

УДК 628.161

М.М. ГІРОЛЬ, доктор технічних наук

Ю.П. ТРАЧ, асистент

Національний університет водного господарства та природокористування,
м.Рівне

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ТЕПЛООБМІННОЇ ВОДИ НА ФІЛЬТРАХ З ПЛАВАЮЧИМ ФІЛЬТРУЮЧИМ ШАРОМ

Висвітлено підхід до математичного моделювання процесу очистки теплої технологічної води спиртових підприємств, яка містить домішки мінерального і органічного походження, при її фільтруванні на фільтрах з плаваючим фільтруючим шаром.

Ключові слова: фільтр; пінополістирольний фільтруючий шар; аераційна камера; біологічне очищення; ефективність.

Изложен подход к математическому моделированию процесса очистки теплой технологической воды спиртовых предприятий, содержащей примеси минерального и органического происхождения, во время ее фильтрования на фильтрах с плавающим фильтрующим слоем.

Ключевые слова: фильтр; фильтрование; пенополистирольные гранулы; биологическое очищение; теплообменная вода.

The mathematical model of the aerobic process of heat-exchanging treatment from organic substance using immobilized microorganisms has been developed, which allows determining the coefficients this model.

Keywords: filter; floating filter; biological treatment, efficiency; heat-exchanging water; immobilized microorganisms.

Постановка проблеми

Вітчизняні спиртові заводи оснащені брагоректифікаційними установками (БРУ) на яких відбувається виготовлення ректифікаційного спирту із бражки. Із метою раціонального використання води та енергоресурсів на спиртових заводах для живлення парових котлів використовують теплообмінну воду, температура якої становить 55°C. Її нагрівання відбувається у теплообмінній апаратурі із одночасним

охолодженням брагоректифікаційної установки (БРУ). Склад теплообмінних вод, якщо вони не забруднюються у технологічному циклі, залежить від якості води в джерелі водопостачання. Використання теплообмінної води для живлення парових котлів передбачає обов'язкове її пом'якшення. Проте вимоги до води, що поступає на Na-катіонітові фільтри суттєво відрізняються від вимог до якості води, що охолоджує певне устаткування на спиртових заводах.

Так наприклад, перед надходженням на фільтр пом'якшення вода не повинна містити загальне залізо понад $0,3 \text{ мг/дм}^3$, а вміст органічних речовин (перманганатна окислюваність) не повинен перевищувати $6 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$. В іншому випадку воду необхідно піддавати попередній очистці. Теплообмінна вода на Зірненському спиртовому заводі Рівненської області містить домішки, концентрація яких перевищує припустимі значення: загальне залізо – $3,5 \text{ мг/дм}^3$, перманганатна окислюваність $35 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$. Виходячи з наведеного відповідно до ДБН В 2.5-74:2013 для забезпечення ефективної роботи технологічної схеми водопідготовки необхідно застосовувати попереднє очищення води на фільтрі із кварцовим піском або на фільтрах з плаваючим фільтруючим шаром [1, 3, 5].

Для очищення води із відносно невисоким вмістом органічних речовин та загального заліза фільтри із плаваючим фільтруючим шаром мають ряд переваг над фільтрами із кварцовим піском [6]. За однакових умов роботи фільтрів біологічне окислення органічних домішок та вилучення окисленої форми заліза інтенсивніше відбувається у фільтруючому шарі зі спінених гранул полістиролу і становить понад 90-95%. В той час як за таких саме умов на фільтрі із кварцовим піском величини згаданих параметрів не перевищують 85%. Через суттєву перевагу в ефективності очищення теплообмінної води на фільтрі із пінополістирольним фільтруючим шаром, на практиці для вирішення проблеми очищення води, перевага надається саме такому фільтру, у якого напрямок фільтраційного потоку води є висхідним.

Метою роботи є пошук та обґрунтування математичної моделі біологічного очищення теплообмінної води фільтруванням, яка враховувала б температуру води 55°C , кінетику біологічних процесів, що відбуваються у фільтруючому шарі фільтра.

