

УДК 628

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.37057

## РОЗРОБКА МАКРОКІНЕТИЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ ГАЗОПОДІБНИХ ВИКИДІВ

© Г. Ю. Бахарєва, О. В. Шестопапов, Є. О. Семенов, Н. О. Букатенко

*Основне призначення цієї статті – ознайомлення спеціалістів із основами розробки макрокінетичної математичної моделі біологічної очистки газоподібних викидів від органічних та неорганічних токсикантів та одорантів.*

*Наукові дослідження, які відображено у статті, було виконано згідно планів наукових досліджень кафедри охорони праці та навколишнього середовища та кафедри хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХПІ»*

**Ключові слова:** макрокінетична математична модель, біологічна очистка, питома швидкість окиснення, концентрація, шкідлива речовина

*The main purpose of this article is familiarization of specialists with the basics of design of macrokinetic mathematical models of biological treatment of gasiform emissions from organic and inorganic toxicants and odorant.*

*Research, that given in the article, was done according to plans of research of labor and environment protection department and chemical engineering and industrial ecology department of NTU "KhPI"*

**Keywords:** macrokinetic mathematical model, biological treatment, specific rate of oxidation, concentration, harmful substance

### 1. Вступ

Газоподібні викиди різного промислового походження за об'ємом, складом шкідливих речовин та їх концентраціями є небезпечним та потужним джерелом забруднення навколишнього середовища. Негативність впливу посилюється ще й тим, що переважно ці джерела забруднення знаходяться у зонах помешкання та життєдіяльності людей. Відомо, що установки біологічної очистки повітря є екологічно чистими, дешевими та простими в експлуатації. Тому, всебічне дослідження процесів біологічної очистки газоподібних викидів є актуальною темою.

### 2. Постановка проблеми

Основне значення наведеного у статті дослідження полягає у розробці науково обгрунтованих методик розробки макрокінетичних математичних моделей біологічної очистки газоподібних викидів, як основ для подальших розрахунків проектних параметрів апаратів для біологічної очистки від водорозчинних та неводорозчинних газоподібних забруднень.

Мета даної роботи – винайти наукові основи для проектних розрахунків апаратів біологічної очистки від водорозчинних та нерозчинних у воді забруднень, характерних для викидів багатьох підприємств, які містять багатокомпонентні системи за допомогою розробки макрокінетичних математичних моделей.

Задачі дослідження – виконання теоретичних та експериментальних досліджень процесів біологічної очистки повітря від забруднюючих речовин, визначення поняття макрокінетичної математичної моделі біологічного очищення.

### 3. Літературний огляд

Процес біодеструкції газоподібних шкідливих речовин було досліджено низкою вітчизняних та закордонних вчених. Завдяки здібності мікроорганізмів до адаптації, цей універсальний принцип використовується для утилізації широкого спектру забруднюючих речовин органічного походження, а також деяких неорганічних сполук, наприклад,  $H_2S$ ,  $SO_2$  та  $NH_3$ . Порівняльний економічний аналіз [1] різних способів очищення газоподібних викидів свідчить про те, що очищення та дезодорація викидів у біофільтрах та біоскруберах вимагає найнижчих капітальних та експлуатаційних витрат. Проте, слід відзначити, що процеси детоксикації таких викидів є сукупністю взаємопов'язаних процесів, обумовлених складними біокінетичними реакціями, такими як, наприклад, нітрифікація та денітрифікація [2]. Складність процесів, які відбуваються у біореакторі, ускладнює процедуру моделювання, розрахунку їх апаратного оформлення та управління [3]. Ці процеси характеризуються жорсткою динамікою (широким рядом констант часу), нелінійністю, змінними з плином часом параметрами та умовами, а також утворенням перехресних сполук тощо [4]. У зв'язку зі специфічністю та токсичністю неорганічних сполук сірки та азоту, виникає необхідність використання у біореакторах іммобілізованих [5], а також адаптованих до забруднень штамів мікроорганізмів та їх популяцій [6].

З урахуванням вищевказаного, задля розрахунку кінетики складних процесів та конструкторських параметрів біореакторів, очевидна необхідність комплексного підходу, що включає експериментальне дослідження, розробку на цих засадах методів розробки макрокінетичних математичних моделей.

