Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут нафтогазової інженерії

Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

Курилюк Марія Богданівна

УДК 669.54:602
(індекс)

# БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Оцінка впливу гальванічних відходів на довкілля з розробкою схеми комплексної утилізації та переробки
(назва роботи)

Технології захисту навколишнього середовища
(назва освітньої програми)

183 Технології захисту навколишнього середовища
(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня Курилюк М.Б.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Фомічова О.В., к.х.н, доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

**Допущено до захисту**
Завідувач кафедри

_____
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ**
**2025**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут нафтогазової інженерії
Кафедра технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

ОПП Технології захисту навколишнього середовища

Затверджую
Зав. кафедри ТЗБП
*Галина ГРИЦУЛЯК* _____
(ім'я та прізвище) (підпис)
«___» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Курилюк Марії Богданівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оцінка впливу гальванічних відходів на довкілля з розробкою схеми комплексної утилізації та переробки»

керівник роботи:
Фомічова О.В., к.х.н., доцент
(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання керівника)

затверджені наказом університету від "___" _____ 20___ р. № ____

2 Термін здачі закінченої роботи "___" _____ 2025 р.

3 Вихідні дані до роботи: Діяльність підприємства ТОВ «Флекса Друк»_____
_____
_____
_____
_____

4 Зміст пояснювальної записки

ВСТУП
РОЗДІЛ 1.ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УТВОРЕННЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ
1.1. Технологічні процеси, що спричиняють утворення гальванічних відходів
1.2. Фізико-хімічні властивості гальванічних відходів
1.3. Нормативно-правове регулювання поводження з гальванічними відходами в Україні та світі
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

2.1. Характеристика підприємства та особливостей технологічного процесу гальванічного виробництва
2.2. Оцінка складу гальванічних відходів та системи очищення стічних вод
2.3. Оцінювання ризику екологічної небезпеки від зберігання гальванічних відходів
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СХЕМИ КОМПЛЕКСНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ПЕРЕРОБКИ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ
3.1. Аналіз методів очистки стічних вод гальванічних виробництв
3.2. Моделювання схеми очищення стічних вод гальванічного виробництва
3.3. Оцінка ефективності утилізації та переробки гальванічних відходів
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ
ВИСНОВКИ
5 Орієнтовний перелік текстового та графічного матеріалу в презентації
сторінок – 68, рисунків-8; таблиць- 22.

**Календарний план виконання бакалаврської роботи**

| № | Назва етапів бакалаврської роботи | Термін виконання | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | Вступ<br>Розділ 1. Теоретичні основи утворення та характеристика гальванічних відходів | | |
| 2 | Розділ 2. Аналіз екологічного впливу гальванічних відходів | | |
| 3 | Розділ 3. Розробка схеми комплексної утилізації та переробки гальванічних відходів | | |
| 4 | Розділ 4. Охорона праці | | |
| 5 | Висновки<br>Літературні джерела<br>Додатки | | |

**Студент** _____ *Марія КУРИЛЮК*
(підпис) (ім'я та прізвище)

**Керівник** _____ к.х.н., доцент *Ольга ФОМІЧОВА*
(підпис) (ім'я та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Дипломну роботу присвячено дослідженню екологічних наслідків, спричинених утворенням та накопиченням гальванічних відходів, які є джерелом значного забруднення довкілля важкими металами та іншими токсичними сполуками.

Актуальність теми зумовлена високим рівнем екологічної небезпеки, що супроводжує гальванічні процеси у промисловості.

У роботі проаналізовано основні джерела утворення таких відходів, їхній вплив на компоненти навколишнього середовища та запропоновано комплексну технологічну схему утилізації та переробки, яка спрямована на мінімізацію шкоди природі. Основною метою є розробка ефективних рішень для зменшення техногенного навантаження на довкілля.

Проведено аналіз технологічних процесів гальванічного виробництва, що сприяють утворенню відходів, а також їх впливу на довкілля, зокрема на ґрунтові, водні ресурси та атмосферне повітря. На основі аналізу чинного законодавства й сучасних методів переробки обґрунтовано потребу у впровадженні комплексного підходу до утилізації гальванічних відходів. Запропоновано ефективну схему поводження з відходами, яка включає сортування, нейтралізацію, вилучення металів та повторне використання сировини. Проведено економічна оцінка та обґрунтування доцільності запропонованих заходів.

**Новизна дослідження** полягає у розробці і впровадженні нових методів зменшення шкідливого впливу виробництва на довкілля, включаючи модернізацію технологічних процесів та використання інноваційних природоохоронних технологій. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування запропонованих рішень на інших підприємствах галузі для підвищення їх екологічної ефективності та сталого розвитку.

***Ключові слова***: гальванічні відходи, утилізація, важкі метали, переробка, забруднення, довкілля, схема утилізації.

## ABSTRACT

The thesis is devoted to the study of the environmental consequences caused by the formation and accumulation of galvanic waste, which is a source of significant environmental pollution with heavy metals and other toxic compounds. The relevance of the topic is due to the high level of environmental hazard that accompanies galvanic processes in industry.