Сучасні методики розрахунку фільтра із пінополістирольним фільтруючим шаром для біологічного очищення теплої теплообмінної води

Для опису процесів що протікають в товщі фільтруючого шару під час фільтрування води застосовують математичні моделі, які враховують параметри фільтруючого шару та процеси затримки домішок в його товщі. Значна частина відомих математичних моделей містить опис кінетичних процесів аеробної гетеротрофної конверсії органічних речовин, нітрифікації, денітрифікації та інші. Їхня структура певною мірою залежить від виду

забруднюючих речовин та лімітуючи факторів [8]. Окрім того, умовно математичні моделі, які описують біологічне окислення органічних речовин на біофільтрі можна поділити на ті, у яких лімітується концентрація розчинного кисню і ті, в яких не лімітується концентрація кисню. Останні застосовують для опису біохімічної очистки води із невисоким вмістом органічних речовин (концентрація домішок органічного походження сягає 5,7...6,0 мг O₂/дм³).

На основі вивчення та аналізу механізмів і особливостей процесу фільтрування теплообмінної води, температура якої 55°C, що містить легкоокислювальні органічні речовини, нами обрана математична модель, яка описує процес біологічного окислення домішок у фільтрі за умов достатньої кількості кисню [7, 9]. Для покращення процесу насичення теплообмінної води киснем повітря у фільтр із пінополістирольним фільтруючим шаром було влаштовано аераційну камеру, яка являла собою центральну трубу у середині корпусу фільтра. Ця аераційна камера містила вільноплаваючі зерна спіненого полістиролу. Висота шару складає 0,7 м. Присутність в об'ємі центральної труби гранул полістиролу викликана необхідністю диспергування повітря, яке захоплюється струменем падаючого потоку теплообмінної води і проникає під нижню межу плаваючого шару. Крім того, зерна спіненого полістиролу в цій камері перешкоджають швидкому спливанню диспергованого повітря, тим самим збільшуючи час контакту повітря із водою. Експериментально встановлено, що насичення води киснем повітря в аераційній камері фільтра забезпечує його концентрацію 5,7-6,0 мгO₂/дм³.

Особливість обраної моделі, яка розроблена професорами Олійником О.Я. та Поляковим В.Л. полягає у тому, що при урахуванні кінетичних процесів які протікають у біологічній плівці, для певних параметрів процесу фільтрування, розраховується значення висоти фільтруючого шару. За цих умов:

– нестационарне рівняння матеріального балансу маси субстрату для відносно необмеженої ділянки тонкого активного шару біоплівки за умови, що зерна фільтруючого шару мають сферичну форму:

$$D_L \left(\frac{\partial^2 L}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial L}{\partial r} \right) - R_L = \frac{\partial L}{\partial t} \quad (1)$$

– рівняння для потоку субстрату до поверхні біоплівки із об'єму рідини (фільтра) через гідравлічну плівку (прикордонний шар):

$$N_L = K_L (L_e - L) \quad (2)$$

– нестационарне рівняння матеріального балансу для субстрату в об'ємі фільтра

$$n_c \frac{\partial L_e}{\partial t} = -v \frac{\partial L_e}{\partial z} - \frac{F_s}{F} K_L (L_e - L) \Big|_{R+\delta} \quad (3)$$

де: L , L_e – відповідно, концентрації субстрату у біоплівці та очищувальній

воді, $\text{мгО}_2/\text{дм}^3$; D_L – коефіцієнт молекулярної дифузії субстрату у біоплівці $\text{м}^2/\text{год}$; R_L – швидкість окислення органічних речовин, $\text{г}/(\text{м}^3/\text{год})$; K_L – коефіцієнт масоперенесення субстрату в гідравлічній плівці, $\text{м}/\text{год}$; v – швидкість фільтрування, $\text{м}/\text{год}$; F – площа фільтра, м^2 ; F_δ – площа поверхні біоплівки на одиницю висоти фільтра, м ; n_c – пористість фільтруючого шару; δ , δ_n – відповідно, товщини активної (аеробної) біоплівки та гідравлічної плівки, м .