тичних моделей біологічної очистки газопо-дібних викидів.

#### 4. Дослідження процесу біологічної очистки газоподібних викидів

Під час проведення досліджень була поставлена така мета: експериментально визначити кінетичні показники біологічної аеробної й анаеробної детоксикації газоподібних викидів, що містять формальдегід, кінетичні показники біологічної детоксикації газоподібних викидів, що містять метан, а також  $H_2S$ ,  $SO_2$  та  $NH_3$ . Ці речовини дуже розповсюджені та містяться окремо або разом у газоподібних викидах багатьох підприємств хімічної, лісохімічної, деревообробної, харчової галузей промисловості, а також у побутових стічних водах. Крім того, ці речовини, які є представниками різних груп сполук (вуглеводні, аліфатичні, сірко- та азотвмісні), піддаються біодеструкції [7].

У лабораторних експериментах встановлювали кінетичні характеристики біотехнологічної детоксикації формальдегіду, розчиненого у воді, у відомому аеробному та розроблювальному анаеробному процесах. Після 8 годин обробки в аеробних умовах ефект очищення від формальдегіду склав 75 %, прогнозний термін для досягнення норм ГДК – 20 годин обробки. При обробці в анаеробному процесі 100 % ефект очищення від формальдегіду було досягнуто за 4 години. Максимальна питома швидкість біотехнологічного анаеробного окиснення формальдегіду більш ніж у 6 разів перевищувала значення цього параметру в аеробному процесі [8]. На основі досліджень іноземних вчених та даних власних експериментальних досліджень, було розроблено мікрокінетичну математичну модель зміни концентрації формальдегіду в процесі його усунення з газоподібних викидів [9].

Таким чином, на основі досліджень, було зроблено висновок, що для біотехнологічного очищення газоподібних викидів від формальдегіду на стадії регенерації води можна рекомендувати анаеробний процес, як такий, що дозволяє значно пришвидшити доведення екологічно небезпечної концентрації формальдегіду до встановлених норм ГДК. Крім того, при цьому в процесі анаеробної детоксикації формальдегіду можна вести обробку більш концентрованих розчинів, у порівнянні із аеробним процесом, тобто приблизно в 1,5 рази зменшити витрати чистої води на абсорбцію. Експлуатаційні витрати на додатковий реагент –  $NaNO_3$  (у якості якого можна використовувати мінеральне добриво), компенсуються виключенням витрат на електроенергію для аерації [10].

Також, у лабораторних експериментальних дослідженнях встановлювали кінетичні характеристики біотехнологічної детоксикації метану та супутніх йому газів ( $H_2S$ ,  $SO_2$  та  $NH_3$ ) у двосекційному біореакторі з шаром, що омивається [11]. В установці, яка моделювала першу (нижню) секцію двосекційного біореактору було визначено кінетичні характеристики біотехнологічної детоксикації розчинених у воді  $H_2S$ ,  $SO_2$  та  $NH_3$ . Експериментальні дані

свідчать про те, що в діапазоні концентрацій  $H_2S$  у воді 15–120 мг/дм<sup>3</sup> швидкість окиснення змінювалася від 12 мг/г за годину в області мінімальних концентрацій до максимальних значень рівних приблизно 40 мг/г за годину. Близькі та аналогічні за характером результати змін отримані і для швидкості окиснення  $SO_2$  у воді. У діапазоні концентрацій  $NH_3$  у воді 2,5 – 20 мг/дм<sup>3</sup> швидкість окиснення змінювалася від приблизно 1,5 мг/г за годину при мінімальних концентраціях до максимального значення, що дорівнює 5 мг/г за годину. В цілому, виконаний на лабораторній установці експеримент, з одержаного рівня швидкостей окиснення, показує технологічну застосовність біореактору для очищення від  $H_2S$ ,  $SO_2$  і  $NH_3$  [11]. В установці, яка моделювала другу (верхню) секцію двосекційного біореактору було визначено кінетичні характеристики біотехнологічної детоксикації метану з газоподібного стану. Після 1 години 15 хвилин обробки газової суміші, що містить метан специфічним мікробіоценозом було досягнуто зниження концентрації метану із 15 об. % до 0. Максимальна питома швидкість окиснення метану досягла 260 мл/г-год [10].

