

**ВОДОПОСТАЧАННЯ, ВОДОВІДВЕДЕННЯ**

УДК 628.161.2

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ТЕПЛООБМІННОЇ ВОДИ НА ФІЛЬТРАХ З ПЛАВАЮЧИМ ФІЛЬТРУЮЧИМ ШАРОМ**

**О. М. Логацька**

студентка 4-го курсу, група ВВ-41, навчально-науковий інститут будівництва і архітектури  
Науковий керівник – к.т.н., асистент Ю. П. Трач

*Національний університет водного господарства та природокористування,  
м. Рівне, Україна*

**Висвітлено теоретичний 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:** теплообмінна вода, фільтр, фільтруючий шар, математична модель, ХПК, завислі речовини, пінополістирол, біологічна плівка, аерація, окислення, органічні домішки.

**Изложен теоретический 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:** теплообменная вода, фильтр, фильтрующий шар, математическая модель, ХПК, взвешенные вещества, пенополистирол, биологическая пленка, аэрация, окисление, органические примеси.

**Theoretical approach to the mathematical design of process of warm technological water containing the admixtures of mineral and organic origin treatment of spiriting enterprises is expounded, during its filtration on filters with a floating layer.**

**Keywords:** heat-exchange water, filter, filter layer, mathematical model, COD, suspended solids, polystyrene, biological film, aeration, oxidation, organic impurities.

Для живлення парових котлів у спиртовому виробництві використовують теплообмінну воду, температура якої становить 55° С. В існуючих технологічних циклах виробництва теплообмінна вода містить підвищене значення ХПК – 34-35 мгО<sub>2</sub>/л та завислі речовини у вигляді окисленого заліза. Окислене залізо у теплообмінній воді присутнє у кількості 2-6 мг/дм<sup>3</sup>. Його наявність пояснюється тим, що для охолодження теплообмінного устаткування використовується вода із свердловини, вміст загального заліза у якій сягає 3,5-4,1 мг/дм<sup>3</sup>, та експлуатуються старі сталеві труби, якими здійснюється транспортування теплообмінної води.

Існуючі технічні рішення не можуть повністю впоратися з посталою проблемою. Через присутність у воді домішок органічного походження спостерігається формування басейнів бруду у товщі зернистого шару і фільтри швидко замулюються і виходять з ладу [1].

Одним із можливих варіантів вирішення проблеми є застосування фільтрів із пінополістирольним фільтруючим шаром, які добре зарекомендували себе на багатьох станціях очистки води. За наявності в воді домішок органічного походження такі фільтри спроможні працювати в режимі біофільтра, що має особливе значення для умов наших досліджень [1]. Аеробна біодеструкція органічних речовин в таких біофільтрах протікає

завдяки наявності термофільних бактерій, які містять слиз. Складовою слизу є полісахарид (glycocalyx), який збільшує здатність бактерій скупчуватися на поверхні фільтруючого матеріалу. Імобілізовані мікроорганізми утворюють велику колонію, оскільки шар полісахаридного слизу допомагає «прилипанню» як інших бактерій, так й поживних речовин, що «пропливають» біля них. На поверхні гранул фільтра утворюється так званий біоорганомінеральний комплекс, який в технології біоочистки називається біологічною плівкою [2].

Відомо, що із підвищенням температури розчинність кисню зменшується. Для забезпечення аеробних біохімічних процесів у фільтруючому шарі теплообмінну воду, перед поступленням її на фільтр, аерують шляхом переливу. Завдяки цьому концентрація розчинного кисню у воді збільшується. У досліджуваній теплообмінній воді значення концентрації кисню коливалося від 3,7 до 4,2 мг  $O_2/дм^3$ .

Для опису процесів окислення домішок в біофільтрі математична модель повинна враховувати зміну параметрів фільтрування та особливості біохімічних процесів у фільтруючому шарі. Математичні моделі, які пропонуються більшістю авторів, в своїй основі містять опис кінетичних процесів аеробної гетеротрофної конверсії органічних речовин, нітрифікації, денітрифікації та інші.

