

- зменшення скиду забруднюючих речовин у водні об'єкти у складі стічних вод житлово-комунального господарства в 2,5 раза, а в складі поверхневих стічних та дренажних вод – до 25 разів;
- захист в межах НП ґрунтових вод від забруднення інфільтраційними стічними водами і ви-

токами з водонесучих комунікацій, а також підтримання рівня ґрунтових вод на певній глибині від поверхні землі.

Таким чином, перелічені здобутки показують, що запропоновані заходи можуть стати основою перебудови водокористування НП України в екологічно безпечне.

### Література

1. Мельник Л. Принципы экологического развития [Текст] / Л. Мельник ; Экономика Украины. – 1996. N 2.- С. 71-78.
2. Directive 2000/60/ EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy [Text] // Official Journal of the European Union. – L327, 22.12.2000. – 72 p.
3. Tyler Miller G. Living in the Environment (Ninth Edition) [Text] / G. Tyler Miller // Wadsworth Publish Company. – ITP.: California USA, 1997. – 800 p.
4. Реймерс Н.Ф. Экология. Теории, законы, правила, принципы и гипотезы [Текст] / Н.Ф.Реймерс.- М.: Россия, 1994. –345 с.
5. Яковлев С.В. Канализация [Текст] : Учебник для вузов по спец. «Водоснабжение и канализация» / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, А.И. Жуков, С.К. Колобанов. – Лет Ме Принт, 2012. – 638 с.
6. Сологаев В.И. Водоснабжение и водоотведение [Текст] : Учебное пособие / В.И. Сологаев. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. – 44 с.
7. Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste- water treatment [Text] // Official Journal L 135, 30/05/1991/ P. 0040-0052. CELEX:31991L0271:EN:HTML.
8. Дмитрієва О.О. Існуюча концепція управління водокористуванням населених пунктів України [Текст] / О.О. Дмитрієва // Продуктивні сили і регіональна економіка. – К.: РВПСУ. – 2006. – Ч. II, С. 228-238.
9. Стольберг Ф.В. Экология города [Текст] : Учебник / Ф.В. Стольберг. –К.:Либра, 2000. –464 с.
10. Дмитрієва О.О. Інноваційні технології перебудови водокористування в населених пунктах України [Текст] / О.О. Дмитрієва; Механізм регулювання економіки . –2008. – №2. – С. 196-200.

*Статтю присвячено вирішенню актуального завдання – забезпечити екологічну безпеку навколишнього природного середовища з доведенням концентрації формальдегіду у газоподібних викидах до норм ГДК шляхом конвертації його в екологічно безпечні сполуки. Розроблено заходи для забезпечення екологічно безпечного стану міської атмосфери в районі газоподібних викидів, що містять формальдегід*

*Ключові слова: газоподібні викиди, формальдегід, екологічна безпека, біотехнологічна детоксикація, біоскрubber*

*Статья посвящена решению актуальной задачи - обеспечить экологическую безопасность окружающей природной среды с доведением концентрации формальдегида в газообразных выбросах нормам ПДК путем конвертации его в экологически безопасные соединения. Разработаны мероприятия для обеспечения экологически безопасного состояния городской атмосферы в районе газообразных выбросов, содержащих формальдегид*

*Ключевые слова: газообразные выбросы, формальдегид, экологическая безопасность, биотехнологическая детоксикация, биоскрubber*

УДК 628

## ЕКОЛОГІЧНА НЕБЕЗПЕКА ГАЗОПОДІБНИХ ВИКИДІВ, ЩО МІСТЯТЬ ФОРМАЛЬДЕГІД ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЙОГО УСУНЕННЯ

**Г. Ю. Бахарєва**

Кандидат технічних наук, старший викладач  
Кафедра охорони праці та  
навколишнього середовища  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

**В. О. Юрченко**

Доктор технічних наук, професор  
Кафедра екології  
Харківський національний  
автодорожній університет  
вул. Петровського, 25, м. Харків, Україна, 61002

---

## 1. Вступ

---

Значні об'єми, хімічні та біологічні властивості формальдегіду в газоподібних викидах хімічних підприємств зумовлюють підвищену екологічну небезпеку навколо об'єктів, де вони утворюються. Концентрація формальдегіду в викидах зазначених виробничих процесів не відповідає встановленим нормативам, тому що через особливості технології і складу викидів ця одновуглецева сполука важко піддається видаленню традиційними методами, і тому служить фактором інтенсивного погіршення екологічного стану міської атмосфери. Крім того, традиційні фізико-хімічні методи очищення газоподібних викидів від формальдегіду не вирішують проблему екологічної безпеки цієї сполуки для природного середовища: такі методи лише переводять формальдегід з газоподібного середовища у водне середовище при абсорбції.

