

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

проф., д.т.н. _____ **КАПЛУН В.В.**
(підпис)
« _____ » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

доц., к.т.н. _____ **ОКУШКО О.В.**
(підпис)
« _____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ
ОЧИСТКИ СТИЧНИХ ВОД»**

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

_____ **К.Т.Н., ДОЦЕНТ**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ **К.Т.Н., ДОЦЕНТ**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Савченко В.В.
(ПІБ)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій**

к.т.н., доц. Окушко О.В.

(підпис)

« _____ » 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Савченку Володимиру Вячеславовичу

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Розробка електротехнологічного комплексу очистки стічних вод»

затверджена наказом від 18.11.2024 №2061 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14. 11 .2025

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: «Правила устаткування електроустановок»; «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів»; «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Існуючі технології обробки стічних вод, їхні недоліки та переваги
2. Принципи дії електротехнологічного обладнання для обробки стічних вод
3. Розробка електротехнічного комплексу для обробки стічних вод
4. Економічна ефективність розробленого комплексу
5. Питання охорони праці на виробництві

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання «19» листопада 2024 р.

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

_____ (підпис)

Усенко С.М.

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

Савченко В.В.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 88 с., 28 рис., 7 табл., 26 джерел.

Мета дослідження. Розробка електротехнологічного комплексу для підвищення якості та енергоефективності очистки стічних вод, шляхом застосування сучасних електротехнологічних методів обробки.

Об'єкт дослідження. Електротехнологічні методи обробки стічних вод побутових та промислових об'єктів.

Предмет дослідження. Вплив електротехнологічних методів обробки на якість обробки стічних вод.

Дослідження проводились за сучасними методиками. Обробка результатів виконувалась на ПК в середовищі математичного програмного забезпечення "Mathcad 15.1".

В магістерській роботі представлено вибір технологічного обладнання для обробки стічних вод.

Проаналізовано питання безпеки праці. Проводяться техніко-економічні розрахунки.

Положення що виносяться на захист:

- Аналіз існуючого стану використання електротехнологічних методів обробки стічних вод з метою зменшення матеріальних витрат на обробку;
- Вибір технологічного обладнання для обробки та підготовки до скиду стічних вод;
- Обрахунок та вибір електротехнічного обладнання різних технологічних процесів на станціях очистки стічних вод;
- Розрахунок доцільності використання пристроїв обробки стічних вод;
- Заходи з охорони праці;
- Заходи з пожежної безпеки.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1	8
ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ, ТА ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І СИСТЕМ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД.....	8
1.1 Історичний огляд	8
1.2. Огляд існуючих методів сучасності обробки стічних вод їх переваг та недоліків	10
РОЗДІЛ 2	31
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД.....	31
2.1. Електрохімічні методи.....	31
2.2.Огляд сучасних напрямків розвитку озонування і методів очистки ним споживчих та стічних вод.....	38
2.3.Огляд сучасних видів обробки води комбінаціями Ультрафіолетового опромінення з іншими методами обробки	51
РОЗДІЛ 3	55
КОНЦЕПЦІЯ ТА РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ОБРОБКИ СТІЧНИХ ВОД КОМБІНОВАНИМ МЕТОДОМ ОЗОНУ І УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	55
3.1.Аналіз проблеми.....	55
3.2. Підбір та внесення змін у класичну систему обробки стічної води із використанням комбінованого методу озон ультрафіолет	66
3.3. Розробка розрахунок системи.....	73
РОЗДІЛ 4.....	78
ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ.....	78
РОЗДІЛ 5	83
ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК	83
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87

ВСТУП

Вода є одним із найважливіших і водночас незамінних природних ресурсів, без яких неможливе повноцінне функціонування людського суспільства, промисловості та природних екосистем. У процесі розвитку промислового виробництва утворюються значні обсяги стічних вод, що можуть містити широкий спектр забруднювальних речовин — від органічних сполук до важких металів і токсичних хімічних компонентів. Накопичення таких забруднювачів у водних об'єктах створює серйозні загрози не лише для довкілля, але й для здоров'я населення, оскільки вони негативно впливають на якість питної води, біорізноманіття та загальний стан водних екосистем.

Кожна галузь промисловості формує стічні води зі специфічним складом, обсягом та рівнем забрудненості. У зв'язку з цим надзвичайно важливим є глибоке розуміння природи та властивостей промислових стічних вод, що дозволяє обґрунтовано обирати та впроваджувати ефективні технології очищення. Від правильного вибору методів залежить не лише результативність роботи очисних споруд і їх економічність, а й можливість повторного використання очищеної води, що є складовою сталого управління водними ресурсами.

Промислова революція та інтенсивна урбанізація зумовили різке зростання обсягів утворення стічних вод у світовому масштабі. У середньому близько 22 % світового водоспоживання припадає на промисловий сектор. Водночас приблизно 80 % утворених стічних вод скидається у природні водотоки без належного очищення, що призводить до забруднення довкілля та становить серйозну загрозу для здоров'я людини й водних екосистем (Міжнародна водна асоціація, Звіт про стічні води, 2018). У розвинених країнах, зокрема Північної Америки та Європи, частка промислового водоспоживання є значно вищою, ніж у країнах, що розвиваються (приблизно 50 % проти 4–12 %). Сполучені Штати Америки досягли

помітних успіхів у сфері очищення стічних вод завдяки впровадженню передових технологій та високому рівню технічної експертизи. З огляду на сучасні тенденції, прогнозується, що до 80 % світових стічних вод і надалі скидатимуться у природні водойми без будь-якого очищення.

Основними джерелами промислових стічних вод є нафтохімічна, фармацевтична, целюлозно-паперова, текстильна, сталеливарна, металообробна, харчова, лакофарбна, гірничодобувна, енергетична та гальванічна промисловості. Саме ці галузі є основними джерелами надходження важких металів у стічні води, зокрема міді (Cu), цинку (Zn), кадмію (Cd), хрому (Cr), ртуті (Hg), заліза (Fe), свинцю (Pb), нікелю (Ni) та миш'яку (As), які присутні у різних концентраціях залежно від специфіки технологічних процесів.

Незадовільний технічний стан очисних споруд, недостатній рівень їх обслуговування та дефіцит кваліфікованого персоналу призводять до того, що значні обсяги промислових стічних вод скидаються без належного очищення. Це негативно впливає як на поверхневі, так і на підземні води, погіршуючи екологічний стан водних об'єктів і створюючи додаткові ризики для здоров'я населення. Зростання попиту на природні ресурси та інтенсифікація гірничодобувної діяльності ще більше посилюють проблему, сприяючи утворенню великих обсягів стічних вод, насичених металами.

У зв'язку з цим управління промисловими стічними водами перетворилося на одну з ключових глобальних екологічних проблем. Незважаючи на наявність значної кількості розроблених і досліджених методів очищення, кожен із них має певні обмеження, зокрема недостатню ефективність за окремих умов, високе споживання реагентів і утворення вторинних забруднювачів, таких як шлам, токсичні відходи та концентровані стоки. Тому актуальним залишається пошук економічно доцільних і екологічно безпечних технологій очищення промислових стічних вод з підвищеною ефективністю.

РОЗДІЛ 1

ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТА ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І СИСТЕМ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД

1.1 Історичний огляд

Історія розвитку технологій та систем очищення стічних вод охоплює тисячоліття й тісно пов'язана з еволюцією людської цивілізації, її ставленням до водних ресурсів, гігієни та екологічної безпеки. З найдавніших часів люди прагнули забезпечити доступ до чистої води та відведення забруднених стоків. Від перших глиняних каналів Месопотамії до сучасних мембранних біореакторів XXI століття розвиток систем очищення відображає поступ науки й техніки та зростання екологічних вимог.

Перші відомі каналізаційні системи датуються IV–III тис. до н.е. та були створені в Месопотамії, Шумері, Вавилоні й цивілізації долини Інду. У містах Мохенджо-Даро та Хараллі археологічні дослідження виявили розгалужені дренажні мережі з обпаленої глини та цегли. Кожне житло мало власний канал, під'єднаний до центральної системи, що відводила побутові стоки за межі поселень. Також використовувалися примітивні камери для осідання твердих речовин — прототипи сучасних відстійників.

У Стародавньому Єгипті іригаційні канали виконували частково й дренажні функції, а в Стародавньому Китаї застосовували керамічні трубопроводи. Найвищого рівня розвитку інженерні рішення досягли у Стародавньому Римі. Система "Cloaca Maxima", збудована у VI ст. до н.е., забезпечувала відведення дощових і побутових вод та частково функціонує донині. Водночас очищення води не здійснювалося — основною метою було запобігання затопленням і антисанітарії.

У середньовіччі розвиток санітарних технологій у Європі значною мірою зупинився, що призвело до погіршення гігієнічних умов і спалахів

епідемії. Більшість міст не мали централізованої каналізації, а стоки скидалися безпосередньо на вулиці або у водойми. Водночас у Китаї та Японії продовжували застосовувати підземні керамічні трубопроводи, що забезпечували мінімальний рівень санітарії.

Суттєвий перелом відбувся у ХІХ столітті в період індустріальної революції. Швидке зростання міст і промисловості спричинило різке збільшення обсягів стічних вод та забруднення річок. Показовим став «Великий сморід» у Лондоні 1858 року, після якого інженер Джозеф Базалджетт спроектував масштабну систему підземних колекторів. У цей період з'являються перші механічні методи очищення — решітки, пісколовлювачі та первинні відстійники, а також удосконалюються матеріали труб і міська інфраструктура.

На початку ХХ століття відбувся перехід від простого відведення води до її очищення. Перші очисні споруди базувалися на механічному відстоюванні та фільтрації. У 1914 році було вперше впроваджено метод активованого мулу, який став основою сучасної біологічної очистки стічних вод. Надалі активно розвивалися біофільтри, аеротенки та хлорування як метод знезараження. У 1930–1950-х роках масово будувалися комбіновані очисні станції, що поєднували механічні та біологічні процеси.

Після Другої світової війни посилилася увага до охорони довкілля та формування екологічного законодавства. Проведення Стокгольмської конференції ООН у 1972 році стало поштовхом до впровадження нормативів щодо обов'язкового очищення стічних вод. У 1970–1990-х роках активно розвивалися технології видалення азоту та фосфору, ультрафіолетового знезараження, зворотного осмосу, ультра- та нанофільтрації, а також автоматизовані системи контролю якості води. Саме в цей період сформувалися концепції повторного використання очищеної води.

У ХХІ столітті галузь очищення стічних вод зазнала технологічного прориву. Широкого поширення набули мембранні біореактори (MBR), системи глибокої фільтрації, електрохімічні та фотокаталітичні методи.

Значну роль відіграє цифровізація — використання датчиків, онлайн-моніторингу, автоматизованих систем управління та елементів штучного інтелекту. Все більшого поширення набуває концепція "Zero Liquid Discharge", спрямована на мінімізацію скидів.

В Україні розвиток систем очищення стічних вод розпочався наприкінці XIX — на початку XX століття з будівництва централізованих каналізацій у великих містах. У радянський період були зведені потужні станції аерації, зокрема Київська станція аерації (1960 р.), одна з найбільших у Європі. Водночас до кінця XX століття значна частина споруд зазнала фізичного та морального зносу. З 2000-х років розпочалася модернізація за підтримки міжнародних фінансових організацій з орієнтацією на європейські стандарти, впровадження MBR, енергоефективної аерації, УФ-зnezараження та замкнених водних циклів.

Таким чином, розвиток технологій очищення стічних вод пройшов тривалий шлях — від простих дренажних систем до високотехнологічних інтегрованих комплексів. Сучасні та перспективні напрями розвитку галузі зосереджуються на енергоефективності, екологічній безпеці, цифровізації та повторному використанні водних ресурсів, що є ключовими чинниками сталого розвитку.

1.2. Огляд існуючих методів сучасності обробки стічних вод їх переваг та недоліків

Промислові стічні води характеризуються значною різноманітністю складу та часто є токсичнішими за комунальні. Через це вони не завжди можуть бути ефективно очищені на міських очисних спорудах, орієнтованих переважно на видалення біохімічного споживання кисню (БСК). Ефективне очищення промислових стоків потребує детального аналізу їх складу та впровадження відповідних комбінацій методів очищення. Як правило, досягнення нормативної якості води забезпечується шляхом послідовного

застосування кількох технологічних стадій, кожна з яких спрямована на видалення певних груп забруднювачів. Процес очищення стічних вод зазвичай складається з попереднього, первинного, вторинного та третинного етапів.

Схема загального процесу очищення стічних вод та відповідні використовувані методи очищення показано на рис. 1.1.



Рис. 1.1.

Попереднє очищення полягає в видаленні великих частинок сміття, піску та твердих речовин зі стічних вод за допомогою таких процесів, як фільтрація, відсіювання видалення піску. Далі, первинне очищення видаляє завислі тверді речовини, дрібні частинки піску, жири та олії за допомогою таких процесів, як седиментація, флотації розчиненого повітря (Dissolved Air Flotation, DAF).

Вторинне очищення полягає у використанні біологічних методів для зменшення вмісту органічних речовин, азоту та фосфору у стічних водах шляхом біохімічних реакцій, таких як перетворення на біомасу.

Третинне очищення, також відоме як поглиблене очищення, застосовується для подальшого покращення очищених стічних вод, щоб вони відповідали певним стандартам для повторного використання або скидання води. Третинне очищення включає такі методи, як мембранна фільтрація, адсорбція та хімічне окислення.

Методи очищення можна розділити на фізичні, біологічні та хімічні.

Фізичні методи передбачають видалення забруднюючих речовин шляхом використання фізичних та механічних властивостей для розділення. Ці методи включають просіювання, подрібнення, видалення піску, седиментацію, DAF, сорбцію, іонний обмін, мембранну фільтрацію, випаровування, дистиляцію та мембранну дистиляцію.

Біологічне очищення можна розділити на аеробне та анаеробне очищення залежно від доступності кисню.

Фізико - хімічне очищення включає осадження, коагуляцію, флокуляцію, випаровування, дистиляцію, мембранну дистиляцію, екстракцію розчинником, електрохімічні методи, хімічне окислення, та поглиблені процеси окислення (AOP), його частиною є хімічні та електротехнічні методи.

1.2.1 Опис фізичних методів.

Просіювання, подрібнення та видалення піску.

Просіювання, подрібнення та видалення піску застосовуються як етапи попередньої обробки стічних вод перед первинним очищенням. Основною метою цих процесів є захист обладнання, розташованого нижче за течією, та підвищення ефективності подальших стадій очищення шляхом видалення або зменшення розмірів твердих домішок. Під час просіювання стічні води пропускають через решітки або сітчасті фільтри, які затримують великі

тверді частинки та сміття. Залежно від розміру включень застосовують грубі решітки з отворами 6 мм і більше, дрібні решітки з отворами 1,5–6 мм, сита з отворами 0,2–5 мм та мікросита з розмірами отворів 0,001–0,3 мм. Затримане сміття видаляється вручну або механізовано та утилізується.

Подрібнення використовується як альтернатива просіюванню та полягає у зменшенні розміру твердих частинок без їх фактичного видалення зі стічних вод. Саме подрібнення не видаляє тверді речовини зі стічних вод. Подрібнені тверді речовини видаляються в наступній пісколомильній камері та відстійнику. Подрібнювачі складаються з решіткового блоку та обертового елемента з ріжучими зубцями. Оскільки подрібнені частинки можуть пошкоджувати обладнання та повинні вилучатися на наступних стадіях, подрібнювачі обмежено застосовуються на сучасних очисних спорудах.

Пісколовлювачі призначені для видалення важких мінеральних частинок (піску, гравію), що запобігає зносу насосів і трубопроводів. Використовуються аеровані, вихрові та горизонтальні пісколовлювачі, а також гідроциклони. Вибір типу визначається характеристиками частинок, гідравлічними умовами, енергоспоживанням та експлуатаційними витратами.

Седиментація

Седиментація є одним із найпоширеніших методів первинного очищення стічних вод, що забезпечує зниження показників БСК та ХСК. Первинні відстійники розміщуються після механічного очищення та перед біологічною обробкою. У відстійниках швидкість потоку зменшується, внаслідок чого зважені та органічні речовини осідають на дно резервуара з утворенням осаду.

Відстійники можуть бути прямокутної або круглої форми. Прямокутні резервуари характеризуються нижчою вартістю будівництва, тоді як круглі забезпечують зручніше видалення осаду та простіше обслуговування. Ефективність седиментації залежить від характеристик частинок, швидкості осідання, гідродинаміки потоку та геометричних параметрів резервуара. Для

вдосконалення проєктування дедалі частіше застосовуються емпіричні моделі та методи обчислювальної гідродинаміки (CFD).

Седиментація дозволяє видалити приблизно 50–70 % зважених речовин та 25–40 % БСК. Основними недоліками є значні габарити споруд та низька ефективність щодо дрібнодисперсних і розчинених домішок.

1.2.2. Опис фізико - хімічних методів.

Флотація розчиненим повітрям.

Флотація розчиненим повітрям (DAF) застосовується для видалення завислих речовин, органічних забруднювачів, масел та жирів. Метод базується на утворенні дрібних бульбашок повітря, які прикріплюються до частинок і спричиняють їх спливання на поверхню, де вони механічно видаляються. Для підвищення ефективності процесу часто додають коагулянти та флокулянти.

DAF широко використовується для очищення промислових стічних вод і забезпечує високу ефективність видалення БСК та ХСК. Порівняно із седиментацією, флотація потребує менших об'ємів споруд та має коротший час утримання, однак характеризується підвищеними енергетичними та експлуатаційними витратами.

Іонний обмін

Іонний обмін полягає у видаленні розчинених іонів зі стічних вод за допомогою іонообмінних смол. Смоли поділяються на катіонні та аніонні й здатні до багаторазової регенерації. Метод ефективний для пом'якшення води, демінералізації та вилучення важких металів.

Смолу вибирають залежно від таких критеріїв, як цільові іони, що підлягають видаленню, характеристики стічних вод, економічна доцільність та бажана якість води. Найбільшого практичного значення для очищення стічних вод набули синтетичні іонообмінні смоли – високомолекулярні сполуки, вуглеводневі радикали яких створюють просторову сітку з фіксованими на ній іонообмінними функціональними групами. Просторова вуглеводнева сітка називається матрицею, а іони, що обмінюються, -

протионами. Кожен протион з'єднаний із протилежно зарядженими іонами, званими анкерними.

Ступінь забрудненості іонообмінної смоли визначають за допомогою індикаторів. Було проведено дослідження волокнистих сорбентів, що застосовуються для очищення стічних вод від іонів важких металів (Ag, Hg, Cr, Cd, Fe). Вони легко регенеруються шляхом обробки кислотами та можуть багаторазово використовуватися для очищення. З розчину, отриманого після регенерації волокон, можна виділяти метали та використовувати їх повторно.

Основними перевагами іонного обміну є високий ступінь очищення та можливість рекуперації цінних компонентів. До недоліків належать значні витрати на смоли, потреба в реагентах для регенерації та утворення вторинних відходів.

Сорбція

Сорбція передбачає вилучення забруднювачів на поверхні твердих адсорбентів. На ефективність адсорбції впливає багато факторів, таких як температура, рН, використання перемішування, час контакту, дозування адсорбенту та початкова концентрація. Адсорбенти, що використовуються для очищення води, включають натуральні та синтетичні матеріали, такі як активоване вугілля, глина, біосорбенти, оксид графену та різні наноматеріали. Серед різних доступних адсорбентів активоване вугілля є найпопулярнішим і широко використовується для очищення стічних вод завдяки таким перевагам, як висока питома площа поверхні, широке застосування до багатьох забруднювачів та здатність до регенерації. Разом з тим, висока вартість стимулює використання альтернативних адсорбентів, зокрема біосорбентів та промислових відходів. Сорбційні процеси застосовуються на вторинних і третинних стадіях очищення, часто в поєднанні з іншими методами.

Мембранна фільтрація

Мембранна фільтрація – це універсальна технологія очищення промислових стічних вод, яку можна поєднувати з іншими технологіями для

досягнення достатньо високої якості води для повторного використання, це метод що використовуються в технології виділення кольорових металів із стічних вод, умовно поділяються на мікрофільтрацію, ультрафільтрацію, зворотний осмос, випаровування через мембрани.. Вона може використовуватися для очищення стічних вод багатьох галузей промисловості, включаючи целюлозно-паперову, текстильну, гальванічну та нафтову.

Стічні води можна фільтрувати через напівпроникні мембрани з різними розмірами пор для відділення забруднювачів, таких як колоїди, мікроорганізми, органічні речовини, солі та іони. Напівпроникні мембрани вибірково проникають речовинами з певними розмірами та зарядами. Стічні води можна очищати за допомогою мембран MF, UF, NF та RO

Асиметричні мембрани

Асиметричні мембрани використовуються в процесах, що працюють під тиском, завдяки їхній високій плинності та механічній стабільності. Мембрани можуть складатися з полімерів (таких як поліетилен, політетрафторетилен та поліпропілен) або неорганічних матеріалів (таких як кераміка, цеоліти та кремнезем).

Метод зворотного осмосу.

Зворотним осмосом та ультрафільтрацією називають процеси фільтрування розчинів через напівпроникні мембрани під тиском, що перевищує осмотичний тиск. Мембрани пропускають молекули розчинника, затримуючи розчинені речовини. Вони мають розмір пор у кілька ангстрем і можуть розділяти іони натрію та хлориду, що робить метод перспективною технологією для опріснення морської води. При ультрафільтрації розмір окремих частинок значно більше. Від звичайної фільтрації такі процеси відрізняються відокремленням частинок менших розмірів. Тиск, необхідний проведення процесу зворотного осмосу (6 - 10 МПа) значно більше, ніж щодо процесу ультрафільтрації (0.1 – 0.5 МПа).

Відомо, що з зворотному осмосі ступінь добування хрому дорівнює 94 – 95%. Відзначено, що зі зростанням рН швидкість фільтрування зменшується в 3 – 4 рази, а за нижчих рН термін служби мембран зменшується.

Як самостійні зворотноосмотичні установки для очищення гальванічних стічних вод використовуються установки з наступними характеристиками: продуктивність по очищеній воді 1,0; 5,0; 10,0; 25,0 м³/год, що забезпечують очищення від солей важких металів не нижче 98%, рівень повторного використання води не менше 95% при робочому тиску від 3,0 до 5,0 МПа.