The work analyzes the main sources of such waste formation, their impact on environmental components, and proposes a comprehensive technological scheme for utilization and processing, which is aimed at minimizing harm to nature. The main goal is to develop effective solutions to reduce the man-made burden on the environment.

The analysis of technological processes of galvanic production that contribute to the formation of waste, as well as their impact on the environment, in particular on soil, water resources and atmospheric air, is carried out. Based on the analysis of current legislation and modern processing methods, the need for the implementation of an integrated approach to the utilization of galvanic waste is substantiated. An effective waste management scheme is proposed, which includes sorting, neutralization, metal extraction and reuse of raw materials. An ecological and economic justification of the feasibility of the proposed measures is carried out.

The novelty of the research lies in the development and implementation of new methods for reducing the harmful impact of production on the environment, including the modernization of technological processes and the use of innovative environmental technologies. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the proposed solutions at other enterprises of the industry to increase their environmental efficiency and sustainable development.


***Keywords:*** galvanic waste, disposal, heavy metals, recycling, pollution, environment, disposal scheme

**ЗМІСТ**

ВСТУП 7

РОЗДІЛ 1.**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УТВОРЕННЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ** 8

**1.1 Технологічні процеси, що спричиняють утворення гальванічних відходів** 8

**1.2 Фізико-хімічні властивості гальванічних відходів** 11

**1.3 Нормативно-правове регулювання поводження з гальванічними відходами в Україні та світі……14**

РОЗДІЛ 2. **АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ** 21

**2.1 Характеристика підприємства та особливостей технологічного процесу гальванічного виробництва** 21

**2.2 Оцінка складу гальванічних відходів та системи очищення стічних вод** 28

**2.3.Оцінювання ризику екологічної небезпеки від зберігання гальванічних відходів** 34

РОЗДІЛ 3. **РОЗРОБКА СХЕМИ КОМПЛЕКСНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ПЕРЕРОБКИ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ** 39

**3.1 Аналіз методів очистки стічних вод гальванічних виробництв** 39

**3.2 Моделювання схеми очищення стічних вод гальванічного виробництва……41**

**3.3 Оцінка ефективності утилізації та переробки гальванічних відходів ……..46**

РОЗДІЛ 4. **ОХОРОНА ПРАЦІ** 49

**ВИСНОВКИ** 54

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……59**

**ДОДАТКИ**

# ВСТУП

У сучасних умовах інтенсивного розвитку промисловості питання зменшення негативного впливу виробничих відходів на довкілля набуває особливої актуальності. Одним із найбільш екологічно небезпечних типів відходів є гальванічні відходи, що утворюються в результаті гальванотехнічних процесів на підприємствах поліграфічної, електронної, приладобудівної та інших галузей. Вони містять токсичні сполуки важких металів (нікелю, хрому, кадмію, міді, цинку тощо), які забруднюють ґрунт, поверхневі та підземні води, а також атмосферне повітря, створюючи серйозну загрозу для здоров’я людини та стану екосистем.

**Актуальність теми** зумовлена необхідністю пошуку ефективних технологічних і природоохоронних рішень щодо утилізації та переробки гальванічних відходів, що дозволить знизити техногенне навантаження на довкілля та сприятиме сталому розвитку виробництва.

**Метою** роботи є оцінка впливу гальванічних відходів на навколишнє середовище та розробка ефективної комплексної схеми їх утилізації та переробки.

**Мета досягнення**: Слід виконати наступні завдання: проаналізувати процеси утворення гальванічних відходів та їх класифікацію; вивчити фізико-хімічні властивості гальванічних відходів і особливості їх взаємодії з компонентами довкілля; оцінити рівень екологічної небезпеки, пов’язаної з накопиченням і зберіганням таких відходів; розглянути сучасні технології переробки та нейтралізації гальванічних відходів; розробити схему комплексної утилізації та обґрунтувати її екологічну й економічну доцільність.

У дипломній роботі використані **літературні джерела** зарубіжних та вітчизняних авторів, а також методичні розробки досліджуваного підприємства, спрямованні на природоохоронні заходи.

# РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УТВОРЕННЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

## 1.1 Технологічні процеси, що спричиняють утворення гальванічних відходів

В Україні функціонує значна кількість підприємств, які у процесі виробництва утворюють гальванічні відходи як побічний продукт. Наразі вже впроваджено технологічні рішення для їхньої нейтралізації та подальшого використання перероблено шламу у виготовленні таких будівельних матеріалів, як асфальт, бетон, керамзит тощо шляхом застосування гальваношламів, збагачених барвними оксидами, у ролі пігментів у композиційних матеріалах.

Одним із головних технологічних процесів, що використовуються в гальванічному виробництві (зокрема в галузі виготовлення друкованих плат), є процес гальванопокриття. У його результаті формуються багатокомпонентні стічні води, що містять іони важких металів. Важливим екологічним аспектом цього процесу є те, що лише 10–30% солей металів дійсно беруть участь у формуванні покриття, тоді як решта потрапляє у стоки разом із промивними водами. Таким чином, стічні води гальванічних виробництв (СВГВ) є значним джерелом забруднення навколишнього середовища.

