

ВІДГУК

офіційного опонента, кандидата технічних наук, доцента
Безсонного Віталія Леонідовича
на дисертаційну роботу Макарова Євгена Олексійовича
«Підвищення екологічної безпеки процесу очистки стічних вод
молокопереробних підприємств»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 18 «Виробництво та технології»
за спеціальністю 183 - Технології захисту навколишнього середовища

Дисертаційна робота Макарова Є.О. присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання в галузі технології захисту навколишнього середовища – підвищенню екологічної безпеки процесу очистки стічних вод молокопереробних підприємств шляхом встановлення колоїдно-хімічних закономірностей і раціональних хіміко-технологічних параметрів очищення хімічними та електрохімічними методами.

Оскільки для України проблема екологічної безпеки поверхневих водних об'єктів завжди має велике значення, зокрема через наявність стабільного забруднення викидами неочищених або недостатньо очищених промислових стічних вод, а одним з основних джерел забруднення водоєм є стічні води підприємств харчової галузі, а саме, з переробки молока, тому тема дослідження є актуальною та обґрунтованою.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України (м. Харків) відповідно до Розпорядження КМУ від 21 квітня 2021 року № 443-р «Про схвалення Національного плану дій з охорони навколишнього природного середовища на період до 2025 року» та Указу Президента України №722/2019 від 30 вересня 2019 року «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року», у рамках науково-дослідної роботи «Підвищення екологічної безпеки процесу електрокоагуляційної очистки стічних вод молокопереробних підприємств» (№ ДР 0120U000007), в якій здобувач був відповідальним виконавцем.

Метою роботи є підвищення екологічної безпеки технології очистки стічних вод молокопереробних підприємств шляхом встановлення колоїдно-хімічних і хіміко-технологічних закономірностей очищення хімічними та електрохімічними методами.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше встановлені колоїдно-хімічні закономірності електрохімічного одержання коагулянтів на основі алюмінію для електрокоагуляційного очищення стічних вод молокозаводів, а саме, що при електрокоагуляції кислих та слабо кислих стічних вод ($4 < \text{pH} < 6$) утворюється колоїдний розчин малорозчинних частинок молекулярної будови $\text{Al}(\text{OH})_3$, які здійснюють коагулюючу дію і при цьому реалізується адсорбційний механізм коагуляції; при електрокоагуляції нейтральних та слабо лужних стічних вод

($9 > \text{pH} > 6$) в якості коагулянтів виступають заряджені мономерні та полімерні комплексні іони алюмінію, що забезпечує більш високий ступінь очистки, оскільки при цьому реалізується змішаний механізм коагуляції: поряд з адсорбційною здійснюється електростатична коагулююча дія.

Вперше розроблено математичну модель осадження шламу, яка є системою із трьох нелінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами, які було визначено на основі експериментальних даних з використанням методу найменших квадратів. Модель описує кінетику процесу осадження шламу в залежності від концентрації доданих реагентів – лужної добавки кальцію оксиду (CaO) та флокулянту поліакриламід (ПАА).

Удосконалено технологічну схему очистки висококонцентрованих стічних вод молокопереробного підприємства, яка включає видалення грубодисперсних механічних домішок відстоюванням і фільтруванням, електрокоагуляційну очистку, відстоювання після додавання лужної добавки та флокулянту, зневоднення шламу і флотоконденсату центрифугуванням. Впровадження удосконаленої схеми забезпечує високий ступінь очистки (98-99%) стічної води від жирів, білків та інших органічних етеророзчинних речовин (ЕРР), а також економію електроенергії.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота загальним об'ємом 172 сторінки складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 76 найменувань і 2 додатків, містить 28 рисунків та 18 таблиць.

Аналіз змісту дисертаційної роботи

У *вступі* подано загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та основні завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та публікації.

