,68	103,2	19,8
9,423	2,21	103,2	14,6
9,563	0,61	126,4	37,9
9,563	1,14	126,4	32,8
9,563	1,68	126,4	24,6
9,563	2,21	126,4	18,5
12,381	0,61	134,4	36,2
12,381	1,14	134,4	28,6
12,381	1,68	134,4	26,5
12,381	2,21	134,4	22,1
12,623	0,61	122,8	25,5
12,623	1,14	122,8	49,6
12,623	1,68	122,8	23,7
12,623	2,21	122,8	21,3
14,928	0,61	122,4	38,6
14,928	1,14	122,4	33,1
14,928	1,68	122,4	27,4
14,928	2,21	122,4	26,1
15,292	0,61	119,6	36,4
15,292	1,14	119,6	42,2
15,292	1,68	119,6	29,6
15,292	2,21	119,6	27,2

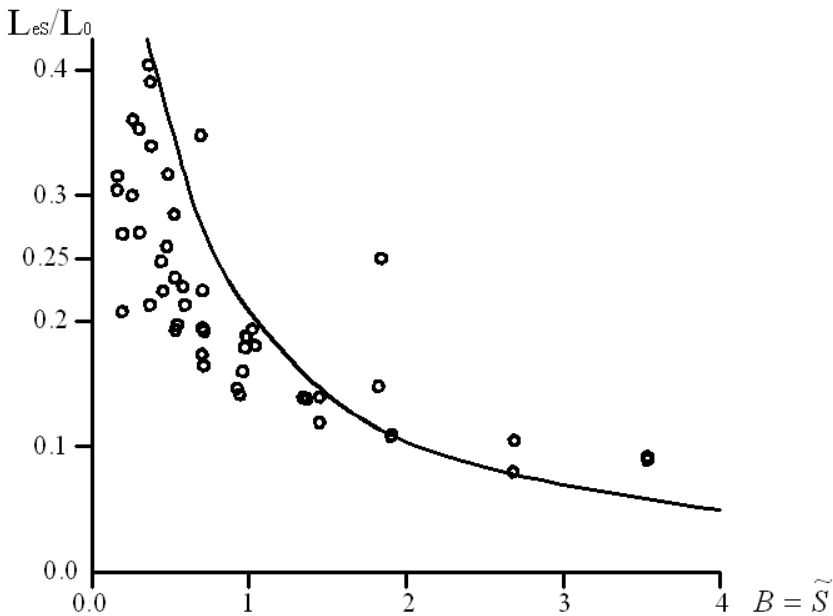


Рис. 5 – Залежність L_{es} від параметрів B для біофільтра з гравійним завантаженням, що окислюють міські стічні води

• - дослідні дані, — - розрахункова пряма

Висновки: наведені порівняльні результати і їх аналіз свідчать про те, що запропоновані моделі і розроблені на їх основі методи розрахунку в цілому з достатньою адекватністю описують і відображають процеси очистки стічних вод на краплинних біофільтрах.

Проте треба зазначити, що в запропонованих, як і в інших існуючих розрахункових рекомендаціях, які, як правило, побудовані на основі аналізу дослідних даних, безпосередньо не знайшли відображення ряд важливих складових очистки, зокрема параметри біоплівки, швидкості кінетичних реакцій в біоплівці та інші. Тому в кожному випадку слід чітко визначити правила і межі використання цих рекомендацій.