Зворотноосмотичний модуль установки для очищення стічних вод гальванічних виробництв продуктивністю 1 м³/год представлений на рис. 1.2.

Переваги методу: Можливість очищення до вимог ГДК, повернення очищеної води до 60% в обіговий цикл, можливість утилізації важких металів, очищення у присутності лігандів, що утворюють міцні комплексні сполуки.

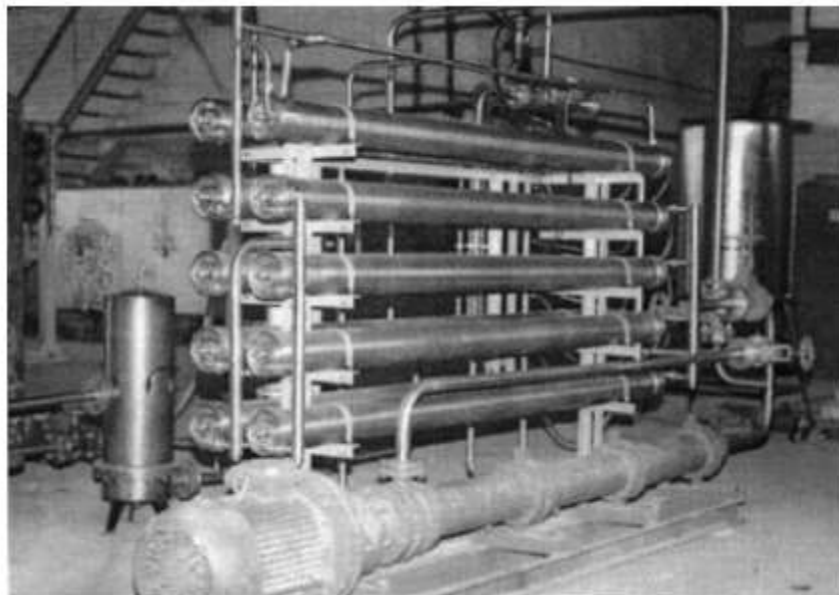


Рис. 1.2. Зворотноосмотичний модуль комплексної установки для очищення стічних вод гальванічних виробництв продуктивністю 1 м³/год.

Недоліки методу: Необхідність попереднього очищення стічних вод від масел, розчинників, органіки, завислих речовин, дефіцитність та дорожнеча

мембран, складність експлуатації, високі вимоги до герметичності установок; великі площі, високі капітальні витрати, відсутність селективності, чутливість мембран до зміни параметрів стоків, що очищаються також схильні до забруднення, повинні працювати під високим тиском і є дорогими за інші мембрани.

Випаровування, дистиляція та мембранна дистиляція

Випаровування, дистиляція та мембранна дистиляція належать до термічних методів очищення стічних вод, які застосовуються для розділення та концентрування забруднюючих речовин. Очищена вода в цих процесах зазвичай збирається шляхом конденсації водяної пари.

Випарні ставки являють собою неглибокі басейни під відкритим небом, вистелені глиною або синтетичними матеріалами для запобігання фільтрації стічних вод у ґрунт. Під дією сонячного опромінення вода випаровується, що призводить до концентрування забруднювачів, кристалізації солей та накопичення осаду, який періодично видаляється та утилізується. Випарні ставки застосовуються для очищення нафтовидобувних, шахтних та інших промислових стічних вод, а також для відведення розсолів з опріснювальних установок. До їх переваг належать простота реалізації та низькі капітальні й експлуатаційні витрати. Водночас недоліками є можливий негативний вплив на довкілля та здоров'я через викиди важких металів, пестицидів, летких органічних сполук, CO₂ і CH₄, а також значні потреби в земельних ресурсах, що обмежує застосування цього методу переважно сухими та теплими регіонами.

Інші методи випаровування реалізуються із застосуванням спеціалізованого обладнання, зокрема миттєвих випарників, конденсаторів і дистиляційних колон. Стічні води нагріваються за допомогою теплових насосів або нагрівальних елементів до утворення водяної пари, яка надалі конденсується у вигляді дистильованої води. Невипарені солі та тверді речовини залишаються у концентрованому залишку. Термічні методи можуть

застосовуватися для очищення широкого спектра стічних вод і є особливо ефективними для опріснення, однак характеризуються значними енергетичними витратами. Крім того, леткі органічні сполуки, що випаровуються при відносно низьких температурах, можуть переходити в очищену воду.

Альтернативою є механічна рекомпресія пари, при якій стиснена пара повторно використовується для нагрівання сировини. Ця технологія відзначається підвищеною енергоефективністю, компактністю та можливістю низькотемпературної експлуатації.

До основних переваг випарних технологій належать високий коефіцієнт відновлення води, можливість одночасного вилучення очищеної води та солей, а також широкий спектр застосування. Недоліками є високі капітальні витрати, значне енергоспоживання та складність обладнання.

Мембранна дистиляція – це процес термічного розділення, в якому гідрофобна пориста мембрана використовується для пропускання водяної пари, одночасно відкидаючи забруднювачі. Мембранну дистиляцію можна розділити на чотири типи залежно від сторони проникнення: прямий контакт, при якому обидві сторони поверхні мембрани контактують з паром, повітряний зазор, при якому сторона проникнення має повітряний зазор, продувний газ, при якому холодний інертний газ використовується для перенесення пари зі сторони пермеату, та вакуум, при якому вакуум застосовується до сторони пермеату насосом під нижчим тиском, ніж тиск насичення летких молекул. Мембранна дистиляція вважається однією з найперспективніших технологій для очищення сольових стічних вод, а також може бути використана для очищення масляних стічних вод у поєднанні з іншими процесами для зменшення забруднення. Деякими перевагами мембранної дистиляції є низький робочий тиск (для запобігання забрудненню), висока селективність та низька чутливість до концентрації розчиненої речовини в сировині. Деякими недоліками мембранної дистиляції

є нижча пропускна здатність, ніж у RO, ризик змочування пор та високе споживання енергії.

1.2.3.Хімічні методи. Хімічна обробка включає використання хімічних речовин, таких як неорганічні (солі заліза та алюмінію) та органічні (катіонні, аніонні та неіонні полімери). Деякими прикладами методів хімічної обробки є коагуляція-флокуляція та хімічне осадження (для підвищення здатності до осідання забруднювачів, хімічне окислення та альфа-фосфати (для розкладання органічних речовин, регулювання рН та дезінфекції). Хімічну обробку часто поєднують з іншими біологічними та фізичними процесами очищення як стратегію попередньої або подальшої обробки.

Хімічне осадження. Хімічне осадження застосовується для видалення розчинених забруднювачів зі стічних вод шляхом переведення їх у нерозчинну тверду фазу. Метод є особливо ефективним для вилучення важких металів і широко використовується в промисловості завдяки відносно низькій вартості та простоті експлуатації. Для зменшення розчинності іонів до стічних вод додають відповідні реагенти, внаслідок чого утворюється осад, який надалі відокремлюється методами седиментації або фільтрації. Для покращення осаджувальних властивостей часто застосовують флокулянти.

Розчинені метали можуть осаджуватися у вигляді гідроксидів, сульфідів або карбонатів. Найбільш поширеним є гідроксидне осадження, яке реалізується шляхом додавання лужних реагентів, зокрема гідроксиду кальцію або гідроксиду натрію. Вапно є найбільш економічним реагентом і сприяє утворенню гідроксидів металів. Оптимальне значення рН для осадження залежить від конкретного металу, а з огляду на амфотерні властивості гідроксидів зміна рН може призводити до повторного розчинення осаду. Це ускладнює очищення стічних вод, що містять суміші різних металів, і потребує багатостадійної обробки.

Сульфідне осадження здійснюється шляхом введення сульфід-іонів, що утворюються з таких реагентів, як H_2S , Na_2S , CaS або $NaHS$. Порівняно з

гідроксидним осадженням цей метод забезпечує утворення менш розчинних осадів і кращі кінетичні характеристики, однак є чутливим до дозування реагентів і може супроводжуватися проблемами при використанні надлишкового сульфїду. Карбонатне осадження є альтернативним підходом, що базується на застосуванні карбонатів натрію або кальцію. Дослідження показали, що карбонатне осадження може забезпечувати вищу ефективність вилучення деяких металів при рН 7–8, проте призводить до утворення більшого об'єму осаду.

Коагуляція та флокуляція

Коагуляція та флокуляція призначені для видалення колоїдних і дрібнодисперсних частинок без фазового переходу. Коагуляція полягає у дестабілізації суспензій, тоді як флокуляція забезпечує агрегацію частинок у більші флокули. Утворені флокули відокремлюються шляхом седиментації, фільтрації або флотації.

Ефективність процесів значною мірою залежить від режиму перемішування. Для коагуляції застосовується інтенсивне короткочасне перемішування, тоді як для флокуляції — повільне перемішування протягом тривалішого часу. На результат також впливають рН, температура, доза коагулянтів і флокулянтів та іонний склад води. До традиційних коагулянтів належать солі алюмінію та заліза, однак через їх чутливість до рН і утворення значної кількості осаду все ширше застосовуються полімерні флокулянти.

Перевагами коагуляції та флокуляції є простота реалізації та висока ефективність видалення колоїдів і завислих речовин. Основними недоліками залишаються високі експлуатаційні витрати, пов'язані з витратою реагентів, та необхідність утилізації значних об'ємів осаду.

Екстракція розчинником

Екстракція розчинником використовується для видалення та відновлення цінних компонентів зі стічних вод і широко застосовується в нафтовій, хімічній та фармацевтичній промисловості. Процес полягає в контактуванні стічних вод з незмішуваним розчинником, який вибірково

вилучає цільові сполуки. В результаті утворюються екстракт, збагачений розчиненою речовиною, та рафінат — очищена вода.

Контакт між фазами забезпечується за допомогою змішувачів-відстійників, колон з перемішуванням або насадкових колон. Подальша регенерація розчинника та вилучення цінних речовин здійснюються шляхом дистиляції або відпарювання. Метод ефективний для очищення стічних вод з високою концентрацією фенольних сполук і дозволяє досягати високого ступеня відновлення корисних компонентів.

До переваг екстракції розчинником належать селективність, можливість рекуперації цінних речовин і відсутність утворення осаду. Недоліками є високі інвестиційні витрати, складність обладнання та потенційний негативний вплив розчинників на довкілля і здоров'я персоналу.

1.2.4. Біологічні методи

Біологічна обробка використовує мікроорганізми, такі як бактерії, грибки, дріжджі та водорості, для видалення забруднюючих речовин зі стічних вод. Біологічна обробка стічних вод в основному використовується для зменшення вмісту органічних речовин, але також може видаляти неорганічні сполуки, такі як важкі метали. Біологічна обробка може ефективно очищати промислові стічні води з високим вмістом органічних речовин, такі як стічні води з харчової, паперової та текстильної промисловості. Біологічна обробка зазвичай поділяється на аеробні та анаеробні типи. Аеробна біологічна обробка полягає у використанні мікроорганізмів для перетворення органічних забруднювачів на CO₂, воду та біомасу у присутності кисню, який часто подається за допомогою механічної аерації за допомогою повітродувок та компресорів. Під час анаеробної біологічної обробки забруднюючі речовини метаболізуються мікроорганізмами за відсутності кисню через анаеробні процеси, включаючи гідроліз, ацидогенез, ацетогенез та метаногенез. В результаті утворюється біогаз, що містить переважно CO₂ та CH₄. Аеробна обробка зазвичай використовується для стічних вод низької концентрації з ХСК нижче 1000

мг/л, тоді як анаеробна обробка підходить для стічних вод високої концентрації з ХСК вище 4000 мг/л. Анаеробне очищення пропонує переваги над анаеробним, включаючи меншу потребу в енергії, у шість-вісім разів менше виробництво біомаси, менший об'єм реактора та виробництво біогазу, який можна використовувати як паливо. Аеробне очищення пропонує переваги над анаеробним очищенням, включаючи вищу якість очищених стічних вод, зменшення запаху та видалення поживних речовин. Таким чином, анаеробно-аеробні системи можна використовувати для ефективного видалення органічного вмісту та підвищення якості стічних вод для відповідності стандартам скидання. Інші комбіновані системи включають АОАО, ААО та ААОО. Біологічне очищення поєднується з фізичним та хімічним очищенням, зазвичай, як вторинне очищення на очисних спорудах.

Аеробне зброджування

До найбільш застосовуваних методів аеробної біологічної очистки стічних вод належать системи активного мулу (AS), аеровані лагуни, SBR-реактори періодичної дії, крапельні фільтри, мембранні біореактори (MBR), обертові біологічні контактори (RBC) та аеробні MBBR. Одним із ключових аспектів цих технологій є поводження з надлишковим мулом. Традиційно осад вивозили на полігони, однак через екологічні вимоги та зростання вартості захоронення все більше впроваджують альтернативні методи. Серед них – згущення з наступним анаеробним зброджуванням чи спалюванням, а також процедури зневоднення та сушіння зі спалюванням після підготовки. В європейських країнах основними засобами утилізації є повторне використання осаду (зокрема в агросекторі) та його спалювання.

Активний мул

Технологія активного мулу – один із найрозповсюдженіших способів біологічної очистки, спрямований на видалення завислих речовин та органічних домішок. Система працює за рахунок мікроорганізмів, які утримуються в аеротенках і переробляють органічні речовини. Після аеротенка використовується відстійник, де частина мулу повертається назад,

підтримуючи потрібну концентрацію біомаси, а інша частина віддаляється. Залежно від вимог до якості очищених вод, отриманий супернатант може напряду скидатися або піддаватися додатковим стадіям знезараження. Для підвищення ефективності видалення ХСК можуть застосовуватися біоносії; наприклад, у целюлозно-паперовій промисловості досягають до 88,4% зниження ХСК. Основні переваги систем активного мулу включають низькі інвестиційні витрати, високу якість стоку та компактність. Недоліками є значні експлуатаційні витрати, утворення надлишкового осаду та чутливість до змін у складі стічних вод.

SBR — послідовний реактор періодичної дії

SBR є модифікацією AS-процесу, у якій усі стадії – наповнення, аерація, відстоювання, злив та видалення осаду – відбуваються в одному резервуарі. Цикл SBR складається з п'яти фаз:

1. Заповнення - коли стоки надходять у резервуар;
2. Реакція - під час якої виконується біо-очищення з аерацією або без неї;
3. Седиментація - коли притік і відтік припиняються для формування чіткого шару освітленої води;
4. Злив супернатанту;
5. Холостий хід - який забезпечує переключення між циклами чи резервуарами.

Гнучкість управління аерацією дає можливість створювати як аеробні, так і анаеробні умови. Серед переваг – компактність, варіативність, можливість виконувати всі операції в одному резервуарі. До недоліків належать складніша експлуатація, ризик винесення осаду та можливість забивання аераційних елементів.

Крапельний фільтр

Крапельні фільтри працюють за принципом рівномірного розподілу стічних вод по завантаженню з гравію, каміння або пластикових матеріалів, на поверхні яких розвивається біоплівка. Аеробні умови формуються за

рахунок природної чи примусової вентиляції. Коли біоплівка надмірно збільшується, її частки відриваються та вимиваються в потік, після чого затримуються у вторинних відстійниках. Для очищення стоків молочних підприємств крапельні фільтри забезпечують до 85% зниження ХСК за 10 діб при 7–13 °С. Технологія характеризується простотою, низьким енергоспоживанням та надійністю, хоча має й недоліки – запахи, необхідність контролю та додаткового обслуговування.

Мембранний біореактор (MBR)

MBR поєднує біологічну очистку з мембранним розділенням (мікрофільтрація, ультрафільтрація). Мул відокремлюється не осадженням, а мембранними модулями. Залежно від конструкції, мембрани встановлюються або всередині біореактора (занурені), або зовні в окремих корпусах. Аерація служить не лише джерелом кисню, а й способом зменшення забруднення поверхні мембран. Для зниження енерговитрат розглядають керамічні фільтри та анаеробні модифікації. Переваги MBR – дуже висока якість очищеної води, малі габарити, можливість незалежного регулювання HRT та SRT, стабільність роботи при високій концентрації мулу. Недоліки – швидке забруднення мембран, потреба в частому їх обслуговуванні, піноутворення, підвищене енергоспоживання та високі капітальні витрати.

Обертвий біологічний контакттор (RBC)

У RBC використовують диски, змонтовані на обертовому валу, занурені наполовину у стічні води. На дисках формується біоплівка, яка під час обертання проходить фазу занурення та контакту з повітрям, отримуючи необхідний кисень. Зайві тверді частинки відриваються під дією турбулентності й видаляються у вторинному відстійнику. Переваги RBC – компактність, висока щільність біомаси, низька потреба в енергії та невеликий HRT. Недоліки – обмежена регулюваність процесу, чутливість до складу стоків та потреба в періодичному видаленні осаду.

MBBR — біореактор з рухомих шаром

У системах MBBR у біореактор додаються легкі полімерні носії, які утримуються в русі за допомогою аерації чи змішування. На носіях формується біоплівка, яка й здійснює очищення. Подібно до крапельних фільтрів, старі шари біоплівки відриваються та видаляються під час подальших процесів (седиментація, мембранна фільтрація тощо). Головна перевага MBBR – можливість модернізації існуючих споруд AS без будівництва нових резервуарів. Перехід на MBBR дозволяє зменшити HRT, збільшити SRT, усунути каналотворення та знизити капітальні витрати.

Аераційні басейни

Аераційні лагуни являють собою відкриті водойми, у яких аерація забезпечується поверхневими або зануреними аераторами. Розрізняють лагуни повного та часткового змішування. У системах повного змішування тверді частинки постійно підтримуються у суспензії, що підвищує енергоспоживання. У лагунах часткового змішування аератори подають кисень, але не створюють достатньої турбулентності, що призводить до осідання мулу та формування анаеробних зон. Такі лагуни споживають удесятеро менше енергії, ніж лагуни повного змішування. Переваги – низькі експлуатаційні витрати, менше утворення мулу порівняно з іншими методами вторинної очистки, компактніші, ніж традиційні стабілізаційні ставки. Недоліки – більша потреба в площі, ніж у механізованих систем AS, слабкіше видалення поживних речовин та енерговитрати на аерацію.

Анаеробне зброджування

Історія промислових анаеробних реакторів починається з низькошвидкісних установок, таких як резервуари Імгофа (1905) та CSTR-реактори, поширені до 1960-х років. Через низьку швидкість росту анаеробних бактерій такі системи потребували великих об'ємів для накопичення біомаси. Розвиток технологій привів до створення високошвидкісних реакторів, у яких розділені SRT і HRT, що дозволило суттєво збільшити концентрацію активного осаду. Одними з перших високошвидкісних проєктів стали ACP (анаеробний контактний процес) зі

зворотним поверненням осаду та AF-реактори (анаеробні фільтри), де мікроорганізми закріплюються на завантаженні. У 1970-х роках був запропонований реактор UASB, а пізніше – EGSB, модифікація з підвищеною швидкістю потоку, що забезпечує кращий контакт біомаси зі стічними водами.

Високошвидкісні реактори UASB/EGSB стали основним методом анаеробної очистки промислових стічних вод і займають близько 90% ринку. Це зумовлено високою ефективністю, компактністю, низькими енерговитратами, мінімальним утворенням осаду та виробництвом біогазу. Проте процес має і недоліки: складність контролю грануляції, залежність від якості стоків, потребу у попередньому видаленні твердих домішок, чутливість до шоків навантажень та температури, а також тривалий період запуску.

UASB — анаеробний реактор з висхідним потоком

У UASB стоки подаються знизу і проходять через гранульований шар осаду. Біогаз, що утворюється при розкладанні органіки, сприяє перемішуванню та формуванню гранул. Гранули є носіями біоплівки, забезпечують осаджуваність та хорошу взаємодію стоків з біомасою. У верхній частині встановлений трифазний сепаратор GLSS, що розділяє газ, тверді частини та освітлену воду. Гранули повертаються вниз, а очищений потік і біогаз відводяться. Покращені конструкції GLSS дають змогу підвищити утримання осаду.

EGSB — розширений гранульований шар осаду

EGSB є вдосконаленням UASB та працює з високою поверхневою швидкістю (4–10 м/год), що досягається збільшеною висотою реактора або рециркуляцією потоку. Такий режим дозволяє краще контактувати стічним водам із гранулами та підтримувати їх високу концентрацію. Серед переваг – робота при високих навантаженнях, невелика площа, здатність очищувати стоки з ліпідами та токсичними компонентами. Через ці переваги EGSB все

частіше впроваджують на повномасштабних об'єктах, витісняючи традиційні UASB.

1.2.5.Хімічне окислення

Традиційне хімічне окислення передбачає використання різних окислювачів для розкладання органічних забруднювачів у стічних водах та дезінфекції біологічно очищених стоків. До найбільш поширених окислювачів належать перманганат, озон (O_3), пероксид водню (H_2O_2), хлор та персульфати. Хлорування широко застосовується для знезараження стічних вод перед скиданням або повторним використанням завдяки високій ефективності та економічності, однак може призводити до утворення канцерогенних галогенованих побічних продуктів, що становлять ризик для довкілля та здоров'я людини.

Пероксид водню використовується для зниження БСК, ХСК та усунення запахів з метою підвищення якості води після фізичного або біологічного очищення. Дослідження показали, що застосування O_3 та H_2O_2 для очищення промислових стічних вод дозволяє досягати значного зниження ХСК, а їх поєднання проявляє синергетичний ефект.

Перевагами хімічного окислення є універсальність, ефективність щодо широкого спектра органічних забруднювачів, короткий час контакту, усунення запаху та кольору, а також дезінфекція. До недоліків належать екологічний вплив використовуваних реагентів і проміжних продуктів, високі експлуатаційні витрати на зберігання та використання окислювачів, а також необхідність попереднього очищення стічних вод.

Передові процеси окислення

Передові процеси окислення (AOP) є сучасними методами очищення води, здатними ефективно руйнувати стійкі токсичні органічні сполуки та покращувати якість очищених стічних вод для повторного використання. В основі AOP лежить утворення гідроксильних радикалів ($HO\bullet$), які неселективно окислюють органічні забруднювачі до CO_2 та H_2O . Такі методи

особливо ефективні для видалення фармацевтичних препаратів, пестицидів, фенолів і барвників, які важко усунути традиційними технологіями.