У *першому розділі* надано аналітичний огляд стану сучасної молокопереробної промисловості України. Визначені проблеми та перспективи розвитку галузі з урахуванням впливу воєнного стану, що був запроваджений після повномасштабного російського вторгнення. Встановлено, що вітчизняне виробництво молока та виробів з нього, не дивлячись на суттєві проблеми та навіть під час широкомасштабної війни, здатне не тільки вижити, а й повільно, але нарощувати об'єми виробництва та продажів. Проаналізовано літературні джерела щодо методів очищення стічних вод молокопереробних підприємств. Надано порівняльну характеристику електрохімічних методів, визначені переваги та недоліки. Встановлено, що найбільш перспективними, які дозволяють отримати найвищий ступінь очистки, є електрохімічні методи, а саме, електрокоагуляція. Спираючись на 12 принципів «зеленої хімії» та на принципи сталого розвитку, сформульовано основні напрями для підвищення екологічної безпеки електрохімічних методів очистки.

У *другому розділі* наведені матеріали та методи дослідження, які використовувались для досягнення мети та рішення основних завдань дисертаційної роботи. Надана хіміко-технологічна характеристика процесів утворення загального стоку, а також схем очистки стічних вод, яка складена на основі вивчення існуючих схем та споруд на молокопереробних підприємствах Сумської і Харківської областей. Описана технологічна схема очистки стічних вод на ТОВ «Богодухівський молзавод» Харківської області, яка включає очистку механічним та хімічним (реагентним) методами. Встановлено, що існуюча схема не дозволяє отримати воду після очистки з показниками, які б надавали можливість скиду в системи централізованого водовідведення або на споруди біологічної очистки. Наведений опис лабораторних методів дослідження процесів хімічної та електрохімічної очистки стічних вод молокозаводів, а також лабораторні методики визначення хімічного складу, фізико-хімічних та санітарно-гігієнічних властивостей стічних вод.

У *третьому розділі* представлені дослідження умов та закономірностей утворення і формування стічних вод молокопереробного підприємства. Досліджено хімічний склад стічних вод за основними показниками, які регламентуються при викиді стоків у систему водовідведення та на споруди біологічної очистки. Визначено, що хімічний склад загального стоку молокопереробного підприємства не відповідає вимогам скиду. Норми суттєво перевищені по наступним показникам: ХСК – у 4–24 рази; концентрація ЕРР – у 8–26 разів; концентрація ортофосфат-іонів – у 10–15 разів; концентрація ЗР – у 4–10 разів. Показник реакції середовища рН стічних вод є кислим, а по нормам має бути нейтральним або слабо лужним.

Наведено результати дослідження процесів реагентних (хімічних) методів очистки, встановлені хімікотехнологічні та колоїдно-хімічні закономірності, а також умови гідролізу солей металів FeSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ і FeCl_3 у стічних водах молокозаводів, за яких забезпечується достатньо високий ступінь очистки за ЕРР (85–87 %). Зазначається, що додавання солей металів має і негативні аспекти, а саме, вторинне забруднення стічних вод аніонами солей – хлорид- або сульфат-іонами. Показано, що використання методу реагентно-електрофлотаційної очистки стічних вод молокозаводів для видалення ЕРР та завислих речовин забезпечує необхідний ступінь очистки в області вивчених технологічних параметрів.

Проведені дослідження хімікотехнологічних та колоїдно-хімічних закономірностей електрохімічного одержання коагулянтів на основі алюмінію для електрокоагуляційного очищення стічних вод молокопереробних підприємств. Встановлено, що ефективність електрохімічного утворення та хімічна природа коагулянтів (гідроксидів металів, комплексних іонів) безпосередньо залежить від умов проведення процесу: рН середовища і хімічного складу стічних вод, густини електричного струму, тривалості проведення процесу електрокоагуляції.

Проведені дослідження процесів освітлення очищених електрокоагуляцією стічних вод трьома способами: гідростатичним відстоюванням та додатково, напірною флотацією або центрифугуванням. Проведено дослідження кінетики відстоювання очищених стічних вод після електрокоагуляції та встановлені закономірності утворення і осадження шламу в залежності від концентрації добавок, що дозволяють прискорити процес ущільнення та покращити фізикохімічні властивості шламу – кальцію оксиду (СаО) та флокулянту поліакриламід (ПАА).

Побудовано математичну модель осадження шламу, яка є системою із трьох нелінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами. Модель описує кінетику процесу осадження шламу в залежності від концентрації доданих реагентів. Показано, що лінії рівня об'єму шламу, як функції від кількості доданих реагентів, є прямими. Це означає, що рішенням задачі про вибір реагентів з мінімальною загальною вартістю, що забезпечують досягнення об'єму шламу не більше певного рівня, є вибір лише одного реагенту. Показано, що при поточних цінах на СаО і ПАА, економічно вигідним для освітлення є використання ПАА.

