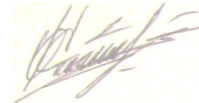


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

**КОЛПАКОВА ОЛЬГА АНАТОЛІЇВНА**



УДК 628.353.1

**ОБГРУНТУВАННЯ БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД ВІД  
ОРГАНІЧНИХ ЗАБРУДНЕНЬ НА КРАПЛИННИХ БІОФІЛЬТРАХ**

Спеціальність 05.23.04 – Водопостачання, каналізація

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти та науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**КРАВЧУК АНДРІЙ МИХАЙЛОВИЧ**  
завідувач кафедри водопостачання та водовідведення  
Київського національного університету будівництва і  
архітектури.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ЕПОЯН СТЕПАН МИХАЙЛОВИЧ**  
завідувач кафедри водопостачання, каналізації і  
гідравліки Харківського національного університету  
будівництва та архітектури.

кандидат технічних наук, доцент  
**ГРИЦИНА ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСІЙОВИЧ**  
доцент кафедри теплогазопостачання, вентиляції та  
санітарної техніки Національного університету водного  
господарства та природокористування.

Захист дисертації відбудеться «22» \_\_\_\_\_ грудня \_\_\_\_\_ 2015 р. о 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури, за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31.

Автореферат розісланий «17» листопада 2015 р.

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



Василенко О.А.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### **Актуальність роботи.**

Однією із важливих соціальних і екологічних проблем України є очищення води від забруднень різного походження, зокрема розробка нових та вдосконалення існуючих методів очистки стічних вод від органічних забруднень на біофільтрах.

Основним джерелом надходження стічних вод з високим вмістом органічних забруднень є господарсько-побутові стічні води.

Провідна роль в процесах глибокої очистки стічних вод до необхідних нормативних вимог належить вилученню забруднень різного походження за рахунок фізико-хімічних і біологічних процесів, які відбуваються при їх фільтруванні через зернисті, волокнисті та інші типи завантаження фільтрів. В процесах глибокої очистки (доочистки) фільтруванням господарсько-побутових стічних вод, чому присвячена дана дисертаційна робота, які забруднені переважно легко окислювальними речовинами, в основному відбуваються процеси біологічного окислення (деструкція) забруднень органічного походження. Найбільш розповсюдженим та ефективнішим методом вилучення органічних забруднень із стічної води є фільтрування на краплинних біофільтрах з різними матеріалами завантаження. Ефективність вилучення органічних забруднень в біологічних фільтрах пов'язана з утворенням високої концентрації біомаси в одиниці об'єму фільтра у вигляді біоплівки, яка утворюється на поверхні завантаження і має значну концентрацію мікроорганізмів.

Проте існуючі наукові дослідження в цьому напрямку носили в основному емпіричний характер і не враховують багатофакторний вплив різних процесів, тому не дозволяють надійно та в повному обсязі обґрунтувати конструктивні та технологічні параметри очисних краплинних біофільтрів.

Глибоке вивчення і аналіз процесів та механізмів, які відбуваються при фільтруванні в краплинних біофільтрах повинно базуватись на основі розробки більш досконалих фізичних і математичних моделей, які описують та враховують особливості різних перетворень і трансформацій при вилученні органічних забруднень фільтруванням в ненасиченому середовищі завантаження.

Реалізація розроблених і запропонованих моделей дозволить обґрунтувати і розробити більш надійні і досконалі методи розрахунку параметрів очистки стічних вод на краплинних біофільтрах, що є актуальною проблемою, направленою на підвищення ефективності очистки стічних вод.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано згідно державної програми «Про концепцію розвитку водного господарства України», вона безпосередньо пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури, які виконувалися на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0199U000598).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розробка і наукове обґрунтування більш досконалих і надійних методів розрахунку очистки господарсько-побутових стічних вод від органічних забруднень на краплинних

біофільтрах на основі сформульованих і реалізованих математичних моделей для забезпечення нормативних вимог якісної очистки стічних вод та вибору оптимальних технологічних і конструктивних параметрів біофільтрів з широким залученням для їх оцінки і апробації дослідних даних.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

- провести аналіз літературних джерел щодо процесу вилучення органічних забруднень на краплинних біофільтрах з урахуванням особливостей утворення біологічної плівки на поверхнях різного типу завантаження;

- на підставі проведеного аналізу обґрунтувати фізичну (концептуальну) модель вилучення органічних забруднень методом фільтрування на краплинних біофільтрах;

- побудувати загальну і інші математичні моделі на підставі створеної фізичної моделі з врахуванням особливостей вилучення органічних забруднень закріпленим біоценозом на ненасиченому середовищі завантаження краплинних біофільтрів;

- на основі реалізації математичної моделі розробити інженерну методику розрахунку технологічних і конструктивних параметрів краплинних біофільтрів та запропонувати рекомендації по реалізації цієї методики для різних стадій і умов очистки;

- провести порівняльний аналіз результатів теоретичних розрахунків з дослідними даними, одержаними на існуючих краплинних біофільтрах в реальних умовах;

- для виконання розрахунків визначити необхідні вихідні параметри і коефіцієнти та виконати порівняння отриманих розрахункових залежностей з дослідними даними різних авторів.

**Об'єкт дослідження** – очищення господарсько-побутових стічних вод від органічних забруднень закріпленим біоценозом.

**Предмет дослідження** – процеси біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах з використанням біоплівкових технологій.

**Методи дослідження** – фізичне і математичне моделювання процесів біологічної очистки стічних вод при фільтруванні, використання чисельних і аналітичних методів розв'язку окремих задач, наукове обґрунтування одержаних теоретичних розробок і порівняння їх з існуючими дослідними даними.

**Наукова новизна роботи:**

- обґрунтована і побудована загальна математична модель вилучення органічних забруднень із стічних вод на краплинних біофільтрах, яка враховує взаємодію гідравлічних, фізико-хімічних і біологічних процесів при фільтруванні крізь різне завантаження в ненасиченому середовищі;

- на підставі реалізації запропонованої математичної моделі розроблені чисельні і аналітичні методи розрахунку для визначення конструктивних та технологічних параметрів краплинних фільтрів з різним завантаженням в умовах достатнього кисневого режиму;

- одержані методи розрахунку дозволяють визначити зміну концентрації органічних забруднень, як по товщині біологічної плівки так і у краплинному фільтрі в цілому, проведена їх експериментальна оцінка і широка апробація;

- оцінено вплив основних факторів і вихідних характеристик на процес біологічної очистки в краплинних біофільтрах;
- проведено визначення вихідних параметрів і коефіцієнтів з залученням дослідних даних та використанням спеціальних методик їх обробки.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Розроблено інженерну методику та запропоновані рекомендації щодо розрахунків процесів вилучення органічних забруднень та технологічних і конструктивних параметрів краплинних біофільтрів без використання додаткових експериментальних досліджень з врахуванням ряду факторів і процесів, які раніше або не приймались до уваги, або враховувались недостатньо. Також показані порядок і послідовність їх використання при різних умовах роботи фільтрів з різним завантаженням.

Науково-практичні рекомендації використовуються при рішенні практичних задач, що дозволяє підвищити ефективність вилучення органічних забруднень за рахунок врахування особливостей мікробіологічних процесів очистки та конструктивних характеристик краплинних біофільтрів. Рекомендації підтверджені порівняльними співставленнями теоретичних та існуючих дослідних даних, які показали високу ступінь збіжності, що забезпечує можливість їх надійного використання у виробничих умовах з врахуванням, як особливостей характеристик стічних вод, так і очисних споруд.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в робочий проект ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства» (НДКТІ МГ) м. Київ, а також на ПП «Укрбіотал-проект» м. Житомир, що дозволило значно підвищити ефективність вилучення органічних забруднень із стічних вод до необхідної нормативної концентрації.