До АОР належать процеси $O_3/УФ$, $H_2O_2/УФ$, O_3/H_2O_2 , $O_3/H_2O_2/УФ$, окислення Фентона, фотокаталіз та соноліз. Озонування може відбуватися шляхом прямого окислення органічних сполук озоном або непрямого окислення гідроксильними радикалами. Поєднання O_3 , H_2O_2 та УФ-випромінювання дозволяє суттєво підвищити ефективність процесу, що підтверджено при очищенні стічних вод текстильної, фармацевтичної, нафтової та аквакультурної промисловості.

Перевагами АОР є висока ефективність, повна мінералізація забруднювачів, відсутність галогенованих побічних продуктів, дезінфекція та можливість повторного використання води. Основними недоліками залишаються значні капітальні та експлуатаційні витрати, пов'язані з виробництвом озону, УФ-опроміненням та використанням H_2O_2 , а також ризику при роботі з окислювачами.

Окислення Фентона ґрунтується на генерації гідроксильних радикалів у результаті реакції H_2O_2 з іонами заліза (Fe^{2+}) в кислому або близькому до нейтрального середовищі. Фото-Фентонівське окислення, яке поєднує процес Фентона з УФ-опроміненням, підвищує швидкість розкладання органічних речовин за рахунок регенерації Fe^{2+} та додаткового утворення $HO\cdot$.

Ці методи успішно застосовуються для очищення стічних вод нафтової, текстильної та целюлозно-паперової промисловості. До переваг належать простота реалізації, висока ефективність та доступність реагентів, тоді як недоліками є необхідність контролю рН, утворення осаду та значні витрати реагентів.

Фотокаталіз.

Фотокаталіз базується на використанні напівпровідникових матеріалів, які під дією світла генерують електрон-діркові пари, що ініціюють окиснювальні реакції. Найбільш поширеним фотокаталізатором є TiO_2

завдяки його хімічній стабільності, довговічності та низькій токсичності. Органічні забруднювачі можуть розкладатися безпосередньо на поверхні каталізатора або опосередковано через утворення активних форм кисню.

Для підвищення ефективності розробляються гібридні фотокаталітичні системи, зокрема фотокаталітичні мембранні реактори, реактори з біоплівками та сонофотокаталітичні процеси. Перевагами фотокаталізу є неселективна мінералізація органічних сполук, можливість повторного використання каталізатора та застосування сонячної енергії. Недоліками залишаються високі енергетичні витрати, забруднення каталізатора та вартість обладнання.

Соноліз.

Соноліз передбачає використання ультразвуку для розкладання органічних забруднювачів у стічних водах. Ультразвукове опромінення викликає кавітацію — утворення та руйнування мікробульбашок, що супроводжується локальними високими температурами та тисками і призводить до генерації активних радикалів. Частота ультразвуку визначає домінування фізичних або хімічних ефектів, а застосування кількох частот дозволяє підвищити ефективність процесу.

Перевагами сонолізу є відсутність необхідності в хімічних реагентах, екологічність та можливість використання як попередньої стадії для підвищення біорозкладності. Основними недоліками є висока вартість обладнання та значне енергоспоживання. Соноліз добре поєднується з біологічними методами, фотокаталізом та АОР на основі УФ, O_3 і H_2O_2 .

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД

2.1. Електрохімічні методи

Електрохімічні технології передбачають застосування електрики через електроди. Найбільш вивчені процеси включають електрокоагуляцію (ЕС), електрохімічна флоатація (ЕФ), електрохімічне окислення (ЕО), електровідновлення (ЕВ) та електродіаліз (ЕД).

Метод електрокоагуляції.

Електрохімічна коагуляція ЕС - це метод очищення стічних вод, за якого електричний струм подається на анод і катод у реакторі з метою генерації дестабілізуючих агентів (іонів Al або Fe) та газових бульбашок. Сутність методу полягає у відновленні Cr(VI) до Cr(III) в процесі електролізу з використанням розчинних сталевих електродів, що робить електрохімічну коагуляцію особливо придатною для очищення хромовмісних стічних вод.

Під дією електричного струму на аноді відбувається електролітичне розчинення металу з утворенням катіонів Fe^{2+}/Fe^{3+} , тоді як на катоді генеруються гідроксид-іони та газоподібний водень. Утворені гідроксиди металів формуються в результаті взаємодії катіонів металів з гідроксид-іонами та виконують роль коагулянтів, які нейтралізують заряджені забруднювачі. Нейтралізовані частинки адсорбуються та агрегуються з утворенням флокул, що полегшує їх подальше видалення.

Під час проходження розчину через міжелектродний простір одночасно відбуваються процеси електролізу води, поляризації частинок, електрофорезу, окисно-відновних реакцій та взаємодії продуктів електролізу між собою. При пропусканні постійного струму через хромовмісні розчини анодне розчинення заліза забезпечує утворення іонів Fe, які з одного боку є

ефективними відновниками іонів Cr(VI), а з іншого — коагулянтами. На катоді виділення водню сприяє підвищенню рН середовища, що створює умови для осадження гідроксидів домішкових металів та перебігу електрохімічних відновних реакцій.

Перевагами методу електрохімічної коагуляції - є можливість досягнення нормативних вимог ГДК щодо сполук Cr(VI), висока продуктивність процесу, простота експлуатації, компактність установок, низька чутливість до коливань параметрів стічних вод, а також утворення шламу з добрими структурно-механічними властивостями.

Недоліками методу - є значне енергоспоживання та витрата розчинних металевих анодів, можливість пасивації електродів, неможливість ефективного вилучення важких металів зі шламу через високий вміст заліза, обмежена можливість повторного використання очищеної води в оборотних циклах через підвищений вміст солей, а також потреба у значних площах для складування шламів. Крім того, метод вимагає попереднього розведення стоків до сумарної концентрації іонів важких металів близько 100 мг/л.

Метод електрофлотації.

У методі електрохімічна флотація. ЕФ (електрофосфорної очистки) фокуси розділяються бульбашками водню, які прилипають до фокусів і виносять їх на поверхню, або шляхом седиментації.

Методи електрофлотації, розроблені порівняно недавно, дозволяють очищену стічної води повернути у виробництво та рекуперувати цінні компоненти. У цьому процесі очищення стічних вод від зважених частинок відбувається за допомогою бульбашок газу, що утворюються при електролізі води та використання розчинних електродів. На аноді з'являються бульбашки кисню, на катоді - водень. Піднімаючись у стічній воді, бульбашки флотують завислі частки. Метод забезпечує очищення стічних вод гальвановиробництва від іонів важких металів до ГДК, також очищає від жирів та олій. Проводяться експерименти з вилучення іонів важких металів із

стічних вод гальвановиробництва за допомогою нерозчинних анодів. Метод впроваджено на низці підприємств.

На рис. 2.1. зображено технологічну схему глибокого очищення стічних вод від іонів важких металів до ГДК електрофлотаційним методом.

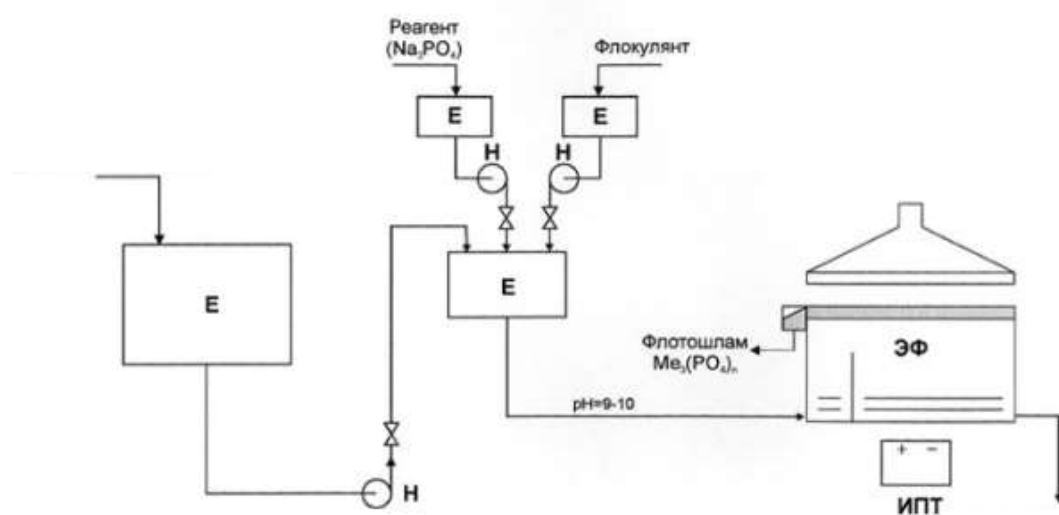


Рис. 2.1. Технологічна схема глибокої очистки стічних вод від іонів важких металів до ГДК електрофлотаційним методом.

Подібно до звичайної коагуляції-флокуляції, електрофорез може бути використаний для видалення забруднюючих речовин зі стічних вод, таких як загальні тверді речовини, загальний органічний вуглець, олії, важкі метали, ХСК, колір та каламутність.

Використання електрофорезу досліджувалося для очищення стічних вод молочної, текстильної, нафтової, целюлозно-паперової та фармацевтичної промисловості.

Переваги електрофорезу включають ефективне видалення колоїдів, відсутність додавання хімікатів, низьке утворення осаду та простоту експлуатації. Електрокоагуляція також має недоліки, такі як періодична

заміна жертвовного анода, забруднення електрода, можливість розчинення гідроксиду металу та споживання енергії.

Електрохімічне окислення

Електрохімічне окислення включає прямі та непрямі механізми окислення забруднюючих речовин у стічних водах. За прямого окислення забруднювачі адсорбуються на поверхні анода, де відбувається безпосередній перенос електронів між анодом і речовиною. За непрямого окислення на поверхні електрода утворюються реакційноздатні проміжні сполуки, зокрема активні форми кисню та хлорактивні сполуки, які вступають у реакцію із забруднювачами.

Електрохімічне окислення досліджувалося для очищення стічних вод нафтової, целюлозно-паперової та фармацевтичної промисловості з метою зниження ХСК, видалення розчинних та стійких органічних речовин. Ключовим елементом процесу є анод, властивості якого визначають ефективність та економічність технології. У зв'язку з цим ведуться активні дослідження щодо розробки анодних матеріалів з високою електрохімічною активністю, стабільністю та зниженою вартістю.

До переваг електрохімічного окислення належать здатність до розкладання стійких органічних забруднювачів, компактність установок, відсутність необхідності в додаванні хімічних реагентів та зменшення вторинного забруднення. Основними недоліками є високе енергоспоживання, значна вартість деяких анодних матеріалів (зокрема на основі благородних металів і алмазу), проблеми масштабування, можливість корозії та забруднення електродів, а також потреба в їх періодичній заміні.

Електрохімічне відновлення

Електрохімічне відновлення – це нова технологія, яка включає пряме або непряме відновлення. Під час прямого відновлення відбувається перенесення електронів між катодом і забруднювачем, адсорбованим на катоді. Під час непрямого відновлення катод відновлює медіатор, а відновлений медіатор відновлює забруднювач. Електрохімічне відновлення

вивчалоя для детоксикації та перетворення токсичних органічних речовин на матеріали з доданою вартістю, денітрифікації, видалення та відновлення металів та знебарвлення. Перевагами ЕР є відсутність додавання хімікатів, низький рівень займаної площі, видалення та відновлення металу, а також перетворення забруднювачів на матеріали з доданою вартістю. Недоліками ЕР є висока вартість електродів з благородних металів, високе енергоспоживання, необхідність контролювати конкуренцію з реакцією виділення водню та можливість деякої корозії. Порівняно з ефіроолією (ЕО), ЕОР був предметом меншої кількості досліджень, не може мінералізувати забруднювачі та має повільнішу кінетику.

Метод електролізу.

У процесі електролізу електрохімічне окислення відбувається на аноді, де іони забруднюючих речовин віддають електрони. В результаті складні та токсичні сполуки розкладаються до простіших форм, які можуть бути видалені іншими методами очищення. Як аноди застосовують електрично нерозчинні матеріали, зокрема графіт, магнетит, діоксиди свинцю, марганцю та рутенію, нанесені на титанову основу. Катоди виготовляють з молібдену, сплавів заліза з вольфрамом, вольфраму з нікелем, графіту або нержавіючої сталі з відповідними покриттями. Метод електролізу знайшов застосування на багатьох промислових підприємствах.

Тривалий час використання електролізу обмежувалося низькою продуктивністю апаратів із плоскими електродами. Перспективи підвищення ефективності пов'язані з впровадженням електролізерів із проточними об'ємно-пористими волокнистими електродами, що забезпечують значне збільшення питомої поверхні та коефіцієнта масопередачі. Також застосовуються апарати псевдозрідженого типу з розвиненою електродною поверхнею.

Подальший розвиток методу пов'язаний з оптимізацією регенерації осаджених металів, удосконаленням анодних процесів, розробкою компактних та енергоефективних електролізерів, а також створенням

доступних і довговічних анодних матеріалів. Зокрема, у Дніпропетровському хіміко-технологічному інституті запропоновано очищення стічних вод в електролізері з розчинним анодом із пористого титану у присутності заміщених амідів аміносульфінової кислоти.

До переваг методу електролізу належать відсутність утворення шламу, незначна витрата реагентів, простота експлуатації, компактність обладнання та можливість вилучення металів із концентрованих стоків.

Недоліками є неможливість досягнення ГДК при скиданні у водойми рибогосподарського призначення, використання анодів з дефіцитних матеріалів та економічна неефективність очищення розбавлених стічних вод.

Електродіаліз

Електродіаліз ґрунтується на застосуванні електричного поля та іонообмінних мембран для розділення іонів, зокрема розчинених солей, у водних розчинах. Електродні відсіки, що контактують з анодом і катодом, розташовуються на зовнішніх сторонах електродіалізного апарата. Між електродами чергуються аніонообмінні (АЕМ) та катіонообмінні мембрани (КЕМ), розділені прокладками, що формують систему окремих комірок.

Під дією прикладеного електричного потенціалу катіони мігрують у напрямку катода, проходячи крізь КЕМ, тоді як аніони переміщуються до анода через АЕМ. При цьому катіони затримуються аніонообмінними мембранами, а аніони — катіонообмінними, що призводить до формування чергуючихся відсіків з концентрованими та розбавленими розчинами. Кількість пар комірок у стеку залежить від масштабу установки і може змінюватися від кількох пар у лабораторних апаратах до кількох сотень у пілотних та промислових системах.

Іонообмінні електродіалізнi матеріали характеризуються селективністю до іонів залежно від їх заряду. Попри суттєві теоретичні переваги, електродіаліз поки що обмежено застосовується у вітчизняній гальванотехніці. Основними стримувальними чинниками є висока капіталомісткість установок, а також значна міжмембранна відстань у

серійних апаратах (близько 2 мм), що призводить до зростання габаритів, омічних втрат і зниження питомої продуктивності. Частково ці недоліки усунуто шляхом розробки апаратів із зменшеною міжмембранною відстанню (до 0,5 мм), а також конструкцій, у яких міжмембранний простір заповнений зернами іонітів або іонообмінними волокнами.

Електродіаліз досліджувався для очищення промислових стічних вод, що містять значні концентрації солей, зокрема у нафто- і газовидобувній, нафтохімічній, вугільній промисловості та на електростанціях. Окрему увагу приділено можливості відновлення металів зі стічних вод гальванічних і металообробних виробництв.

Основними напрямками розвитку є запобігання осадоутворенню та отруєнню мембран, забезпечення селективного іонного обміну, створення компактних і надійних апаратів, адаптованих до умов гальванічних цехів, розробка технологій утилізації концентратів і одержання технологічної води, а також створення дешевших і стійкіших іонообмінних мембран та фільтрів для захисту апаратів від засмічення.

До переваг електродіалісної обробки належать високий ступінь видалення солей і металів, низька схильність до утворення накипу, відсутність необхідності у хімічних реагентах та робота при низькому тиску. Недоліками методу є високі капітальні витрати, значна енергоємність процесу, забруднення мембран і неможливість видалення неіоногенних забруднювачів.

Крім методів, розглянутих вище, існують комбіновані мембранні методи. Так, електроліз у поєднанні з електродіалізом набуває нової якості: досягається не тільки повне знесолення і, отже, оборот води, а й покращення умов роботи електродіалізатора за рахунок зменшення осадоутворення на мембранах.

На рис. 2.2 зображено технологічну схему встановлення комплексного очищення стічних вод гальванічного виробництва.

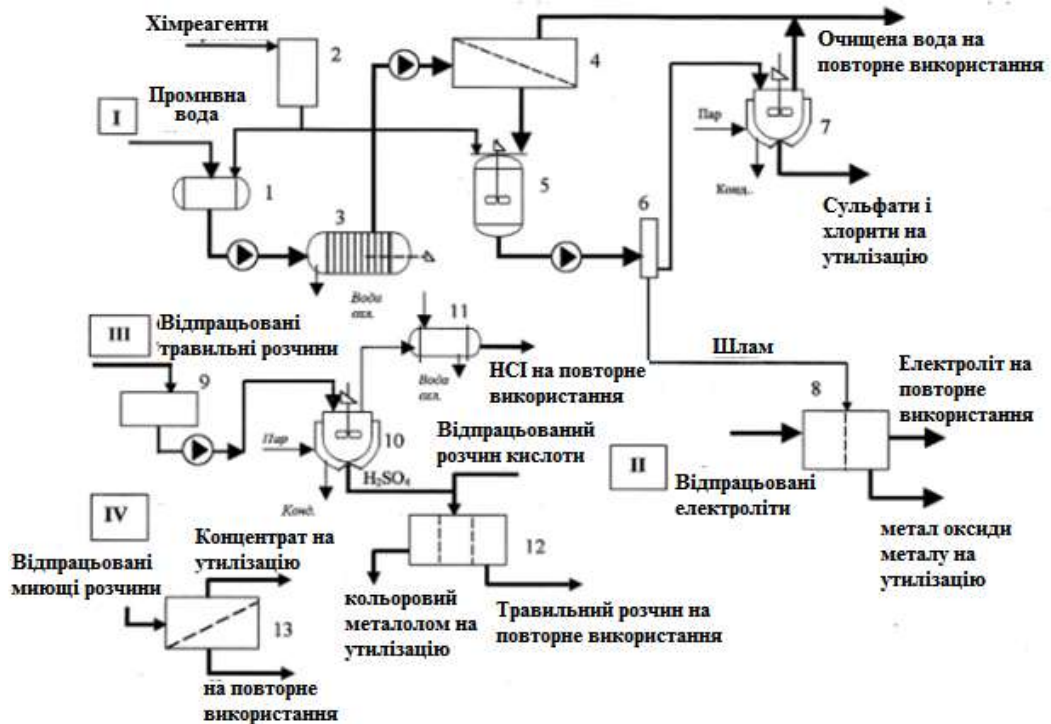


Рис. 2.2. Технологічна схема установки комплексного очищення стічних вод гальванічного виробництва:

1 – усреднитель; 2 – вузол реагентної обробки; 3 – фільтр; 4 – зворотноосмотичний мембранний модуль; 5 – реактор-нейтралізатор; 6 – мікрофільтр; 7 – випарна установка; 8 – електролізер; 9 – ємність; 10 – випарник; 11 – холодильник; 12 – електродіалізатор; 13 – ультрафільтраційна установка

Установка комплексного очищення стічних вод гальванічного виробництва включає чотири основні вузли:

- I – вузол очищення промивних вод;
- II – вузол регенерації відпрацьованих розчинів електролітів;
- III – вузол регенерації відпрацьованих травильних розчинів;
- IV – вузол регенерації миючих та знежирювальних розчинів

Установка може працювати в єдиному комплексі або окремі локальні очисні споруди.

2.2.Огляд сучасних напрямків розвитку озонування і методів очистки ним споживчих та стічних вод

Хімічні процеси обробки води, що ґрунтуються на найкращих доступних технологіях (НДТ), є більш доцільними порівняно з традиційними методами,

оскільки забезпечують високу ефективність очищення без надмірного негативного впливу на довкілля та без істотного зростання витрат. Такий підхід передбачає мінімізацію або повне усунення використання й утворення небезпечних речовин на всіх етапах — від розробки та виробництва до практичного застосування хімічної продукції. Принципи зеленої хімії широко представлені в наукових джерелах і орієнтовані на екологічно безпечні методи синтезу, запобігання забрудненню та зниження екологічних ризиків.

Екологічна хімія відіграє ключову роль у моніторингу стану довкілля та розробці ефективних природоохоронних технологій, сприяючи створенню так званих «зелених» продуктів. Водночас забруднення водних ресурсів залишається однією з найгостріших екологічних проблем, що зумовлює зростання потреби у впровадженні сучасних систем очищення й переробки води, особливо в галузях з високим водоспоживанням та жорсткими екологічними обмеженнями.

Значні обсяги промивних вод, забруднених органічними та неорганічними сполуками, утворюються, зокрема, під час виробництва друкованих плат, а також у процесах варіння й вибілювання деревної маси. Вибір оптимальної технології очищення визначається складом стічних вод, вимогами до якості очищеної води та економічними чинниками. У багатьох випадках ефективними є фізичні методи видалення завислих речовин, масел і жирів, а також біологічні технології, які добре зарекомендували себе при очищенні міських, харчових та аграрних стоків.

Разом з тим, ефективність фізичних і біологічних процесів істотно знижується за наявності розчинних, стійких або токсичних забруднень, які пригнічують біологічні системи. У таких умовах хімічні методи очищення застосовуються як допоміжні або коригувальні етапи технологічної схеми. Традиційні процеси, засновані на перенесенні забруднень між фазами, здебільшого призводять лише до їх концентрування, що потребує подальшої обробки.

Рівень руйнування стійких органічних сполук умовно поділяють на первинну деградацію, яка полягає у зміні структури молекул, прийнятну деградацію з частковим зниженням токсичності та остаточну деградацію — повну мінералізацію забрудників до CO_2 , H_2O та неорганічних сполук. Екологічно безпечний окисник повинен бути достатньо реакційноздатним, не утворювати токсичних побічних продуктів і бути економічно доступним. До найбільш поширених окислювачів належать озон, пероксид водню, хлор та його похідні, а також перманганат калію.