На багатьох підприємствах очисні споруди морально і технічно застаріли, тому не забезпечують належного очищення води перед її скиданням як у природні водойми, так і в системи централізованого водовідведення. У зв’язку з цим сучасні наукові дослідження все більше орієнтуються на розробку ефективних, екологічно безпечних і ресурсозберігаючих рішень для модернізації очисних споруд.

Виробництво друкованих плат здебільшого базується на використанні підложок зі склотекстоліту або гетинаксу, які покриті з обох боків мідною фольгою. Іноді застосовуються і діелектрики без фольги. Основні методи

виготовлення плат включають хімічний, електрохімічний, комбінований та адитивний підходи.

**Хімічний метод** полягає у нанесенні захисного шару на мідну фольгу, після чого зайва мідь видаляється шляхом травлення. Цей спосіб досить поширений, але створює шлам, який важко утилізується.

**Електрохімічний метод** заснований на осадженні металу на ділянки, відкриті в результаті нанесення захисного шаблону. Через низьку продуктивність його переважно використовують у лабораторних або дрібносерійних умовах.

**Комбінований метод** поєднує хімічне травлення провідного малюнка з подальшою металізацією отворів. Він менш трудомісткий за електрохімічний, але має типові недоліки хімічного підходу.

**Адитивний метод** дає змогу формувати провідні доріжки шляхом нарощування шару хімічної міді без необхідності травлення. Це дозволяє зменшити зазори між провідниками і здешевити виробництво, проте процес потребує вдосконалення через низьку продуктивність та складність у досягненні якісної металізації.

Усі зазначені методи обробки поверхні пов’язані з утворенням відпрацьованих розчинів, які потребують очищення. Внаслідок цього виникає необхідність їх обробки як на підприємствах, так і на міських очисних спорудах. Найбільш поширеними способами знешкодження залишаються хімічні методи, після яких утворюється осад — шлам, що несе додаткові екологічні ризики.

Для мідних пластин-контактів існує кілька основних типів покриттів, які покращують їх експлуатаційні властивості.

Хромові покриття застосовують для підвищення стійкості до корозії та впливу агресивних середовищ. Нікелеві покриття характеризуються підвищеним захистом від корозії і зносостійкістю, що робить їх популярними в промисловому використанні.

Олово-кадмієве покриття забезпечує захист від атмосферної корозії та має високу хімічну стійкість у морській воді, а також відзначається гарною міцністю і здатністю зберігати цю властивість протягом тривалого часу [1].

Олово-кадмієві покриття вирізняються високою стійкістю до впливу бризок кухонної солі та атмосферних корозійних процесів. Вони забезпечують більш надійний захист у порівнянні з цинковими, кадмієвими або олов'яно-цинковими покриттями, особливо протистоять діям парів органічних кислот, що виділяються з дерев'яної тари та інших упаковок. Завдяки цим властивостям такі покриття часто застосовують для охорони електричного та іншого обладнання, яке транспортується в дерев'яній тарі [2].

Таким чином, для гальванічного покриття мідних поліграфічних валів використовується олово-кадмієвий сплав, оскільки він володіє високою корозійною стійкістю. Після виготовлення та обробки друкарські вали проходять додаткові етапи, такі як перевірка відповідності стандартам, обробка поверхні та монтаж.

Рекомендована товщина покриття, що враховує форму, її електричні властивості та характеристики покриття, становить приблизно 10 мкм.

Проводяться дослідження ефективності використання таких відходів для барвників [1–3]. Встановлено, що застосування переробленого гальванічного шламу для забарвлення композицій на основі мінеральних (гіпсових) і полімерних (лакових) в'яжучих є результативним: навіть при вмісті до 25 % забезпечується насичене та привабливе забарвлення. Крім того, було виявлено ущільнюючий ефект таких шламів.

Суттєвий внесок у вирішення проблеми очищення стічних вод зробили вітчизняні науковці, серед яких варто згадати Філіпчука В.Л., Рогова В.М., Гончарука В.В., Душкіна С.С., Терновцева В.О., Хоружого П.Д., Хоботову Е.Б., Шмандія В.М., Гомелю М.Д., Радовенчика В.М., Кучеренка В.І., Клименко-Мешкову Н.А., Андронова В.А., Донченка М.І. та інших.

Окремі дослідження, були спрямовані на розробку локальних систем регенерації відпрацьованих розчинів. У таких системах відновлений метал у

вигляді порошку утворював експлуатаційні труднощі, що обмежувало їхнє широке впровадження [4].

### 1.2 Фізико-хімічні властивості гальванічних відходів

Гальванічні шлами за обсягами накопичення в Україні, можна порівняти з природними корисними копалинами [5]. Таким чином, всі гальванічні виробництва виступають одним із потенційних джерел забруднення довкілля іонами важких металів.

Більшість підприємств спрямовують стічні води, що містять значну концентрацію солей металів, на станції нейтралізації, де вони піддаються обробці електрокоагуляційним або реагентним способом. В результаті йони металів переходять у нерозчинну форму [6,7]. Це знижує агресивність стоків, але водночас створює проблему подальшого поводження з утвореним осадом. Зберігання такого осаду на відкритому повітрі може спричинити зміни його якісного складу під впливом різних факторів, що підвищує ризик проникнення токсичних речовин у ґрунтові води та навколишнє середовище.