### **Особистий внесок здобувача**

Наукові результати, які викладені в дисертації, отримані особисто автором на основі аналізу існуючих теоретичних розробок і результатів дослідних даних. Особисто виконано обґрунтування запропонованих фізичних і математичних моделей і на підставі їх реалізації складені рекомендації по методиці розрахунку параметрів очистки стічних вод від органічних забруднень на краплинних біофільтрах. Зокрема автором проведено теоретичний аналіз результатів досліджень по зміні концентрацій по товщині біоплівки і висоті фільтра, що дозволить оптимізувати вибір їх параметрів. Проведені дослідження по вибору і визначенню вихідних параметрів і коефіцієнтів, які необхідні для виконання розрахунків, а також дослідження по співставленню теоретичних результатів з існуючими дослідними даними.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідались: на Науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2011-2014рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми водопостачання та водовідведення. Вода-2011» (м. Одеса 2011р.); Наукових конференціях молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА (м. Київ, 2011-2012рр.); Науково-практичній конференції «Сучасні

проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві» (м. Миргород 2012р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Технології очищення води – технічні, біологічні та екологічні аспекти» (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, 2013р.); І Міжнародній науково-практичній конференції «Водокористування: технології, споруди, менеджмент» (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 2014р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 11 друкованих праць, в тому числі 6 у фахових виданнях, 1 у міжнародному фаховому виданні.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 155 найменувань і додатків. Робота викладена на 152 сторінках, містить 34 рисунки, 5 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, відображено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, відзначено особистий внесок автора роботи, подано відомості про апробацію досліджень та публікації, структуру та обсяг дисертації.

**В першому розділі** виконано аналітичний огляд стану проблеми біологічної очистки стічних вод від органічних забруднень, викладені основні принципи та існуючі технології вилучення органічних забруднень за допомогою фільтрування в спорудах з закріпленим біоценозом (біофільтрах), відзначені роль і внесок вчених різних країн в дослідженні цієї проблеми. Детально розглянуті фізико-хімічні процеси і особливості утворення біологічної плівки на поверхні завантаження в ненасиченому середовищі краплинних біофільтрів та протікання можливих реакцій біологічного окислення органічних забруднень при утворенні на ній високої концентрації біомаси.

На підставі проведеного аналізу і здійсненої оцінки існуючих наукових розробок, які безпосередньо пов'язані з дослідженням краплинних біофільтрів (trickling biofilters) в роботах таких авторів, як Яковлев С.В., Воронов Ю.В., Таварткіладзе І.М., Олійник О.Я., Вавілін В.А., Шведов В.І., Кузьмін С.С., Карюхіна Т.А., Клепікова В.В., Henze M., Morgenroth E., Logan B., Bruce E., Seguret F., Некмат О., Liao O., Chang K. та ін. показано, що існуючі наукові дослідження, на основі яких розроблялись і пропонувались методи розрахунку, носили в основному емпіричний характер, які можуть бути використані в обмежених умовах, а також спрощених теоретичних підходів (моделей), які в достатній мірі як правило не враховують важливі фактори процесу очистки.

На підставі виконаного аналізу робиться висновок, про необхідність і доцільність розробки методів розрахунку краплинних біофільтрів, на основі переважно подальшого вдосконалення і використання математичних моделей, які найбільш повно описують процеси вилучення органічних забруднень в різних умовах їх експлуатації.

У другому розділі сформульовані основні передумови і концепції для обґрунтування фізичної і математичної моделей на основі існуючого уявлення про фізичну суть процесів вилучення органічних забруднень, які поступають зі стічними водами і вилучаються за допомогою біологічно-активних мікроорганізмів, що знаходяться на твердій поверхні завантаження.

Ефективність вилучення органічних забруднень у біофільтрі пов'язана з утворенням високої концентрації закріпленої біомаси (біоплівки) на одиницю об'єму біофільтра. Наведений аналіз явищ дозволив сформулювати біоплівкову модель вилучення органічних забруднень, яка є основною частиною загальної моделі очистки стічних вод фільтруванням. Біоплівка являє собою складну мікробіальну екосистему, в якій одночасно протікають декілька фізичних, хімічних та біологічних процесів. У загальному випадку біоплівка складається з двох частин: рідинна фаза, в якій розчинені речовини перемішуються за рахунок молекулярної дифузії, і тверда фаза. Тверда частина біоплівки має складну структуру і складається в основному з активної біомаси (в даному випадку гетеротрофних мікроорганізмів), інертної біомаси і позаклітинних полімерних речовин. При цьому в біоплівкових моделях приймає участь не вся можлива товщина біоплівки, а тільки її активна частина, рекомендації по визначенню якої наведені в дисертації.

Для вирішення задачі оптимізації та удосконалення процесів вилучення органічних забруднень із стічних вод, за участю автора була сформульована і побудована найбільш повна математична трифазна модель, яка складається із гідродинамічного блоку (рівняння потоків повітря та рідини і нерозривності) та з блоку динаміки органічних забруднень і повітря (рівняння матеріального балансу, записаних відносно концентрацій забруднень та кисню в рухомій і твердій фазах) в краплинному фільтрі.

Згідно прийнятої фізичної та математичної моделей вказані вище процеси можна представити наступним чином. Поток рідини забруднення переносяться з певною швидкістю (конвективний перенос) та завдяки дифузії поступають в біоплівку, в якій перероблюються мікроорганізмами. Кисень поступає з газового повітряного потоку, адсорбується на межі розділу фаз газ-рідина, де відбувається насичення киснем рідини, далі в процесі дифузії переходить в біоплівку через утворену на її поверхні тонку рідинну плівку, тобто використовується мікроорганізмами для своєї життєдіяльності.

Таким чином, реалізація запропонованої математичної моделі, що складається з двох вказаних блоків, описується системою взаємозв'язаних рівнянь, рішення яких дозволить визначити зміну концентрації забруднень та кисню по висоті та в цілому в краплинному фільтрі, а також оцінити ефект очистки. Запропоновані на основі цих моделей методи розрахунку дозволять обґрунтувати найбільш доцільні конструктивні та технологічні параметри роботи краплинного біофільтра.

Запропонована модель спрощується у випадках, коли процес утилізації забруднень не лімітується киснем, тобто забезпечений ним в достатній кількості, згідно необхідних умов і критеріїв наведених в дисертації. Таким чином, з врахуванням прийнятих передумов, які цілком допустимі і не вносять суттєвих

похибок в розрахунки, робоча математична модель вилучення забруднень в краплинному біофільтрі буде складатись з наступної системи рівнянь.

Нестаціонарне рівняння матеріального балансу маси забруднень на елементарній ділянці активного шару біоплівки з плоским завантаженням

$$D_L \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - R_L = \frac{\partial L}{\partial t}. \quad (1)$$

Нестаціонарне рівняння матеріального балансу для органічних забруднень в об'ємі фільтра

$$Fn_e \frac{\partial L_e}{\partial t} = -Q \frac{\partial L_e}{\partial z} - F_\delta K_L (L_e - L|_{x=0}). \quad (2)$$

Швидкість для реакції в біоплівці при відсутності інгибуючого процесу біоокислення і при достатній кількості кисню описується відомим нелінійним рівнянням Моно

$$R_L = \frac{\rho_m L}{K_{mL} + L}, \quad \rho_m = \frac{\mu_m X}{Y}, \quad (3)$$

яке при  $K_{mL} \gg L$  можна спростити до рівняння кінетики реакції першого порядку, яка описується лінійним рівнянням

$$R_{L1} = kL, \quad k = \frac{\rho_m}{K_{mL}} = \frac{\mu_m X}{K_{mL} Y}, \quad (4)$$

а при  $K_{mL} \ll L$  - рівняння кінетики реакції нульового порядку

$$R_{L0} = w_L, \quad w_L = \rho_m = \frac{\mu_m}{Y} X. \quad (5)$$

Згідно проведеного аналізу, для практичних розрахунків рішення рівнянь (1) і (2) достатньо виконати в стаціонарних умовах, які наступають досить швидко, тобто при  $\frac{\partial L}{\partial t} = 0$  і  $\frac{\partial L_e}{\partial t} = 0$ .

В цьому випадку рішення рівняння (1) і (2) виконуються при наступних граничних умовах

$$\text{при } x = 0 \quad -D \frac{\partial L}{\partial x} = K_L (L_e - L|_{x=0}), \quad (6)$$

$$\text{при } x = \delta \quad \frac{\partial L}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

$$\text{при } z = 0 \quad L_e = L_0. \quad (8)$$

Зазначимо, що рівняння (6) характеризує потік забруднень на поверхню біоплівки із об'єму рідини (фільтра) через рідинну плівку (пограничний шар).

