

1. Grandclément, C., Seyssiecq, I., Piram, A., Wong-Wah-Chung, P., Vanot, G., Tiliacos, N., Roche, N., & Doumenq, P. (2017). From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes: The evaluation of organic micropollutant removal — A review. *Water Research*, 111, 297–317. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.005>
2. Zhukova V. New approaches to wastewater treatment of periodic operations Pure water. Fundamental, applied and industrial aspects (9-10 November 2023, Kyiv): proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference / Editors: Zhukova V., Koltysheva D. – 2023.– 47-48 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/62840>
3. Feng, L., Chen, K., Han, D., Zhao, J., Lu, Y., Yang, G., Mu, J., & Zhao, X. (2017). Comparison of nitrogen removal and microbial properties in solid-phase denitrification systems for water purification with various pretreated lignocellulosic carriers. *Bioresource Technology*, 224, 236-245. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.002>

## ПОРІВНЯННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ МЕТОДІВ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД МОЛОКОПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

*Бабій Д. В., ст., Саблій Л. А., д.т.н., проф.*

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Україна, Київ, [babii.daria@lil.kpi.ua](mailto:babii.daria@lil.kpi.ua)*

Останніми роками в Україні суттєво зросло виробництво молочних і кисломолочних продуктів, а разом із цим — кількість молокопереробних підприємств. У процесі виробництва утворюються значні об'єми стічних вод, що містять органічні (жири, білки, цукри) та неорганічні (солі, кислоти, сода) домішки, залишки молочних продуктів і ПАР. Скидання таких вод без очищення призводить до дефіциту кисню у водоймах і загибелі риби. Фізико-хімічні методи очищення забезпечують ефективне видалення завислих речовин, емульгованих жирів і колоїдних частинок. Їхня основна перевага полягає у високій швидкості процесу та високій ефективності очищення [1].

Метою роботи є порівняння ефективності різних методів фізико-хімічного очищення стічних вод молокопереробних підприємств.

Коагуляція є одним із найважливіших фізико-хімічних методів очищення промислових стічних вод, що забезпечує зменшення вмісту колоїдних, завислих речовин і каламутності води. За оптимальної дози коагулянтів сульфату алюмінію та сульфату заліза 1000 мг/дм<sup>3</sup> при рН 5 ефективність видалення ХСК зі стічних вод молокопереробної промисловості становила 68% для сульфату алюмінію і 62% для сульфату заліза. Використання сульфату алюмінію в поєднанні з поліферосульфатом і поліакриламідом як допоміжних реагентів дозволило досягти 82% зниження ХСК за набагато нижчої дози — 100 мг/дм<sup>3</sup> [2]. При рН 6 для FeCl<sub>3</sub> та рН 7 для Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> оптимальна доза Al<sup>3+</sup> становила 188,4 мг/дм<sup>3</sup>, а ефективність видалення ХСК сягала 33%. Для Fe<sup>3+</sup> оптимальна доза дорівнювала 172,5 мг/дм<sup>3</sup>, а зниження ХСК — 45%. Таким чином, кращі результати очищення були отримані за використання FeCl<sub>3</sub> порівняно з Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> [3].

Метод коагуляції було використано для очищення модельних стічних вод молокопереробних підприємств за допомогою неорганічних коагулянтів, таких як поліалюмінійхлорид (РАС), сульфат заліза (FeSO<sub>4</sub>) та галун калієво-алюмінієвий (KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O) [4]. Експерименти проводили для оцінки впливу початкового рН (5–10) і дози коагулянту (100–5000 мг/дм<sup>3</sup>) на ефективність видалення ХСК. Оптимальне значення

pH становило 8,0 для всіх трьох реагентів, а оптимальні дози — 300 мг/дм<sup>3</sup> для PAC, 800 мг/дм<sup>3</sup> для FeSO<sub>4</sub> і 500 мг/дм<sup>3</sup> для KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O. За таких умов ефективність за ХСК через 30 хвилин контакту складала, %: 69,2, 66,5 і 63,8, відповідно [4].

Основними проблемами використання методу коагуляції є високі витрати реагентів, утворення великих об'ємів осадів та складність їх подальшої утилізації [1].

Електрокоагуляція є перспективною альтернативою традиційним методам хімічної коагуляції. У цьому процесі коагулянт утворюється *in situ* внаслідок електрохімічних реакцій, що відбуваються безпосередньо у водному середовищі [5]. Серед різноманітних методів очищення стічних вод електрохімічні методи, зокрема електрокоагуляція та електрокоагуляція-флотація, займають важливе місце завдяки низці переваг:

- значне зменшення або повне виключення використання хімічних реагентів;
- зменшення об'ємів утворених осадів;
- незаражувальна, коагулююча та флокулююча дія електричного струму;
- відсутність підвищення мінералізації води, що дозволяє використовувати очищену воду повторно;
- уніфікована й компактна апаратура, придатна для інтеграції з іншими очисними спорудами;
- зниження трудомісткості обслуговування та можливість автоматизації процесу [1].