Фізико-хімічні властивості гальванічних відходів — це характеристики, які описують їхню фізичну форму, хімічний склад і поведінку в навколишньому середовищі. Ось основні властивості, які зазвичай аналізують:

*Фізичні властивості:*

- консистенція (стан): шлам, суспензія, тверда речовина, желеподібна маса;
- густина: маса одиниці об'єму (особливо сухого залишку і загальної суспензії);
- вологість: вміст води у відходах (%);
- колір і запах: може вказувати на тип і характер забруднення;
- розмір часток: розподіл за фракціями твердих часток;
- осадження: швидкість осідання твердих часток у відстійнику.

*Хімічні властивості:*

- pH: кислотність або лужність відходів;
- концентрація важких металів (наприклад, кадмій, хром, нікель, мідь, цинк, свинець) — основне джерело токсичності;
- вміст солей: концентрація різних солей металів і інших речовин;
- органічні речовини: вміст шкідливих органічних сполук, які можуть бути присутні;
- хімічна спроможність до осадження: здатність утворювати нерозчинні сполуки при обробці;
- токсичність: загальний вплив на довкілля та здоров'я.

Таким чином, гальванічні відходи мають комплекс фізико-хімічних характеристик, що визначають їхню поведінку при зберіганні, обробці та впливі на довкілля. За фізичними властивостями ці відходи найчастіше представлені у вигляді шламу або суспензії з високим вмістом води, що надає їм желеподібної консистенції.

Густина сухого залишку варіюється залежно від глибини осаду — найбільша в нижніх шарах і поступово зменшується до поверхні, що свідчить про осідання твердих часток і їх ущільнення.

Вологість гальванічних відходів є високою, часто перевищує 80–90 %, що ускладнює їх транспортування і утилізацію.

Колір і запах можуть змінюватися залежно від складу металів та інших домішок.

За хімічними властивостями ці відходи характеризуються значною кислотністю або лужністю, що залежить від технологічного процесу і методів очищення. Концентрація важких металів — таких як кадмій, хром, нікель, мідь, цинк і свинець — перевищує гранично допустимі норми і є основним джерелом токсичного навантаження на довкілля. Окрім того, у складі відходів можуть міститися різні солі металів і органічні сполуки, які посилюють їх шкідливий вплив.

Завдяки електрохімічній коагуляції йони металів переходять у нерозчинну форму, що сприяє зменшенню токсичності стоків. Водночас утворений твердий

осад зберігає високу концентрацію металів, тому потребує ретельного аналізу для вибору способів утилізації чи захоронення.

Відходи підприємства ТОВ « Флекса Друк» зберігаються у герметичних, некорозійних ємностях у вигляді шламу, який містить близько 90 % води. Найбільш ефективним підходом до поводження з цим відходом є розділення його на стічну воду та тверду фазу. Тому необхідно провести аналіз як стічної води, так і твердого залишку стандартними методами [16.17], щоб визначити можливість скидання очищених промислових стоків, а також варіанти утилізації чи безпечного захоронення відходів.

Відомо, що для очищення стоків це підприємство застосовує метод електрохімічної коагуляції, що має перевагу у запобіганні додаткового надходження зайвих йонів у водойми. Згідно з результатами хімічного аналізу сухої речовини шламу наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад гальванічного шламу

| № п/п | Хімічний елемент | Вміст, мг/л |
|---|---|---|
| 1 | Залізо | 11,90 |
| 2 | Марганець | 2,0 |
| 3 | Нікель | 0,55 |
| 4 | Мідь | 1,87 |
| 5 | Цинк | 0,032 |
| 6 | Стронцій | 10,04 |
| 7 | Свинець | 0,04 |
| 8 | Кадмій | 0,014 |
| 9 | Берилій | 0,17 |
| 10 | Галій | 0,32 |
| 11 | Магній | 0,28 |
| 12 | Хром | 0,65 |

Відповідно до таблиці класифікації відходів за гранично допустимими концентраціями (ГДК) [20], цей відхід відноситься до II класу небезпеки, при цьому концентрація важких металів перевищує допустимі норми втричі.

Густина сухої частини залишку неоднорідна по всьому об’єму відстійника: вона максимальна у нижній його частині, тоді як у верхній частині

шлам має желеподібну консистенцію. Це свідчить про те, що тверда фаза осідає і ущільнюється при попаданні в ємність, що ускладнює процес її подальшої утилізації. Окрім того, тверді відкладення концентруються в одному з кутів ємності, де вона має нахил.

Дослідження показали, що з глибиною твердого залишку зростає його густина: найбільша – біля дна відстійника, а найменша – біля поверхні.