В приведених рівняннях та залежностях прийняті наступні позначення деяких параметрів та коефіцієнтів:  $L$ ,  $L_\delta$ ,  $L_e$ ,  $L_0$  - відповідно, концентрації органічних забруднень в біоплівці, на поверхні біологічної плівки, в фільтрі та вхідній рідині гБСК/м<sup>3</sup>, гХСК/м<sup>3</sup>;  $\delta$ ,  $\delta_p$  - відповідно, розрахункові товщини активної (аеробної) біоплівки та рідинної плівки (пограничного шару), м;  $F_\delta$  - площа поверхні біоплівки на одиницю висоти завантаження фільтра, м;  $F_\delta = \frac{F_{\delta s}}{S}$ , де  $F_{\delta s}$  - загальна площа



поверхні біоплівки (завантаження) в фільтрі;  $F$  - площа фільтра,  $\text{м}^2$ ;  $S$  - робоча висота фільтра,  $\text{м}$ ;  $Q$  - витрата (об'ємна швидкість потоку),  $\text{м}^3/\text{год}$ ;  $D_L$  - коефіцієнт молекулярної дифузії забруднень в біоплівці,  $\text{м}^2/\text{год}$ ;  $K_L$  - коефіцієнт масопереносу органічних забруднень в рідинній плівці,  $\text{м}/\text{год}$ ;  $K_{mL}$  - константа насичення (півнасичення) по органічним забрудненням,  $\text{гБСК}/\text{м}^3$ ,  $\text{гХСК}/\text{м}^3$ ;  $\mu_m$  - питома максимальна швидкість зростання мікроорганізмів,  $\text{год}^{-1}$ ;  $Y = \frac{dX}{dL}$  - стехіометричний коефіцієнт приросту біомаси в біоплівці,  $X$  - концентрація біомаси в біоплівці,  $\text{гБВБ}/\text{м}^3$ ,  $\text{гХСК(Б)}/\text{м}^3$ .

В результаті рішення рівняння (1) при граничних умовах (6, 7) для реакції  $R_{LI}$  першого порядку (4) одержимо наступну залежність для зміни концентрації  $L$  по товщині біоплівки  $x$

$$L(\bar{x}) = L_e \frac{e^{\sqrt{\alpha}(2-\bar{x})} + e^{\sqrt{\alpha}\bar{x}}}{\left(e^{2\sqrt{\alpha}} + 1\right) + \lambda \left(e^{2\sqrt{\alpha}} - 1\right)}, \quad (9)$$

$$\text{або } L(\bar{x}) = \frac{ch\sqrt{\alpha}(1-\bar{x})}{ch\sqrt{\alpha}} L_\delta, \quad (10)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{k\delta^2}{D_L}, \quad \lambda = \frac{\sqrt{kD_L}}{K_L}, \quad \bar{x} = \frac{x}{\delta}.$$

Залежність для визначення концентрації забруднень на зовнішній поверхні біоплівки одержимо з рівняння (9) при значенні  $\bar{x} = 0$

$$L(0) = L_\delta = AL_e, \quad (11)$$

де параметр  $A$  визначимо аналітично за формулою (12)

$$A = \frac{1 + e^{-\varphi}}{\left(1 + e^{-\varphi}\right) + \lambda \left(1 - e^{-\varphi}\right)}, \quad \varphi = 2\sqrt{\alpha}. \quad (12)$$

Для оцінки ефективності вилучення органічних забруднень в дисертації наведені рекомендації, які дозволяють оцінити роботу біоплівки в залежності від прийнятої товщини  $\delta$  по характеру проникнення в ній органічних забруднень.

Для реакції нульового порядку (5) при граничних умовах (6, 7) визначимо концентрацію на поверхні біоплівки та зміну концентрації по товщині біоплівки:

а) при значенні ( $\beta \geq 1$ ), яке відповідає повному проникненню органічних забруднень в біоплівку, маємо

$$L(x) = L_e - \frac{w_L}{D_L} \left( \frac{\delta D_L}{K_L} + \delta x - \frac{x^2}{2} \right) = L_\delta \left[ 1 - \left( \frac{2x}{\delta\beta^2} - \frac{x^2}{\delta^2\beta^2} \right) \right], \quad (13)$$

$$L(x) = L_\delta - \left( \delta x - \frac{x^2}{2} \right) \frac{w_L}{D_L}, \quad (14)$$

$$\text{де } \beta = \sqrt{\frac{2L_\delta D_L}{w_L \delta^2}} \quad \text{або} \quad \beta\delta = \sqrt{\frac{2L_\delta D_L}{w_L}}. \quad (15)$$

Значення концентрації на поверхні біоплівки ( $x=0$ ) буде складати

$$L_{\delta} = L_e - \frac{w_L \delta}{K_L} \quad (16)$$

б) при значенні  $\beta < 1$ , яке відповідає частковому проникненню органічних забруднень в біоплівку, маємо

$$L(x) = L_{\delta} \left( 1 - \frac{2x}{\beta \delta} - \frac{x^2}{(\beta \delta)^2} \right), \quad (17)$$

$$L_{\delta} = \frac{L_e - \frac{w_L \delta}{K_L}}{\left( 1 - \frac{D_L}{\delta K_L} \right)}. \quad (18)$$

На рис. 1, в якості прикладу, наведено графік зміни концентрації  $L$  за товщиною біоплівки  $\delta$ , які фактично відповідають кожному конкретному значенню змінної по висоті фільтра концентрації  $L_e$ , від якої залежить концентрація на поверхні біоплівки  $L_{\delta}$ . Таким чином параметр  $\beta$  буде залежати також від концентрації  $L_e$ , що необхідно мати на увазі. З рис. 1 також слідує, що перехід від частково проникної біоплівки до повністю проникної біоплівки відбувається при  $\beta = 1$ , що наближено відповідає значенню концентрації на поверхні біоплівки

$$L_{\delta_{\min}} = \frac{\delta^2 w_L}{2D_L}. \quad (19)$$

З врахуванням залежностей (17) і (18), згідно рівняння (4) в дисертаційній роботі одержані рівняння для визначення потоків  $N_0$  для випадків  $\beta > 1$  і  $\beta < 1$  при кінетиці нульового порядку.

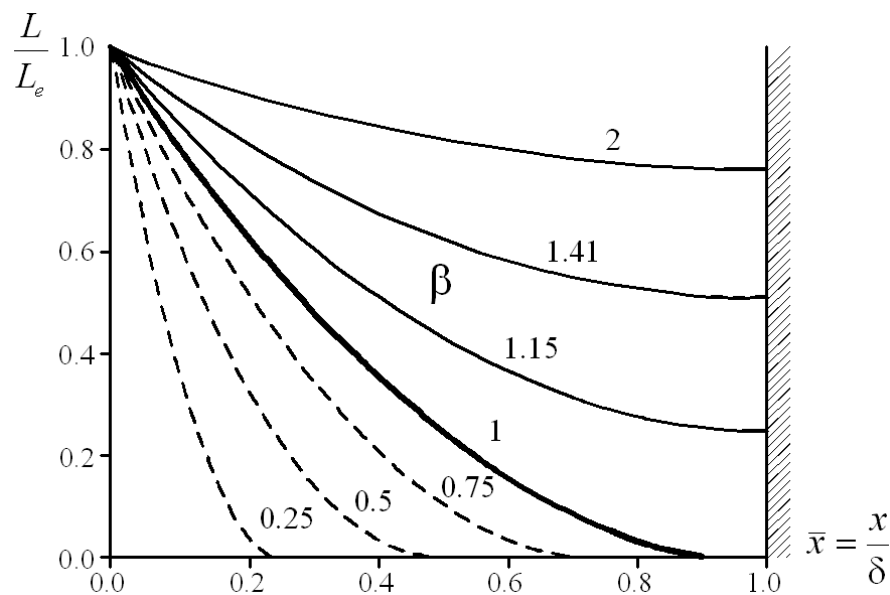


Рис. 1. Профілі концентрації при кінетиці нульового порядку в біоплівці для різних значень  $\beta < 1$  і  $\beta > 1$ .