Комбінація хімічних і біологічних методів очищення часто є економічно обґрунтованою, оскільки дозволяє компенсувати недоліки кожного з процесів. Ефективність хімічного окислення залежить від концентрації органічних речовин, рН, температури та швидкості реакцій, тоді як біологічні процеси визначаються умовами середовища, наявністю токсичних компонентів і концентрацією кисню. Оптимальне поєднання цих параметрів забезпечує адаптивність систем очищення до змінного складу стічних вод.

Особливу увагу приділяють розширеним процесам окиснення (РПО), що базуються на утворенні гідроксильних радикалів з високим окислювальним потенціалом ($E^\circ = 2,80 \text{ В}$). До таких процесів належать системи $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$, реагент Фентона ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$), UV/O_3 та інші. Численні дослідження підтверджують високу ефективність РПО у знезараженні та мінералізації різних типів стічних вод, а також їх перспективність з точки зору досягнення нормативів очищення та зниження токсичного навантаження на довкілля.

За останнє десятиліття витрати на виробництво озону зменшилися приблизно на 50 %, що сприяло розширенню сфер його застосування. Потенційні ринки використання озонових технологій охоплюють водопідготовку, обробку стічних вод текстильної промисловості, стерилізацію поверхонь, відбілювання деревної маси та обробку охолоджувальної води. Важливою перевагою озону є відсутність утворення

галогенованих побічних продуктів, характерних для хлорування. Незважаючи на нижчу розчинність озону у воді та його нестійкість, екологічні переваги цього окисника виправдовують зростання інтересу до його застосування у сучасних системах очищення води.

Застосування озону при обробці води

Вода є фундаментальним ресурсом для життя, однак її доступність поступово зменшується, що зумовлює необхідність ефективного очищення водних ресурсів. У промислово розвинених країнах удосконалення технологій водоочищення практично усунуло загрозу гострих захворювань, що передаються через воду. Після відкриття озону Х. Шенбайном у 1840 р. цей потужний окисник швидко набув поширення у водоочищенні завдяки вираженій бактерицидній дії.

Ідею промислового використання озону для очищення води вперше запропонував В. Сіменс у 1889 р., а практичне впровадження систем озонування для міського водопостачання розпочалося наприкінці ХІХ століття. Перший експеримент із дезінфекції води озоном було проведено Де Мерітенсом у 1886 р. З того часу інтерес до озону як альтернативи хлору постійно зростає, оскільки він не утворює токсичних побічних продуктів, характерних для хлорування, зокрема тригалометанів і хлорорганічних сполук.

Процеси очищення питної води спрямовані на видалення широкого спектра забруднювачів, включаючи гумінові речовини та токсичні мікроконтанінанти. Озон ефективно окиснює як органічні, так і неорганічні домішки та забезпечує інактивацію патогенних мікроорганізмів — бактерій, вірусів і паразитів. За даними Агентства з охорони довкілля США (EPA), озон належить до найефективніших дезінфектантів. Після запровадження у 1996 р. обмежень на вміст побічних продуктів хлорування у питній воді попит на альтернативні методи знезараження, зокрема озонування, суттєво зріс.

Разом з тим, використання озону має певні обмеження. За наявності у воді іонів броміду можливе утворення бромату — канцерогенної сполуки, допустима концентрація якої не повинна перевищувати 10 мкг/дм³. Тому для кожного джерела води необхідним є ретельний підбір дози озону та часу контакту.

Кінетика озонування відіграє ключову роль у визначенні ефективності руйнування різних органічних забруднювачів. Дослідження Хойне показали, що швидкість окислення залежить від природи сполук і механізму реакції — прямого, за якого озон безпосередньо взаємодіє з молекулами, або непрямого, пов'язаного з дією гідроксильних радикалів, що утворюються під час розкладання озону. Таке розмежування дозволяє прогнозувати перебіг реакцій у природних і техногенних водних системах.

Сполуки з високими константами швидкості ($k > 100 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) легко окиснюються як прямим, так і радикальним шляхом, тоді як стійкі органічні забруднювачі переважно руйнуються гідроксильними радикалами. Оскільки процес озонування є енергоємним, установки повинні працювати з максимальною ефективністю та високим рівнем герметичності. Контроль температури, вологості поданого газу та стану обладнання є критично важливим, адже присутність вологи сприяє утворенню агресивних оксидів азоту.

Озон характеризується обмеженою розчинністю у воді та високою швидкістю розкладання, що потребує ефективного змішування газу з водною фазою. Додаткові вимоги безпеки пов'язані з вибухонебезпечністю озону при високих концентраціях, хоча в промислових озонаторах вони зазвичай не перевищують 50–200 г/м³. Робота з озоном вимагає використання відповідних систем захисту та суворого дотримання регламентів.

Озонування демонструє високу ефективність у знищенні мікроорганізмів, стійких до традиційних дезінфектантів, зокрема криптоспоридій і лямблій. Механізм дії включає руйнування клітинних мембран, ДНК та інгібування ферментативних процесів, що може

відбуватися як за рахунок прямої дії озону, так і через радикальні механізми. Сучасні дослідження доводять, що ефективної дезінфекції можна досягти при низьких дозах озону та короткому часі контакту, що суттєво підвищує економічну доцільність процесу.

Порівняння різних типів озонових реакторів дозволило оцінити вплив часу контакту та гідродинамічних умов на ефективність процесу. Протягом усього дослідження основним параметром оцінки була передана доза озону (ПДО). Яка визначалась наступним чином:

$$\text{ПДО} = Q_{\text{газ}} / Q_{\text{рід}} ([\text{O}_3]_{\text{газ вх.}} - [\text{O}_3]_{\text{газ вих.}}) \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{газ}}$ і $Q_{\text{рід}}$ – кількість витраченого газу та води відповідно,

$[\text{O}_3]_{\text{газ вх.}}$ – концентрація озону в поданому газі,

$[\text{O}_3]_{\text{газ вих.}}$ – концентрація озону в вихідних газах, що виходять.

Потреба в озоні визначалася за двома параметрами: X - безпосередня потреба в озоні; і k , кінетична константа розпаду, обумовлена загальним споживанням озону за допомогою помірних або повільних реакцій.

Обидва значення були розраховані на основі графіку залишкового озону та ПДО. Коли ПДО перевищує X , у стічних водах з'являється залишковий озон, і його концентрація збільшується зі збільшенням ПДО. Нахил ділянки (K_d) - це функція часу гідравлічного перебування в реакторі, його гідравлічних характеристик і k , яку можна визначити за таким рівнянням:

$$K_d = \frac{1}{\left(1 + \frac{kT}{n}\right)^n} \quad (2.1)$$

де T - середній час гідравлічного утримання в колоні (хв),

n - кількість «послідовно перемішуваних резервуарів» (CSTR),

виміряних за допомогою гідравлічних випробувань.

Вплив якості стічних вод на ефективність знезараження.

Експериментальні результати, отримані в пілотному масштабі на різних стоках стічних вод, підтверджують ефективність озону для знезараження стічних вод (рис. 2.3). Залежно від якості стоків для передачі зрошення стандарту ВООЗ (1000 E.coli /100 мл) була необхідна передана доза озону (ПДО) від 2 до 15 мг. Що стосується вторинних стоків низької якості та високого рівня СРР (сухих розчинних речовин) та ХПК, важче буде постійно задовольняти більш суворим вимогам навіть при дуже високих ПДО 25-30 мг / л. Для досягнення покращення результатів очищення стічних вод за необхідності необхідно використати третинну фільтрацію, що дозволяє досягти суворих вимог при низькому вмісті дози 5-10 мг /л озону.

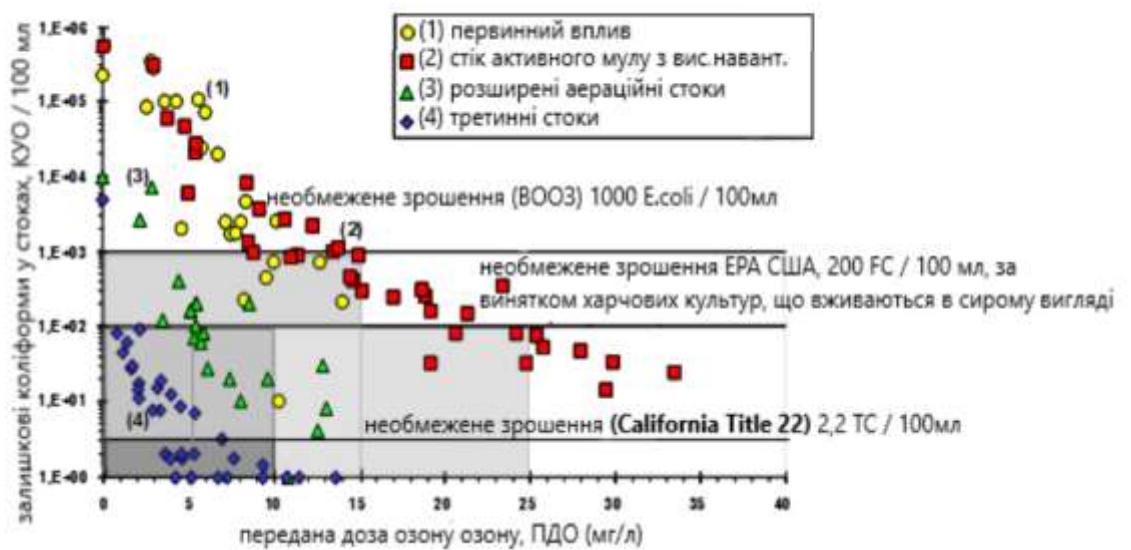


Рис. 2.3 – Ефективність озону, для інактивації коліформ для стічних вод та стандартів

Для тієї ж мети дезінфекції третинна фільтрація дозволила зменшити дозу озону на 50% до 7 мг / л. Найвищий рівень дезінфекції 100 ТС / 100 мл був досягнутий у третинних стоках з дозою озону 15 мг / л та ЗГТ менше 5 хв. Труднощі в цьому дослідженні з метою виявлення не виявлених коліформ можуть бути зумовлені низькою ефективністю фільтрації, оскільки середня

концентрація СРР становила 7 мг / л з максимальними значеннями до 10 мг / л. В даному експерименті були виявлені не виявлені коліформи у відфільтрованих стоках дуже високої якості із середньою концентрацією СРР 2,3 мг / л та максимальними значеннями менше 4 мг / л. Нижче були зроблені графіки залежності ПДО та залишкових коліформ, а також виведено лінійне рівняння кожної залежності окремо для стічних вод, в різних відділах очисних споруд.

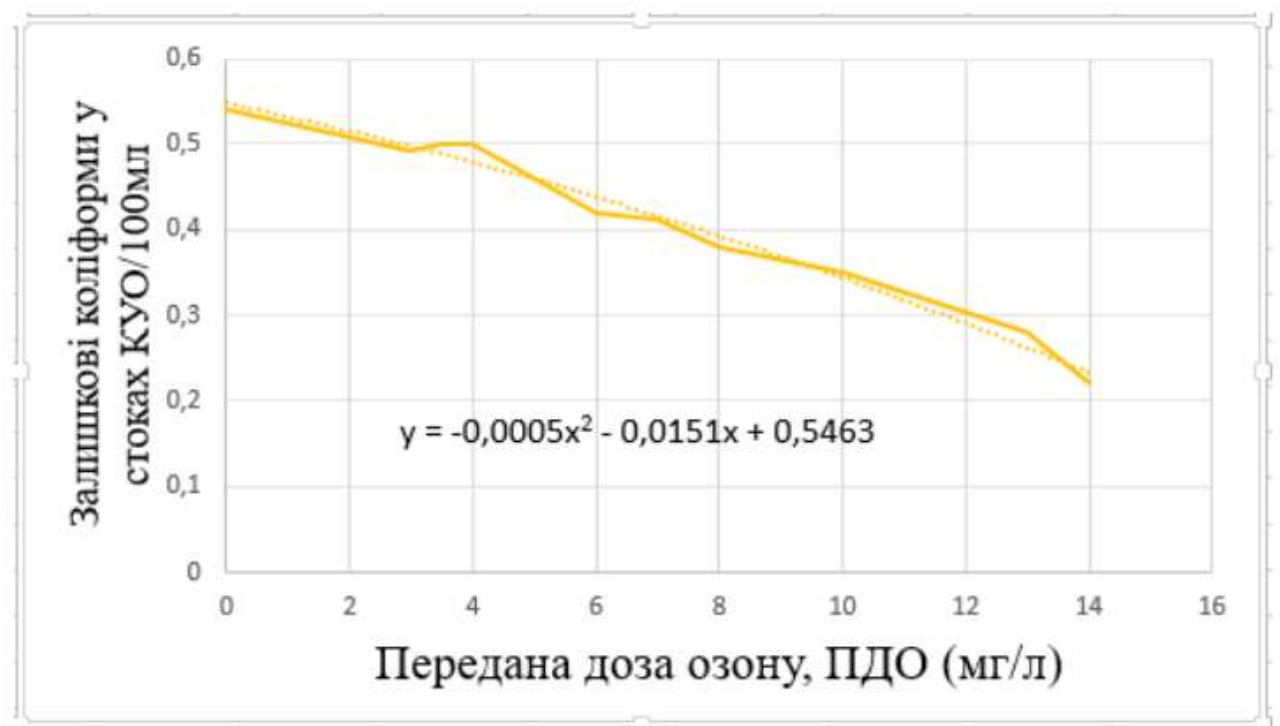


Рис. 2.4. Ефективність озону для інактивації коліформ для стічних вод та стандартів, лінійний графік для первинного впливу

Вплив якості стічних вод наочно показано на рис.2: передані дози озону, необхідні для зменшення фекальних коліформ на 2 log, коливаються від 2-3 мг / л для третинних стоків, від 6 до 17 мг / л для вторинних стоків і вище від 25 до 30 мг / л для первинних стоків. Було відмічено, що зі зниженням якості стоків (збільшення ТСС, ХПК) дисперсія експериментальних результатів сильно зростає. Ці результати наочно демонструють необхідність третинної фільтрації не тільки для того, щоб зменшити ПДО, але і для послідовного досягнення жорстких норм, уникаючи екрануючого впливу зважених твердих

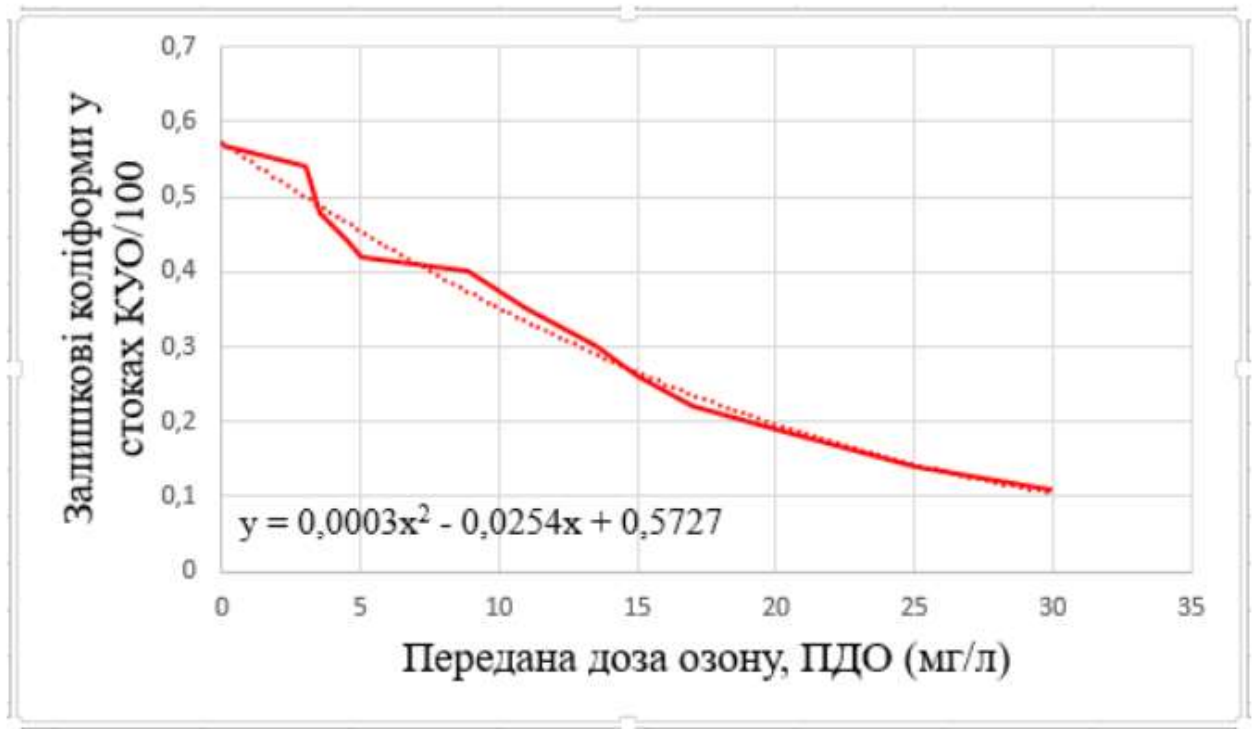


Рис. 2.5 – Ефективність озону для інактивації коліформ для стічних вод та стандартів, лінійний графік для стоку активного мулу з високим навантаженням

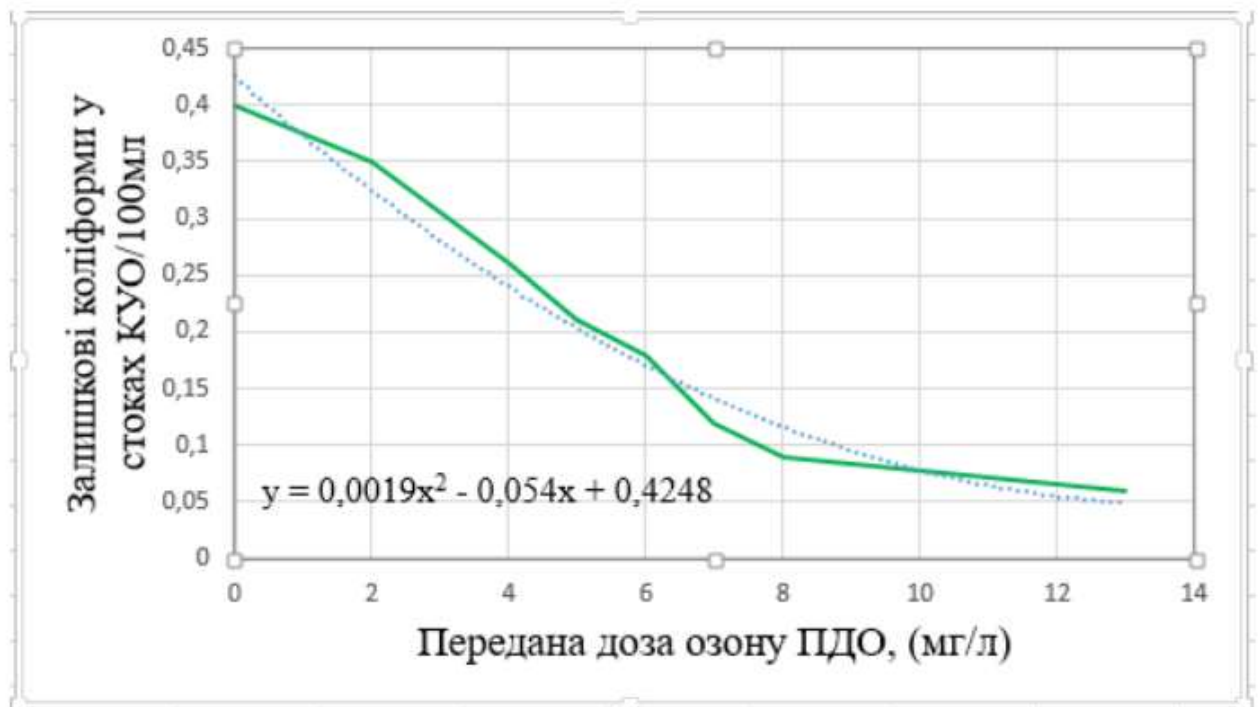


Рис. 2.6 – Ефективність озону для інактивації коліформ для стічних вод та стандартів, лінійний графік для розширених аераційних стоків

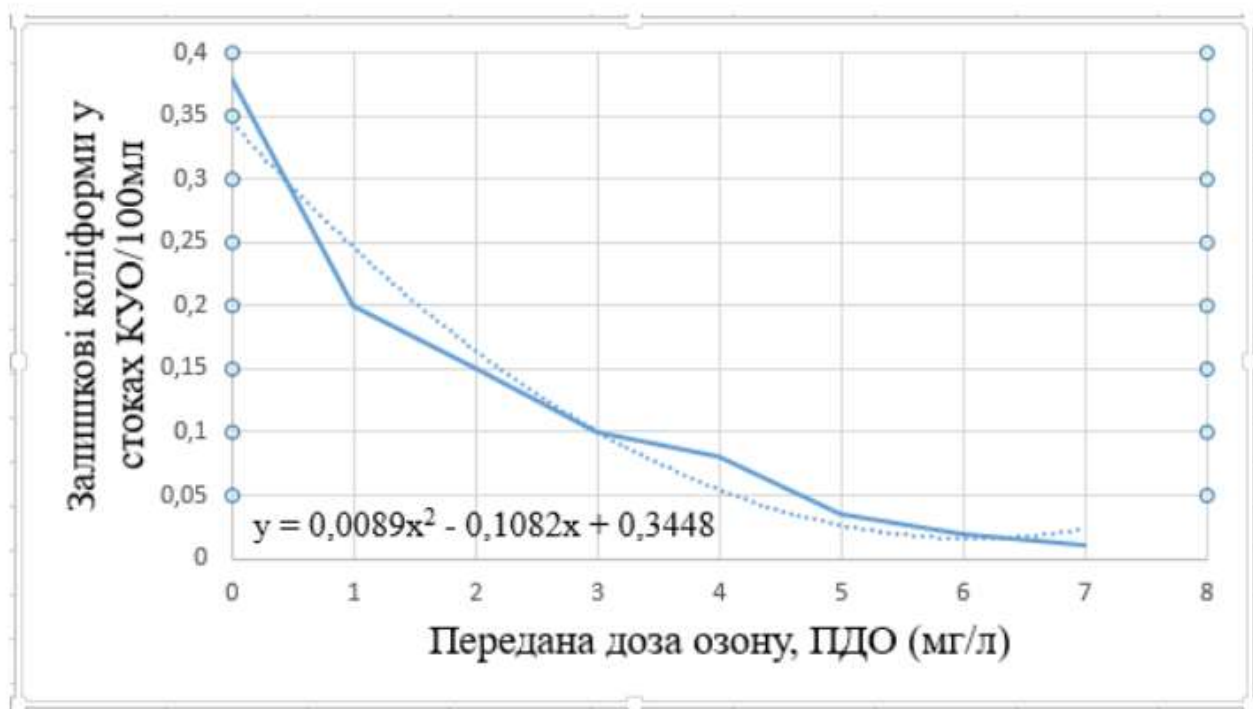


Рис. 2.7 – Ефективність озону для інактивації коліформ для стічних вод та стандартів, лінійний графік для третинних стоків