Таким чином, можна зробити висновок, що за допомогою біотехнологічного методу можна довести екологічно небезпечну концентрацію метану та  $H_2S$ ,  $SO_2$  і  $NH_3$  у газоподібних викидах до встановлених норм ГДК. Усі дані експериментальних досліджень за результатами статистичної обробки є достовірними.

Докладно усі вище описані експериментальні дослідження із результатами статистичної обробки наведено у [9].

Основи розробки макрокінетичної математичної моделі, що наведено у цій статті, відтворені на основі даних, отриманих в результаті вище вказаних експериментальних досліджень.

#### 5. Апробація результатів дослідження

##### 5.1. Поняття макрокінетичної математичної моделі процесу біологічної очистки

Визначаючи питому швидкість окиснення, як кількість шкідливої речовини, яка розкладається одиницею біомаси за одиницю часу, для будь-яких пар значень концентрації та часу, можна записати так [7]:

$$\frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} = -\mu_0 V_i, \quad (1)$$

де  $\mu_0$  – початкова концентрація біомаси;  $\Delta p_i = p_{i+1} - p_i$  – приріст концентрації;  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$  – приріст часу;  $V_i$  – питома швидкість окиснення.

Знак «мінус» відображає зменшення концентрації при позитивній швидкості видалення забруднення.

У граничному переході, при  $\Delta t \rightarrow 0$ , одержимо рівняння, що описує процес біологічного очищення в диференціальній формі [8]:

$$\frac{dp_i}{dt_i} = -\mu_0 V_i. \quad (2)$$

Тоді, аналітичною формою опису процесу біологічного очищення буде одна із взаємозалежних пар функцій, що задовільняють рівнянню (2) [7]:

$$\rho_t = f_p(t); V_t = f_v(t); \quad (3)$$

$$t_p = f_t(\rho); V_p = f_v(\rho), \quad (4)$$

де  $V_t$  – залежність питомої швидкості окиснення від часу обробки;  $V_p$  – залежність питомої швидкості окиснення від концентрації окиснюваної речовини;  $\rho_t$  – залежність концентрації окиснюваної речовини від часу обробки;  $t_p$  – залежність часу обробки від концентрації окиснюваної речовини.

Друга пара взаємозалежних функцій (4) відповідає граничному переходу при  $\Delta\rho \rightarrow 0$  та рівноцінному співвідношенню (2) диференційного рівняння [8]:

$$\frac{dt_p}{d\rho} = -\frac{1}{\mu_0 V_p} \quad (5)$$

Вочевидь, що вирази для  $\rho_t$  і  $t_p$  повинні бути взаємозамінними прямою та зворотною функціями. Тому, додатковими можливими парами функцій можуть бути [8]:

$$t_p = f_t(\rho); V_t = f_v(t) \quad (6)$$

$$\rho_t = f_p(t); V_p = f_v(\rho) \quad (7)$$

Таким чином, макрокінетична математична модель біологічного очищення є системою двох функцій, що кількісно відображають взаємозалежність концентрації речовини, що видаляється, часу протікання процесу очищення, питомої швидкості деструктування шкідливої речовини та початкової концентрації біомаси, а також, що задовільняє взаємозв'язки цих же параметрів у диференційній формі [7].

Необхідно підкреслити, що поняття макрокінетичної моделі з необхідністю витікає із визначення найважливішого параметра – питомої швидкості видалення забруднення [7].

Викладене дозволяє надати розробку макрокінетичної математичної моделі процесу біологічного очищення, як визначення залежностей вигляду  $V_p$ ,  $V_t$ ,  $\rho_t$  та  $t_p$ , що адекватно описують експериментальні дані та задовільняють диференційному рівнянню (2) або (5) [8].

## 6. Висновки

Визначено поняття макрокінетичної математичної моделі біологічного очищення, як системи двох аналітичних функцій, що кількісно відображають взаємозалежність питомої швидкості деструкції забруднення, його концентрації, часу протікання процесу та початкової концентрації біомаси, а також, що задовільняють взаємозв'язки цих же параметрів в диференційній формі.