Наведені вище рішення одержані для кінетик реакцій  $R_L$  першого і нульового порядків, що відповідає низьким і значним концентраціям органічних забруднень та наближено відповідає відношенням  $\beta_L = \frac{K_{mL}}{L_0} > 2$  і  $\beta_L < 0,25$ . У випадках, коли  $0,25 < \beta_L < 2$  при розрахунках кінетики реакції  $R_L$  використовуємо відоме рівняння Моно (3).

В цьому випадку рішення рівняння (1) проводиться шляхом корегування коефіцієнта  $k = k_L$  в рівнянні (4) шляхом використання ітераційної схеми рішення, яка наведена в дисертації:

$$k_L = \frac{\frac{\rho_m}{L_0}}{\beta + \frac{L}{L_0}}, \quad \beta = \frac{K_{mL}}{L_0}, \quad \rho_m = \frac{\mu_m X}{Y}. \quad (20)$$

Для всіх кінетичних реакцій, в дисертації на основі рівняння (6) одержані рекомендації для визначення потоків забруднень  $N$  через поверхню біоплівки. Зазначені також обґрунтовані можливості їх використання при розрахунку параметрів біофільтра, в якому змінюється по висоті фільтра концентрація  $L_e$ .

**У третьому розділі** представлені інженерні методи розрахунку очищення стічних вод від органічних забруднень на краплинних біофільтрах, одержані на основі запропонованих моделей.

Так, для визначення зміни концентрації  $L_e$  по висоті біофільтра, використовуємо рівняння (2) збереження маси забруднень в потоці рідини біофільтра. В умовах стаціонарного режиму, в результаті рішення рівняння (2) при  $\frac{\partial L_e}{\partial t} = 0$  і, враховуючи залежність (11) для  $L_s$ , і граничну умову (8) для реакції першого порядку одержимо залежність для визначення зміни концентрації  $L_e$  по висоті фільтра

$$\bar{L}_e = e^{-B\bar{z}} \approx e^{-\tilde{z}}, \quad (21)$$

$$\text{де } \bar{L}_e = \frac{L_e}{L_0}, \quad \bar{z} = \frac{z}{S}, \quad B = \frac{A_* S}{Q}, \quad \tilde{z} = B\bar{z} = \frac{A_*}{Q} z, \quad A_* = K_L F_\delta (1 - A).$$

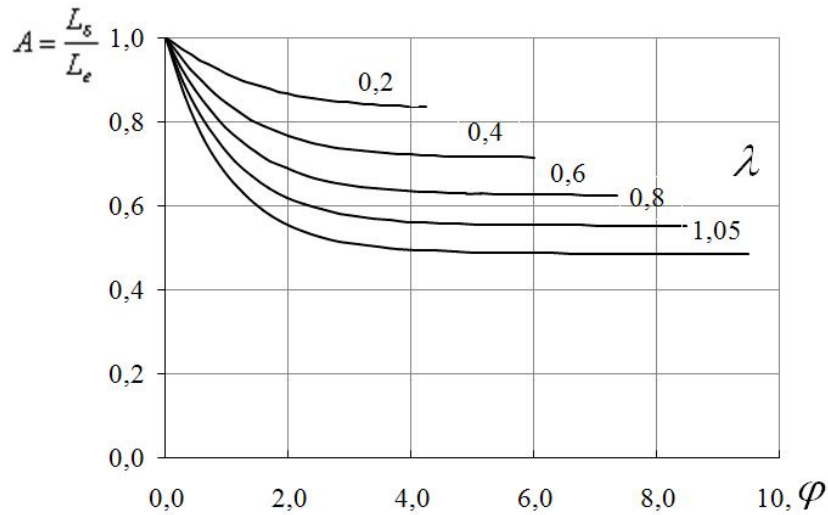
Для розрахунку концентрації на виході із фільтра (у фільтраті)  $z = S$  буде

$$L_e(S) = L_0 e^{-\tilde{S}}, \quad \tilde{S} = \frac{A_*}{Q} S, \quad (22)$$

а для знаходження робочої висоти фільтра  $S$  при відомих (заданих) параметрах  $L_0$ ,  $Q$ ,  $L_e(S)$  і  $A_*$  маємо

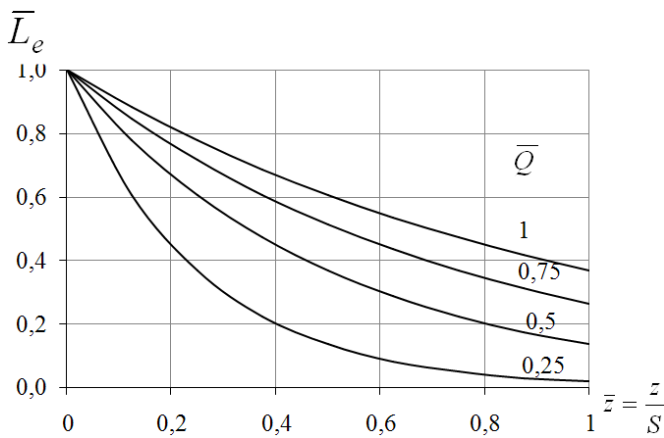
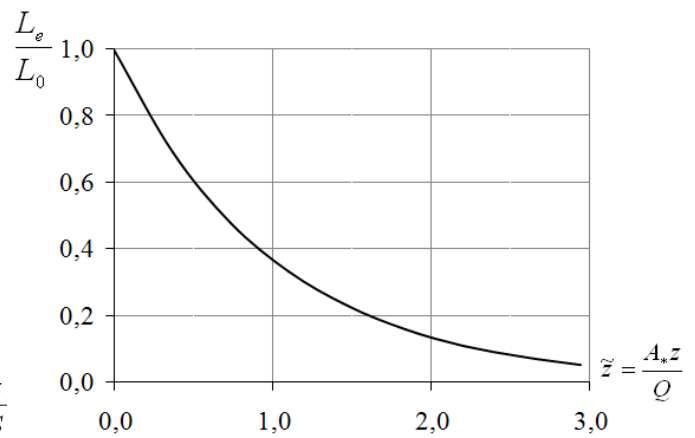
$$S = \frac{Q}{A_*} \ln \frac{L_0}{L_e(S)}. \quad (23)$$

Для визначення параметра  $A$  по рівнянню (12) побудований розрахунковий графік  $A = f(\phi, \lambda)$ , наведений на рис. 2.

Рис. 2. Графік залежності  $A = f(\varphi, \lambda)$ .

На основі залежності (21) для отримання зміни концентрації по висоті фільтра  $S$  побудовані розрахункові графіки  $\bar{L}_e = \frac{L_e}{L_0} = f(\bar{Q}, \bar{z})$  (рис. 3) і  $\bar{L}_e = \frac{L_e}{L_0} = f(\bar{z})$  (рис.

4), де  $\bar{Q} = \frac{1}{B} = \frac{Q}{A_* S}$ .

Рис. 3. Графік залежності  $\bar{L}_e = \frac{L_e}{L_0} = f(\bar{Q}, \bar{z})$ Рис. 4. Графік залежності  $\bar{L}_e = \frac{L_e}{L_0} = f(\bar{z})$ 

В результаті рішення рівняння (2) для реакції нульового порядку з врахуванням залежності (16) для визначення зміни концентрації  $L_e$  по висоті фільтра  $z$  одержимо залежність

$$L_e = L_0 - \frac{F_\delta}{Q} w_L \delta z \quad (24)$$

Концентрація на виході із фільтра ( $z = S$ ) буде складати

$$L_e(S) = L_0 - \frac{F_\delta}{Q} w_L \delta S \quad (25)$$

а для знаходження висоти фільтра при заданій концентрації  $L_e(S)$  та відомих значеннях  $Q$ ,  $L_0$ ,  $F_\delta$ ,  $\delta$ ,  $w_L$ , маємо

$$S = \frac{Q}{F_\delta w_L \delta} (L_0 - L_e(S)). \quad (26)$$

Нагадаємо, що в умовах використання в розрахунках кінетики реакції згідно рівняння Моно при  $0,25 < \beta_L < 2$  при визначенні концентрації  $L_\delta$  використовуємо запропонований ітераційний метод. Приклади розрахунку концентрації  $L_\delta$  в цьому випадку наведені в дисертаційній роботі.