Після розв'язку вище наведеної системи диференціальних рівнянь, при витримуванні певних граничних умов, а саме:

1) на поверхні розділення плівок ($r = R + \delta$) приймається, що потік субстрату до біоплівки дорівнює притоку до неї через гідравлічну плівку:

$$D_L \frac{\partial L}{\partial r} = K_L (L_e - L) \Big|_{r=R+\delta} \quad (4)$$

2) на поверхні розподілу середовища та біоплівки ($r = R$) приймається, що надходження субстрату у фільтруючий шар відсутнє і дорівнює нулю:

$$D_L \frac{\partial L}{\partial r} = 0 \Big|_{r=R} \quad (5)$$

Після того, як було встановлено граничні умови та здійснено розв'язок системи диференціальних рівнянь (1-3), було визначено формулу розрахунку висоти фільтруючого шару фільтра-біореактора. Висота фільтруючого шару розраховується наступним чином:

$$H = \frac{V}{A_0} \ln \frac{L_e}{L_{\text{вих}}} \quad (6)$$

де V – швидкість фільтрування, $\text{м}/\text{год}$; A_0 – параметр, який враховує кінетику біологічних процесів у біологічній плівці; $L_{\text{вих}}$ – допустима концентрація органічних речовин у фільтраті, $\text{мгО}_2/\text{дм}^3$.

Для практичного застосування математичного виразу (6) необхідно визначити числові значення емпіричних коефіцієнтів, які описують кінетику біохімічних процесів у біоплівці. Ці емпіричні коефіцієнти не завжди можуть бути незалежними від умов очистки води. Тому, для проектування біофільтра із пінополістирольним фільтруючим шаром для біологічного очищення гарячої теплообмінної води температура якої 55°C важливим є дослідження емпіричних коефіцієнтів та визначення їх числових значень.

На основі існуючих наукових праць у галузі дослідження кінетичних процесів у біологічній плівці [7, 8] у таблиці 1 наведено діапазон можливих числових значень згаданих коефіцієнтів.

Числові значення констант та коефіцієнтів

Номер п/п	Коефіцієнт	Одиниця виміру	Числовий діапазон існування або формула розрахунку
1	Коефіцієнт трансформації субстрату до біомаси мікроорганізмів	Y, мг біомаси/ мг ХПК	0,3...0,7
2	Концентрація активної частини біомаси	X, г/дм ³	< 30
3	Константа напівнасичення по субстрату	K _m , г·ХПК / м ³	10-30
4	Коефіцієнт молекулярної дифузії субстрату в біоплівці	D _L , м ² /год	(1,25...3,0)·10 ⁻⁶
5	Товщина активної біоплівки	δ, м	(1...2)·10 ⁻⁴
6	Коефіцієнт масоперенесення субстрату з рідини в біоплівку	K _L , м/год	0,025...0,08

Визначення коефіцієнтів математичної моделі біологічного очищення води.

Числові значення коефіцієнтів, що наведено у таблиці у деяких випадках мають широкий діапазон зміни, що свідчить про ймовірну їх залежність від інших факторів, зумовлених особливістю біологічних процесів при високих температурах. Тому для розрахунку біофільтра із пінополістирольним фільтруючим шаром, в якому протікає процес фільтрування теплообмінної води важливим є визначення та обґрунтувати числових значень коефіцієнтів математичної моделі. Це можливо здійснити завдяки встановленню їх фізичної суті, визначення можливих взаємозв'язків із параметрами фільтрування.

Термофільні мікроорганізми, через ряд особливостей внутрішньої будови клітини, мають пришвидшений обмін речовин, а отже й швидкість розмноження. При відсутності суттєвого коливання вмісту органічних речовин у теплообмінній воді, що надходить на фільтр, формування біологічної плівки настає відносно швидко і утворюються стаціонарні умови. На швидкість росту біомаси впливає температура, тому швидкість росту мікроорганізмів μ_{\max} при конкретних температурах можна описати рівнянням Вант-Гоффа [8]:

$$\mu_{\max}(T) = \mu_{\max}(20^{\circ}\text{C}) \cdot \exp(\chi(T - 20)) \quad (7)$$

де χ – температурна константа, град⁻¹ ($\chi = 0,06...0,08$).