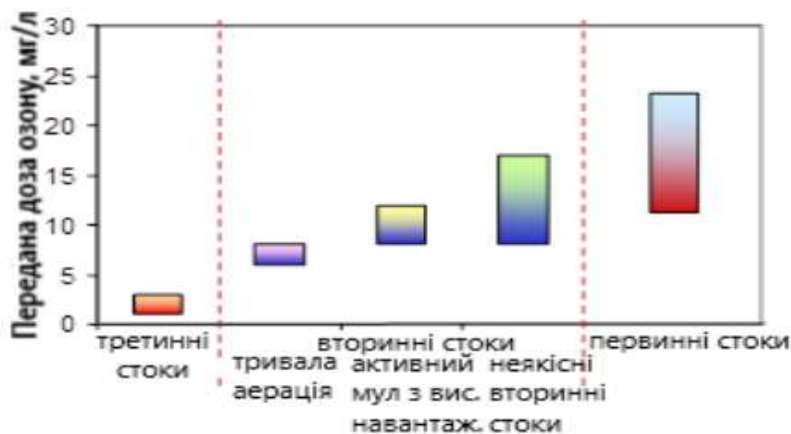


Рис. 2.8 – Діапазон варіацій перенесених доз озону (ПДО), необхідних для зменшення фекальних коліформ у різних категоріях стічних вод

речовин, що може значно вплинути на залишкову концентрацію коліформ. Аналіз концентрацій СРР та ХПК не дозволив пояснити ці розбіжності. Інші забруднювачі також можуть впливати на ефективність дезінфекції як

сірководень або інші хімічні сполуки. Подібно до УФ-дезінфекції було продемонстровано, що використання Fe^{3+} як коагулянта порівняно з Al^{3+} негативно впливає на ефективність озонування

Вплив якості води на інактивацію фекальних коліформ спостерігається також для вторинних стоків з різною якістю. Для зменшення фекальних коліформ на ПДО збільшився з 6 мг/л у стоках після тривалої аерації до 10 мг/л для неякісних вторинних стоків. Щоб отримати зменшення коліформ, збільшувалося ПДО становило від 11 до 17 мг/л. Через 4 хвилини утримання в колоні озонування та при переданих дозах озону, що перевищували 8 мг/л, було досягнуто майже повне видалення коліформ з вмістом менше 20 ФК/100 мл для високоякісних вторинних стоків. Щоб досягти загального видалення коліформ у вторинних стоках низької якості, були потрібні дуже високі ПДО, понад 30 мг / л. Це явище можна пояснити високою концентрацією суспендованих твердих речовин у цьому стоці, яка може захистити бактерії від дезінфекційного агента

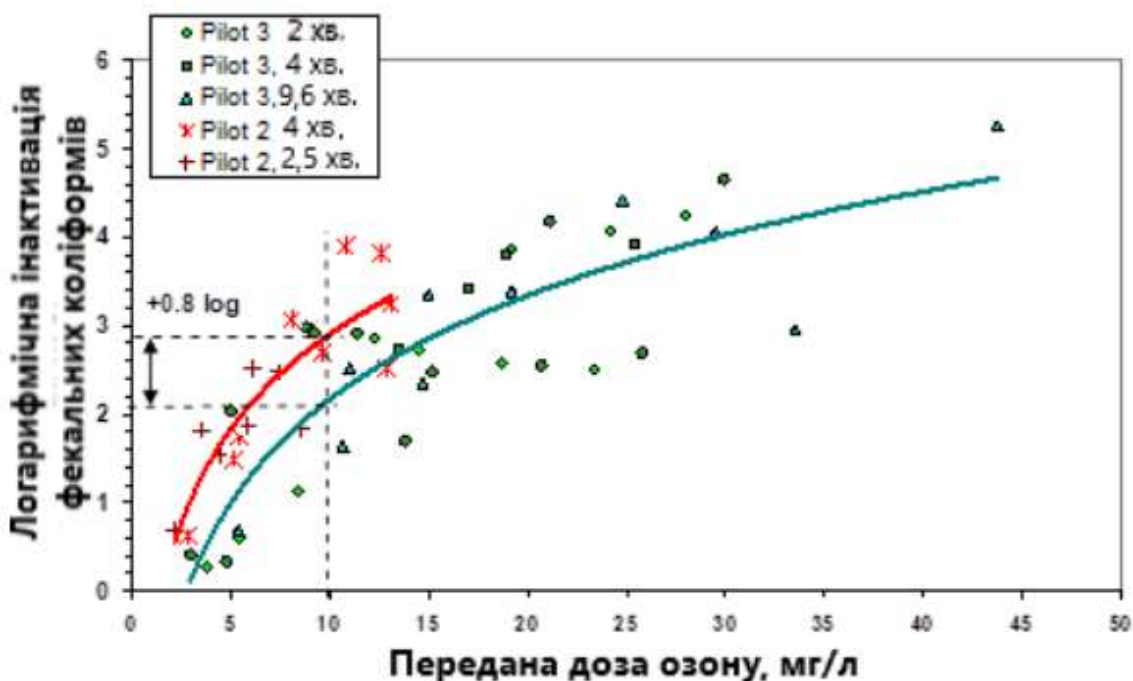


Рис. 2.9 – Вплив ПДО на видалення журналу фекальних коліформ для двох вторинних стоків

Аналіз тривалої експлуатації повномасштабної озонувальної станції у Франції підтверджує, що система озонування здатна стабільно відповідати жорстким нормативним вимогам. Упродовж десятирічного періоду залишкові концентрації коліформних бактерій систематично становили менше ніж 100 КУО *Escherichia coli** на 100 мл, причому у 98 % проб за останні два роки цей рівень дотримувався незалежно від коливань витрати стоків, вмісту завислих твердих речовин, значень СРР та початкових концентрацій *E. coli**. Значення СРР у профільтрованих стоках характеризувалися відносною стабільністю: середнє геометричне значення становило 1,7 мг/л, медіанне — 1,2 мг/л, максимальне — 9,6 мг/л, при цьому у 90 % зразків показник не перевищував 4 мг/л. Додатково у жодному з аналізованих зразків не було виявлено сальмонели.

Висока ефективність дезінфекції була досягнута за рахунок низького дозування озону на рівні 2,5–5 мг/л, що відповідало лише 25–50 % від проєктної дози. Середній рівень видалення *E. coli* становив близько 4 log при залишкових концентраціях менше ніж 100 КУО/100 мл, що суттєво нижче встановленого нормативного значення <1000 КУО/100 мл.

Як показано експериментальними даними, гідравлічний час утримання практично не впливає на ступінь дезінфекції індикаторних бактерій: інактивація залишається сталою при тривалості контакту від 2 до 10 хв. Дослідження з використанням озонової колони та постконтактора підтвердили, що залишковий озон різко зменшується вже через 2 хв додаткового контакту, а подальшого зростання інактивації не спостерігається. Це пояснюється активним споживанням озону матрицею стічних вод, унаслідок чого без повторного введення окисника подальша інактивація є неможливою.

Аналогічні результати отримані для вторинних і третинних стоків, де збільшення часу контакту з 5 до 15 хв не призводило до підвищення ступеня знезараження коліформних бактерій. Як і у випадку ультрафіолетового опромінення, озонування забезпечує значне зменшення кольоровості стоків,

що є важливою перевагою при повторному використанні очищеної води. Водночас посилення нормативних вимог обумовлює необхідність застосування ефективних третинних етапів фільтрації.

Перехід озону з газової у водну фазу є критичним етапом процесу, оскільки інактивація бактерій відбувається надзвичайно швидко. За однакової дози озону відсутня різниця в ефективності знезараження при зміні часу утримання від 2 до 10 хв. Важливим аспектом оптимізації роботи системи є коректне визначення залишкового озону (CO_3), період напіврозпаду якого може сягати кількох хвилин. Контроль цього параметра можливий як прямими вимірюваннями, так і опосередковано через аналіз газів, що відходять від дифузорів, за умови мінімального часу контакту проб з обладнанням.

На сьогодні озонування вважається зрілою та економічно обґрунтованою технологією, ефективною як окисник у складних схемах очищення стічних вод, зокрема целюлозно-паперової промисловості. Практичний досвід показує, що поєднання озонування з біоплівковими реакторами з нерухомим завантаженням є одним із найбільш результативних підходів до видалення ХПК, кольору та ПОГ за мінімального споживання озону. На відміну від фазового перенесення забруднювачів, озонування забезпечує їх руйнування з утворенням відносно невеликої кількості біологічного надлишкового мулу.

Ефективність процесу значною мірою визначається параметрами дифузії озону, зокрема розміром і розподілом бульбашок, часом контакту та гідродинамічними умовами. Ці чинники впливають на механізм реакцій на міжфазній поверхні або в об'ємі рідини і, відповідно, на економічність видалення органічних забруднень. Лабораторні дослідження показали, що після озонування стоків з низьким значенням БПК необхідне застосування біоплівкових технологій, оскільки традиційні системи активного мулу є малоефективними за низького органічного навантаження.

У випадках, коли необхідно досягти видалення ХПК понад 50 %, доцільним є двоступеневе поєднання озонування та біофільтрації. Пілотні випробування засвідчили можливість усунення понад 80 % ХПК при питомому споживанні озону 0,6–0,8 кг О₃ на 1 кг ХПК, вилученої після біофільтрів, при цьому додаткові витрати становили близько 1 % загальної собівартості продукції целюлозно-паперового підприємства.

Перспективними напрямками застосування озону залишаються очищення стічних вод, що містять фенольні сполуки, пестициди та інші стійкі органічні забруднювачі. У таких системах озонування часто використовується як попередній етап перед біологічною фільтрацією, що сприяє підвищенню біорозкладності органічних речовин і зростанню мікробіологічної активності. Поліпшення біодеградації після озонування залежить від властивостей стоків, дози озону та тривалості реакції, що зумовлює необхідність оптимізації робочих параметрів для досягнення заданого рівня очищення.

2.3.Огляд сучасних видів обробки води комбінаціями ультрафіолетового опромінення з іншими методами обробки

Сучасні технології та обладнання для обробки стічних вод не завжди забезпечують необхідний рівень очищення та знезараження. Вода може містити небезпечні концентрації радіонуклідів, нафтопродуктів, фенолів, поверхнево-активних речовин і солей важких металів. У періоди паводків у водойми надходять значні обсяги пестицидів і мінеральних добрив, зокрема азотних сполук. Унаслідок цього в Україні лише близько 15 % водних об'єктів належать до 1–3 категорій «практично чисті».

В Україні найбільш поширеним методом знезараження стічних вод залишається хлорування, однак у багатьох європейських країнах від нього поступово відмовляються на користь ультрафіолетового опромінення, ультразвуку та комбінованих методів.

Одним із сучасних і перспективних способів знезараження є ультрафіолетове випромінювання, яке нині застосовується більш ніж на 3000 очисних споруд у світі. УФ-знезараження має низку переваг порівняно з хлоруванням: відсутність утворення токсичних і мутагенних побічних продуктів; покращення органолептичних показників води та часткове руйнування стійких органічних сполук; високу стабільність процесу, оскільки знезараження відбувається шляхом фотохімічного впливу безпосередньо на клітини мікроорганізмів; відсутність негативних наслідків при передозуванні, що спрощує контроль процесу. Крім того, час експозиції у проточному режимі становить лише 1–10 с, що дає змогу відмовитися від контактних резервуарів. Експлуатаційні витрати при цьому є нижчими через мале енергоспоживання та відсутність потреби у реагентах, а компактність УФ-обладнання дозволяє інтегрувати його в існуючі технологічні схеми без суттєвих будівельно-монтажних робіт.

Разом з тим, за даними наукових досліджень, за останні 15–20 років стійкість патогенної мікрофлори до хлору зросла приблизно у 5 разів, до озону — у 2–3 рази, а до УФ-випромінювання — у 4 рази. Це зумовлює необхідність урахування зростання резистентності мікроорганізмів при проектуванні систем знезараження та застосування підвищених доз УФ-опромінення. У розвинених країнах мінімальна доза УФ нині становить 40 мДж/см², а для нових станцій питного водопостачання та очищення стічних вод передбачається 70–100 мДж/см².

У цьому контексті особливої актуальності набувають комбіновані методи знезараження із застосуванням кількох фізичних або хімічних чинників. Одним із таких підходів є поєднання ультразвуку та УФ-випромінювання, однак його ефективність залежить від каламутності й кольоровості води, типу та концентрації мікроорганізмів, дози опромінення і конструктивних особливостей установок. Додатковим недоліком є утворення відкладень гумінових речовин, сполук заліза та марганцю на кварцових кожухах ламп, що знижує інтенсивність випромінювання. Крім того, УФ-

зnezараження не має тривалої післядії, що створює ризик вторинного бактеріального росту та фотореактивації мікрофлори.

Альтернативою реагентним методам можуть бути електрохімічні та фізичні способи зnezараження, зокрема обробка змінним електричним струмом, ультразвуком і магнітними полями. Доцільність спільного застосування різних методів виникає у випадках, коли окремий метод не забезпечує необхідного ефекту або коли їх поєднання дозволяє інтенсифікувати процес зnezараження. Сумісна дія хімічних і фізичних чинників може призводити до виникнення синергетичного ефекту, за якого сумарний результат істотно перевищує ефективність кожного з методів окремо.

УФ-опромінення в поєднанні з озонуванням

УФ-опромінення водних розчинів, що містять озон, призводить до його часткового розкладання з утворенням радикалів атомарного кисню та гідроксильних радикалів $\bullet\text{OH}$. Їхня реакційна здатність (окиснювальний потенціал) у багато разів перевищує відповідний показник для молекулярного озону. Коефіцієнт екстинкції O_3 на довжині хвилі 254 нм становить 3300 л/(моль·см), що значно перевищує аналогічне значення для H_2O_2 [18,6 л/(моль·см)]. Орієнтовно, швидкість розпаду озону за цих умов у тисячу разів вища, ніж у перекису водню.

Поглинання УФ-випромінювання озоном приводить до його фотолізу з утворенням високоактивного радикала синглетного кисню, далі – до утворення перекису водню та фотодисоціації останнього з утворенням двох гідроксильних радикалів:



Безперечно, гідроксильні радикали відіграють важливу роль у процесі зnezараження, проте насамперед вони витрачаються на окислення інших органічних і неорганічних домішок, присутніх у воді. На сьогодні доведено існування щонайменше трьох основних шляхів перебігу реакцій у системі

УФ/О₃, які призводять до генерації гідроксильних радикалів ОН• через утворення збуджених атомів кисню, перекису водню та пергідроксильних іонів. Реальна кількість радикальних ланцюгів є значно більшою, однак складність хімічних перетворень унеможливує повний опис усіх реакцій, їхньої кінетики та механізмів утворення радикалів.

Комбінований метод знезараження води шляхом УФ-опромінення у поєднанні з озонуванням застосовується переважно для очищення окремих типів вод із метою руйнування складних органічних домішок. Такі процеси характеризуються високою ефективністю за дуже великих доз УФ-випромінювання — 500–600 мДж/см², що суттєво перевищує дози, необхідні для глибокого знезараження. Озонування як потужна окиснювальна технологія ефективно поєднується з УФ-методами та підсилює їх дію [26, 24].

Попереднє озонування води з наступним УФ-опроміненням істотно підвищує її УФ-прозорість, одночасно забезпечуючи часткове знезараження, що робить подальше УФ-очищення економічно доцільнішим. Озонування насамперед виконує функцію фізико-хімічної очистки, дозволяє зменшити витрати реагентів і формує первинний бар'єр для мікробного забруднення.

Практика використання озонування перед УФ-знезараженням уже багато років реалізується на великих водоочисних станціях Фінляндії (Pitkakoski та Vanhakaupunki), які забезпечують водопостачання м. Гельсінкі, а також на станції Coquitlam у Канаді [25]. Встановлено, що за наявності у воді органічних сполук, які інтенсивно поглинають УФ-випромінювання, пряме УФ-опромінення є малоефективним через оптичне «екранування». Застосування технології УФ/О₃ у таких випадках дозволяє досягти повної мінералізації низькомолекулярних органічних сполук, зокрема щавлевої та мурашиної кислот [25]

РОЗДІЛ 3

КОНЦЕПЦІЯ ТА РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ОБРОБКИ СТІЧНИХ ВОД КОМБІНОВАНИМ МЕТОДОМ ОЗАНУ І УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1. Аналіз проблеми

Ефективна робота очисних споруд з очищення від токсичних забруднень стічних вод звалищ, полігонів побутових та промислових відходів, підприємств хімічної та фармацевтичної промисловості є важливим завданням. Тому, на сьогоднішній день одним із головних завдань, що стоять перед розробниками сучасних технологій очищення стічних вод, є завдання, пов'язане із розробкою ефективних і недорогих методів знешкодження токсичних стічних вод.

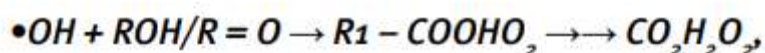
Потенційними забруднювачами навколишнього середовища можуть бути:

- хлорвуглеводні (ДДТ, гексахлорциклогексан, мірекс, ендосульфат і т.д.);
 - фосфорорганічні сполуки (такі як дихлофос, карбофос, хлорофос); - синтетичні піретроїди (перметін, циперметін, децис);
 - похідні карбамінової кислоти (карбаріл, карбофуран, кронетон, альдікарб);
 - похідні сечовини (хлорсульфурон, хлорімурон тіасульфуронта тощо).
- Їх небезпека полягає в можливості накопичення в об'єктах живої природи; великому періоді напіврозпаду; метаболізмі та потенційно можливих екологічних катастроф (людський фактор), які пов'язані з умовами зберігання і використання.

Метою проведених досліджень є розробка ефективного методу окисної деструкції високотоксичних з'єднань і дезінфекції стічних вод і повітря від патогенних мікроорганізмів, заснованого на застосуванні спільного впливу озону та інтенсивного ультрафіолетового опромінення.

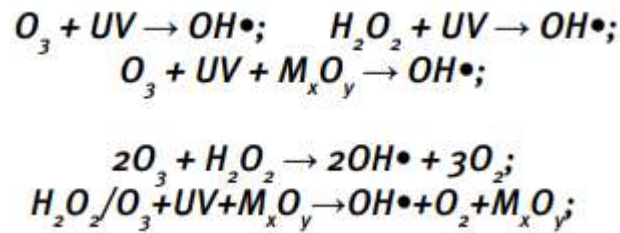
Озон є сильним і екологічно безпечним окиснювачем, який ефективно руйнує токсичні речовини, що знаходяться в стічних водах, здійснюючи при цьому їх знезаражування. Досвід застосування озону для очищення господарчо–побутових та промислових стоків показав, що озон ефективно розкладає більшість токсичних органічних речовин. А у сукупності з ультрафіолетовим опромінюванням ефективність руйнуючої дії озону значно збільшується. На цьому принципі засновано відносно новий напрямок очищення рідких токсичних речовин, який має назву методу активного окислення – ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOP). В основі цього методу – принцип з'єднання хімічних і фізичних методів окислювального процесу, що значно підвищує ефективність знешкодження розчинених токсичних речовин, які знаходяться в стічних водах, і забезпечує високу ефективність знезараження стоків. Накопичений в різних країнах досвід досліджень процесів очищення стічних вод від складних органічних забруднень показує, що до найбільш перспективних методів очищення від токсичних речовин належить деструкція, заснована на використанні в якості окиснювача озону, а в якості каталізатора – ультрафіолетового випромінювання. Застосування ультрафіолетового випромінювання спільно з озонуванням дозволяє не тільки істотно знизити концентрацію озону, необхідну для розкладання органічної речовини, а й істотно підвищити глибину його розкладання.

Суть методу активного фотохімічного окислення (Advanced Oxidation Process) можна коротко записати у вигляді:



де R – органічний компонент.

Основним окиснювачем при використанні активного окислення виступають гідроксильні радикали, які утворюються у стоках за рахунок процесу фотолітичного розкладання молекул озону:



де UV – ультрафіолетове випромінювання;

M_xO_y – каталізатор.

Радикали, які утворюються в результаті фотолітичного окиснювання, мають значно вищий окиснювальний потенціал (2,6 В), що у 1,25 рази більше окиснювального потенціалу озону (2,07 В), та в 1,91 рази перевищує окиснювальний потенціал хлору (1,36 В). Хімічний склад радикалів, які утворюються у процесі фотолітичних реакцій, наведено у табл. 3.1.

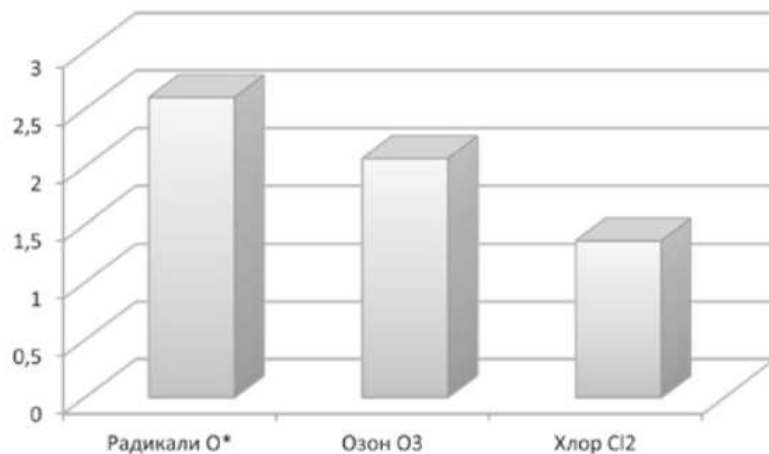


Рис3.1. Окиснювальні потенціали радикалів O*, озону O3 , хлору Cl2

Крім того, озон та радикали, які утворюються в результаті вищезгаданих процесів, можуть ефективно реагувати з органічними сполуками при дуже високих швидкостях реакцій окиснення, що дозволяє суттєво зменшити витрати на знешкодження токсичних стоків. Слід зауважити, що одною з чисельних переваг методу активного окиснювання є можливість повного або часткового руйнування токсичних забруднень у стічних водах при температурі навколишнього середовища шляхом їх перетворення в різні

нешкідливі проміжні або кінцеві продукти, такі як: карбонові кислоти, двоокис вуглецю, кисень, вода та інші.