Дані щодо хімічного складу водного шару наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні показники стічних вод гальванічного виробництва

| № п/п | Показники | Усереднений значення показника |
|---|---|---|
| 1 | Зовнішній вигляд | Рідина без запаху |
| 2 | Прозорість, мм | >200 |
| 3 | pH середовища | 8,97 |
| 4 | Густина при 20°С, г/мл | 1,0017 |
| 5 | Колірність | 7° |
| 6 | Сухий залишок, % | 0,1598 |
| 7 | Реакція на окислювачі | відсутня |
| 8 | (ХПК) | 50 мг [О]/л |

## 1.3 Нормативно-правове регулювання поводження з гальванічними відходами в Україні та світі

З 1994 року в Україні почали впроваджувати програми з управління відходами, які охоплювали певні періоди. Остання з таких програм діяла в період 2005–2011 років і стала основою для створення довгострокової Національної стратегії поводження з твердими промисловими відходами. Головні завдання цих ініціатив, взяті з досвіду європейських країн, включають:

- зменшення обсягів утворення відходів, їх повторне використання та утилізацію (наприклад, застосування багаторазового посуду, мінімізація пакування, повторне використання цінної сировини, такої як пластик, папір, скло; утилізація відходів, що не підлягають переробці, шляхом спалювання або захоронення на полігонах);
- впровадження системи роздільного збору сміття;

- оновлення парку сміттєвозів із закупівлею нових моделей і поліпшення системи контейнерного постачання;
- контроль за існуючими сміттєзвалищами з метою їх модернізації та трансформації у полігони, що дозволяє знизити обсяги поховання відходів;
- проведення санітарно-гігієнічних заходів для поліпшення екологічного стану;
- організація інформаційно-просвітницьких кампаній щодо правильного поводження з відходами;
- впровадження сучасних технологій, які є екологічно безпечними та ресурсозберігаючими.

Згідно з постановою Верховної Ради України, яка окреслює основні напрями державної політики у сфері охорони довкілля, щорічно у населених пунктах накопичується приблизно 40 млн.м$^3$ сміття, що зберігається на 771 міському сміттєзвалищі та полігоні.

Національна стратегія та політика у сфері управління відходами закріплені у законі України №33 «Про відходи» від 5 березня 1998 року. У цьому законодавчому акті визначені ключові принципи, серед яких першочерговий захист навколишнього середовища та здоров'я населення від шкідливого впливу відходів, раціональне і економне використання матеріальних, сировинних і енергетичних ресурсів, а також гармонізація екологічних, економічних і соціальних інтересів суспільства в процесі утворення та поводження з відходами для забезпечення сталого розвитку країни. Нормативні документи: «Про вилучення з обігу, переробку, утилізацію, знищення або подальше використання неякісної та небезпечної продукції» № 1393-XIV від 14. 01. 2000р. , «Про металобрухт» № 2114-III від 16. 11. 2000 р.

Постанова КМУ №915 «Про впровадження системи збирання, сортування, транспортування, переробки та утилізації відходів як вторинної сировини» від 26.07.01 (Із змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 1069 від 25.07.02, № 1084 26.07.02, № 1844 від 26.11.03).

Враховуючи прагнення України до інтеграції з Європейським Союзом, важливо оцінювати відповідність національного законодавства європейським нормам. Особливу увагу слід приділяти вимогам європейських правових актів і можливості їх адаптації до української системи. На симпозіумі ЮНЕП, присвяченому проблемі незаконного міжнародного обігу небезпечних хімічних речовин, який проходив у Празі (Чехія) 6–8 листопада 2006 року, було визначено, що незаконний обіг включає кілька складових: саму хімічну речовину, процес її отримання або виготовлення, транспортування, особливо через кордони, а також її застосування і знищення [21].

Наприклад, у Швеції спостерігається дефіцит певних видів відходів, через що вони імпортуються з Норвегії, Фінляндії, Німеччини, а також папір і пластик - з Нідерландів. У середньому країна приймає близько 300 тисяч тонн відходів щороку.

Для регулювання переміщення небезпечних відходів через кордони і їх утилізації була прийнята Базельська конвенція в 1989 році, яка набрала чинності у 1992 році. Наразі до неї приєдналися 136 країн. Головною метою конвенції є захист здоров'я людей і навколишнього середовища від негативних наслідків, що виникають через зростання обсягів виробництва, транспортування і утилізації небезпечних відходів. Конвенція особливо регулює міжнародну торгівлю такими відходами, перелік яких наведено у додатках. Торгівля дозволяється лише між учасниками конвенції і базується на процедурі отримання попередньої згоди.

Крім того, кожна країна має право заборонити ввезення всіх небезпечних відходів на свою територію.

У поправці до Конвенції, яка поки що не набула чинності, передбачено повну заборону на вивезення небезпечних відходів з розвинених країн до країн, що розвиваються, з метою їх остаточного знищення. У різних державах діють неоднакові нормативи щодо поводження з токсичними відходами, що створює сприятливі умови для зловживань. Виробники часто використовують правові прогалини, аби позбутися небезпечних матеріалів, передаючи їх за кордон через

мережі фіктивних компаній. Через недосконаліть системи ліцензування та нечіткість вимог щодо документального оформлення, нерідко відбувається підроблення або приховування інформації про склад і токсичність відходів [22].