Використання такого рівняння допускається для описанні аеробних процесів в температурному інтервалі 20... 32°C. Проте, існують відомості [8], що гетеротрофна конверсія може відбуватися в термофільних умовах

(50...60°C), при цьому значення швидкостей приблизно на 50% вище, ніж при 35°C.

На основі існуючих наукових досліджень [7-9], нами було обґрунтовано числові значення коефіцієнтів математичної моделі, а саме коефіцієнт дифузії $D_L = 2,65 \cdot 10^{-6}$ м²/год, $\mu_{\max} = 1,8$ год⁻¹, $\delta = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м. Проте невідомими є ряд коефіцієнтів математичної моделі, а саме коефіцієнт напівнасичення за субстратом K_m , товщина гідравлічної плівки δ_n , концентрації біомаси у фільтруючому шарі фільтра X , коефіцієнт трансформації субстрату у біомасу Y . Для встановлення числових значень вище наведених невідомих коефіцієнтів математичної моделі і встановлення їх можливої функціональної залежності від параметрів фільтрування було проведено експериментальні дослідження.

Для цієї мети було складено програму на мові TURBO PASCAL 7.0. В основу складеної програми лягли отримані експериментальні дані, а саме визначенні висоти фільтруючого шару при різних значеннях швидкості фільтрування (4, 6, 7 м/год) та діаметру гранул пінополістиролу (0,75 мм, 1,25 мм, 1,75 мм). При цьому ефективність очистки та тривалість фільтроциклу для кожної комбінації були приблизно однакові 80...95% та 12...14 годин відповідно. Дана програма, при задаванні отриманих експериментальних даних (d , V , H) підбирала можливі числові значення досліджувальних коефіцієнтів математичної моделі. Для кожної отриманої можливої комбінації числових значень коефіцієнтів моделі передбачався розрахунок середнього квадратичного відхилення і він повинен бути меншим за 10^{-5} . Середнє значення Y становило 0,55 мг біомаси/мг, а середнє значення δ_n було прийнято $0,75 \cdot 10^{-4}$ м.

Окрім того, за допомогою цієї програми і наступного аналізу отриманих можливих числових значень було встановлено взаємозв'язок між коефіцієнтами математичної моделі із параметрами фільтрування. Для кожної отриманої можливої комбінації числових значень коефіцієнтів математичної моделі передбачався розрахунок середнього квадратичного відхилення, який має бути меншим за 10^{-5} . Отримано середні числові значення коефіцієнта K_m за фільтроцикл при досліджених швидкостях фільтрування та діаметрах гранул полістиролу, виявлено існування взаємозв'язку із параметрами фільтрування, залежність концентрації біомаси X та коефіцієнта напівнасичення K_m від параметрів фільтрування (швидкості фільтрування та діаметру гранул фільтруючого шару). Отримані залежності проілюстровано на рис.1 та рис.2.

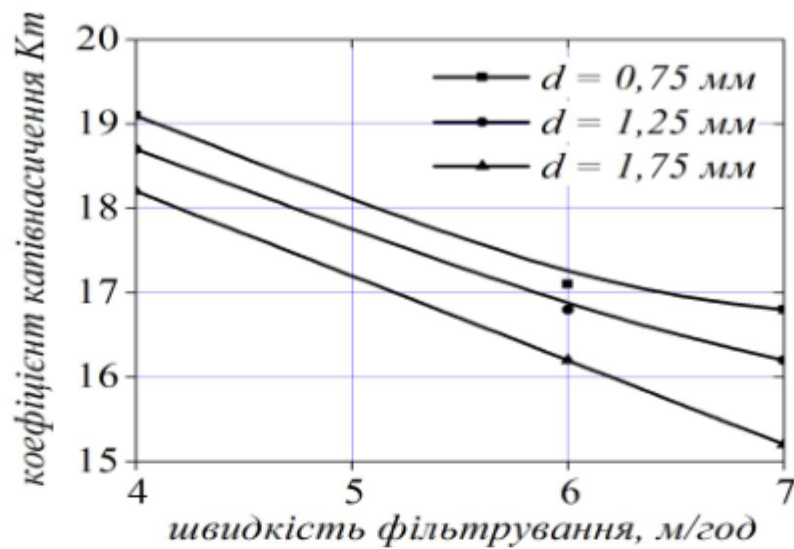


Рис.1. Залежність коефіцієнта напівнасичення за субстратом від швидкості фільтрування