Таблиця 3.1

Хімічний склад радикалів

№ з/п	Хімічний склад	Вміст, %
1	Радикали $O^* + O_3$	66,7
2	Гідроксильні радикали	14,7
3	Діоксид водню HO_2	6,3
4	Перекис водню H_2O_2	5,9
5	Атомарний кисень O	4,4
6	Інші окиснювачі	2
7	Оксид азоту NO_x	0,1

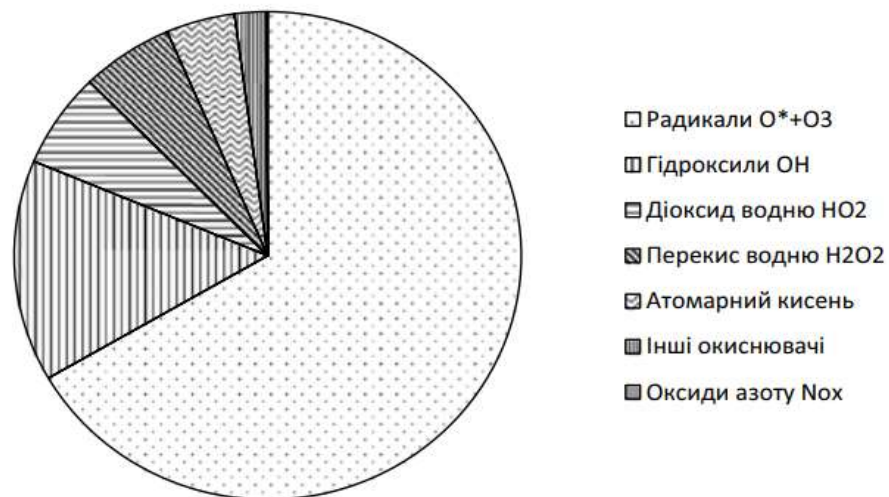


Рис. 3.2. Хімічний склад радикалів, які утворюються у процесі фотолітичних реакцій

На початку очищення стічні води поступають до фільтрувальної установки 3, де відбувається їх очищення від завислих речовин. Далі очищені стоки за допомогою насоса подаються до інжектору із 5, де відбувається їх насичення озоном, який утворюється за допомогою озонатора 2. Насичені озоном стоки поступають у камеру змішування 6, де відбувається контакт озону з токсичними органічними речовинами, які присутні у цих стоках.

Після цього стічні води поступають до фотохімічного реактору 7, де відбувається процес їх детоксикації, знезараження та знебарвлення.

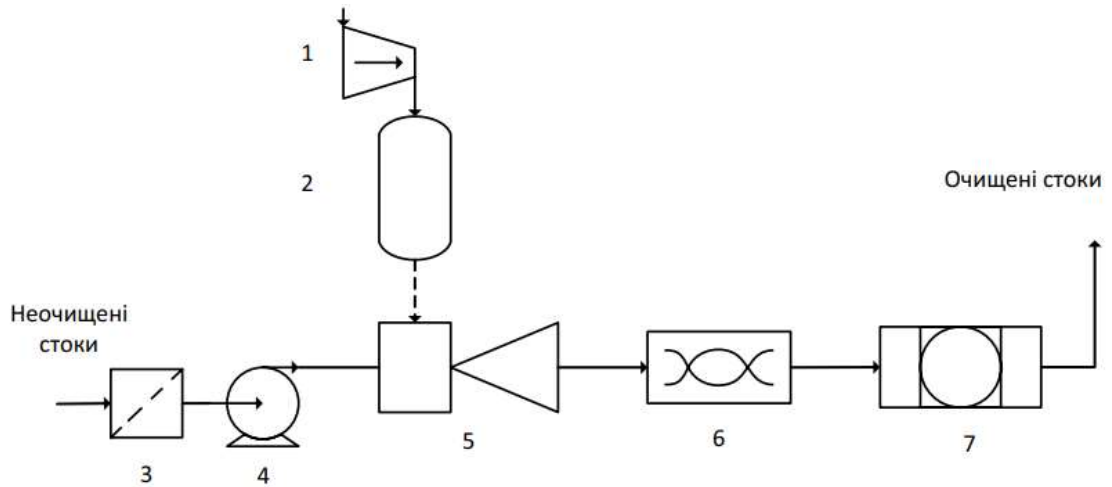


Рис. 3.3. Технологічна блок-схема очищення токсичних стоків:

1 – компресор, 2 – генератор озону, 3 – фільтр, 4 – насос, 5 – інжектор, 6 – камера змішування, 7 – фотохімічний реактор.

Таблиця 2

Обробка стічних вод при комплексній дії УФ опромінювання та озону

№	Параметр	Забрунююча токсична речовина			
		Карбофос	Ампіцилін	Прометрин	2,4-D ¹
1	Початкова концентрація, мг/дм ³	78,5	82,7	95,0	89,7
2	Кінцева концентрація, мг/дм ³	3,06	2,15	4,28	5,0
3	Концентрація озону, мгО ₃ /дм ³	10,0	10,0	10,0	10,0
4	Доза УФ опромінення, кДж/м ²	250	250	250	250
5	Температура, °С	26,5	25,8	25,7	26,3
6	Ступінь очищення,%	96,1	97,4	95,5	94,3

Як видно з отриманих результатів при сумісному застосуванні УФ опромінення та озонування ефективність знешкодження токсичних речовин різко збільшується і перевищує 94%. Слід одразу зауважити, що ефективність знешкодження можна значно підвищити, якщо використовувати більшу кількість озону та підвищити інтенсивність УФ опромінювання, або збільшити час обробки стічних вод. У результаті роботи

мобільної установки відбувається повне або майже повне очищення і знезараження стічних вод, до складу яких входять токсичні забруднення, з отриманням продуктів наступних класів безпеки: тверда фаза – 3-4 клас небезпеки; рідинна фаза – нетоксична технічна вода

Для оцінки ефективності очищення стоків був також використаний метод контролю ефективності очищення за ХПК.

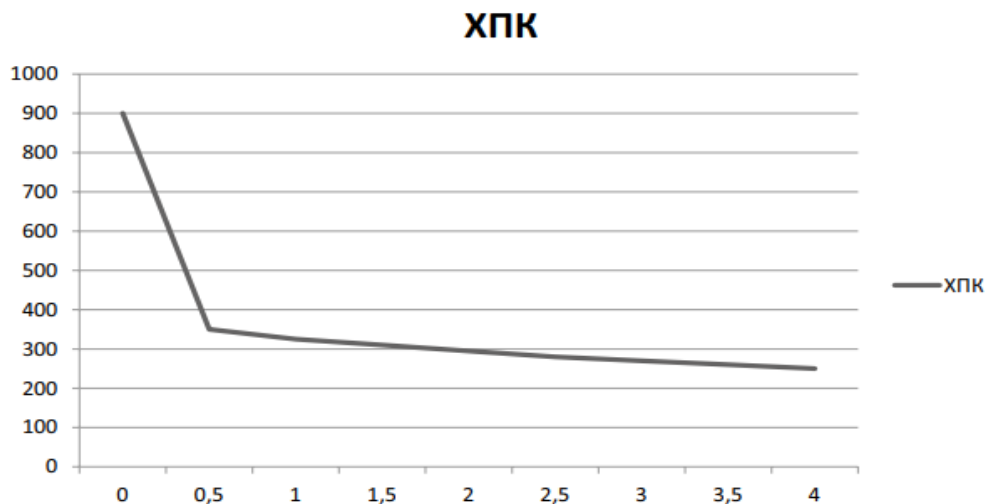


Рис. 3.4. Зниження ХПК штучно забруднених токсичними речовинами стоків протягом 4-х годин роботи мобільної дослідної установки.

Як видно з цієї діаграми, протягом першої півгодини роботи установки відбувається стрибок ХПК з 950 до 350 мг/дм³, далі йде поступове, близьке до лінійного, зменшення ХПК. Протягом 4-х годин відбувається зменшення ХПК з 350 до 250 мг/дм³. Проведені дослідження показали, що спільне використання ультрафіолетового опромінювання разом з озонуванням забезпечує зниження рівня забруднення стічних вод токсичними речовинами з ефективністю понад 94%. Це дозволяє розглядати даний метод у якості ефективного засобу очищення стічних вод від токсичних органічних речовин. Невеликі витрати електроенергії 1,0-1,5 кВт годин/м³, простота та компактність обладнання дозволяють розглядати метод активного окиснювання як такий, що придатний для вирішення проблеми детоксикації та знезараження токсичних стоків.

3.2. Підбір та внесення змін у класичну систему обробки стічної води із використанням комбінованого методу озон ультрафіолет

Вибір сучасніших конструкцій та внесення змін у окремі системи озонатора повітря та покращення масопередачі повітряно озонованої суміші у обробляему воду може збільшити не лише об'єм обробляємих стічних вод,, а й зменшити енергозатрати на обробку одних і тих же об'ємів обробки

3.2.1. Аналіз енергоефективності високовольтних генераторів озону

Генератор озону високої напруги (DBD-високочастотний трубчастий озонатор) складається з перетворювача частоти живлення, високочастотного високовольтного трансформатора та озонової трубки.

Перетворювач частоти живлення

Перетворювач частоти перетворює джерело постійного струму на певну частоту, необхідну для ефективної роботи генератора озону. Конфігурація випрямляча та мосту на ізольованому затворі (IGBT) показана на схемі перетворення потужності на малюнку 1. Випрямляч перетворює змінну напругу на постійну. Вихідна постійна напруга V_{dc} потім накопичується на конденсаторі C1. Чотири IGBT (S_1 , S_2 , S_3 та S_4), що складають міст IGBT, з'єднані з відповідними діодами вільного ходу. Окремі блоки, відповідальні за керування цими IGBT, називаються драйверами IGBT. Після активації ці драйвери можуть отримувати керуючі сигнали від високочастотного мікроконтролера. Таким чином, мікроконтролер відповідає за керування станами ввімкнення/вимкнення IGBT, що призводить до створення необхідної вихідної напруги прямокутної форми для системи генератора озону

Високочастотний високовольтний трансформатор

Для підвищення напруги, необхідної для виробництва озону, було використано трансформатор, розроблений для високочастотних застосувань. Він був оснащений первинною обмоткою, та вторинною обмоткою, із співвідношенням витків 1:55. Така конфігурація була призначена для роботи

з високочастотними входами в діапазоні частот 1–25 кГц. Що стосується високочастотної роботи цих високовольтних трансформаторів, міст IGBT генерував високочастотний сигнал, який подавався на первинну обмотку високочастотного трансформатора. Трансформатор підвищував напругу 55,6 разів.

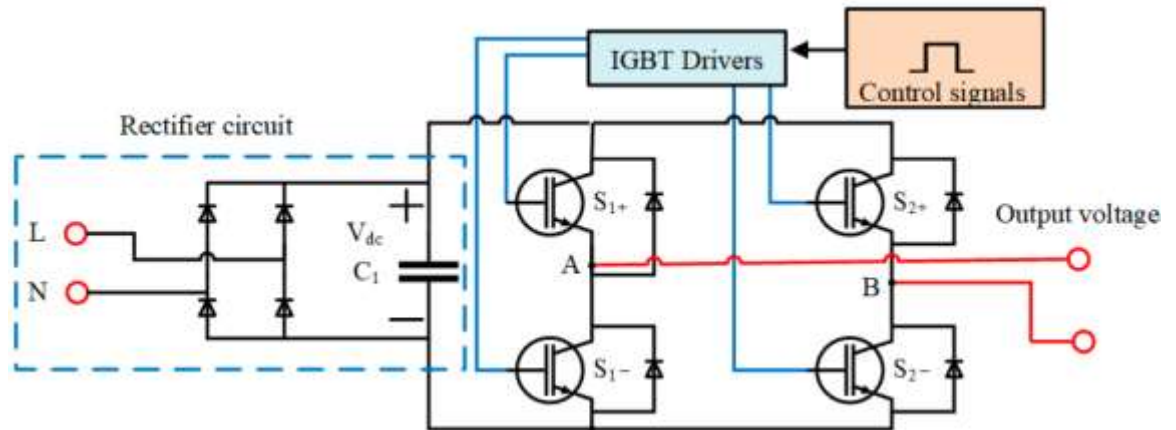


Рис 3.5. Схема перетворювача частоти живлення для системи генератора озону.

Процес генерації озону в озонувій трубці ініціювався високовольтним високочастотним виходом, який сприяв коронному розряду та підвищував ефективність виробництва озону. Базова установка для генерації високочастотної енергії, як показано на малюнку 2, включає перетворювач частоти живлення, високочастотний трансформатор та озонову трубку

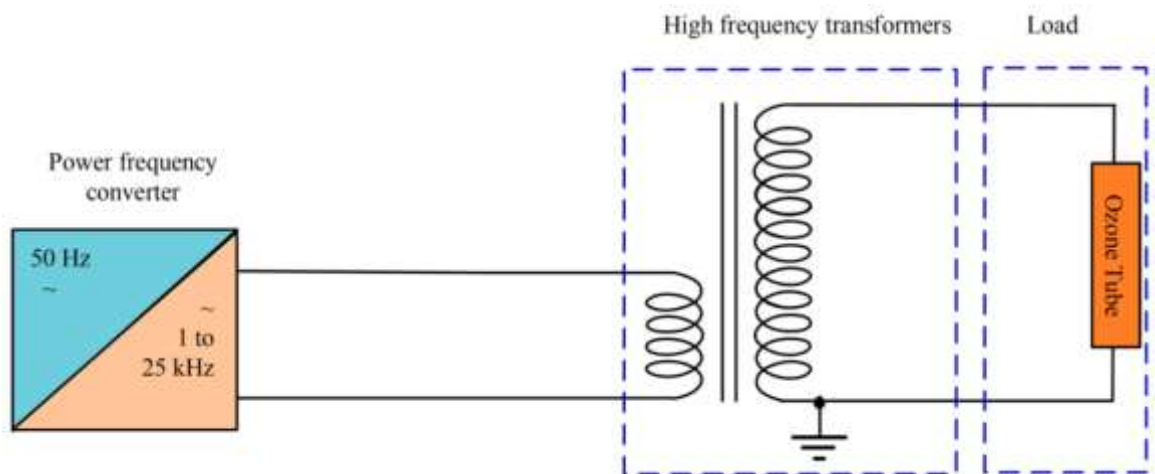


Рис 3.6. Схема перетворювача частоти живлення для нерезонансних систем в генераторі озону.

Ця система перетворює потужність частотою 50 Гц у діапазон частот 1–25 кГц, одночасно підвищуючи напругу, що забезпечує просту та ефективну конструкцію, придатну для фундаментальних застосувань. І навпаки, на схемі на рисунку 3, показано послідовний резонансний контур, розташований між перетворювачем потужності та трансформатором. Цей контур складається з конденсатора та індуктивності. Цей резонансний контур сприяє точному регулюванню частоти та підвищує ефективність, усуваючи небажані частоти, мінімізуючи шум та покращуючи загальну продуктивність. Включення резонансного контуру підвищує придатність цієї конструкції для промислових або високопродуктивних застосувань, які потребують точного налаштування частоти та зменшення втрат потужності.

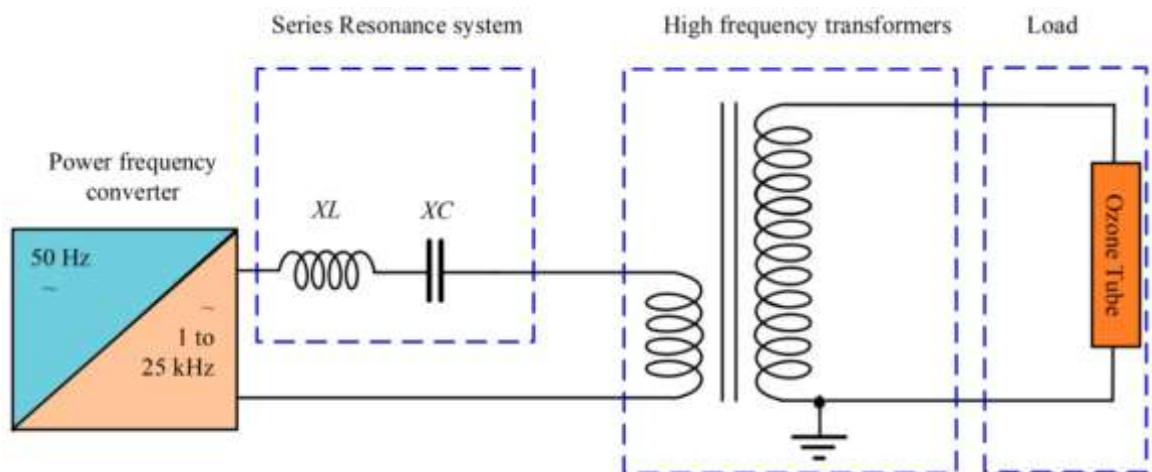


Рис. 3.7. Схема перетворювача частоти живлення для резонансних систем в генераторі озону.

Резонансні системи забезпечують отримання високої напруги з мінімальними енергетичними втратами завдяки використанню резонансного контуру, що зазвичай складається з індуктивностей і конденсаторів. Оптимальний режим роботи озоногенеруючого блока досягається тоді, коли індуктивний та ємнісний опори рівні за величиною й протилежні за фазою, що відповідає умовам резонансу. Резонансну частоту послідовного контуру визначають на основі значень ємності (нФ) та індуктивності (мГн), які

охоплюють високочастотний трансформатор. Внутрішній опір безпосередньо не впливає на резонансну частоту, проте визначає добротність контуру та ширину резонансної смуги.

У нерезонансних системах генерації озону додаткові втрати зумовлені використанням прямокутної напруги високої частоти. Така форма сигналу містить значну кількість гармонік, що призводить до зростання втрат як в осерді, так і в обмотках трансформатора. Втрати в осерді підвищуються через посилення гістерезисних явищ і вихрових струмів, а також через імовірність насичення при різких фронтах напруги. Втрати в міді зростають унаслідок ефектів скін-напливу та близькості, що підвищує активний опір змінному струму і втрати I^2R . Сукупні втрати в осерді та міді при використанні прямокутної хвилі можуть досягати приблизно 6 %, що негативно впливає на загальну ефективність трансформатора.

У резонансних системах стан резонансу досягається шляхом точного узгодження параметрів індуктивності та ємності на заданій робочій частоті. Такі системи, як правило, працюють із синусоїдальними формами напруги з низьким вмістом гармонік, що істотно зменшує втрати енергії в осерді та обмотках трансформатора. Практичні резонансні генератори озону демонструють підвищену енергоефективність із середнім показником продуктивності близько 120 г O_3 /кВт·год. Зменшення гістерезисних втрат, вихрових струмів і втрат у міді зумовлює зниження загальних втрат до приблизно 4 % при вхідній потужності 100 Вт, що свідчить про високу ефективність таких систем.

Експериментальні дослідження підтверджують істотну різницю в енергоспоживанні між резонансними та нерезонансними технологіями. Порівняно з нерезонансними системами, резонансні потребують значно меншої кількості електроенергії для генерації однакової кількості озону. Середня ефективність резонансних систем становить близько 120 г/кВт·год, тоді як для нерезонансних — приблизно 80 г/кВт·год, що відповідає приросту ефективності на рівні близько 50 %. Оцінка втрат зазвичай

проводиться в ланці постійного струму, тобто враховує часткову ефективність перетворювальної частини системи.

Вища продуктивність резонансних систем пояснюється оптимізованою передачею потужності в умовах резонансу, що мінімізує енергетичні втрати та забезпечує більший вихід озону при меншій споживаній потужності. Водночас такі системи відзначаються складнішою конструкцією, потребують точного налаштування параметрів і можуть мати вищі початкові капітальні витрати, що обмежує їх застосування у маломасштабних або бюджетно обмежених проєктах. Нерезонансні системи, попри нижчу енергоефективність, залишаються простішими у впровадженні та більш універсальними в умовах, де визначальними є вартість і технологічна надійність.

3.2.2. Порівняння будови озонаторних електродів. Утворення озону відбувається внаслідок коронного розряду який індукується в кисні високовольтним змінним сигналом, що генерувався високочастотним високовольтним трансформатором, і потім подавався на озонову трубку. У результаті цього процесу утворювався озон, який збирали з метою проведення тестів на видалення кольору з води.