На очистку стічних вод від органічних забруднень крім кінетик реакцій очищення, які прийняті в біоплівкових моделях, значно впливають ряд параметрів, які потребують додаткового обґрунтування і визначення, зокрема коефіцієнти масопереносу  $K_L$  і дифузії  $D$  в рідинній плівці, молекулярна дифузія в біоплівці  $D_L$ , активна (робоча) товщина біоплівки  $\delta$  і рідинної плівки  $\delta_p$ .

В багатьох існуючих біоплівкових моделях профілі концентрації в біоплівці розраховані за умови, що концентрація забруднень на поверхні біоплівки  $L_\delta$  дорівнює концентрації забруднень в біофільтрі  $L_e$ . Проте, навіть при повному перемішуванні в біофільтрі, спостерігається утворення пограничного шару, що потребує врахувати явище масопереносу, залежність (6).

В дисертації наведені рекомендації для визначення коефіцієнта масопереносу  $K_L$ , який в основному залежить від коефіцієнта дифузії  $D$  і товщини рідинної плівки  $\delta_p$ . Обґрунтована також залежність, яка встановлює зв'язок між коефіцієнтом  $K_L$  і параметром  $A$ . Оцінено вплив товщини рідинної плівки  $\delta_p$  на значення коефіцієнта  $K_L$ .

При формуванні активної товщини біоплівки, необхідно враховувати процеси її зростання, розпаду, відриву, що особливо доцільно робити при значних товщинах біоплівки і при тривалих режимах їх роботи.

З врахуванням вказаних процесів в дисертації наведені балансові рівняння, реалізація яких дозволяє визначити формування товщини біоплівки в нестационарних і стаціонарних умовах. Так, в якості прикладу, в результаті рішення цього рівняння в умовах зростання біоплівки за реакцією нульового порядку ( $N = w_L \delta$ ) одержано наступну залежність для визначення товщини біоплівки  $\delta$

$$\delta = \frac{\mu_m - b}{k_d}, \quad b = b_{res} + b_{in}, \quad (27)$$

де  $b$ ,  $b_{in}$ ,  $b_{res}$  - відповідно коефіцієнт розпаду, інактивації і ефективного дихання (респірації), год<sup>-1</sup>;  $k_d$  - коефіцієнт відриву, 1/(год·м).

Проведений аналіз показав, що у всіх випадках товщина біоплівки і потік органічних забруднень зменшується зі збільшенням швидкості відриву, тоді як із збільшенням концентрації органічних забруднень в біофільтрі ці характеристики збільшуються.

При вилученні забруднень закріпленим біоценозом (біоплівкою) на біофільтрах різних конструкцій їх концентрації по висоті фільтра будуть зменшуватись, що згідно прийнятим моделям, призведе в цілому до зменшення також товщини біоплівки по висоті фільтра. Запропоновані моделі і методи розрахунку в принципі дозволяють врахувати цю обставину. Проте, проведений чисельний порівняльний аналіз теоретичних розрахунків з дослідними даними свідчить про те, що запропоновані моделі і розроблені методи розрахунку, на основі прийнятих середньозважених постійних значень товщини  $\delta$ , достатньо надійно і адекватно описують і відображають процеси очистки в цих випадках. В цьому випадку при розрахунках товщини  $\delta$  в прийнятих рівняннях приймаються також осереднені значення потоків  $N$  і концентрацій  $L_\delta$ . Так як параметри  $N$  і  $L_\delta$  в загальному випадку залежать від товщини біоплівки, то розрахунок  $\delta$  виконується методом ітерацій.

Прослідкувати хід виконання розрахунків та рішення задач щодо визначення вихідної концентрації органічних забруднень, питомої площі поверхні завантаження, товщини біоплівки, висоти фільтруючого завантаження можна по запропонованому алгоритму інженерного розрахунку біологічної очистки стічних вод в краплинних біофільтрах (рис. 5.).

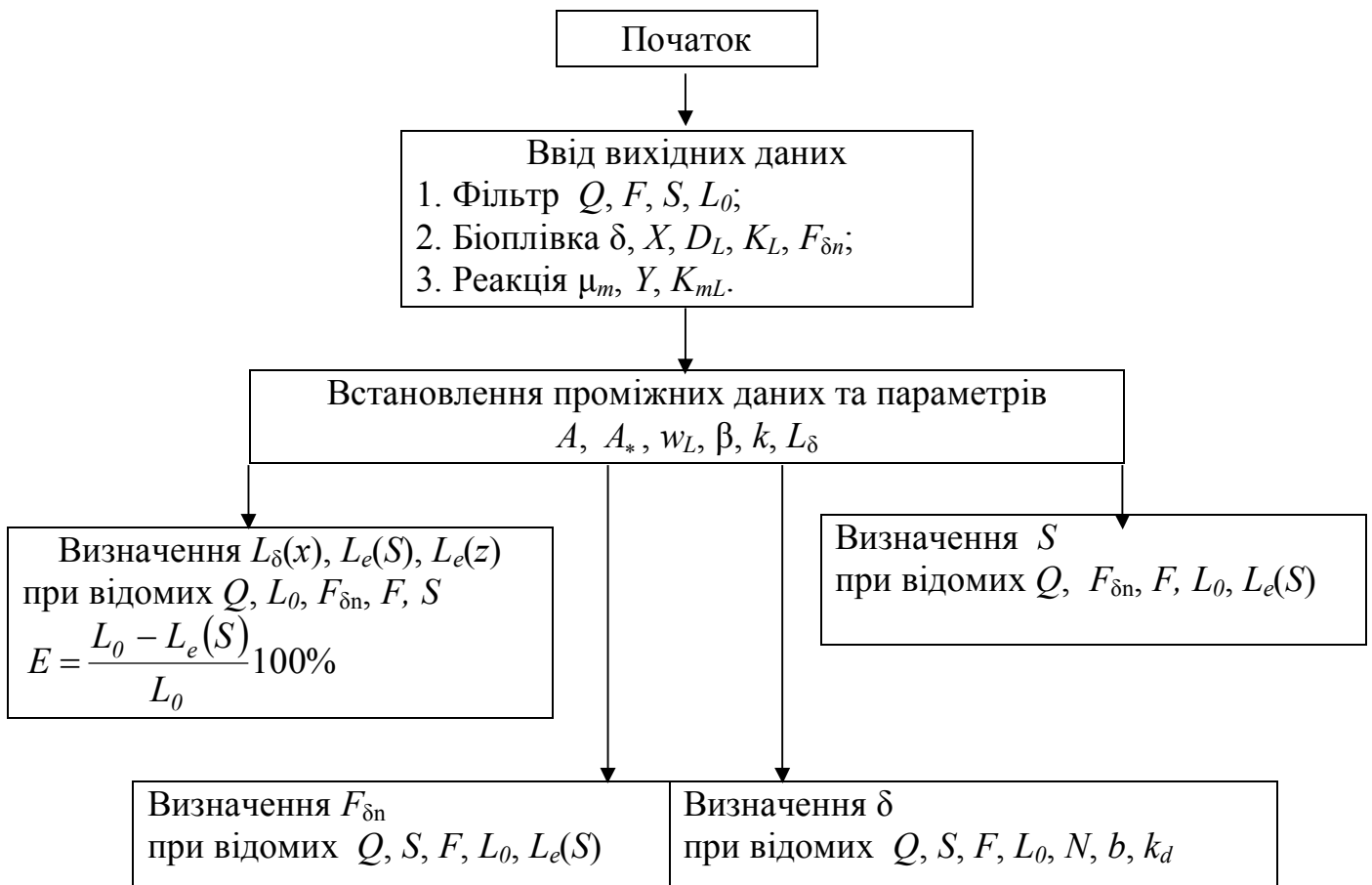


Рис. 5. Алгоритм (схема) інженерного розрахунку біологічної очистки стічних вод від органічних забруднень на краплинних біофільтрах

Для ілюстрації запропонованих методів розрахунку в роботі розглянуті приклади розрахунку. Запропоновані теоретичні розрахункові методики одержали широку апробацію шляхом співставлення результатів розрахунків з численними дослідними даними, одержаними різними авторами в лабораторних і виробничих умовах на краплинних біофільтрах з різним завантаженням.