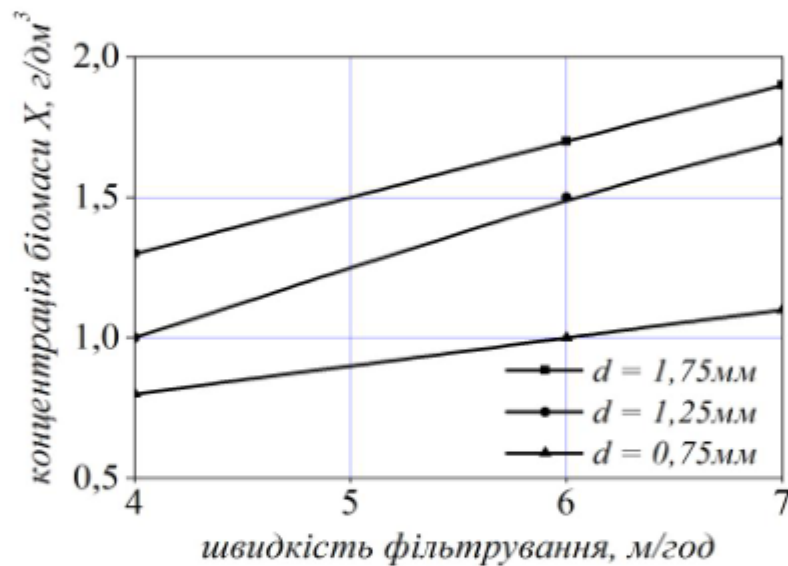


Рис.2. Залежність концентрації біомаси у фільтруючому шарі від швидкості фільтрування

Результати числових досліджень дозволили отримати числові значення коефіцієнтів математичної моделі при змінних параметрах фільтрування. Досліджуючи вплив швидкості фільтрування та діаметр гранул пінополістиролу на числові значення коефіцієнта K_m та концентрацію біомаси X встановлено їх функціональну залежність від параметрів фільтрування. А саме:

$$K_m = 20 \cdot V^{-0,09d} \quad (8)$$

$$X = 0,9 \cdot V^{0,37d^{-0,1d}} \quad (9)$$

Встановлення числових значень емпіричних коефіцієнтів математичної

моделі та їх залежність від параметрів фільтрування дає можливість здійснити розрахунок фільтра-біореактора для очищення теплообмінної води у спиртовому виробництві. Розрахунок такої очисної споруди означає визначення раціональних значень параметрів фільтрування, а саме швидкості фільтрування, діаметру гранул пінополістиролу і висоти фільтруючого шару. Від числових значень, вище наведених параметрів фільтрування, залежить розмір самого фільтра-біореактора, розмір приміщення вузла попереднього очищення теплообмінної води для енергетичних об'єктів, висота приміщення та тривалість фільтроциклу.

При виборі та обґрунтуванні раціональних значень параметрів фільтрування важливим є те, що продуктивність вузла попередньої очистки є незмінною величиною і для енергетичних об'єктів Зірненського спиртового заводу вона становить $8,3 \text{ м}^3/\text{год}$.

Експериментально встановлено, що фільтр-біореактр може забезпечувати необхідну ефективність вилучення як органічних речовин, так і окисного заліза (перманганат на окислюваність) $< 6 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$, окисне залізо $< 0,3 \text{ мг}/\text{дм}^3$) при тривалості фільтроциклу 12 год та висоті фільтруючого шару 1,1...1,3 м. Більша тривалість фільтроциклу може досягатися за таких умов: висота фільтруючого шару більша за 1,1...1,3 м, діаметр гранул пінополістиролу менший за 0,75 мм, швидкість фільтрування 2 м/год і менше.