Розподіл електричного поля має вирішальне значення при визначенні ефективності виробництва озону у високовольтних генераторах озону, як показано малюку 4 та 5. Високовольтне електричне поле було застосовано до трьох конфігурацій електродів, а саме: неоднорідне електричне поле, однорідне електричне поле та злегка неоднорідне електричне поле, для вивчення впливу геометрії на розподіл поля та його наслідків для генерації озону. Інтенсивність неоднорідного електричного поля поступово збільшувалася від 12,4 до 37,9 кВ, що вказує на локалізоване посилення поблизу різкої області. Однорідне електричне поле демонструвало найкрутіше та найпослідовніше зростання, досягнувши 122,17 кВ, що вказує на дуже однорідне поле. Злегка неоднорідне електричне поле мало плавну нелінійну тенденцію, зростаючи від 17,4 до 78,4 кВ через помірну

концентрацію поля. Усі профілі поля демонстрували квадратичні тенденції, що підтверджує, що геометрія електродів має вирішальне значення для напруженості та однорідності поля, що безпосередньо впливає на ефективність та стабільність високовольтних систем генерації озону. Однак, дещо неоднорідні поля можуть покращити продуктивність, сприяючи більш стабільному виробленню озону та зменшуючи локальні гарячі точки, незважаючи на незначні коливання напруженості поля. Крім того, для досягнення балансу між однорідністю та практичними обмеженнями можна впроваджувати вдосконалені конструкції електродів для оптимізації розподілу поля. Ефективно керуючи ступенем неоднорідності, можна підвищити ефективність генерації озону, що призведе до більш стабільного та ефективного високовольтного генератора озону

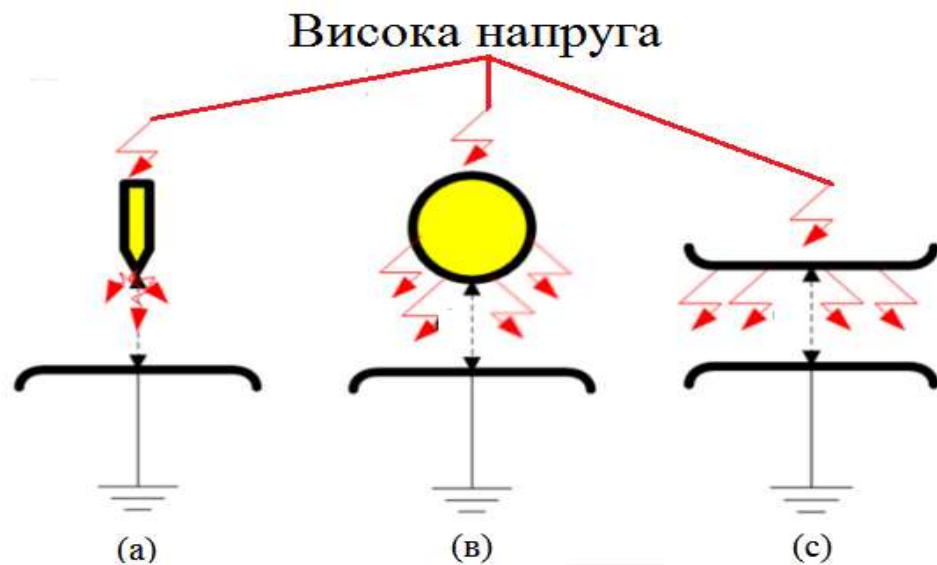


Рис. 3.8 Неоднорідне електричне поле(а).Слабо неоднорідне електричне поле(в).Однорідне електричне поле(с).

Розпад повітря між електродами є фундаментальним процесом у таких системах, як генератори озону з коронним розрядом, що призводить до утворення озону (O_3).

Між електродами прикладається високовольтне електричне поле, яке іонізує повітря або кисень та ініціює хімічні реакції, що призводять до

утворення озону. Це початок процесу. Коли прикладена напруга перевищує поріг пробією повітря або кисню, інтенсивне електричне поле іонізує молекули газу в проміжку, створюючи плазму, що складається з вільних електронів, позитивних іонів та радикалів.

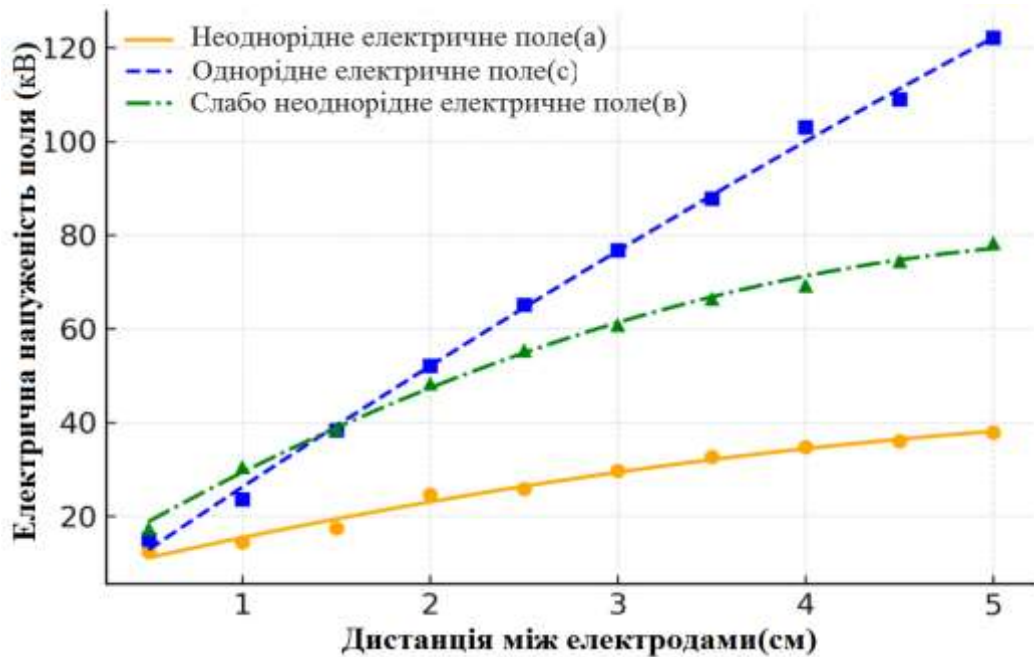


Рис 3.9 Характеристики напруженості електричного поля залежно від геометрії електрода

Коронний розряд є наслідком іонізації, яка виникає, коли електричне поле достатньо інтенсивне, щоб викликати частковий пробій повітря без встановлення повної електричної дуги між електродами. Дисоціація молекул кисню (O_2) на окремі атоми кисню (O) полегшується результуючою нетермічною плазмою, яка одночасно мінімізує теплову вихідну потужність і сприяє хімічним реакціям, що генерують озон.

Прикладом сучасних розробок озонаторних трубок наведу патент EP 4 039 640 A1 описує високоефективний озонатор, у якому генерація озону здійснюється за допомогою рівномірної холодної плазми, сформованої короткими високовольтними імпульсами без виникнення дугових або коронних розрядів. Ключовою відмінністю запропонованого пристрою є

спеціальна будова електродного вузла з інтегрованим діелектричним шаром, що забезпечує підвищену енергоефективність і стабільність роботи.

Електродна система складається з двох масивних металевих електродів (алюміній, мідь, латунь або нержавіюча сталь) товщиною не менше 0,25–0,75 см, які виконують не лише електричну, а й тепловідвідну функцію. На поверхню кожного електрода, звернену до газового проміжку, нанесено тонкий діелектричний шар, який інтимно та безпосередньо з'єднаний з металом без використання клеїв або проміжних адгезивних матеріалів. Таке безпосереднє з'єднання усуває внутрішні повітряні зазори, що є основною причиною локальних мікророзрядів і підвищених теплових втрат у традиційних DBD-озонаторах.

Як діелектрик застосовуються матеріали з високою діелектричною проникністю та теплопровідністю, зокрема оксид алюмінію (Al_2O_3) або нітрид алюмінію (AlN), нанесені методами плазмового напилення, хімічного осадження або спікання. Висока діелектрична проникність таких матеріалів забезпечує концентрацію до 90 % електричного поля в газовому зазорі, що підвищує ефективність іонізації кисню та сприяє рівномірному формуванню холодної плазми.

Газовий проміжок між діелектричними шарами має малу і точно витриману ширину (0,5–2 мм), а краї електродів заокруглені для запобігання локальній концентрації електричного поля. У поєднанні з активним охолодженням електродів така конструкція забезпечує стабільну роботу озонатора при високих щільностях потужності та дозволяє досягати питомого виходу озону понад 100 г O_3 /кВт·год, що істотно перевищує показники класичних коронних і DBD-систем.

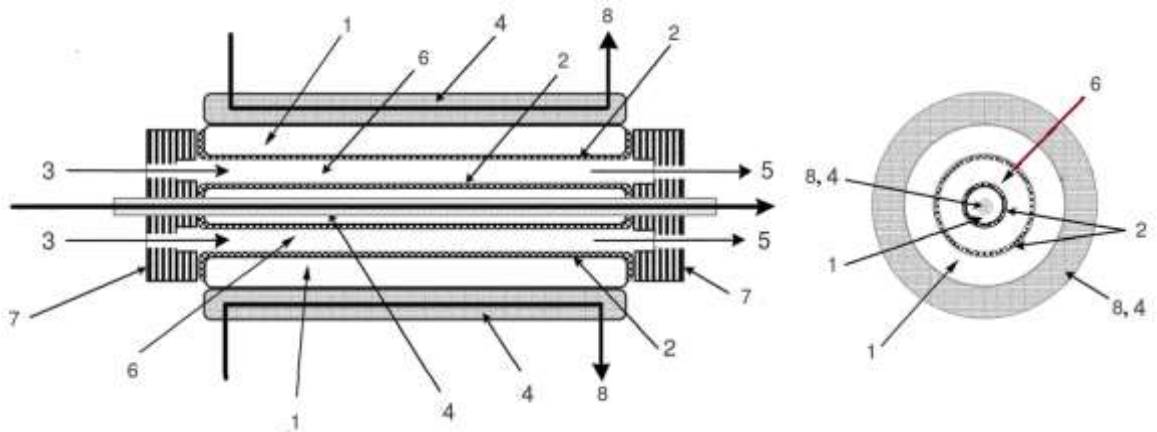


Рис 3.10 Внутрішня будова озонаторної трубки

1-високовольтний електрод; 2-діелектричний шар високовольтного електрода; 3-вхідний потік осушеного повітря; 4- діелектрик(скло, кераміка) озонаторної установки із наскрізними отворами; 5- вихідний потік газозонової суміші повітря; 6-зона міжелектродного проміжку утворення озону; 7-контактно фіксуючі упори озонаторної трубки; 8-охолоджувальна рідина.

3.2.3. Генератор мікробульбашок механічно-обертового типу з форсунковим диспергуванням: конструкція та принцип дії.

Загальна характеристика мікробульбашкових генераторів

Мікробульбашкові генератори є ключовим елементом сучасних систем для інтенсифікації масопереносу у водних середовищах. Використання мікробульбашок забезпечує значно більшу питому поверхню контакту газ–рідина та подовжений час зависання бульбашок у порівнянні з традиційними методами аерації та газового змішування. Розміри мікробульбашок, як правило, знаходяться в діапазоні 10–100 мкм, що дозволяє досягати високих показників ефективності у процесах озонування, флоатації, аерації та передових окисних технологіях (AOP).

Конструктивна схема комбінованого генератора показана на рис. 3.11.

Комбінований генератор мікробульбашок складається з таких основних конструктивних елементів:

1. Корпус із вхідними та вихідними патрубками, який формує гідравлічний контур.

2. Ротор, що обертається за допомогою електродвигуна з частотою 3000–9000 об/хв.

3. Статор, жорстко закріплений у корпусі та оснащений системою щілин або перфорованих отворів.

4. Газовий інжектор, призначений для подачі повітря, озону або кисню у зону механічної дії ротора, із каналами для захвату води.

5. Форсунковий модуль, представлений однією або декількома насадками із заданою геометрією сопел.

6. Камера стабілізації та вирівнювання мікробульбашок, у якій потік знижує швидкість, а бульбашки набувають рівномірного розподілу.

Взаємодія цих елементів дозволяє реалізувати комбінований принцип генерації мікробульбашок, що поєднує переваги механічного та форсункового диспергування газової фази.

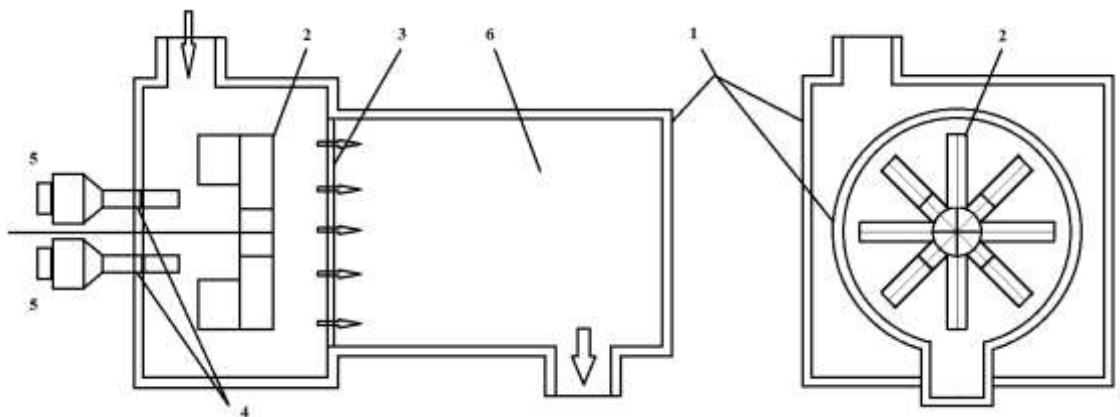


Рис 3.11. Принципова схема роботи механічно-обертального мікробульбашкового генератора

Принцип дії комбінованого генератора полягає в послідовному проходженні рідини та газу через три основні зони: "зону механічного дроблення", "зону турбулентного змішування" та "зону форсункового диспергування".

Зона механічного дроблення

Після подачі рідини у корпус пристрою та інжекції газу у камеру ротора формується двофазний потік. Високошвидкісне обертання ротора створює інтенсивні зсувні напруження, що перетворюють крупні газові включення у бульбашки значно меншого розміру. На межі ротор–статор відбувається додаткове руйнування бульбашок унаслідок ударів об елементи статора та різкої зміни швидкостей у зазорі.

Зона турбулентного змішування

У проміжку між лопатями ротора утворюються мікрівихори, що захоплюють газ та сприяють подальшому його подрібненню. У результаті формується газорідинна суміш із первинними мікробульбашками діаметром 50–150 мкм. Кавітаційні явища, які супроводжують процес, додатково розривають газові включення.

Зона форсункового диспергування

Після виходу із роторно-статорної камери потік спрямовується до форсункового модуля. Проходячи через сопла зі спеціально підбраною геометрією, газорідинна суміш зазнає значного прискорення. Це призводить до вторинного диспергування бульбашок і формування часток розміром 10–50 мкм. Форсункова обробка забезпечує вирівнювання розподілу та стабілізацію отриманих мікробульбашок.

Характеристики газорідинної суміші на виході генератора

Комбінований метод дозволяє отримувати газорідинну суміш із такими параметрами:

- діаметр бульбашок: "10–100 мкм";
- концентрація бульбашок: "до 10^9 шт./л";
- питома поверхня контакту: "до $6000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ";
- час зависання: "3–15 хвилин";
- рівномірність розподілу: високий ступінь стабільності за рахунок форсунок.

Ці характеристики істотно перевищують можливості класичних механічних аераторів та вентураторів.

Переваги комбінованої системи у порівнянні з традиційними методами

1. Висока енергоефективність

– досягнення необхідного ефекту при значно нижчому тиску нагнітання газу.

2. Підвищена глибина масопереносу

– збільшена питома площа поверхні бульбашок.

3. Стабільність мікробульбашок

– тривалий час існування у рідині без швидкої коалесценції.

4. Універсальність

– придатність для озонування, АОР-процесів, флотації, аерації.

Можливість роботи з реактивними газами - зокрема озonom, без їх руйнування під час інжекції.

Тобто використання генератора мікробульбашок механічно-обертового типу з форсунковим диспергуванням забезпечує підвищення інтенсивності масопередачі озону у воду орієнтовно на 150–300 % порівняно з традиційною барботажною аерацією, а в окремих випадках — до 400 %. Це свідчить про те що втрати газової суміші можуть зменшитись до кількох відсотків і набагато бистріший час протікання реакцій що дозволить зменшити час знаходження в ємності для реакцій із 30 - 45хв до 10 - 15хв що вдвічі або втричі менший за початковий

3.3. Розробка розрахунок системи

Використовуючи всі вищенаведені розробки та дослідження можна скласти схему комбінованого методу обробки озonom та УФ-опромінення наведену на рис. 3.12

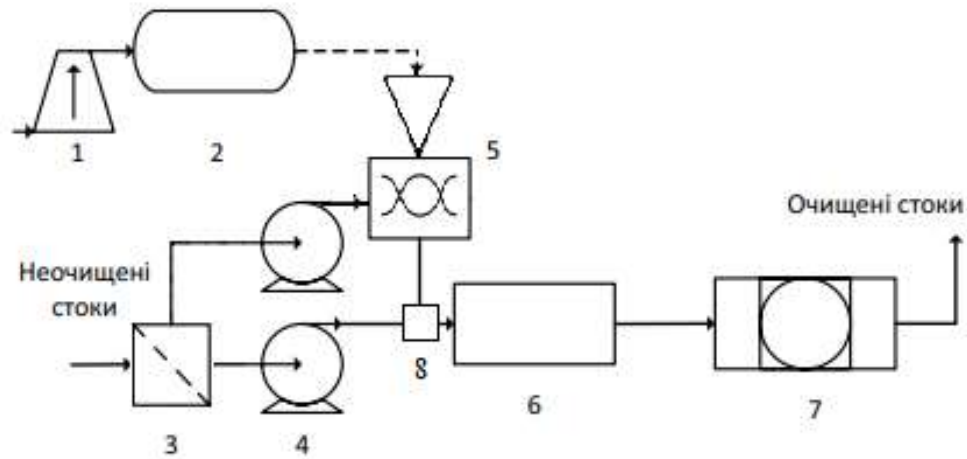


Рис. 3.12 Технологічна блок-схема очищення токсичних стоків комбінованим методом

1-очисно осушувальна система підготовки повітря; 2-озонаторна установка; 3-системи попередньої,первинної, вторинної обробки стічних вод; 4-насоси; 5-генератор мікробульбашок; 6-ємність обробки озонем; 7-поточковий УФ-опромінювач; 8-змішувальний дифузор.

Схему обробки стічних вод у такій схемі можна поділити на такі етапи:

- 1.Попередня обробка повітря;
- 2.Озонування;
- 3.Подача частини стічних вод, змішування та насичення газозоновою сумішю повітря та створення мікробульбашок;
- 4.Змішування насичених стічних вод мікробульбашковою газозоновою сумішю повітря у змішувальному дифузорі з основним потоком стічних вод;
- 5.Відстоювання і основна обробка насичених озонем стічних вод протягом 15-20хв.
- 6.Доактивація залишкового озону та потокова обробка УФ-оромінювачими стічних вод.

Розрахунок енергоспоживання та витрат реагентів установки доочищення стічних вод комбінованим озон-УФ методом.

Для прикладу який можна буде масштабувати візьмемо потік стічних вод в об'ємі 100м³/год

3.3.1 Вихідні дані для розрахунку.

Для проєктування комбінованої установки доочищення стічних вод методом озонування з подальшим УФ-опроміненням приймаємо такі вихідні параметри процесу:

Розрахункова витрата стічних вод: $Q = 100 \text{ м}^3/\text{год}$;

Доза озону: $C_O = 10 \text{ г}/\text{м}^3$;

УФ-доза (флюенс): $D \approx 5 \text{ кДж}/\text{м}^2$.

Режим роботи установки: безперервний, 24 год/добу;

Живлення озонатора – питомі витрати електроенергії на генерацію озону приймаємо $15 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг } O_3$ (у діапазоні на генерацію озону $12\text{-}15 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ плюс на підготовку і подачу повітря $3\text{-}5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$).

Для досягнення УФ-дозы $\sim 5 \text{ кДж}/\text{см}^2$ приймаємо питомі енерговитрати на УФ-опромінення $E_{UV,сп} \approx 0,1 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$.

Прийняті значення питомих енерговитрат відповідають сучасним даним щодо ефективних озонаторів, що працюють на кисні, та низьконапірних УФ-реакторів для процесів розширеного окиснення (AOP).

Розрахунок витрати озону

Доза озону задається в перерахунку на одиницю об'єму води:

$$C_{O_3} = 10 \text{ г}/\text{м}^3$$

Об'ємний потік стічної води:

$$Q = 100 \text{ м}^3/\text{год}$$

Годинна витрата озону визначається за формулою:

$$G_{O_3, \text{год}} = C_{O_3} \cdot Q \quad (3.1)$$

Підставляємо значення:

$$G_{O_3, \text{год}} = 10 \text{ г}/\text{м}^3 \cdot 100 \text{ м}^3/\text{год} = 1000 \text{ г}/\text{год} = 1 \text{ кг}/\text{год}$$

Добова витрата озону:

$$G_{O_3, \text{доб}} = G_{O_3, \text{год}} \cdot 24 = 1 \text{ кг}/\text{год} \cdot 24 \text{ год}/\text{добу} = 24 \text{ кг}/\text{добу}$$

Отже, для забезпечення дози $10 \text{ г}/\text{м}^3$ при витраті стічної води $100 \text{ м}^3/\text{год}$ необхідно подати приблизно 1 кг озону на годину або 24 кг озону на добу.

Розрахунок енергоспоживання озонаторної установки

Енергоспоживання озонатора визначається питомими витратами електроенергії на генерацію 1 кг озону. Для сучасних коронних озонаторів на кисневій сировині питомі витрати становлять близько 8–10 кВт·год/кг O₃. У розрахунку приймаємо середнє значення:

$$E_{\text{оз,сп}} = 15 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг O}_3$$

Годинна електрична потужність, необхідна для генерації озону, визначається як:

$$P_{\text{оз}} = G_{\text{оз,год}} \cdot E_{\text{оз,сп}} \quad (3.2)$$

$$P_{\text{оз}} = 1 \text{ кг}/\text{год} \cdot 15 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг} = 15 \text{ кВт}$$

Добове енергоспоживання озонаторної установки:

$$E_{\text{оз,доб}} = P_{\text{оз}} \cdot 24 = 15 \text{ кВт} \cdot 24 \text{ год} = 360 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$$

Таким чином, для генерації необхідної кількості озону (1 кг/год) при прийнятих питомих витратах 15 кВт·год/кг сумарна встановлена потужність озонаторної частини становить близько 15 кВт, а добове споживання електроенергії – близько 360 кВт·год.

Розрахунок енергоспоживання УФ-реактора

УФ-доза для АОР-процесів задається як енергія випромінення, віднесена до площі поперечного перерізу потоку, наприклад у кДж/см². Для цілей проектного розрахунку зручно користуватися питомими енерговитратами на об'єм води, що обробляється (кВт·год/м³).

На основі експериментальних та пілотних даних для систем з УФ-дозами в діапазоні 5 кДж/см² можна прийняти питомі енерговитрати на рівні $E_{\text{уф,сп}} \approx 0,022 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$.

Тоді годинна потужність, необхідна для роботи УФ-реактора, становитиме:

$$P_{\text{уф}} = E_{\text{уф,сп}} \cdot Q \quad (3.3)$$

$$P_{\text{уф}} = 0,022 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3 \cdot 100 \text{ м}^3/\text{год} = 2,2 \text{ кВт}$$

Добове енергоспоживання УФ-секції:

$$E_{\text{уф,доб}} = P_{\text{уф}} \cdot 24 = 2,2 \text{ кВт} \cdot 24 \text{ год} = 52,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$$

Отже, при витраті 100 м³/год і цільовій УФ-дозі на рівні 5 кДж/см² сумарна встановлена потужність УФ-обладнання оцінюється приблизно у 2,2 кВт, а добове споживання електроенергії – близько 53 кВт·год.