У багатьох країнах бракує кваліфікованих фахівців і технічних засобів для перевірки імпортованих відходів. Внаслідок цього спроби простежити шлях небезпечного вантажу стикаються з бюрократичними труднощами і затягуванням часу. Часто небезпечні відходи продають підприємствам у країнах із менш жорсткими екологічними вимогами, де заради економічної вигоди готові ігнорувати потенційну загрозу. Хоча частина міжнародної торгівлі відходами має законний характер і передбачає відповідну утилізацію, нелегальні операції також досить поширені [23].

У 1997 році в місті Кіото (Японія) відбулася міжнародна конференція під егідою ООН, присвячена питанням координації заходів у сфері охорони довкілля. Результатом цієї зустрічі стало підписання Кіотського протоколу, який запровадив жорсткіші норми щодо контролю за викидами парникових газів. Під тиском міжнародної спільноти та зростаючого громадського усвідомлення екологічних проблем, розвинені держави змушені більше уваги приділяти переробці власних відходів.

Для цього активно досліджуються шляхи впровадження безвідходних технологій і методів безпечної нейтралізації токсичних речовин. Одним із найактуальніших викликів сучасності стали промислові відходи. Їх утворення, транспортування, зберігання, утилізація та знищення стали пріоритетними питаннями для індустріально розвинених країн, оскільки саме вони значною мірою впливають на стан навколишнього середовища.

В Україні ця проблема набула особливої гостроти через великі обсяги утворення небезпечних відходів. Щороку в державі генерується приблизно 1,5 мільярда тонн промислових відходів, з яких близько 8 мільйонів тонн належать до категорій із високим рівнем небезпеки (1–3 класи).

Загальний обсяг промислових відходів, накопичених в Україні, перевищує 25 млрд. тонн. Лише незначна частина підприємств займається їх утилізацією та

знешкодженням, при цьому більшість з них не має належного технологічного забезпечення. Основна кількість відходів видаляється у відвали, терикони, шламосховища, хвостосховища, полігони та інші об’єкти накопичення, яких в країні нараховується вже декілька тисяч. Для цих цілей вилучаються значні площі земель, проте на багатьох із таких об'єктів відсутні ефективні заходи захисту довкілля.

Найбільше серед відходів становлять розкривні породи, що утворюються в результаті гірничих робіт, а також залишки збагачення руд, вугілля, металургійні шлаки, шлами хімічних і гальванічних виробництв, горілі породи тощо.

В Україні коефіцієнт повторного використання таких відходів коливається в межах 10–30%, а обсяг знешкодженого матеріалу — менше 2%. У той самий час багато з цих відходів містять цінні ресурси: чорні та кольорові метали, рідкісні та благородні елементи, а також нерудну сировину. Це, зокрема, стосується залишків гальванічного виробництва, металургійної і хімічної промисловості. Тому накопичувачі подібних відходів часто розглядають як техногенні родовища, і в Україні проводяться їх обстеження для встановлення складу, властивостей та рівня впливу на довкілля [15].

Гальванічні відходи складають значну частину найбільш небезпечних відходів 1–3 класів, які одночасно є джерелом вторинної сировини. Їхня утилізація ускладнена відсутністю ефективних технологій і тим, що вони часто зберігаються разом з іншими видами відходів. Для вирішення цієї проблеми необхідно створювати спеціальні дільниці або підприємства, оснащені технологіями для знешкодження й вилучення цінних компонентів. У багатьох випадках ці речовини зберігаються у невідповідних умовах або навіть просто неба. Ефективне їх знешкодження потребує створення профільних підприємств або використання енергетичних агрегатів, таких як обертові печі цементних заводів чи котли спеціального призначення.

Частина відходів має у своєму складі водорозчинні компоненти, які у випадку недостатньої ізоляції забруднюють ґрунти та водні ресурси.

Вирішенням цієї проблеми може стати вдосконалення методів добування корисних копалин, яке б мінімізувало утворення таких відходів.

На підприємствах часто утворюється широкий спектр малих обсягів відходів: шлами та пил з газоочисних систем, стічні осади, відходи лакофарбових матеріалів, полімерів, гуми, відпрацьовані лампи, будівельне сміття тощо. Для їх ефективної переробки доцільним є створення багатофункціональних комплексів, здатних збирати та утилізувати декілька типів відходів із урахуванням їх специфіки. Такі комплекси повинні мати як стаціонарне обладнання, так і мобільну техніку.

Ефективне поводження з гальванічними відходами потребує також створення комплексної нормативної бази, яка має визначати:

- граничні обсяги утворення відходів у процесах виробництва;
- питомі нормативи на утворення, використання й утрати сировини;
- порядок регулярного перегляду нормативів із урахуванням науково-технічного прогресу;
- систему встановлення лімітів на утворення та розміщення відходів;
- вимоги до транспортування, зберігання та захоронення.

Розмір плати за розміщення залежить від класу небезпеки відходів і вартості території. За перевищення лімітів передбачені штрафи у підвищених розмірах.

Основні напрями політики у сфері поводження з промисловими відходами включають:

- запобігання їх утворенню шляхом модернізації технологій;
- утилізацію та регенерацію через повернення відходів у виробничі процеси;
- організацію спеціалізованих підприємств для обробки відходів;
- впровадження технологій вилучення цінних матеріалів;
- створення кластерів, де відходи одного підприємства стають сировиною для іншого;

− знешкодження залишків механічними, термічними, хімічними та біологічними методами.