Оцінюючи вище сказане, встановлення більшої тривалості фільтроциклу ніж 12 год і забезпечення необхідної ефективності очистки, продуктивності фільтра-біореактора необхідно суттєво збільшити розміри, як очисної споруди, так і розміри приміщення. Окрім того, вибір саме такої тривалості фільтроциклу як 12 год дозволить своєчасно здійснювати промивку фільтра на виробництві і для обслуговування очисної споруди необхідна буде одна людина.

Проведені експериментальні дослідження роботи фільтра-біореактора показали, що із збільшенням діаметру гранул пінополістирольного фільтруючого шару для забезпечення необхідної ефективності при незмінній висоті фільтруючого шару зменшується швидкість фільтрування. Результати такої залежності наведені на рис.3. За таких умов необхідним є збільшення діаметру фільтра-біореактора.

Це вимагає збільшення кількості металу для виготовлення очисної споруди, збільшення приміщення вузла попередньої очистки теплообмінної води у спиртовому виробництві. Так наприклад, при очищенні води за таких параметрів фільтрування як $V = 4 \text{ м}/\text{год}$, $d = 1,25 \text{ мм}$ та продуктивності $8,3 \text{ м}^3/\text{год}$ діаметр фільтра-біореактора становить 1,4 м. Із збільшенням діаметру пінополістирольного фільтруючого шару від 1,25 мм до 1,75 мм, тобто необхідно зменшити швидкість фільтрування і збільшити діаметр фільтра. Це призведе й до збільшення площі приміщення вузла попередньої очистки теплообмінної води для живлення енергетичних об'єктів.

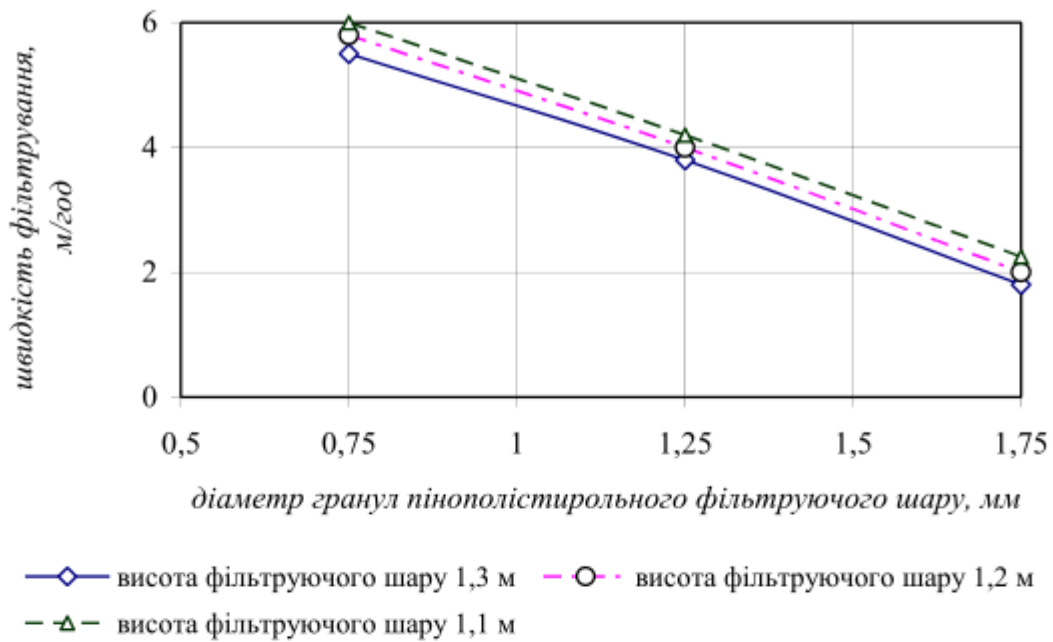


Рис.3 Залежність діаметру гранул пінополістирольного фільтруючого шару від швидкості фільтрування при відповідних значеннях висоти фільтруючого шару