**В четвертому розділі** для реалізації і використання запропонованих математичних моделей і методів розрахунку наведені результати існуючих досліджень по визначенню вихідних параметрів і коефіцієнтів, які входять в представлені моделі і розрахункові залежності.

В дисертації пропонуються також рекомендації, які дозволяють оцінити вплив на кінетику біоокислення і на процеси масопереносу таких важливих параметрів як температура, рН, інгібуючий вплив токсичних і інших речовин.

Для оцінки надійності і ефективності очистки стічних вод на краплинних біофільтрах сформульовано ряд передумов і критеріїв які доцільно використати при проектуванні. Зокрема, проведено обґрунтування питомої площі поверхні біоплівки, часу затримки твердих часток у біоплівці, а також таких відомих параметрів, як об'ємне навантаження по органічній речовині та поверхневе гідравлічне навантаження.

Вилучення органічних забруднень в біоплівці в аеробних умовах контролюється надходженням в біоплівку кисню. Органічна речовина може бути присутньою по всій товщині біоплівки, але не може бути вилучена на ділянці, куди не може проникнути кисень. В біофільтрах з прикріпленим біоценозом (біоплівкою) в умовах аеробного процесу утилізації органічних забруднень необхідно по всій активній товщині біоплівки забезпечити наявність розчиненого кисню з концентрацією не менше  $C = 5$  мг/л. При цьому швидкість (лімітування) процесу буде визначатись тим субстратом, який проникає в біоплівку на меншу глибину.

Зокрема, крім вже зазначених вище, проведені дослідження по визначенню також параметрів і коефіцієнтів, які входять в рівняння прийнятих кінетичних реакцій  $\mu_m$ ,  $X$ ,  $K_{mL}$ ,  $Y$  та інших.

Таким чином, на підставі виконаного аналізу, при виконанні розрахунків можна скористатись наступними значеннями констант і коефіцієнтів приведених в таблиці

Таблиця 1

Значення вихідних параметрів і коефіцієнтів

Параметр	Од. виміру	Значення	Параметр	Од. виміру	Значення
$D_L$	м <sup>2</sup> /год; м <sup>2</sup> /добу	$(1,25 \dots 2,5)10^{-6}$ $(0,3 \dots 0,6)10^{-4}$	$\mu_m$	1/год	0,05...0,15
$\delta$	мкм м	30...150 $(0,3 \dots 1,5)10^{-4}$	$\rho_m$	г/(л·год)	1...10
$K_L$	м/год	0,025...0,08	$X$	г/л	5...20
$k$	год <sup>-1</sup>	80...500	$Y$	гХ/гЛ	0,45...0,65
$K_{mL}$	мг/л	5...20			

При проведенні розрахунків необхідно звертати особливу увагу на додержання правильного вибору одиниць виміру прийнятих параметрів і коефіцієнтів.

Досить ґрунтовне лабораторне дослідження по вилученню органічних забруднень в очисному біофільтрі в умовах достатнього забезпечення аеробного процесу киснем проведено в роботі Mann A.T., Stephenson T. Параметри установки, прийняті вихідні дані і методики проведення дослідів наведені в дисертації.

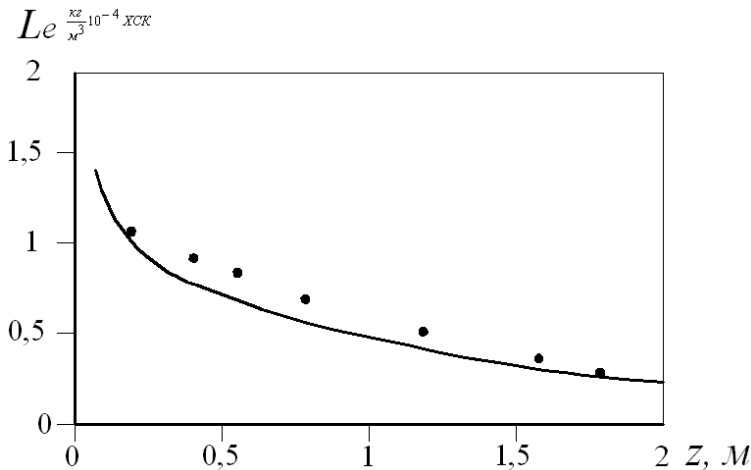


Рис. 6. Графік залежності  $L_e = f(z)$

• - дослідні дані, — розрахункова крива.

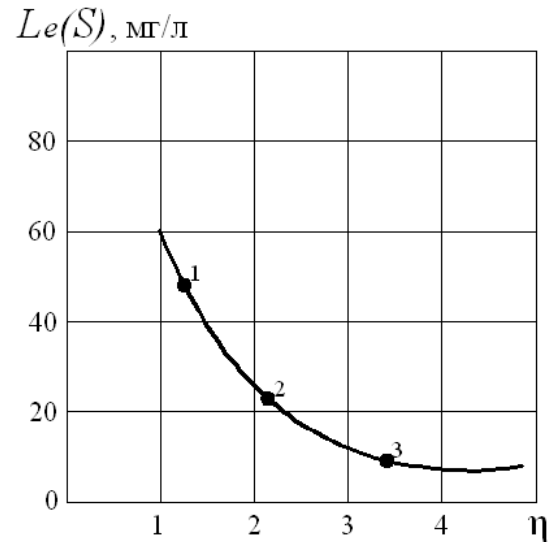


Рис. 7. Графік залежності  $L_e(S) = f(\eta)$

Для проведення порівняльного аналізу результатів теоретичних розрахунків з дослідними даними було використано методику розрахунку, яка наведена в дисертаційній роботі. Згідно цієї методики, з використанням наведених і прийнятих вихідних даних, спочатку було проведено визначення проміжних параметрів (параметри  $A$ ,  $A_*$ ), а потім виконані розрахунки по визначенню зміни концентрації по висоті біофільтра з врахуванням обґрунтованих швидкостей реакції в біоплівці для даного випадку. На рис. 6 наведено порівняльний графік, із якого видно, що розрахункові концентрації розташувались декілька нижче дослідних даних, але в цілому спостерігається відносно добре узгодження між ними.

Так в роботі Яковлева С.В., Воронова Ю.В. на основі обробки лабораторних і напівпромислових досліджень, з використанням, також даних експлуатації виробничих споруд біофільтрів з площинним завантаженням запропоновано розрахунковий графік рис. 7 і емпіричні залежності для розрахунку концентрації в очищеній стічній воді (фільтраті) в одиницях БСК при  $P = 93-96\%$ ,  $F_{\delta n} = \frac{F_{\delta s}}{V} = 90-110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , де  $V$  – об'єм фільтра,  $L_0 = 200-250$  мг/л.

Одержані результати теоретичних розрахунків (розрахунок параметра  $N$ ) будуть повністю співпадати з дослідними даними, якщо прийняти на графіку рис. 7, побудованому в координатах  $L_e(S) = f(\eta)$ , значення параметра  $N$  в точках 1 –  $N = 0,5$ , 2 –  $N = 0,75$ , 3 –  $N = 0,9$ .



В роботі Таварткіладзе І.М., Клепікової В.В. наведені результати численних лабораторних і напіввиробничих досліджень очистки міських і промислових стічних вод на біофільтрах з блоковим завантаженням із піноскла. Використовуючи одержані дослідні дані, на рис. 8 наведено порівняльний графік, побудований в координатах  $L_e(S)=f(B)$ . Як видно з рис. 8 результати розрахунків добре узгоджуються з дослідними даними.

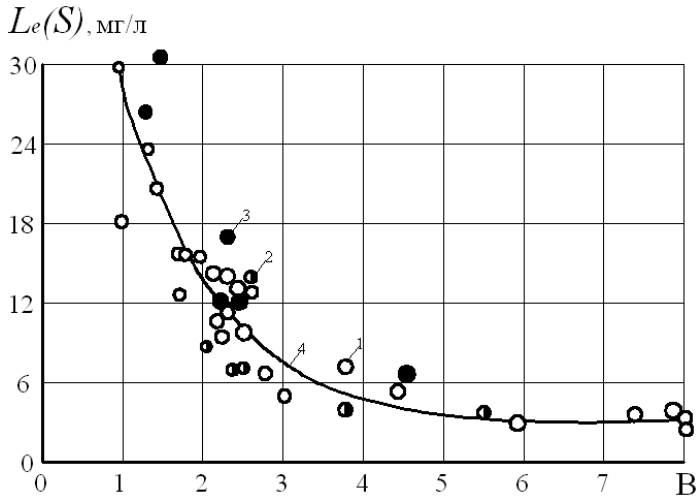


Рис. 8. Графік залежності  $L_e(S)=f(B)$

На графіку (рис. 8): 1 - лабораторні дослідження; 2 - виробничі дослідження, проведені в осінніх умовах; 3 - те ж в зимових умовах; 4 - теоретична крива.