Таким чином, відходи гальванічних виробництв є одними з найнебезпечніших і водночас найбільш цінних промислових залишків. Вони містять значну кількість важких металів, таких як нікель, хром, мідь, цинк, що мають токсичну дію на довкілля та організми. Однак ці метали є також стратегічно важливими ресурсами, придатними до вторинного використання. Складність утилізації гальванічних відходів обумовлена їх хімічною агресивністю, високою концентрацією шкідливих речовин та частим змішуванням із іншими видами промислових відходів.

Ефективне вирішення проблеми потребує впровадження спеціалізованих технологічних ліній із вилучення цінних компонентів та знешкодження залишків, а також чіткого державного контролю та належної нормативно-правової бази. Залучення інноваційних методів переробки, розвиток інфраструктури збору та обробки гальванічних відходів здатні значно знизити ризики для екосистем і сприяти формуванню ресурсозберігаючої моделі економіки.

# РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

## 2.1. Характеристика підприємства та технологічного процесу гальванічного виробництва

Підприємство ТОВ «Флекса Друк» спеціалізується на випуску поліграфічної продукції та валів для поліграфічних машин.

Поштовий індекс, адреса: 61099, м. Харків, Немишлянський р-н, вул. Свистуна, 4. Статутний капітал: 25, 586 млн. грн.

Види економічної діяльності діяльності:

18.13 − виготовлення друкарських форм і надання інших поліграфічних послуг;

18.12 − друкування іншої продукції;

22.21 − виробництво плит, листів, труб і профілів із пластмас;

22.29 − виробництво інших виробів із пластмас;

72.19 – дослідження і експериментальні розробки у сфері інших природничих і технічних наук.

Підприємство розпочало свою діяльність у 1997 році з започаткування невеликого видавництва. Завдяки постійному вивченню нових технологій в поліграфії і величезному бажанню розвиватися, невелика компанія, яка запропонувала пакувальний друк в Дніпропетровську, стала національним лідером серед поліграфічних компаній. Сьогодні продукція підприємства відома не тільки в Україні, але і за кордоном. У пошуках інновацій та нових можливостей ТОВ «Флекса Друк» бере участь у міжнародних виставках, зустрічах, конференціях у Німеччині, Великобританії та Польщі.

На підприємстві впроваджена система менеджменту якості, яка підтверджена сертифікатом ISO 9001:2015, № 320212026/4, що діє до 24.03.2026 року. Щорічно проводяться сертифікаційні та наглядові аудити продукції, в тому числі аудити «третіх осіб» - незалежних аудиторських компаній від наших

іноземних партнерів. Продукція виготовляється відповідно до вимог законодавства, нормативно-правових актів та санітарних норм. Якість та естетика вистави підтверджена нагородами національних та міжнародних виставок та конкурсів (Додаток А).

Фактичні значення виробничої потужності та продуктивності технологічного устаткування наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Фактичні значення виробничої потужності та продуктивності технологічного усттакування

| Найменування устаткування | Річна фактична виробнича потужність | Продуктивність технологічного устаткування, % | Режим роботи устаткування (год/рік) |
|---|---|---|---|
| Автоматична гальванічна лінія | 50 кВт | 100 | 1000 |
| Екструдер | 140 кКт | 100 | 2000 |
| Коронатор екструдеру | 140 кВт | 100 | 2000 |
| Котел ВК-22 | 1 МВт | 100 | 4320 |

Сучасне виготовлення поліграфічних валів для друкарських машин – складний процес і складається з декількох етапів. В таблиці 2.2 наведено перелік сировини, допоміжних матеріалів, які необхідні для випуску продукції ТОВ «Флекса Друк».

Таблиця 2.2 - Перелік сировини, допоміжних матеріалів, які необхідні для випуску продукції

| № з/п | Сировина, допоміжні матеріали | Призначення | Умови зберігання | Річне використання | Наявність документації |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Поліетилен | Виробництво плівки | поліетиленові мішки, технічне приміщення | 140 т | сертифікат якості |
| 2 | Електроди | Виробництво валів | картонні коробки, технічне приміщення | 0,170 т | ГОСТ 9466-75 |
| 3 | Зварювальний дріт | Виробництво валів | у мотках, технічне приміщення | 1,870 т | ГОСТ 30136-95 |

До покриттів, що утворюються у виробничому процес поліграфічних валінів шляхом гальванізації, висувають вимоги щодо зовнішнього вигляду та, за потреби, спеціальних характеристик.

Для металевих покриттів встановлюють норми за товщиною, пористістю та міцністю адгезії, а у випадку нанесення сплавів — також за хімічним складом. Неметалічні неорганічні покриття, окрім цього, повинні відповідати вимогам щодо захисних властивостей і, при необхідності, товщини. Щодо зовнішнього вигляду, покриття мають задовольняти наступні критерії [9-11].

Поліровані поверхні покриттів повинні мати блиск від яскравого до дзеркального з рівномірним відблиском, за винятком отворів, пазів, внутрішніх поверхонь і ввігнутих ділянок виробів зі складною геометрією.