Комплекс виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, початкові розробки макрокінетичних математичних моделей у сукупності є науковими основами для проектних розрахунків апаратів біологічної очистки від водорозчинних та нерозчинних у воді забруднень, характерних для

викидів багатьох підприємств, які містять багатоконпонентні системи.

## Література

1. Gabrieland, D. Technical and economical analysis of the conversion of a full-scale scrubber to a biotrickling filter for odour control [Text] / D. Gabrieland, M. A. Deshusses // Water Science and Technology. Portland: IWAPublishing. – 2004. – Vol. 4. – P. 309–318.

2. Londong, J. Strategies for optimized nitrate reduction with primary denitrification [Text] / J. Londong // Water Science and Technology. Portland: IWAPublishing. – 1992. – Vol. 5-6. – P. 1087–1096.

3. Sotomayor, O. A. Z. A simulation benchmark to evaluate the performance of advanced control techniques in biological wastewater treatment plant [Text] / O. A. Z. Sotomayor, S. W. Park, C. Garcia // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2001. – Vol. 18, Issue 1. doi: 10.1590/s0104-66322001000100008

4. Wentzel, M. C. Processes and modeling of nitrification-denitrification biological excess phosphorus removal systems – a review [Text] / M. C. Wentzel, G. A. Ekama, G. V. R. Marais // Water Science and Technology. Portland: IWAPublishing. – 1992. – Vol. 6. – P. 59–82.

5. Jan, R. Bath experiment on H<sub>2</sub>S degradation by bacteria immobilised on activated carbons [Text] / R. Jan, V. L. Ng, X. G. Chen, A. L. Geng, W. D. Gouhd, H. Q. Duan, D. T. Ling, L. C. Koe // Water Science and Technology. – Portland: IWAPublishing. – 2004. – Vol. 4. – P. 299–308.

6. Barbosa, V. L. Hydrogen sulphide removal by activated sludge diffusion [Text] / V. L. Barbosa, D. Dufol, J. L. Callan, R. Sneath, R. M. Stuetz // Water Science and Technology. Portland: IWAPublishing. – 2004. – Vol. 4. – P. 199–205.

7. Кричківська, Л. В. Процеси та апарати біологічної очистки та дезодорації газоповітряних викидів [Текст]: монографія / Л. В. Кричківська, О. В. Шестопалов, Г. Ю. Бахарева, К. В. Слісь. – Харків: НТУ «ХП», 2013. – 200 с.

8. Кричківська, Л. В. Проектні рішення у розробці апаратів біологічної очистки газоподібних викидів [Текст]: монографія / Л. В. Кричківська, Л. А. Васьковець, І. В. Гуренко та ін.; за ред. проф. Л. В. Кричківської. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – 208 с.

9. Бахарева, А. Ю. Экологически безопасные методы очистки газообразных промышленных выбросов от формальдегида и метана [Текст]: дис... канд. техн. наук: 21.06.01 / А. Ю. Бахарева. – Харьков, 2009. – 210 с.

10. Бахарева, Г. Ю. Екологічно безпечні методи очистки газоподібних промислових викидів від нормальдегіду та метану [Текст]: автор. дис. ... канд. тех. наук / Г. Ю. Бахарева. – Київ, 2010. – 20 с.

11. Бахарева, А. Ю. Загрязнение атмосферы городов газообразными выбросами из канали-зационных сетей [Текст] / А. Ю. Бахарева, Е. А. Семенов // Вісник Національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2014. – № 7 (1050). – С. 136–141.

## References

1. Gabrieland, D., Deshusses, M. A. (2004). Technical and economical analysis of the conversion of a full-scale scrubber to a biotrickling filter for odour control. Water Science and Technology. Portland: IWAPublishing, 4, 309–318.

2. Londong, J. (1992). Strategies for optimized nitrate reduction with primary denitrification. Water Science and Technology. Portland: IWAPublishing, 5-6, 1087–1096.