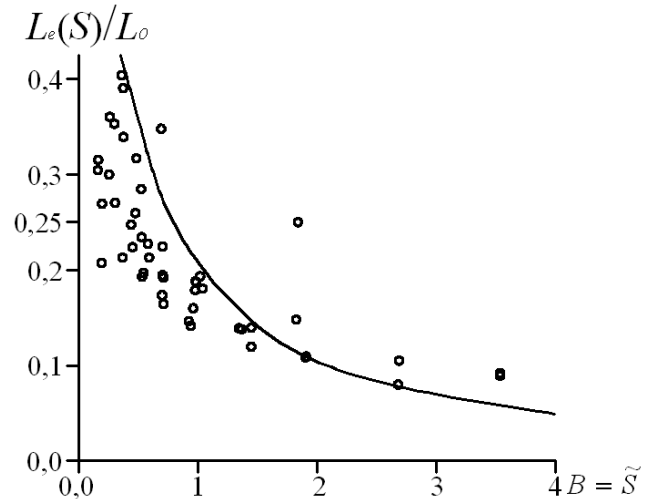


Рис.9. Графік залежності  $L_e(S)=f(B)$

На графіку (рис. 9) приведено залежність  $L_e(S)$  від параметрів  $B$  для біофільтра з гравійним завантаженням, що окислюють міські стічні води.

○ - дослідні дані, — - розрахункова крива

В роботі Вавіліна В.А., з метою оцінки існуючих емпіричних залежностей, використані дослідні дані, які представлені в зазначеній роботі і в перерахованих нами координатах  $L_e(S)=f(B)$  на рис. 9. Це дозволяє провести порівняльну оцінку запропонованих результатів розрахунку з дослідними даними. Розрахунки виконувались з використанням залежностей, представлених в дисертаційній роботі, при визначенні концентрації на виході із біофільтра (фільтраті), зокрема залежності (22).

Як бачимо, при обчисленні параметра  $B$ , особливо при великих значеннях  $\bar{L}_e(S)$ , маємо деяке розходження дослідних даних з розрахунковими, проте в цілому можна вважати задовільним співпадінням між ними.

Крім наведених вище даних інших авторів, нами також здійснено експериментальне вивчення характеристик біофільтра, що знаходиться в с.Циблі Переяслав-Хмельницького району Київської області. Характеристики споруди наступні: площа фільтру  $F = 216 \text{ м}^2$ ,  $S = 1,5 \text{ м}$ ,  $F_{\text{дн}} = 60 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ,  $Q = 1500 \text{ м}^3/\text{доб.}$ , вхідна концентрація  $L_0 = 70 \text{ мгБСК}_5/\text{л}$ , на виході з фільтру  $L_e(S) = 7 \text{ мгБСК}_5/\text{л}$ . Необхідно підібрати такі конструктивні та технологічні характеристики, щоб на виході

(фільтраті) отримати  $L_e(S) = 7$  мгБСК<sub>5</sub>/л при збільшенні витрати води до  $Q = 2000$  м<sup>3</sup>/доб. Результати досліджень та розрахунків представлені на рис. 10.

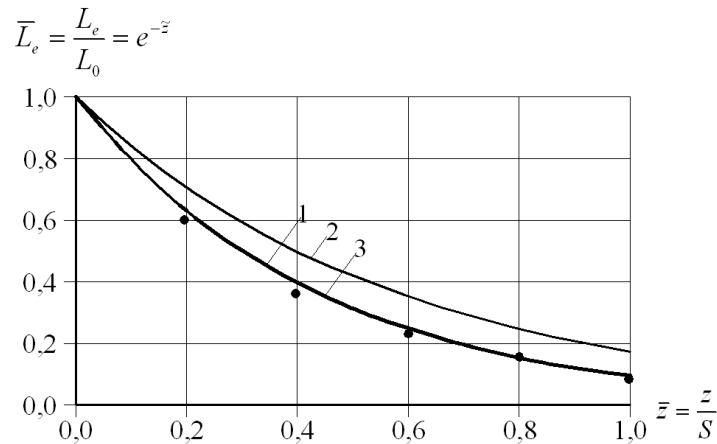


Рис. 10. Графік зміни концентрації органічних забруднень по висоті фільтра.

○ - дослідні дані, — - розрахункова крива

1 – щербеневе завантаження, питома площа поверхні 60 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>,  $S = 1,5$  м,  $F = 216$  м<sup>2</sup>,  $Q = 1500$  м<sup>3</sup>/доб; 2 - щербеневе завантаження, питома площа поверхні 60 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>,  $S = 1,5$  м,  $F = 216$  м<sup>2</sup>,  $Q = 2000$  м<sup>3</sup>/доб; 3 - плоске завантаження, питома площа поверхні 140 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>,  $S = 1,72$  м,  $F = 108$  м<sup>2</sup>,  $Q = 2000$  м<sup>3</sup>/доб.

Проведений порівняльний аналіз теоретичних розрахунків з дослідними даними свідчить про те, що запропоновані розрахунки, на основі прийнятих середньозважених постійних значень товщини біоплівки  $\delta$ , достатньо надійно і адекватно описують розглядуваний процес очистки.

Таким чином, представлені в даній роботі результати і їх аналіз свідчить 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.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних джерел щодо процесу вилучення органічних забруднень на краплинних біофільтрах та визначені особливості утворення біологічної плівки на поверхнях різного типу завантаження в умовах достатнього кисневого режиму.
2. На підставі проведеного аналізу обґрунтована фізична (концептуальна) модель вилучення органічних забруднень методом фільтрування на краплинних біофільтрах.
3. На основі фізичної моделі побудована загальна трифазна математична модель з врахуванням особливості і впливу різних факторів на процеси вилучення органічних забруднень на краплинних біофільтрах (гідравліки руху рідини і повітря (кисню) в ненасиченому середовищі завантаження, масообмінні процеси

і кінетики реакцій, які відбуваються у фазах при вилученні органічних забруднень в умовах аеробного процесу).

4. На підставі реалізації запропонованої математичної моделі, в умовах достатнього забезпечення процесу киснем, розроблені інженерні методи розрахунку параметрів очистки від органічних забруднень на краплинних біофільтрах, зокрема зміни концентрацій по товщині біоплівки і висоті фільтру, при різних кінетиках реакцій біоокислення, технологічних і конструктивних характеристиках біофільтрів для різного типу завантаження і умов їх експлуатації.
5. Сформульовано і запропоновано ряд критеріїв і рекомендацій по визначенню основних, найбільш важливих, вихідних характеристик, оцінено їх вплив на технологічний режим роботи краплинних біофільтрів з закріпленим біоценозом (біоплівкою).
6. Для реалізації і використання запропонованих математичних моделей і методів розрахунку, на підставі критичного аналізу існуючих дослідних даних, а також інших, які є в літературі, наведені рекомендації по вибору параметрів і коефіцієнтів, які входять в рівняння і розрахункові залежності. Оцінено вплив на них різних факторів (температури, рН та інше).
7. Здійснена апробація запропонованих методів розрахунку з залученням лабораторних і виробничих результатів досліджень різних авторів на краплинних біофільтрах з різним типом завантаження. Результати теоретичних розрахунків добре узгоджуються з дослідними даними. Проведено практичне впровадження розробок на реальних об'єктах, що дозволило раціонально і більш надійно обґрунтувати конструктивні параметри краплинних біофільтрів при очистці стічних вод.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Kolpakova O. 2015. Theoretical studies and calculations of wastewater treatment in trickling biofilters // Lublin, MOTROL, Vol. 17, №8 p.165 - 173.