Тому проблеми екологічної безпеки викидів формальдегіду повинні вирішуватись як шляхом удосконалення й інтенсифікації традиційних методів очищення газоподібних викидів, так і шляхом використання альтернативних екологічно чистих методів детоксикації, що конвертують цю сполуку в екологічно безпечні продукти.

В даний час для вилучення ряду газоподібних забруднень промислових викидів, як досить перспективні, розробляються біотехнології, основними перевагами яких є висока екологічна чистота, економічність і універсальність. Основою для розроблювальних біотехнологій є реакції, процеси й організми, що здійснюють детоксикацію газоподібних сполук у природних екосистемах.

Розробка біотехнологічних методів детоксикації промислових газоподібних відходів, що містять формальдегід, і доведення його концентрації до встановлених норм ГДК, є актуальним завданням, як для підвищення техногенної безпеки підприємств, так і для екологічного стану міської атмосфери.

Основна мета дослідження, що розглядається в даній статті – удосконалення існуючих і розробка екологічно безпечних технологічних процесів доведення вмісту формальдегіду у промислових газоподібних викидах до встановлених норм ГДК.

У ході дослідження було ретельно проаналізовано сучасний стан проблеми захисту атмосфери від формальдегіду в промислових газоподібних викидах в Україні, Росії, а також у країнах зарубіжжя. На основі розгляду традиційних фізико-хімічних методів доведення концентрації формальдегіду до норм ГДК було доведено недоліки існуючих заходів щодо детоксикації формальдегіду у газоподібних викидах.

Досліджено основні шляхи детоксикації формальдегіду в біосфері і зазначено, що в природному середовищі ця одновуглецева сполука трансформується в екологічно безпечні продукти мікроорганізмами певної екологотрофічної групи.

Розробкою методів біотехнологічної детоксикації формальдегіду займались багато науковців: Куліков Н. І., Еннан А. А., Костік В. В., Бельдій М. Г., Перчугов Г. Я. та ін.

Проте, у результаті цього аналізу, було зроблено висновок, що біотехнологічні заходи доведення концентрації формальдегіду у газоподібних викидах

до норм ГДК потребують інтенсифікації та вдосконалення.

На підставі проведеного аналізу сучасного стану екологічної проблеми, спричиненої промисловими газоподібними викидами, що містять формальдегід, було визначено певний напрям напрям досліджень, що наведено в даній статті.

---

## 2. Основна частина

---

Було проведено експериментальне дослідження біотехнологічного окиснення формальдегіду і математичне моделювання цього процесу.

В лабораторних експериментальних дослідженнях встановлювали кінетичні характеристики біотехнологічної детоксикації формальдегіду, розчиненого у воді. Ці експерименти моделювали окиснення формальдегіду на етапі регенерації води при детоксикації газоподібних викидів (з концентрацією формальдегіду 50–100 мг/м<sup>3</sup>) у біоскрубері, який складається з двох апаратів – абсорбера та тенка для регенерації води. В лабораторній установці відпрацьовували технологічний режим біологічної детоксикації формальдегіду адаптованим активним мулом в аеробних умовах та в анаеробних умовах шляхом денітрифікації. При дослідженні аеробного окиснення формальдегіду в установку подавали повітря, а при дослідженні анаеробного окиснення формальдегіду використовували механічне перемішування мулової суміші. Динаміка зниження концентрації формальдегіду в аеробному та анаеробному процесі представлена на рис. 1. Після 8 годин обробки формальдегіду (вихідна концентрація у воді 1000 мг/дм<sup>3</sup>) в аеробному процесі ефект очистки склав 75 %. Концентрація формальдегіду мала чітку тенденцію до зниження та досягнення норм ГДК за 20 годин обробки. При обробці формальдегіду (вихідна концентрація у воді 1400 мг/дм<sup>3</sup>) в анаеробному процесі специфічним мікробіоценозом стовідсотковий ефект очистки був досягнутий за 4 години. Середня питома швидкість аеробного окиснення формальдегіду – 40 мг/г-год, була значно нижче цього показника при анаеробному окисненні формальдегіду в процесі денітрифікації – 160 мг/г-год. Максимальна питома швидкість біотехнологічного анаеробного окиснення формальдегіду більш як у 6 разів перевищувала значення цього параметру в аеробному процесі.