3. Sotomayor, O. A. Z., Park, S. W., Garcia, C. (2001). A simulation benchmark to evaluate the performance of advanced control techniques in biological wastewater treatment

plants. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 18 (1). doi:10.1590/s0104-66322001000100008

4. Wentzel, M. C., Ekama, G. A., Marais, G. V. R. (1992). Processes and modeling of nitrification-denitrification biological excess phosphorus removal systems – a review. Water Science and Technology. Portland: IWA Publishing, 6, 59–82.

5. Jan, R., Ng, V. L., Chen, X. G., Geng, A. L., Gouhd, W. D., Duan, H. Q., Ling, D. T., Koe, L. C. (2004). Bath experiment on H<sub>2</sub>S degradation by bacteria immobilised on activated carbons. Water Science and Technology. Portland: IWA Publishing, 4, 299–308.

6. Barbosa, V. L., Dufol, D., Callan, J. L., Sneath, R., Stuetz, R. M. (2004). Hydrogen sulphide removal by activated sludge diffusion. Water Science and Technology. Portland: IWA Publishing, 4, 199–205.

7. Krichkovska, L. V., Shestopalov, O. V., Bakhareva, G. Y., Slis, K. V. (2013). Prozesi ta aparati biologichnoy

ochistki ta dezodorazii gazopovitryanih vikidiv. Kharkiv: NTU «KhPI», 200.

8. Krichkovska, L. V., Vaskovez, L. A., Gurenko, I. V. et. al. (2014). Proektni rishennya u rozrobzi aparativ biologichnoy ochistki gazopovitryanih vikidiv. Kharkiv: NTU «KhPI», 208.

9. Bakhareva, A. Y. (2009). Ekologicheskii bezopasnie metodi ochistki gazoobraznih promishlennih vibrosov ot formaldegida i metana. Kharkiv, 210.

10. Bakhareva, G. Y. (2010). Ekologicheskii bezopasnie metodi ochistki gazoobraznih promishlennih vibrosov ot formaldegida i metana. Kiev, 20.

11. Bakhareva, A. Y., Semenov, E. A. (2014). Zagryazneniye atmosferi gorodov gazoobraznimi vibrosami iz kanalizatsionnih setey. Visnik Nazionalnogo tehnicnogo universitetu «KhPI». Zbirnik naukovih praz. Seriya: Novi rishennya v suchasniyeh tehnologiyah, 7 (1050), 136–141.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Дьомін Д. О.  
Дата надходження рукопису 27.01.2015*

**Бахарєва Ганна Юрїївна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра охорони праці та навколишнього середовища, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

E-mail: baharevaann@gmail.com

**Шестопалов Олексій Валерійович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

E-mail: pheonix\_alex@mail.ru

**Семєнов Євген Олександрович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра охорони праці та навколишнього середовища, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

E-mail: 982945@gmail.com

**Букатєнко Наталія Олексїївна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра охорони праці та навколишнього середовища, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

УДК 629.735.03:004.891.3

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.37626

## МЕТОД СИНТЕЗУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ВІБРАЦІЙНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ

© В. С. Гасиджак, М. П. Кравчук, В.В. Шулевка

*Запропоновано метод синтезу інтелектуальної автоматичної системи діагностування вібраційного стану ГТД на базі інтеграції нечіткої логіки та нейромереж. Досліджено теоретично і експериментально можливості класифікації інтелектуальної автоматичної системи діагностування поточного технічного стану ГТД в процесі його експлуатації*

**Ключові слова:** газотранспортний двигун, нечітка логіка, вібраційний стан, інтелектуальна автоматична система, нейромережі

*In this article a synthesis method of intelligent automation system is presented for vibration state diagnostics of gas turbine engine compressor unit with means of fuzzy logic and neural network. Theoretically and practically were studied intelligent automatic system capabilities of diagnostics of real time technical state of gas transmission engine in use*

**Keywords:** gas transmission engine, fuzzy logic, vibration state, intelligent automatic system, neural networks

### 1. Вступ

Газотурбінні двигуни (ГТД) широко використовують у транспортній і енергетичній галузях. В авіації їх використовують як основні і допоміжні

рушійні установки; силові установки на морських судах; в енергогенерувальних агрегатах; вони є практично основним силовим приводом у газоперекачувальних агрегатах. Ефективність застосування