На основі вивчення та аналізу механізмів і особливостей процесу очистки теплообмінної води фільтруванням переважно від легкоокислювальних органічних речовин нами обрана математична модель, що описує процес біохімічного окислення домішок у фільтрі за умов достатньої кількості кисню [3]. Суть цієї моделі полягає у тому, що при урахуванні кінетичних процесів, які протікають у біологічній плівці, для певних параметрів фільтрування розраховується значення висоти фільтруючого шару.

Вибрана математична модель біохімічної очистки води містить ряд емпіричних коефіцієнтів. Ці емпіричні коефіцієнти не завжди можуть бути постійними і незалежними від умов очистки води. Тому, для проектування біофільтра із пінополістирольним фільтруючим шаром для біохімічної очистки гарячої теплообмінної води, температура якої дорівнює  $55^{\circ}C$ , важливим є дослідження емпіричних коефіцієнтів та визначення їх числових значень.

На основі існуючих наукових праць у галузі дослідження кінетичних процесів у біологічній плівці [2; 4] у табличному варіанті (табл. 1) наведено діапазон можливих числових значень коефіцієнтів, що описують ці процеси і входять до складу математичної моделі біохімічної очистки.

Таблиця 1

Числові значення констант та коефіцієнтів

№ з/п	Коефіцієнт	Одиниця виміру	Числовий діапазон існування або формула розрахунку
1	Економічний коефіцієнт трансформації субстрату до біомаси мікроорганізмів	Y, мг біомаси/ мг ХПК	0,3-0,7
2	Концентрація активної частини біомаси	X, г/дм <sup>3</sup>	< 30
3	Константа напівнасичення по субстрату	K <sub>m</sub> , г·ХПК / м <sup>3</sup>	10-30
4	Коефіцієнт молекулярної дифузії субстрату в біоплівці	D <sub>L</sub> , м <sup>2</sup> /год	(1,25-3,0)·10 <sup>-6</sup>
5	Товщина активної біоплівки	δ, м	(1-2)·10 <sup>-4</sup>
6	Товщина гідравлічної плівки δ <sub>n</sub>	δ <sub>n</sub> м	(0,75-1)·10 <sup>-4</sup> м

Числові діапазони значень коефіцієнтів, що наведені у таблиці 1, у деяких випадках мають широке значення та не враховують особливості біохімічних процесів при високих температурах. Тому для розрахунку біофільтра із пінополістирольним фільтруючим шаром, який очищує теплообмінну воду, важливим є визначення та обґрунтування числових значень коефіцієнтів математичної моделі. Це можливо здійснити завдяки встановленню їх фізичної

суті, визначенню можливості взаємозв'язків із параметрами фільтрування та проведенню експериментальних досліджень.

Для визначення товщини пінополістирольного фільтруючого шару нами було проведено серію дослідів з вивчення кінетики затримки органічних речовин по висоті фільтруючого шару. Досліди проведено для  $d=0,75; 1,25; 1,75$  мм, і  $V=2; 4; 6$  м/год. При цьому ефективність очистки та тривалість фільтроциклу для кожної комбінації були приблизно однакові і складала відповідно 80-95% та 18-24 годин. Товщина фільтруючого шару визначалась за результатами експериментальних досліджень (табл. 2).

Таблиця 2

Значення висоти фільтруючого шару при відповідних параметрах фільтрування

Діаметр гранул пінополістиролу, мм	Швидкість фільтрування, м/год		
	2	4	6
0,75	0,90	1,05	1,1
1,25	1,05	1,2	1,3
1,75	1,3	1,4	1,5

Для встановлення фізичної суті коефіцієнтів математичної моделі було зроблено аналіз кінетичних процесів, який відбувався у дві стадії:

1. Визначення, який субстрат (кисень чи органічні речовини) є лімітуючим, і, відповідно, який контролює кінетику біохімічного процесу.