Отже, для біотехнологічної очистки 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. При цьому анаеробна детоксикація формальдегіду дозволяла вести обробку більш концентрованих розчинів порівняно з аеробним процесом, тобто приблизно в 1,5 рази зменшити витрати чистої води на абсорбцію. Експлуатаційні витрати на додатковий реагент – NaNO<sub>3</sub> (у якості якого можна використовувати мінеральне добриво), компенсуються виключенням витрат на електроенергію.

Математична модель розробленого методу біотехнологічної детоксикації формальдегіду базується на системі рівнянь моделі Моно, яка широко використовується при оптимізації систем біологічної

очистки стічних вод. Моделювання процесу вилучення формальдегіду в анаеробних умовах на етапі регенерації води включає в себе: моделювання процесу біохімічного вилучення формальдегіду; моделювання процесу біосинтезу; моделювання процесу денітрифікації. Математична модель біохімічного окиснення формальдегіду у процесі денітрифікації у біоскрубері періодичної дії на етапі регенерації води, має вигляд наступної системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} &= r_S; & \frac{\partial N}{\partial t} &= r_N; & \frac{\partial X_1}{\partial t} &= r_{X1}; & \frac{\partial X_2}{\partial t} &= r_{X2}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де  $S$  – концентрація формальдегіду у ємності для регенерації (ХСК), мг/дм<sup>3</sup>;  $N$  – концентрація нітратного азоту у ємності для регенерації, мг/дм<sup>3</sup>;  $X_1$  – концентрація мікроорганізмів, які використовують розчинений кисень для біохімічного окиснення формальдегіду, мг/дм<sup>3</sup>;  $X_2$  – концентрація денітрифікуючих мікроорганізмів, які використовують зв'язаний кисень нітратів для біохімічного окиснення формальдегіду, мг/дм<sup>3</sup>;  $t$  – час протікання процесу очистки в апараті, с;  $r_S$  – швидкість зміни концентрації формальдегіду, г/дм<sup>3</sup>·с;  $r_N$  – швидкість зміни концентрації N-нітратів, г/дм<sup>3</sup>·с;  $r_{X1}$  – швидкість зміни концентрації мікроорганізмів, які використовують розчинений кисень для біохімічного окиснення формальдегіду, г/дм<sup>3</sup>·с;  $r_{X2}$  – швидкість зміни концентрації денітрифікуючих мікроорганізмів, які використовують зв'язаний кисень нітратів для біохімічних перетворень, г/дм<sup>3</sup>·с;

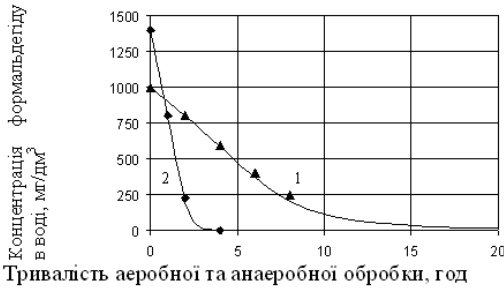


Рис. 1. Вплив тривалості аеробної (1) та анаеробної обробки (2) на концентрацію формальдегіду в воді

Для знаходження рішення системи рівнянь (1) визначали швидкості  $r_S$ ,  $r_N$ ,  $r_{X1}$  та  $r_{X2}$ . Було знайдено рівняння, за якими можна визначити означені швидкості:

$$r_S = -\frac{\mu_{Hmax} X_H}{Y_H} \left( \frac{S}{K_S + S} \right) \left( \frac{O_2}{K_{O_2} + O_2} \right) - \frac{\eta \mu_{Hmax} X_H}{Y_H} \left( \frac{S}{K_S + S} \right) \left( \frac{N}{K_N + N} \right) \left( \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + O_2} \right) + \alpha_S b_1 X_H, \quad (2)$$

$$r_N = -\frac{\eta \mu_{Hmax} X_H}{Y_D} \left( \frac{S}{K_S + S} \right) \left( \frac{N}{K_N + N} \right) \left( \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + O_2} \right) - K_{DE} X_H \left( \frac{S}{K_S + S} \right) \left( \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + O_2} \right), \quad (3)$$

$$r_{X1} = \mu_{H1max} X_{H1} \left( \frac{S}{K_S + S} \right) \left( \frac{O_2}{K_{O_2} + O_2} \right) - b_{11} X_{H1}, \quad (4)$$

$$r_{X2} = \mu_{H2max} X_{H2} \left( \frac{S}{K_S + S} \right) \left( \frac{N}{K_N + N} \right) \left( \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + O_2} \right) - b_{12} X_{H2}, \quad (5)$$