Узагальнення енергетичних витрат і витрат реагентів

Витрати озону

Показник	Значення
Доза озону	10 г/м ³
Годинна витрата озону	1 кг/год
Добова витрата озону	24 кг/добу

Енергоспоживання озонаторної частини

Показник	Значення
Питомі витрати електроенергії на генерацію озону	15 кВт·год/кг О ₃
Встановлена електрична потужність озонатора	≈ 15 кВт
Добове споживання електроенергії озонатором	≈ 360 кВт·год/добу

Енергоспоживання УФ-реактора

Показник	Значення
Питомі витрати електроенергії на УФ-опромінення	0,1 кВт·год/м ³
Встановлена електрична потужність УФ-обладнання	≈ 10 кВт
Добове споживання електроенергії УФ-реактором	≈ 240 кВт·год/добу

Загальний енергобаланс установки

Сумарна встановлена електрична потужність:

$$\Sigma P = P_{\text{оз}} + P_{\text{уф}} = 15 \text{ кВт} + 2.2 \text{ кВт} = 17,2 \text{ кВт}$$

Сумарне добове споживання електроенергії:

$$\Sigma E_{\text{доб}} = E_{\text{оз, доб}} + E_{\text{УФ, доб}} = 360 + 58 = 418 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$$

Питомі енерговитрати на очищення 1 м³ стічної води:

За добу через установку проходить

$$V_{\text{доб}} = Q \cdot 24 = 100 \cdot 24 = 2400 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Тоді питомі енерговитрати становлять:

$$E_{\text{сп}} = \Sigma E_{\text{доб}} / V_{\text{доб}} = 418 / 2400 \approx 0,18 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3.$$

Отже, при заданих параметрах процесу (доза озону 10 г/м³, УФ-доза близько 5 кДж/см², витрата води 100 м³/год) питомі енерговитрати комбінованої озон-УФ установки становлять орієнтовно 0,18 кВт·год/м³.

Висновки до розділу

У даному розділі виконано аналіз існуючих комбінованих систем обробки озон УФ, проведено аналіз підбору різних її складових.

Також зроблено орієнтовний розрахунок витрат озону та енергоспоживання комбінованої установки доочищення стічних вод, що працює за схемою озонування з подальшим УФ-опроміненням.

Для забезпечення дози озону 10 г/м³ при витраті води 100 м³/год необхідна годинна витрата озону становить близько 1 кг/год, що відповідає 24 кг/добу.

При питомих витратах електроенергії 15 кВт·год/кг О₃ встановлена потужність озонаторної частини становить близько 15 кВт, а добове енергоспоживання – близько 360 кВт·год.

Для досягнення УФ-дозы близько 5 кДж/см² прийнято питомі енерговитрати 0,022 кВт·год/м³, що при витраті 100 м³/год дає орієнтовну встановлену потужність УФ-обладнання 2,2 кВт і добове споживання електроенергії на рівні 58 кВт·год.

Сумарні питомі енерговитрати на очищення стічних вод при заданих параметрах становлять близько 0,18 кВт·год/м³, що відповідає сучасному рівню енергоефективних АОР-технологій на основі комбінованого застосування озону та УФ-опромінення.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Експлуатація комбінованого озонно-УФ комплексу очищення стічних вод належить до робіт підвищеної небезпеки згідно з НПАОП 0.00-1.24-10, оскільки поєднує дію високої напруги, озонного окиснювача, УФ-випромінення та водного середовища, яке значно підвищує ризик струмопровідних шляхів. Тому система безпеки повинна бути побудована відповідно до вимог:

НПАОП 40.1-1.21-98 — організація робіт, допуск персоналу, технічний стан електроустановок.

ДСТУ EN 12255-12— вимоги безпеки до УФ-дезінфекційних установок (екрани, блокування, датчики інтенсивності).

ДСТУ EN 1278 — безпечна експлуатація озонних систем, контроль витоків, допустимі концентрації O_3 .

ГДК озону в робочій зоні — $0,1 \text{ мг/м}^3$ (ДСН 3.3.6.039-99).

Технічні заходи

1. Стан обладнання та схема контролю

Усе електрообладнання (DBD-реактори, ВЧ-джерела живлення 5–20 кВт, компресори, УФ-реактори) повинно проходити індексовані випробування та огляди відповідно до п. 1.13 НПАОП 40.1-1.21-98.

Електричні шафи та силові кабелі мають мати ступінь захисту не нижче IP54, а у зонах можливої конденсації — IP65 (ПУЕ, табл. 1.1.3).

2. Заземлення і вирівнювання потенціалів

Озонаторні системи та УФ-модулі підлягають обов'язковому повторному заземленню згідно з ПУЕ 1.7, опір заземлювача — не більше 4 Ом для електроустановок до 1 кВ у нормальних умовах.

Металеві реактори, кожухи УФ-ламп, блоки живлення DBD повинні бути об'єднані системою зрівнювання потенціалів (ПУЕ 1.7.82).

3. Блокувальні та аварійні системи

УФ-реактор відповідно до ДСТУ EN 12255-12 повинен мати:

- * блокування включення при відкритій кришці;
- * датчики інтенсивності УФ-випромінювання;
- * аварійне відключення при перегріві води (>40 °C).

Озонатор — згідно з ДСТУ EN 1278:

- * датчики O₃ у повітрі з порогоми 0,1 / 0,3 мг/м³;
- * автоматичний клапан аварійної дегазації;
- * блокування живлення при відкриванні реакторного блоку або шафи управління.

4. Система вентиляції та озонної дегазації

- * Приміщення озонаторної оснащується припливно-витяжною вентиляцією не менше 6-кратного повітрообміну/год (ДСТУ EN 1278).
- * Витяжні канали — виключно корозійностійкі, з виводом на дах.
- * Обладнанням передбачаються деструктори озону (каталітичні або термічні).

5. Організація робочого простору

- Забороняється розміщувати кабелі в зоні вологості чи механічного контакту (ПУЕ 2.1.57).
- Усі патрубки озону повинні бути виконані з матеріалів PTFE, PVDF, 316L, які стійкі до окиснення.

Організаційні заходи

1. Навчання та допуск персоналу

- * Допуск до роботи: група з електробезпеки не нижче III (НПАОП 40.1-1.21-98).
- * Цільові інструктажі проводяться:
 - * перед початком роботи,
 - * після модернізації озонатора/УФ-реактора,

- * після аварійного відключення.

2. Регламенти технічного обслуговування

- * Перевірка герметичності озонових ліній — щоденно.

- * Перевірка стану УФ-ламп — раз на 250 годин роботи.

- * Калібрування датчиків озону та УФ-інтенсивності — 1 раз на 6 місяців.

3. Документаційна підтримка

- * Оновлення електросхем проводиться при кожній заміні обладнання (ПУЕ

1.2.13).

- * Ведеться журнал:

- * аварійних спрацювань,

- * ремонтів,

- * калібрувань,

- * вимірювань опору заземлення.

4. Алгоритм аварійних дій.

При витоку озону $> 0,3$ мг/м³:

- * автоматичне відключення озонатора;

- * включення аварійної вентиляції;

- * евакуація персоналу.

- * При відкритті УФ-модуля — миттєве відключення ламп.

4.2. Електробезпека.

Електробезпека комбінованої системи ґрунтується на вимогах ПУЕ, НПАОП 40.1-1.21-98, ДСТУ EN 60204-1, які регламентують проєктування, монтаж та експлуатацію високовольтних систем, характерних для DBD-озонаторів (5–20 кВ, іноді до 30 кВ на електродах) і УФ-установок.

Основні технічні вимоги

1. Захист від прямого та непрямого дотику

- * Робочі частини озонатора під високою напругою мають ступінь захисту не нижче IP65.

- * Для шаф управління — мінімум IP54.

* Всі дверцята шаф повинні мати електромеханічні блокування, які відключають живлення при відкриванні (ДСТУ EN 60204-1).

2. Автоматичні системи захисту

* Пристрої автоматичного вимикання (ПЗВ, диференційні автомати) з уставкою "30–300 мА" залежно від класу споживача.

* Захист від перенапруги (варистори, розрядники) — обов'язковий для високовольтної частини.

3. Вимоги до проводки та кабелів

* Кабелі живлення УФ-ламп — термостійкі, з UV-захистом.

* Високовольтні кабелі озонатора — екрановані, прокладені в металевих лотках.

* Мінімальна відстань між ВЧ-лініями та низьковольтними — 150 мм (ДСТУ EN 60204-1).

4. Особливості експлуатації у вологих умовах

* Приміщення обробки води класифікується як «особливо небезпечне» (ПУЕ 1.1.13).

* Обов'язкове використання RCD ≤ 30 мА і пониженої напруги в допоміжних колах (24–48 В).

Організаційні заходи електробезпеки

* Персонал — група III або IV, згідно з НПАОП.

* Щорічна перевірка знань — обов'язкова.

* Щоденний огляд: цілісність кабелів, відсутність запаху озону/горілої ізоляції.

* Заборонено працювати одночасно з відкритими УФ-реакторами або озонатором під напругою.

4.3. Протипожежна безпека

Пожежна безпека комбінованої озонно-УФ системи базується на вимогах:

* ДБН В.1.1-7:2016,

* ДСТУ EN 12845 (автоматичні системи пожежогасіння),

* Правила пожежної безпеки в Україні (Наказ МВС №1417).

Основні ризики для даного типу комплексу

- * Перегрів УФ-реакторів та електронних баластів.
- * Перегрів високовольтних блоків озонатора.
- * Загоряння кабельних трас або компресорного обладнання.
- * Озон — сильний окисник, здатний прискорювати займання матеріалів.

Технічні засоби протипожежного захисту

1. Категорія приміщення

- Озонаторна — зазвичай категорія В (пожежонебезпечна), залежно від кількості масла, кабелів та компресорів.

2. Обладнання

Вогнегасники:

- * CO₂ — для електрообладнання;
- * порошкові ВС — загального призначення;

Місця розташування — згідно з ДБН В.2.5-56:2014, не далі 20 м від робочого місця.

3. Сигналізація та оповіщення

- * Димові та теплові датчики — обов'язкові.
- * Автономні сповіщувачі повинні бути інтегровані в систему вентиляції, щоб вона автоматично переходила у режим аварійної роботи.

4. Конструктивні вимоги

- * Кабелі мають бути нг-LS або нг-HF (непоширюючі горіння, малодимні, безгалогенні).
- * Розміщення УФ-реактора — на негорючій основі (метал, бетон).
- * Каталітичні деструктори озону — також виконують функцію пожежного бар'єра.

Організаційні заходи

- * Щорічний інструктаж протипожежної безпеки.
- * Навчання користуванню CO₂-вогнегасниками.
- * Заборона зберігання легкозаймистих матеріалів у зоні озонаторної.
- * Щомісячний огляд вентиляції та датчиків озону/пожежі.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

Задля виконання даного методу необхідні прямі витрати на придбання установок які складають за кордоном разом із монтажем близько 40 000 тисяч євро а отже при сьогоднішньому курсу євро при продажі у розмірі 49 грн/євро, за розрахунком собівартості прямих матеріальних витрат можна оцінити собівартість даного методу, що буде дорівнювати близько 2 000 000 грн. на закупівлю та монтаж системи.

Згідно з вимогами ДСанПіН 2.2.4-171-10 за фізико-хімічними та мікробіологічними показниками, для знезараження 1л. або 1дм³ стічних вод після біологічного очищення потрібно близько 3мг/л, а лише після механічного очищення доза хлору встановлена в межах 10 мг/л гіпохлориту натрію(технічного хлору) який активно використовується для очистки стічних вод не лише в Україні а також за вмістом діоксиду хлору у воді, яка пройшла обробку хлором тобто сам процес хлорування, повинно не перевищувати 0,10-0,17 мг/дм³ та хлоритів менше 0,2 мг/дм³. Оскільки за даними статистики не всі стічні води в Україні проходять повний процес очистки а лише 88% а значить в середньому доза активного хлору буде припадати на 1л. стоків близько 4 мг/л

Тоді кількість використовуваного для знезараження води рідкого хлору на добу необхідно:

$$4 \cdot 1000 \cdot 2400 = 9600\ 000 \text{ мг/добу.}$$

Отже, рідкого хлору на добу необхідно 9600 000 мг або 9,6 кг (в 1 кг – 1000000 мг)

$$9,6 \cdot 365 = 3504 \text{ кг/рік.}$$

А при концентрації активної речовини в розчині 12-14% загальний об'єм буде:

$$3504 / 0,14 = 25029 \text{ кг/рік} = 25,029 \text{ т/рік}$$

Тоді вартість використовуваного хлору на рік становить:

$$60\,000 \cdot 25,029 = 1\,501\,740 \text{ грн/рік.}$$

Згідно моїх розрахунків за витрату електроенергії на очищення 1 м^3 , із використанням сучасних методів генерації, насичення озонм та ультрафіолетової післяобробки стічних вод, можна досягти витрати $0,18\text{ кВт/м}^3$, а отже на рік

$$0,18 \cdot 2400 \cdot 365 = 157\,680 \text{ кВт/рік}$$

А з використанням двохзонного лічильника в середньому денна(із 7:00 до 23:00) вартість електроенергії(без ПДВ) на ринку буде становити 8,50 грн/кВт і нічна(із 23:00 до 7:00) яка є дешевшою близько на 25% і становитиме 6,50 грн/кВт, тобто в середньому на день ціна буде

$$(8,50 + 6,50)/2 = 7,50 \text{ грн/кВт}$$

Отже на рік вартість електроенергії для очистки 100 м^3 стічних вод становитиме

$$157\,680 \cdot 7,50 = 1\,182\,600 \text{ грн/рік}$$

Виходячи з отриманих розрахунків на рік система очистк стічних вод озон + УФ має перевагу перед методом хлорування і економитиме

$$1\,501\,740 - 1\,182\,600 = 319\,140 \text{ грн.}$$

А отже окупність установки буде тривати

$$2\,000\,000 / 319\,140 = 6,3 \text{ роки}$$

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі обґрунтовано актуальність проблеми очищення промислових і побутових стічних вод в умовах зростання водоспоживання та антропогенного навантаження. Наведено дані, згідно з якими "до 80 % стічних вод у світі скидаються без належного очищення", тоді як "частка промисловості у загальному водоспоживанні становить близько 22 %", а в розвинених країнах — до "50 %". Це обумовлює необхідність упровадження енергоефективних та екологічно безпечних технологій глибокого очищення і повторного використання води.

У першому розділі проаналізовано розвиток і сучасний стан систем очищення стічних вод. Показано, що традиційні механічні методи забезпечують видалення лише "50–70 % завислих речовин" та "25–40 % БСК", що є недостатнім для виконання сучасних екологічних вимог. Біологічні методи ефективні щодо органічних забруднень, але є "чутливими до токсичних компонентів і коливань складу стоків". Мембранні технології (UF, RO) забезпечують ступінь очищення до "94–98 %", проте потребують "високих тисків (6–10 МПа)", значних капітальних витрат і складної експлуатації. Хімічні методи супроводжуються утворенням вторинних відходів. У результаті обґрунтовано доцільність застосування "комбінованих технологічних схем очищення".

У другому розділі виконано аналіз електротехнологічних методів очищення, зокрема озонування та ультрафіолетового опромінення. Встановлено, що озонування забезпечує зниження ХСК і БСК на "60–90 %" залежно від дози озону. Ультрафіолетове опромінення при флюенсі "5–10 кДж/м²" забезпечує інактивацію до "99,9 % мікроорганізмів" без утворення токсичних побічних продуктів. Комбінування озону та УФ формує "АОР-ефект", що підвищує швидкість окислення забруднювачів у "1,5–3 рази" порівняно з окремим застосуванням методів.

У третьому розділі розроблено та розраховано електротехнологічний комплекс очищення стічних вод на основі комбінованого методу «озон + ультрафіолет». Показано, що оптимальне дозування озону становить "8–12 г/м³", що забезпечує зниження ХСК на "70–85 %". Застосування УФ-випромінювання з флюенсом " ≈ 5 кДж/м²" сприяє завершенню мінералізації органічних сполук і ефективному знезараженню. Сумарне енергоспоживання комплексу є "на 20–35 % нижчим", ніж у традиційних схемах із реагентами, а необхідні виробничі площі зменшуються у "1,3–1,6 раза". Комплекс може бути інтегрований у діючі очисні споруди без суттєвих конструктивних змін.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці. Встановлено, що дотримання вимог ПУЕ та ПТЕЕС забезпечує безпечну експлуатацію електрообладнання при напругах до "10 кВ", допустимі рівні електромагнітних полів і УФ-випромінювання, а також "зменшення ймовірності аварійних ситуацій більш ніж у 2 рази" завдяки автоматизованим системам захисту.

Економічна оцінка показала, що впровадження розробленого комплексу є доцільним. "Експлуатаційні витрати зменшуються на 25–40 %", термін окупності становить "3–5 років", а повторне використання очищеної води дозволяє знизити споживання свіжої води на "60–80 %".

Узагальнюючи результати роботи, можна зробити висновок, що розроблений електротехнологічний комплекс очищення стічних вод із використанням комбінованого методу озонування та ультрафіолетового опромінення є технічно обґрунтованим, енергоефективним і доцільним для застосування на стадії поглибленого очищення, забезпечуючи "ступінь очищення до 90–99 %" та відповідність сучасним екологічним вимогам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крамаренко Л.В. Технологія очищення природних вод: навчальний посібник. — Харків, 2008.
2. Толстопалова Н.М., Літинська М.І., Обушенко Т.І. Технологія та обладнання одержання питної та технічної води. Практикум. Частина 1. — Київ: КПІ, 2019.
3. Сорокіна К.Б. Технологія очищення природних вод: конспект лекцій. — Суми, 2021.
4. Radovenchuk Y., Homelia M., Halysh V., Trus I., Skyba M. Нові високоефективні методи очищення води від розчинних та нерозчинних поліютантів: монографія. — Львів: Кондор, 2020.
5. Лотоцька О.В., Бабієнко В.В., Мокієнко А.В. Знезараження води: курс лекцій. — Одеса: Прес-кур'єр, 2022.
6. Langlais B., Reckhow D.A., Brink D.R. (eds). *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering*. — AWWA, 1991.
7. *Ultraviolet (UV) Disinfection for Water Treatment*. — AWWA, 2018.
8. *Water and Wastewater Treatment Technologies*. — Springer, 2023.
9. *Drinking Water Treatment: Focusing on Appropriate Technology and Sustainability*. — Springer, 2011.
10. Nguyen Tran H.T. (ed.). *Adsorption Technology for Water and Wastewater Treatments*. — MDPI, 2023.
11. Chen D.H. (ed.). *Sustainable Water Technologies*. — Routledge, 2017.
12. Семенов А.О., Кожушко Г.М., Дугніст Л.В. Знезараження води комбінованими методами з використанням УФ-випромінювання. — Вісник ЛТЕУ.
13. П'ятковський Т.І., Покришко О.В., Данилков С.О. Оцінка ефективності використання озонування для знезараження прісної води. — Наукова стаття.
14. Епоян С.М., Штонда І.Ю., Шаляпін С.М., Шаляпіна Т.С., Зубко О.Л., Штонда Ю.І. Ультрафіолетові установки для знезараження стічних вод та шляхи їх вдосконалення/ Науковий вісник будівництва. — Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. — 2015. - Вип. 1(79). — С. 237 – 241.
15. Шаляпін С.М., Штонда Ю.І., Шаляпіна Т.С. Застосування УФ опромінення для знезараження стічних вод на малих очисних спорудах./

Виробничо – практичний журнал «Водопостачання та водовідведення». – Київ, 2013. – №2/13. – С. 14-19.

16. Шаляпін С.М., Штонда Ю.І., Шаляпіна Т.С. Порівняння різних методів знезараження стічних вод./ Виробничо – практичний журнал «Водопостачання та водовідведення». – Київ, 2013. – №3/13. – С. 20-25.

17. Штонда Ю.И., Шаляпин С.Н., Штонда И.Ю., Шаляпина Т.С. Обеззараживание сточных вод на локальных очистных сооружениях./ Экологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення, ІХ міжнародна науково-практична конференція, м. Алушта 09-13 вересня 2013 р. Збірник наукових статей. Харків: «Райдер», 2013. – Т. 1. – С. 282 - 287.

18. Эпоян. С.М., Штонда И.Ю., Штонда Ю.И., Шаляпин С.Н., Шаляпина Т.С., Зубко А.Л. Обеззараживание сточных вод на локальных очистных сооружениях при использовании ультрафиолетового излучения./ Motrol. Commission of motorization and energttics in agriculture. – Volume 15 №6. – Lublin - Rzeszow. – 2013. С. 85-92.

19. Луць В. Якість води: порівняльний аналіз директиви Європейського Союзу та нормативно-правових актів України / В. Луць, П. Лапечук, Т. Попович // Юридична Україна. – 2009. – № 4. – С. 51-55

20. Андриєнко О. В., Дрозд І. М. «Газорозрядні системи атмосферного тиску для біомедичних застосувань», Електронна та Акустична Інженерія, 2020, т. 3, № 3, с. 11–15.

21. Патент - EP 4 039 640 A1. *Apparatus for Highly Efficient Cold-Plasma Ozone Production*, European Patent Office, 2022.

22. ДБН В.2.5-75:2013 «Каналізація зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування»

23. ДБН В.2.5-74:2013 «Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування»

24. Meunier L. Implications of sequential use of UV and ozone for drinking water quality / L. Meunier, S. Canonica, U. Gunten // Water research. V. 40. Issue 9, 2006. – P. 1864-1876

25. Семенов А. О. Визначення ефективності дії ультрафіолетових систем залежно від чинників впливу та технічного обслуговування / А.О. Семенов, Т.В. Сахно // Науковий вісник полтавського університету економіки і торгівлі: Серія «Технічні науки», ПУЕТ, 2020. №1(96). С. 97-104.

26. Semenov A. Ultraviolet disinfection of activated carbon from microbiological contamination / A. Semenov, Y. Hmelnitska // Archives of Materials Science and Engineering. – 2022. - № 115/1. - pp. 34-41.