2. Визначення порядку реакції біохімічного окислення органічних речовин.

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 поступає на фільтр, формування біологічної плівки настає відносно швидко і утворюються стаціонарні умови. На швидкість росту біомаси впливає температура, тому швидкість росту мікроорганізмів  $\mu_{\max}$  при конкретних температурах можна описати рівнянням Вант-Гоффа [2]:

$$\mu_{\max}(T) = \mu_{\max}(20^{\circ}\text{C}) \cdot \exp(\chi(T - 20)) \quad , \quad (1)$$

де  $\chi$  – температурна константа, град<sup>-1</sup> ( $\chi = 0,06-0,08$ ).

Використання такого рівняння допускається для опису аеробних процесів в температурному інтервалі від 20 до 32° С. Проте, існують відомості [2], що гетеротрофна конверсія може відбуватися в термофільних умовах (50-60° С) і при цьому значення швидкостей приблизно на 50% вище, ніж при 35° С.

На основі існуючих наукових досліджень у літературних джерелах [3; 4], нами було обґрунтовано числові значення коефіцієнтів математичної моделі, а саме коефіцієнт дифузії  $D_L = 2,65 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/год,  $\mu_{\max} = 1,8$  год<sup>-1</sup>,  $\delta = 1,5 \cdot 10^{-4}$  м. Теоретичне значення коефіцієнта молекулярної дифузії крохмалю при підвищеній температурі 55° С становить приблизно  $2,6 \cdot 10^{-6} - 2,7 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/год. Товщина біологічної плівки, яка утворена навколо гранул фільтруючого шару, може коливатися в межах відомого числового діапазону  $(1-2) \cdot 10^{-4}$  м.

Проте невідомими є ряд коефіцієнтів математичної моделі, а саме коефіцієнт напівнасичення за субстратом  $K_m$ , товщина гідравлічної плівки  $\delta_n$ , концентрації біомаси у фільтруючому шарі фільтра  $X$ , коефіцієнт трансформації субстрату у біомасу  $Y$ .

Для успішного пошуку числових значень коефіцієнтів математичної моделі  $X, Y, \delta_n, K_m$  на основі математичної моделі [3; 4] було складено програму на мові TURBO PASCAL 7.0. Окрім того, за допомогою цієї програми і наступного аналізу отриманих можливих числових значень було встановлено взаємозв'язок між коефіцієнтами математичної моделі із параметрами фільтрування.

Враховуючи те, що товщина гідравлічної плівки  $\delta_n$  залежить від коефіцієнту масоперенесення  $K_L$  та коефіцієнту молекулярної дифузії  $D_L$  із можливо існуючого діапазону  $(0,75-1) \cdot 10^{-4}$  м був вибраний крок перебору  $0,5 \cdot 10^{-5}$ . Проаналізувавши отримані можливі числові значення товщини гідравлічної плівки, було встановлено, що її значення коливалось від  $0,7 \cdot 10^{-4}$  м до  $0,8 \cdot 10^{-4}$  м. Тому для наступних розрахунків було прийнято середнє значення  $0,75 \cdot 10^{-4}$  м.

Для визначення числового значення коефіцієнта напівнасичення за субстратом  $K_m$  із можливо існуючого діапазону  $10-30$  г·ХПК/м<sup>3</sup> був обраний крок перебору 0,1. Такий вибраний крок перебору дозволив встановити можливий зв'язок даного коефіцієнту із параметрами фільтрування, оскільки діапазон можливого існування є широким. Після виконання перебору можливих числових значень цього коефіцієнту при різних параметрах фільтрування було визначено середнє значення коефіцієнта  $K_m$  за фільтроцикл. Проаналізувавши отримані середні числові значення коефіцієнта  $K_m$  за фільтроцикл при досліджуваних швидкостях фільтрування та діаметрах гранул полістиролу був виявлений його взаємозв'язок із параметрами фільтрування. Отриманий взаємозв'язок наведено на рис. 1.