де  $\eta$  – безрозмірний параметр, який враховує зменшення швидкості росту мікроорганізмів в процесі денітрифікації;  $\mu_{Hmax}$  – максимальна питома швидкість росту біомаси, діб<sup>-1</sup>;  $\mu_{H1max}$  – максимальна питома швидкість росту біомаси мікроорганізмів, які використовують розчинений кисень, діб<sup>-1</sup>;  $\mu_{H2max}$  – максимальна питома швидкість росту біомаси мікроорганізмів, які використовують зв'язаний кисень нітратів, діб<sup>-1</sup>;  $\alpha_S$  – частка органіки, яка міститься у біомасі та швидко виділяється у розчин після відмирання, мг/мг;  $K_{DE}$  – константа питомої швидкості видалення нітратів у процесі ендогенного дихання, діб<sup>-1</sup>;  $K_S$  – константа напівнасичення за субстратом, мг/дм<sup>3</sup>;  $K_N$  – константа напівнасичення за нітратами, мг/дм<sup>3</sup>;  $K_{O_2}$  – константа напівнасичення за розчиненим киснем, мг/дм<sup>3</sup>;  $Y_H$  – економічний коефіцієнт, який враховує утилізацію органічних сполук у процесі приросту біомаси мікроорганізмів, мг/мг;  $Y_D$  – економічний коефіцієнт, який враховує утилізацію нітратів у процесі приросту біомаси мікроорганізмів, мг/мг;  $O_2$  – концентрація розчиненого кисню, мг/дм<sup>3</sup>;  $b_1$  – константа питомої швидкості відмирання мікроорганізмів, діб<sup>-1</sup>;  $b_{11}$  – константа питомої швидкості відмирання мікроорганізмів, які використовують розчинений кисень, діб<sup>-1</sup>;  $b_{12}$  – константа питомої швидкості відмирання мікроорганізмів, які використовують зв'язаний кисень нітратів, діб<sup>-1</sup>;  $X_H$  – концентрація мікроорганізмів (адаптованого активного мулу), мг/дм<sup>3</sup>.

Для розрахунку питомої швидкості детоксикації формальдегіду в анаеробних умовах шляхом денітрифікації використовували математичну модель, яка також базується на кінетиці Моно та застосовується для опису процесів очистки стічних вод шляхом денітрифікації, її константи:

$$\rho_{\Phi д} = \rho_{\max д} \frac{S}{S + K_S} \cdot \frac{N}{N + K_N} \cdot 10^{k_T(T-20)} a_{pH д} \cdot \frac{K_{O_2}}{O_2 + K_{O_2}}, \quad (6)$$

де  $\rho_{\Phi д}$  – питома швидкість детоксикації формальдегіду шляхом денітрифікації, мг/г·год;  $\rho_{\max д}$  – максимальна питома швидкість детоксикації формальдегіду шляхом денітрифікації, мг/г·год;  $k_T$  – температурна константа;  $T$  – температура, °С;  $a_{pH д}$  – коефіцієнт залежності розвитку денітрифікуючого мулу від рН.

На основі експериментальних досліджень біотехнологічного методу очищення газоподібних промислових викидів від формальдегіду, що наведено в цій статті, запропоновано технологічну пропозицію щодо захисту повітряного середовища від цієї екологічно-небезпечної одновуглецевої сполуки (рис. 2).

### 3. Висновки

Біотехнологічні методи, які є інтенсифікованими аналогами процесів детоксикації формальдегіду в природному середовищі, економічно вигідніші та екологічно безпечніші, ніж фізико-хімічні. Економічна вигода полягає в низькій вартості біотехнологічних установок та відсутності матеріальних затрат на спеціальні реагенти, вели-

ку кількість води. Екологічні переваги полягають в завершенні задачі знешкодження формальдегіду шляхом конвертування в екологічно безпечні речовини та відсутності екологічно небезпечних відходів.

Експериментально доведено суттєве вдосконалення відомої біотехнології детоксикації формальдегіду в газоподібних викидах: підвищення швидкості окиснення формальдегіду в 6 разів та покращення її екологічних та економічних показників (зменшення в два рази витрат чистої води та електроенергії) при використанні на етапі регенерації води в біоскрюбері анаеробної обробки шляхом денітрифікації.