Використання електрокоагуляції дозволяє отримати вищу ефективність видалення ХСК, БСК<sub>5</sub> і завислих речовин зі збільшенням напруги та тривалості процесу. За напруги 10 В показник ХСК зменшився з 6114,25 до 2405,96 мг/дм<sup>3</sup>, що відповідає приблизно 60,6% видалення; БСК<sub>5</sub> знизився з 2919,3 до 892,2 мг/дм<sup>3</sup> (близько 57,9%), а ефективність видалення завислих речовин становила приблизно 49,3% [6]. Попри численні переваги, електрокоагуляція має й певні недоліки. Основними проблемами є нестабільна робота установок при коливаннях складу та витрат стічної води, виділення вибухонебезпечних газів (водню та кисню), можливе утворення хлору та вільних радикалів, що можуть пригнічувати подальше біологічне очищення. Також метод характеризується відносно високими витратами електроенергії та пасивацією електродів [1].

Іноді для підвищення ефективності відокремлення фаз після коагуляції замість відстоювання застосовують флотацію. Флотація дозволяє швидко видаляти тонкодисперсні частинки, емульговані жири та легкі флокули, які не осідають при звичайному відстоюванні, що підвищує ефективність очищення і зменшує вміст завислих речовин в очищеній воді. Такий підхід також сприяє зменшенню об'єму осадів і покращує підготовку води до подальшої біологічної обробки. Порівняльний аналіз ефективності флотації з використанням розчиненого повітря (ФРП) та флотації з розчиненим озоном (ФРО) для очищення стічних вод молочної промисловості показав, що обидва методи забезпечують високе зниження показників забруднення, проте ФРП демонструє кращі результати. Для найбільш забрудненої проби стічних вод (ХСК 8876 мг/дм<sup>3</sup>) метод ФРП забезпечив видалення ХСК на рівні 74,8%, БСК — 85,9%, завислих речовин — 92,6%, жирів — 94,9%, загального азоту - 77,7%, загального фосфору — 39,2%. За тих самих умов метод ФРО показав дещо нижчі показники: видалення ХСК становило 74,5%, БСК — 85,6%, завислих речовин — 92,4%, жирів — 85,9%, азоту - 77,4%, фосфору - 32,6% [7].

Для досягнення повного руйнування органічних забруднюючих речовин дедалі ширше застосовують методи окиснення [8], що дозволяють окиснювати більшість органічних сполук, зменшувати їхню токсичність або підвищувати біорозкладність. Зокрема, озонування широко використовують для очищення стічних вод. Використання методів коагуляції-флокуляції з FeSO<sub>4</sub> та озонування стічних вод молокопереробної промисловості (ХСК = 6300 мг/дм<sup>3</sup>) показало, що при pH 12 після 240 хв озонування було досягнуто 71% видалення ХСК, тоді як коагуляція-флокуляція забезпечила лише 60%.

Проте, незважаючи на більшу ефективність, озонування є економічно значно дорожчим методом [3]. Порівнювали ефективність очищення з використанням озону ( $O_3$ ), ультрафіолету (УФ),  $O_3/H_2O_2$ ,  $O_3/УФ$ ,  $УФ/H_2O_2$  та  $O_3/УФ/H_2O_2$ . Випробування проводили в циліндричному реакторі з УФ та введенням озону. За результатами визначали ефективність очищення за ХСК та зниженням лактози. Найвища ефективність була отримана для комбінації  $УФ/H_2O_2/O_3$ : 88% зниження ХСК та 93,4% зниження лактози за оптимальних умов (рН 5, тривалість обробки 180 хв, циркуляція - 50 мл/год, доза  $H_2O_2$  - 0,5 мл) [8].

Застосування нанотехнологій має великий потенціал, оскільки наноматеріали володіють унікальними фізичними та хімічними властивостями завдяки високому співвідношенню площі поверхні до об'єму. Дослідження ефективності нанокompatитних адсорбентів, створених на основі активованого вугілля, кальцію алгілату та нанокремнезему, показало, що такі матеріали володіють надзвичайно високою здатністю до видалення органічних забруднень зі стічних вод молочної промисловості. Максимальну ефективність очищення досягали за оптимальних умов — рН 2, концентрації нанокремнезему 10% за масою та тривалості контакту близько 4 годин. За таких умов ступінь видалення ХСК становив 99,7%, що свідчить про значний потенціал нанокompatиту як адсорбційного матеріалу для глибокого очищення стічних вод [9].

Мембранну фільтрацію зазвичай використовують для доочищення стічних вод, що дозволяє досягти високої якості очищеної води, необхідної для безпечного скидання або повторного використання. Залежно від типу мембрани застосовують пористі [мікрофільтрація (МФ), ультрафільтрація (УФ), нанофільтрація (НФ)] або щільні мембрани [деякі процеси нанофільтрації та зворотного осмосу (ЗО)]. Останні дослідження показали ефективність різних комбінацій мембранних процесів (МФ, УФ, МФ+УФ, МФ+НФ, МФ+ЗО) для очищення стічних вод молокопереробних підприємств після біологічного очищення. Зокрема, поєднання МФ+УФ забезпечило до 99% зниження ХСК, повне видалення завислих речовин та понад 99% зниження каламутності. Комбінація МФ+ЗО давала до 84% видалення загального органічного вуглецю, 100% кольоровості, 94% загального азоту (за К'ельдалем) і 100% каламутності [10].