Вибір зерен пінополістиролу для влаштування фільтруючого шару діаметром 0,75 мм та менше є недоцільним. Це пояснюється тим, що хоч і діаметр фільтра-біореактора буде мати менший діаметр, у порівнянні із фільтром-біореактором із зернами пінополістиролу, діаметр яких більший за 0,75 мм, проте буде спостерігатися суттєві втрати напору на очисній споруді, і її необхідно буде виводити у режим промивки раніше, ніж буде спостерігатися погіршення якості фільтрату. На спиртовому заводі можна забезпечити самопливну подачу теплообмінної води на очисну споруду, і це дозволяє виключити насосну станцію. Проте, вибір найменших діаметрів гранул пінополістиролу фільтруючого шару (рис.3) буде вимагати збільшення висоти подачі води на очисну споруду, а отже може виникнути проблема існування такого приміщення на спиртовому виробництві.

Висновки

Встановлено вплив температури у 55°C очищуваної теплообмінної води на параметри розвиненої математичної моделі, а саме коефіцієнти: молекулярної дифузії D_L , максимальної питомої швидкості росту мікроорганізмів μ_{max} . Обґрунтовано взаємозв'язок концентрації біомаси у фільтруючому шарі X , коефіцієнта K_m із швидкістю фільтрування та діаметром гранул пінополістиролу. Встановлено числові значення емпіричних коефіцієнтів математичної моделі та їх залежність від параметрів фільтрування, що дає можливість здійснити розрахунок фільтра для біологічного очищення теплообмінної води.

У підсумку слід сказати, що для успішного проектування фільтра-біореактора для попереднього очищення теплообмінної води у спиртовому виробництві, який би забезпечував необхідну ефективність очищення теплообмінної води і тривалість фільтроциклу 12 год, слід використовувати вибрану математичну модель та отримані залежності її коефіцієнтів від параметрів фільтрування, і це дозволить проектувати фільтр-біореактор без проведення попередніх експериментальних досліджень.

Список літератури

1. *Гіроль М.М., Гіроль А.М., Гіроль А.М.* Технології водовідведення промислових підприємств. Навчальний посібник. – Рівне. – 611 с.
2. *Гіроль А.Н., Якимчук Б.Н., Дикий В.П.* Очистка декарбонизованной воды на фильтрах с плавающей загрузкой // Вісник Одеської державної академії будівництва та арх-ри (№ 19): Зб. наук. праць. – Одеса, 2005. С.114–118.
3. *Журба М.Г.* Водоочистные фильтры с плавающей загрузкой. – М.: «АкваПромИнжиниринг», 2011. – 536 с.
4. *Орлов В.О., Зошук А.М., Мартинов Ю.С.* Пінополістирольні фільтри в технологічних схемах водопідготовки. За заг.ред В.О.Орлова. – Рівне РДТУ, 1999. – 143 с.
5. *Орлов В.О., Мартынов С.Ю., Зошук В.О.* Технологические схемы очистки воды с пенополистирольными фильтрами // Вода: экология и технология: 7-й Международный конгресс. ч.1: М.: 30 – 2 июня 2006. – С. 580-581.
6. *Охримюк Б.Ф.* Биологический фильтр с подвижной загрузкой из пенополистирола. Автореф. канд.дис. – М., 1988. – 25 с.
7. *Олейник А.Я., Василенко Т.В., Рыбаченко С.А., Хамад Ихаб Ахмад* Моделирование процессов доочистки хозяйственно-бытовых сточных вод на фильтрах // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.:КНУБА, 2006. – Вип.4. – С.67-68.
8. *Хенце М., Армос П., Ля-кур-янсен Й., Арван Э.* Очистка сточных вод (Биологические и химические процессы). Перев. с англ., к.т.н. Т.П.Мосоловой, под ред д.х.н., С.В.Калюжного. – М.: Изд. «Мир», 2004. – 480 с.
9. *Олейник А.Я., Поляков В.Л.* Теоретические исследования фильтрационных процессов в пористых средах с изменяющимися водно-физическими свойствами // Прикладна гідромеханіка. – 2007. – Том 9, № 2-3. – С.122-138.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2014