Тут можна погодитися з думкою відомих спеціалістів, що всі експериментальні криві, які описують результати обробки стоків (ефективність обробки чи концентрацію забруднень на виході із системи очистки), які у великій кількості можна знайти в літературі, характеризуються великим розкидом даних. Це свідчить про те, що подібні прості правила щодо навантаження не можуть врахувати всі численні обставини, які складаються на практиці [1, 2].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Henze M., Harremoes P., Jansen C., Arwin E. Wastewater Treatment-Springer-Berlin, New York, 2002 – 430 p.
2. Henze M., M. Van Loosdrecht M.E., Ekama G.A., Brdjanovic D. Biological Wastewater Treatment // IWA Publishing, London, 2008 – 511 p.
3. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод – М. АСВ. 2002 – 704 с.
4. СНиП. 2.04.03 – 84. Канализация. Наружные сети и сооружения // Госстрой СССР – М.: Стройиздат, 1985 – 73 с.
5. Таварткиладзе И.М., Клепикова В.В. Очистка сточных вод на биофильтрах. – К. Будівельник, 1983 – 70 с.
6. Олейник А.Я., Колпакова О.А. К расчету очистки сточных вод на биофильтрах (капельных фильтрах). // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К. КНУБА, 2011 – Вип. 16. – С. 86–106.
7. Wanner O., Ebert N.I., Rittman B.E. Mathematical Modeling of biofilms // Scientific and Technical report, № 18 – 2006 – 208 p.
8. Олейник А.Я., Василенко Т.В., Рыбаченко С.А., Хамид Ихаб Ахмад. Моделирование процессов доочистки хозяйственно-бытовых сточных вод на фильтрах // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки – 2006 – вип. 7 – С. 85–97.
9. Bruce E. Logan, Stawonir W. Hermanowicz, Denny S. Parker. Engineering implications of a new trickling filter model // WPCF, vol. 39, № 12 – 1987 – P. 1017–1028.
10. Bruce E. Logan, Stawonir W. Hermanowicz, Denny S. Parker. A fundamental model for trickling filter process design // WPCF, vol. 39, № 12 – 1987 – P. 1029–1042.
11. Liao Q., Tian X., Chen R., Zhu X. Mathematical model for gas liquid two-phase flow and biodegradation of a low concentration volatile organic compound (VOC) in a trickling biofilter // Internal. J. of Heat and Mass Transfer – 2007 – P. 1–13.
12. Person F., Wik T., Sorensson F., Hermanson M., Distribution and activity of ammonice bacteria in a large-scale trickling filter // Wet. Res., 2002 – 36 – P. 1439–1448.
13. Олейник А.Я., Кравчук А.М., Колпакова О.А. Теоретическое обоснование очистки сточных вод на капельных биофильтрах / Доповіді НАНУ – 2012 – № 3 – С. 179–183.
14. Кравчук А.М., Колпакова О.А. Моделювання процесу вилучення органічних забруднень на краплинних фільтрах / Вісник ОДАБА, м. Одеса – 2011 – вип. 13 – С. 120–126.

15. Кравчук А.М., Колпакова О.А. «Практичні рекомендації до розрахунку очистки стічних вод на краплинних біофільтрах». // Науково-технічний збірник. «Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки» Київ, 2014, вип. 24, С. 147–155.
16. Wimpenny I., Manz W., Szewzyk U. Heterogeneity in biofilms // FEMS Microb. Rev. – 2000 – Vol. 24. – P. 661–671.
17. Perez I., Piccioreanu C., van Loosdrecht M. Modelling biofilm and flosdiffusion processes based on analytical sokution of reaction – diffusion equations // Wat. Res. 2005, vol. 39 – P. 1311–1323.
18. Lee K.M., Stensel H.D. Aeration and substrate utilization in a sparged packed – biofilm reactor // WPCF, vol. 58, № 11 – p.p. 1065–1073.
19. Келарева Д.А., Кравчук А.М., Олійник О.Я. Моделювання сумісного вилучення органічних забруднень і азоту при очистці стічних вод біофільтрацією // Доповіді НАНУ – 2012 – № 5 – С. 179–183.
20. Рибаченко С.О. Аеробна доочистка стічних вод на затоплених фільтрах / Дис. канд. техн. наук 05.-23.-4 – КНУБіА, 2-11 – С. 143.
21. Mann A.T., Stephenson T. Modelling biological aerated filters for wastewater treatment // Wat. Res., vol. 31, № 10 – 1997 – С. 2443–2448.
22. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Биологические фильтры. – М.: Стройиздат, 1982 – 120 с.
23. Яковлев С.В., Воронов Ю.В., Кореньков В.Н. Соломеев В.П. Исследования биофильтров с жесткими пластмассовыми загрузками // Тр. Ин-та ВНИИ ВОДГЕО Сб. статей «Материалы по очистке сточных вод». – М.: 1972. – С. 14–17.
24. Воронов Ю.В., Кореньков В.Н. Карелина О.Я. Исследования работы биофильтра с мягкой пластмассовой загрузкой // Тр. Ин-та ВНИИ ВОДГЕО Сб. статей «Материалы по очистке сточных вод». – М.: 1972. – С. 51–56.
25. Вавилин В.А. Нелинейные модели биологической очистки и процессов самоочищения в реках. – М.: Наука, 1983. – 159 с.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2014