У *четвертому розділі* розроблені технологічна схема, технологічний режим, характеристика матеріальних потоків, розрахована еколого-економічна ефективність електрокоагуляційної технології очистки та надані рекомендації для ефективного впровадження технологічних рішень у виробництво. Надана порівняльна характеристика ефективності впровадження хімічного (реагентного) та електрокоагуляційного методів. Встановлено раціональний технологічний режим електрокоагуляційної очистки, який забезпечує максимальний ефект очистки за показниками ХСК, БСК, ЕРР, сполук нітрогену, завислих речовин: рН = 4,0-6,5; густина електричного струму – 30-50 А/м²; тривалість електрообробки – 5-7 хвилин. За такого режиму на 1 м³ стічної води витрачається 27-54 г алюмінію та 0,43-1,6 кВт·год електроенергії. Розроблена технологічна схема очистки стічних вод, яка включає видалення грубодисперсних механічних домішок відстоюванням і фільтруванням, електрокоагуляційну очистку, відстоювання після додавання лужної добавки та флокулянту, зневоднення шламу і флотоконденсату центрифугуванням. Розрахований еколого-економічний ефект впровадження технологій очистки стічних вод молокозаводів. Розроблені рекомендації по проектуванню очисних споруд та вибору обладнання для очистки найбільш забруднених стічних вод молокопереробного підприємства.

У *висновках* розкрито основні наукові досягнення автора, чіткі та якісні характеристики отриманих результатів, що свідчить про досягнення поставленої мети.

Зміст дисертації дає змогу зробити висновок, що сформульовані у роботі задачі наукового дослідження коректні, обґрунтовані та витікають із сучасного стану проблеми забруднення поверхневих водних об'єктів викидами неочищених або недостатньо очищених промислових стічних вод, зокрема стічними водами підприємств харчової галузі, а саме, з переробки

молока.

Головний науковий результат роботи полягає у вирішенні актуального науково-практичного завдання в галузі технологій захисту навколишнього середовища – підвищенню екологічної безпеки процесу очистки стічних вод молокопереробних підприємств шляхом встановлення колоїдно-хімічних закономірностей і раціональних хіміко-технологічних параметрів очищення хімічними та електрохімічними методами.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Отримані автором наукові результати достатньо обґрунтовані, що підтверджується коректністю постановки задач досліджень, теоретичним обґрунтуванням колоїдно-хімічних закономірностей та хіміко-технологічних параметрів електрохімічного одержання коагулянтів на основі алюмінію для електрокоагуляційного очищення стічних вод молокозаводів.

Теоретичні та експериментальні дослідження є достатньо науково обґрунтованими, їх достовірність підтверджена різними методами досліджень, що засновані на математичному моделюванні та прогнозуванні.

Публікації здобувача за темою дисертації. Наукові результати дисертації висвітлені у п'яти наукових публікаціях здобувача, у тому числі три статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, дві публікації у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus. Також опубліковано одинадцять тез доповідей у матеріалах наукових конференцій.

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу стану проблеми, обґрунтуванні актуальності роботи та її реалізації шляхом постановки мети і завдань дослідження, формуванні і доказі положень дисертаційного дослідження, виконанні теоретичних, аналітичних та експедиційних досліджень, узагальненні результатів досліджень, розробленні рекомендацій по їх використанню, а також впровадження результатів досліджень, підборі та адаптації до умов експериментів методик аналізу, проведення лабораторних досліджень хімічного складу стічних вод молокопереробного підприємства та встановлення закономірностей утворення загального висококонцентрованого стоку, що спрямовується на очисні споруди підприємства, здійснення математичного моделювання процесу осадження шламу в залежності від концентрації доданих реагентів – кальцію оксиду CaO та флокулянту неіонного поліакриламідру та отримання раціональної комбінації вмісту обох реагентів, які виявили синергічний ефект та забезпечили утворення мінімальної кількості шламу з найкращими хіміко-технологічними параметрами, обробленні результатів досліджень, узагальненні результатів, формулюванні висновків та підготовці матеріалів до публікації.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці раціонального технологічного режиму електрокоагуляційної очистки, який забезпечує максимальну ефективність очищення від забруднень за

показниками ХСК, БСК, ЕРР, сполук нітрогену, завислих речовин. В результаті проведених досліджень встановлені наступні параметри технологічного режиму: рН = 4,0-6,5; густина електричного струму – 30-50 А/м²; тривалість електрообробки – 5-7 хвилин. За такого режиму для очищення 1 м³ стічної води витрачається 27-54 г алюмінію та 0,43-1,6 кВт·год електроенергії.