Отже, фізико-хімічні методи ефективні для зниження концентрацій низки забруднюючих речовин, що містяться в стічних водах молокопереробних підприємств. Метод коагуляції забезпечує видалення до 70–80% органічних речовин і завислих частинок, однак супроводжується утворенням значних об'ємів осаду та потребує оптимізації доз реагентів через їх високу вартість. Електрокоагуляція зменшує витрати реагентів і дозволяє досягати до 60% зниження ХСК і БСК<sub>5</sub>, але характеризується високими енергозатратами та пасивацією електродів. Флотаційні процеси, особливо флотація з використанням розчиненого повітря, демонструють високі показники очищення (до 95% видалення жирів і завислих речовин), підвищуючи ефективність подальшої біообробки. Методи окиснення забезпечують майже повне руйнування органічних сполук (до 88% зниження ХСК), проте залишаються економічно затратними. Особливу перспективу мають нанокompatитні адсорбенти на основі активованого вугілля, кальцію алгілату та нанокремнезему, що демонструють до 99,7% видалення ХСК. Використання мембранних технологій дозволяє видалити зі стічної води до 99% завислих частинок та органічних речовин різного ступеня дисперсності, що робить їх ефективними методами доочищення.

#### Література

1. Саблій Л.А. Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод: Монографія. - Рівне: НУВГП, 2013. – 292 с.

2. Loloei, Mahshid; Alidadi, Hosein; Nekonam, Gholamabbas; Kor, Yousef. Study of the coagulation process in wastewater treatment of dairy industries. *International Journal of Environmental Health Engineering* 3(1):p 12.
3. GÜNEŞ E. Treatment of dairy industry wastewater by variations of coagulation-flocculation and ozonation. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences – Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*. 2022.
4. Jai Prakash Kushwaha, Vimal Chandra Srivastava, Indra Deo Mall. Treatment of dairy wastewater by inorganic coagulants: Parametric and disposal studies. *Water Research*, Volume 44, Issue 20, 2010.
5. Enhancement of dairy wastewater treatment efficiency in batch chemical-assisted solar-powered electrocoagulation-adsorption system / Z. Al-Qodah et al. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024.
6. Application of Electrocoagulation Process for Dairy Wastewater Treatment/E. Bazrafshan et al. *Journal of Chemistry*. 2013. Vol. 2013.
7. DOF/DAF comparison for the treatment of milk industry wastewater / M. D. S. Pereira et al. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 2020. Vol. 15, no. 5. P. 1.
8. Experimental analysis on the synergistic effect of combined use of ozone and UV radiation for the treatment of dairy industry wastewater / R. Suresh et al. *Environmental Engineering Research*. 2020. Vol. 26, no. 5. P. 200375–0.
9. Talafha, A., Abu-Dalo, M., Albiss, B.A. et al. Design and fabrication of nanocomposite adsorbents for dairy industry wastewater treatment. *Discov Sustain* 5, 530 (2024).
10. International Dairy Federation. *Wastewater Treatment in Dairy Processing*. Bulletin of the IDF No. 489/2020. Brussels: IDF, 2020. 84 p.

## **ВИКОРИСТАННЯ *CHLORELLA VULGARIS* ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ВІДХОДІВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ШЛЯХОМ АКУМУЛЯЦІЇ БІОМОЛЕКУЛ**

**Борцюх В.В., Голуб Н.Б.**

**Науковий керівник: д. т. н., доцент Голуб Наталія Борисівна**

Стичні води м'ясопереробної та тваринницької промисловості характеризуються високим навантаженням органічних речовин, сполук азоту й фосфору, а також залишкових вітамінів, зокрема кобаламіну, який природно присутній у продуктах тваринного походження, а отже, і у промивних водах, що контактували з такою сировиною [1].

**Мета роботи** — проаналізувати сучасні літературні дані щодо використання *Chlorella vulgaris* у процесах очищення органічно забруднених стічних вод харчової промисловості та оцінити її потенціал як біотехнологічного агента, здатного одночасно зменшувати вміст забрудників і формувати біомасу, збагачену біологічно активними сполуками.

За даними досліджень, хімічне споживання кисню (ХСК) у м'ясопереробних стоках може сягати 800–2000 мг/л, біохімічне споживання кисню (БСК) — понад 1200 мг/л, загальний вміст азоту — 70–200 мг/л, а фосфору — 16–40 мг/л [1–3]. Такі показники спричиняють серйозні екологічні ризики: надмірне надходження стічних вод у навколишнє середовище призводить до евтрофікації водойм, зниження вмісту розчиненого кисню, масового розвитку ціанобактерій та інших водоростей, що погіршує якість води й викликає загибель водних організмів. Крім того, органічно збагачені стоки є джерелом патогенних мікроорганізмів, антибіотиків та залишкових гормональних сполук, які можуть негативно