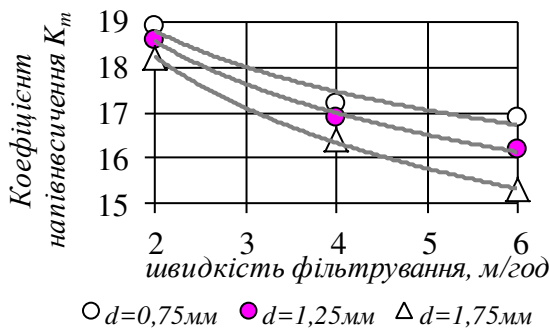


Рис. 1. Залежність коефіцієнта напівнасичення за субстратом  $K_m$  від швидкості фільтрування

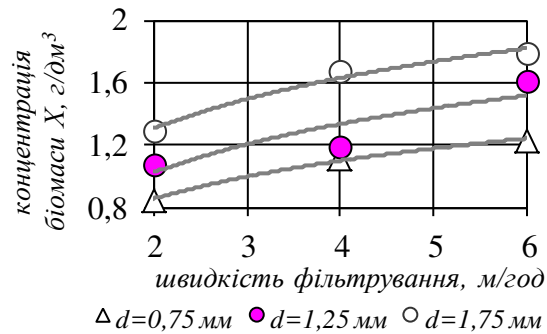


Рис. 2. Залежність концентрації біомаси від швидкості фільтрування

Із рис. 1 видно, що існує і взаємозв'язок між діаметром гранул пінополістирольного фільтруючого шару (при однаковій швидкості фільтрування) та коефіцієнтом  $K_m$ . Збільшення діаметру гранул фільтруючого шару в цьому діапазоні зміни та швидкості фільтрування призводить до зменшення коефіцієнта напівнасичення.

**Наступним кроком** досліджень впливу коефіцієнтів математичної моделі на числове значення висоти фільтруючого шару при різних діаметрах гранул та швидкості фільтрування було порівняння експериментальних даних із розрахунковим, тобто тими, що було отримано після встановлення їх функціональної залежності (рис. 1 та рис. 2).

**Висновки.** На основі проведених досліджень встановлено можливість використання математичної моделі біохімічної очистки води на фільтрі із зернистим фільтруючим шаром для проектування та розрахунку біохімічної очистки теплообмінної води температура якої  $55^{\circ}\text{C}$  у спиртовому виробництві. Доведено, що коефіцієнти використаної математичної моделі  $D_L$ ,  $\mu$ , не є сталими величинами і залежать від температури очищувальної води.

1. Доочистка сточних вод на зернистих фільтрах / Н. Н. Гироль, М. Г. Журба, Г. М. Семчук, Б. Н. Якимчук ; под общ.ред. Н. Н. Гириля. – К. : Типография Левобережная, 1998. – 92 с. 2. Очистка сточных вод (Биологические и химические процессы) / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Лякурянсен, Э. Арван ; перев. с англ., к.т.н. Т. П. Мосоловой, под ред. д.х.н. С. В. Каложного. – М. : Изд. «Мир», 2004. – 480 с. 3. Олейник А. Я. Теоретические исследования фильтрационных процессов в пористых средах с изменяющимися водно-физическими свойствами / А. Я. Олейник, В. Л. Поляков. – 2007. – Том 9, № 2-3. – С. 122–138. 4. Моделирование процессов доочистки хозяйственно-бытовых сточных вод на фильтрах / А. Я. Олейник, Т. В. Василенко, С. А. Рыбаченко, Хамад Ихаб Ахмад // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К. : КНУБА, 2006. – Вип. 4. – С. 67–68.