2. Олійник О.Я. До розрахунку очистки стічних вод на біофільтрах (крапельних фільтрах). / О.Я. Олійник, О.А. Колпакова // Науково-технічний збірник «Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки». Вип. 16. – К.: - 2011. – С. 86 -106.

Особистий внесок Колпакової О.А. полягає в аналізі існуючих моделей та методів розрахунку параметрів очистки стічних вод від органічних забруднень на краплинних біофільтрах.

3. Кравчук А.М. Моделювання процесу вилучення органічних забруднень на краплинних фільтрах. / А.М. Кравчук, О.А. Колпакова // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип.42. – Одеса. – 2011. – С.120-126.

Особистий внесок Колпакової О.А. полягає у розгляданні і аналізі більш простих випадків запропонованої загальної математичної моделі.

4. Олейник А.Я. Теоретическое обоснование очистки сточных вод на капельных биофильтрах. / А.Я. Олейник, А.М. Кравчук, О.А. Колпакова // Доповіді НАНУ. – Київ, 2012. №3. С.179-183.

Особистий внесок Колпакової О.А. полягає у аналізі запропонованих фізичних і математичних моделей і прийнятих кінетичних реакцій очистки на краплинних біофільтрах.

5. Олійник О.Я. Моделювання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах. / О.Я. Олійник, О.А. Колпакова // Збірник наукових праць «Екологічна безпека та природокористування». Вип. 16. – К.: - 2014. – С. 68 - 86.

Особистий внесок Колпакової О.А. полягає в побудові розрахункових залежностей і графіків в оцінці впливу різних факторів розрахунку на процеси біоокислення очистки стічних вод від органічних забруднень.

6. Кравчук А.М. Практичні рекомендації до розрахунку очистки стічних вод на краплинних біофільтрах. / А.М. Кравчук, О.А. Колпакова // Науково-технічний збірник «Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки». – Київ, 2014, Вип. 24. – С.147-155.

Особистий внесок Колпакової О.А. полягає у проведенні розрахунків практичних задач, щодо визначення технологічних та конструктивних параметрів очистки та фільтрів з врахуванням особливостей утворення біоплівки на поверхні завантаження.

7. Олійник О.Я. Порівняльний аналіз теоретичних розрахунків з дослідними даними при очистці стічних вод на краплинних біофільтрах. / О.Я. Олійник, О.А. Колпакова // Збірник наукових праць «Екологічна безпека та природокористування». Вип. 17. – К.: - 2015. – С. 45-56.

Особистий внесок Колпакової О.А. полягає у обробці результатів отриманих дослідних даних та проведенні порівняльних розрахунків використовуючи дослідні дані, одержані різними авторами при очистці стічних вод від органічних забруднень на краплинних біофільтрах.

8. Колпакова О.А. Моделювання процесу утилізації субстрату на краплинних біофільтрах. // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА: тези доповідей. – в 2-х частинах. – Ч.1. – К.: КНУБА, 2011. – С.208-209.

9. Колпакова О.А. Методика математичного розрахунку параметрів краплинних біофільтрів. // Матеріали практичної конференції «Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів». – Миргород, Київ.-2012, с.58.

10. Колпакова О.А. Методика розрахунку і вилучення органічних забруднень на краплинних біофільтрах. // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА. Київ, КНУБА 2012. – С.191.

11. Кравчук А.М. До розрахунку біологічних фільтрів для очистки стічних вод. / А.М. Кравчук, О.А. Колпакова // Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції «Технології очищення води – технічні, біологічні та екологічні аспекти». – К.: НТУУ «КПІ» 2013. – С. 87-88.

Особистий внесок Колпакової О.А. полягає у реалізації запропонованої математичної моделі для визначення зміни концентрації органічних забруднень у фільтрі.

## АНОТАЦІЯ

Колпакова О.А. Обґрунтування біологічної очистки стічних вод від органічних забруднень на краплинних біофільтрах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.04 – Водопостачання, каналізація. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2015.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми – підвищення якості біологічної очистки стічних вод від органічних забруднень на краплинних біофільтрах. В роботі досліджено особливості процесів вилучення органічних забруднень на краплинних біофільтрах. Представлена найбільш повна та досконала математична модель, на підставі реалізації якої розроблена інженерна методика розрахунку технологічних та конструктивних параметрів біофільтрів при достатньому забезпеченні процесу біоокислення киснем. Проведено порівняння теоретичних розрахунків з існуючими дослідними даними різних авторів. Представлені рекомендації по визначенню вихідних параметрів та коефіцієнтів, які отримані на підставі проведеного аналізу літературних джерел і експериментальних досліджень. Проведено техніко-економічний аналіз запропонованої методики розрахунку.

Ключові слова: біологічна очистка, стічна вода, краплинний біофільтр, біоплівка, модель, концентрація органічних забруднень, масоперенос, реакція.

## АННОТАЦИЯ

Колпакова О.А. Обоснование биологической очистки сточных вод от органических загрязнений на капельных биофильтрах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.04 – Водоснабжение, канализация. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, 2015.

Диссертация посвящена решению актуальной проблемы – повышение качества биологической очистки сточных вод от органических загрязнений на капельных биофильтрах. На основе выполненного литературного обзора проведен анализ существующих моделей и методов расчета параметров очистки сточных вод от органических загрязнений, а также исследованы особенности образования биологической пленки на поверхности разного типа грузочного материала и процессы извлечения органических загрязнений на капельных биофильтрах.

На основе сформулированных и реализованных математических моделей, разработана и научно обоснована наиболее полная и совершенная математическая модель. На основании реализации данной модели, предложена инженерная методика расчета оптимальных технологических и конструктивных параметров биофильтров при достаточном обеспечении процесса биоокисления кислородом, что позволяет получить необходимый эффект очистки сточных вод от органических загрязнений без использования дополнительных экспериментальных исследований.

При этом учтены ряд факторов и процессов, которые ранее не применялись в расчетах или учитывались недостаточно.

Рекомендации подтверждены сопоставлением теоретических и существующих опытных данных, которые показали высокую степень совпадения, что обеспечивает возможность их надежного использования в производственных условиях с учетом, как особенностей характеристик сточных вод, так и очистных сооружений. Построен алгоритм (схема) инженерного расчета параметров очистки сточных вод от органических загрязнений на капельных биофильтрах. Представлены примеры расчета. Приведены результаты расчетов параметров капельных биофильтров, показано влияние основных факторов и исходных данных на процесс биологической очистки. Выполнен анализ результатов исследований изменения концентрации органических загрязнений по толщине биопленки и высоте фильтра, что позволяет оптимизировать выбор их параметров.

Представлены рекомендации по определению исходных параметров и коэффициентов, полученных на основе проведенного анализа литературных источников и экспериментальных исследований. Обоснованы некоторые определяющие критерии, необходимые при практическом проектировании капельных биофильтров. Предложенные теоретические результаты расчетов используются при решении практических задач очистки сточных вод на капельных биофильтрах с разными материалами загрузки, что позволяет оптимизировать процессы очистки и выбор конструктивных характеристик капельных биофильтров. Проведен технико-экономический анализ предложенной методики расчета.

Ключевые слова: биологическая очистка, сточная вода, капельный биофильтр, биопленка, модель, концентрация органических загрязнений, массоперенос, реакция.

## RESUME

Kolpakova O.A. Justification biological wastewater treatment of organic contaminants in trickling biofilters. – Manuscript.

The thesis is intended to obtain Candidate of Engineering Science degree (PhD) within specialty 05.23.04 - water supply and sewage, Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, 2015.

The dissertation is devoted to solving the actual problem - improving the quality of biological wastewater treatment of organic contaminants to trickling biofilters. In this paper, the features of the process of removing organic contaminants to drop biofilters. Presents the most complete and perfect mathematical model, based on the realization of which developed engineering method of calculation of technological and structural parameters of biofilters with sufficient support biooxidation by oxygen. A comparison of theoretical calculations with existing experimental data of different authors. Recommendations to determine the output parameters and coefficients obtained on the basis of the analysis of the literature and experimental research. A feasibility study of the proposed method of calculation.

Key words: biological treatment, waste water, trickling biofilter, biological film, model, concentration of organic compound, mass transfer, reaction.