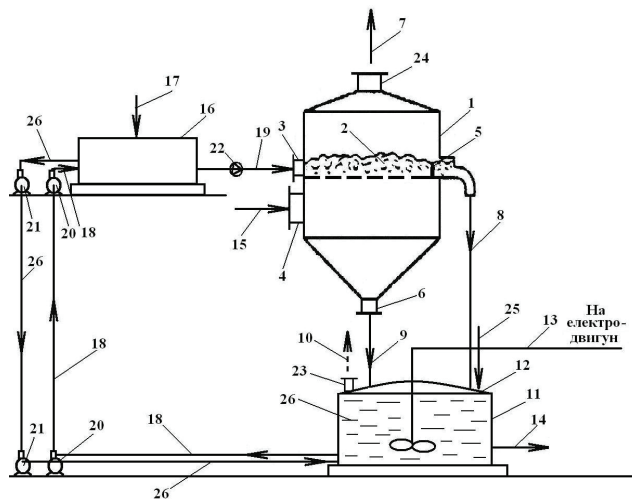


Рис. 2. Схема біотехнологічної детоксикації формальдегіду в газоподібних викидах у біоскрюбері : 1 — барботажний пінний скрублер; 2 — тарілка; 3 — штуцер для постачання води; 4 — патрубок для введення газу, який забруднений формальдегідом; 5 — поріг; 6 — зливний штуцер; 7 — очищений від формальдегіду газ; 8 — основна частина забрудненого формальдегідом води; 9 — частина води, яка залишилась (витік), та є забрудненою формальдегідом; 10 — гази, які утворюються при окисненні формальдегіду; 11 — ємність з вільноплаваючим денітрифікуючим мікробіоценозом (активний мул); 12 — кришка; 13 — механічна мішалка; 14 — вода, яка пройшла біотехнологічну детоксикацію; 15 — забруднений формальдегідом газ; 16 — осаджувальна ємність; 17 — свіжа вода; 18 — активний мул з водою; 19 — освітлена вода, 20, 21 — центробіжні насоси; 22 — насос для постачання освітленої води, 23 — патрубок для відведення газів 10; 24 - патрубок для відведення газу 7; 25 — розчин  $\text{NaNO}_3$ ; 26 — денітрифікуючий мікробіоценоз

лонец С.Д., Калужный С.В. – Учебное пособие. – М.: Высш. школа, 1990. – 296 с.

4. Кузнецов, С.И. Методы изучения водных микроорганизмов [Текст] / Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. – М.: Наука, 1989. – 286 с.
5. Яковлев, В.П. Биохимические процессы в очистке сточных вод [Текст] / Яковлев В.П., Карюхина Т.А. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
6. Бахарева, А. Ю. Математическое описание изменения удельной скорости биологического окисления формальдегида. [Текст] / В. А. Юрченко, А. Ю. Бахарева // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний центр. – 2011. – № 6/6 (54). – С.46–48.
7. Бахарева, А. Ю. Оценка эколого-экономического ущерба, причиняемого промышленными газообразными выбросами формальдегида. [Текст] / В. А. Юрченко, А. Ю. Бахарева // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 9. – С.113–118.
8. Londong, J. Strategies for optimized nitrate reduction with primary denitrification [Текст] / J. Londong // Water Science and Technology. – Portland: IWA Publishing. – 1992. – № 5-6. – P. 1087-1096.
9. Wentzel, M.C. Processes and modeling of nitrification-denitrification biological excess phosphorus removal systems - a review [Текст] / M.C. Wentzel, G.A. Ekama, G.V.R. Marais // Water Science and Technology. – Portland: IWA Publishing. – 1992. – № 6. – P. 59-82.
10. Painter, H.A. A review of literature on inorganic nitrogen metabolism in microorganism [Текст] / H.A. Painter // Water Research. – Portland: IWA Publishing. – 1970. – № 4. – P. 393-450.
11. Hashimoto S. Kinetic Studies on Organic Oxidation and Nitrification by Activated Sludge [Текст] / S.Hashimoto, K. Furukawa, K. Crowh // J. Fermentation Technology. – Amsterdam: Elsevier science B.V. – 1982. – № 6. – P. 537-544.
12. Cristensen M.H. Biological denitrification of sewage: A literature review [Текст] / M.H. Cristensen // Progress in Water Technology. – London: Pergamon Press. – 1977. – № 4/5. – P. 509-551.
13. Prakasam T. Denitrification [Текст] / T. Prakasam, M. Krup // J. of Water Pollution Control Federation. – Geneva: Indersciens Publishers. – 1980. – № 6. – P. 1195-1205.

### Література

1. Бахарева, А.Ю. Экологически безопасные методы очистки газообразных промышленных выбросов от формальдегида и метана: Дис... канд. техн. наук: 21.06.01 [Текст] / Бахарева А. Ю. – Х., 2009. – 210 с.
2. Вавилин, В.А. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов [Текст] / Вавилин В.А., Васильев В.Б., Рытов С.В. – М.: Наука, 1993. – 202 с.
3. Варфоломеев, С.Д. Биотехнология: кинетические основы микробиологических процессов [Текст] / Варфо-