Надана характеристика матеріальних потоків процесу очистки, розраховано еколого-економічний ефект від впровадження технологій очистки стічних вод молокозаводів. Показано, що еколого-економічний ефект від запровадження хімічного методу очистки становить 14048,10 грн, а від запровадження електрокоагуляційного методу – 16062,75 грн.

Розроблені рекомендації по проектуванню очисних споруд та вибору обладнання для очистки висококонцентрованих стічних вод молокопереробного підприємства. Результати досліджень впроваджені у виробництво на ТОВ «Богодухівський молзавод» Харківської області, у науково-дослідній установі «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем» (УКРНДІЕП), а також у навчальний процес здобувачів вищої освіти спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» Національного університету цивільного захисту України.

Недоліки і зауваження:

По роботі є наступні зауваження:

1. В переліку умовних позначень вжито скорочення «БПК – біологічне споживання кисню», хоча правильне позначення та назва: «БСК – біохімічне споживання кисню».

2. У тексті дисертації є певні орфографічні та стилістичні недоліки.

3. У першому розділі згадуються дванадцять принципів «зеленої хімії», було б доцільно їх навести та вказати, з якими саме з цих принципів корелює дослідження здобувача.

4. Підрозділ «1.32. Еколого-економічне обґрунтування використання електрохімічних методів...» доцільніше було б розмістити у «Розділі II Матеріали та методи дослідження»

5. На мій погляд, у першому розділі автор недостатньо уваги приділив питанням аналізу існуючих методів та принципів очистки стічних вод молокопереробних підприємств, зосередившись на електрохімічних методах очистки висококонцентрованих стічних вод молокопереробних підприємств.

6. Підрозділ «2.5 Методи математичної обробки результатів експериментів та математичного моделювання» містить більшою мірою опис комп'ютерного програмного забезпечення і не розкриває суті, власне методів математичної обробки результатів експериментів.

7. При математичному моделюванні осадження шламу в очищених стічних водах (підрозділ 3.5.2) не зовсім зрозуміло, навіщо використовувати метод найменших квадратів для пошуку значення коефіцієнта c_3 (рівняння 3.23), якщо його можна виразити з самого рівняння.

8. З роботи не є очевидним, яким чином впливає сезонність, зокрема

температурний режим навколишнього середовища та рівні забруднення стічних вод досліджуваного підприємства та витрату реагентів для обробки стічних вод.

Зазначені зауваження не зменшують цінність отриманих дисертантом результатів і не мають принципового характеру.

Загальний висновок

У дисертаційній роботі МАКАРОВА Євгена Олексійовича «Підвищення екологічної безпеки процесу очистки стічних вод молокопереробних підприємств», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища», отримані суттєві нові наукові та практичні результати. Робота в цілому вирішує науково-технічну задачу підвищення рівня екологічної безпеки процесу очистки стічних вод молокопереробних підприємств шляхом встановлення колоїдно-хімічних закономірностей і раціональних хіміко-технологічних параметрів очищення хімічними та електрохімічними методами.

Зміст дисертації відповідає поставленим завданням, наукові положення містять наукову новизну та відображені у наукових виданнях України. Текст дисертації написаний науковим стилем. Зміст та напрям досліджень відповідає профілю спеціальності. Таким чином, дисертаційне дослідження МАКАРОВА Євгена Олексійовича на тему «Підвищення екологічної безпеки процесу очистки стічних вод молокопереробних підприємств» за своєю актуальністю, достовірністю результатів досліджень, новизною та практичним значенням відповідає чинним вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 року № 44, а її автор –

МАКАРОВ Євген Олексійович – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища».

Офіційний опонент:

доцент кафедри готельного і ресторанного
бізнесу Харківського національного
економічного університету імені Семена Кузнеця

канд. техн. наук, доцент

Віталій БЕЗСОННИЙ