По товщині, хімічному складу, захисним властивостям та пористості покриття мають відповідати встановленим стандартам. Покриття повинне щільно прилягати до основного металу, не відшаровуватися, бути без сколів, пухирів і тріщин, а також витримувати випробування на міцність згідно з ДСТУ Б В.2.8-16:2009.

Колір захисно-декоративного покриття без полірування — сріблясто-сірий. Для полірованого покриття характерний сріблястий колір з легким блакитним відтінком.

Хромове покриття може бути світло-зеленим або жовто-зеленим, на деталях з багатокомпонентних та литих алюмінієвих сплавів — від сірого до темно-сірого. Фарбоване покриття повинне відповідати кольору барвника, але його відтінок не нормується.

На підприємстві використовують електроліт ДСТУ EN ISO серії 12944 (Додаток В):

- хромовий ангідрид $CrO_3$ 350-400 г/л
- кислота сульфатна $H_2SO_4$ 2,5 – 3,0 г/л
- NaOH 40-60 г/л
- Температура процесу 15-24ºС
- Катодна густина струму 10-60А/дм$^2$

- Катодний вихід за струмом 9%.

Технологічний процес хромування здійснюється електролітом, який працює при кімнатні температурі.

Для процесу хромування застосовують нерозчинні аноди, виготовлені зі сплаву свинцю з оловом або сурмою. Чистий свинець у цьому випадку менш придатний. У гальванічних установках переважно використовують сплав PbSb, що містить близько 7% сурми.

Форма анода впливає на його ефективність у ванні — найкращими вважаються аноди круглої або овальної форми, які рекомендується виготовляти самостійно. При потребі використовують також плоскі аноди шириною приблизно 50 мм та товщиною 10–15 мм. Тонкі широкі аноди є менш вигідними з технічної точки зору, оскільки на їхній задній поверхні важко забезпечити необхідний анодний струм для підтримки активного стану анода [11-13].

Важливим є надійне кріплення анода на штанзі. Класичний метод із загином анода і підвішуванням на штанзі часто не забезпечує якісного проходження струму. Тому до анода радять припаяти міцний гак з мідної смуги шириною близько 30 мм і товщиною 6–8 мм, оснащений різьбою під гвинт для притискання до плоскої струмової штанги.

Якщо на анодах з’являється жовтий наліт, його рекомендують усувати, поміщаючи аноди на ніч у 25%-й розчин кухонної солі, а потім очищуючи шлам сталевими щітками. Сухе очищення анодів небезпечне, оскільки утворюється пил, шкідливий для здоров’я.

Після тривалої перерви, наприклад після вихідних, аноди слід вийняти з ванни, промити, протерти волосяною щіткою, висушити та сушити на повітрі. При коротких паузах, наприклад, на ніч, аноди залишають у ванні, а перед початком роботи активують їх, працюючи приблизно 30 хвилин при напрузі 8 В після навішування на катодну штангу сталевих листів або прутків [18].

Допоміжні аноди виготовляють із тонкого свинцевого листа або свинцевого дроту, які мають гарну пластичність. Очищені аноди, як і нові, активують струмом при високій напрузі.

Друківні вали, виконані зі сталі, що надходять у гальванічний цех для нанесення покриттів, зазвичай мають різні дефекти на поверхні — подряпини, риски, задирки та інші ушкодження. Ці недоліки погіршують зовнішній вигляд виробів і знижують їхню експлуатаційні властивості. Тому перед нанесенням покриттів вали проходять обробку шліфуванням та поліруванням, щоб отримати рівну і гладку поверхню. Для цього використовують спеціальні шліфувальні верстати, а також різні шліфувальні та полірувальні круги, стрічки.

*Шліфування.* Цей процес складається з кількох етапів, кожен із яких виконується за допомогою шліфувальних кругів з різним розміром зерна. Поступово зернистість зменшується — від крупного до дрібного (від 12 до 4 за ДСТУ 3647-80). Для фіксації наждакового порошку на кругах застосовують столярний клей або рідке скло.

*Полірування.* Полірування застосовують для отримання дзеркального блиску поверхні. Після полірування нерівності поверхні стають меншими за довжину хвилі видимого світла. Блиск і гладкість досягаються шляхом тертя з м’якими матеріалами, наприклад, повстю або шкірою. Механізм полірування можна пояснити трьома основними напрямками:

1. Механічне полірування — полягає у знятті мікронерівностей поверхневого шару шляхом дії механічних властивостей матеріалу, таких як твердість і пластичність.

2. Фізичне полірування — пов’язане з такими властивостями, як температура плавлення та теплопровідність матеріалу.

3. Хімічне полірування — ґрунтується на видаленні оксидних плівок, які утворюються на поверхні під впливом навколишнього середовища.

Практичний досвід показує, що полірування є складним комплексом механічних, фізичних, електричних та хімічних процесів, які взаємодіють між собою і змінюються залежно від матеріалу, інструменту, режимів обробки та умов довкілля.

Схема технологічного процесу нанесення хромового покриття на друківні вали наведена рисунку 2.1.

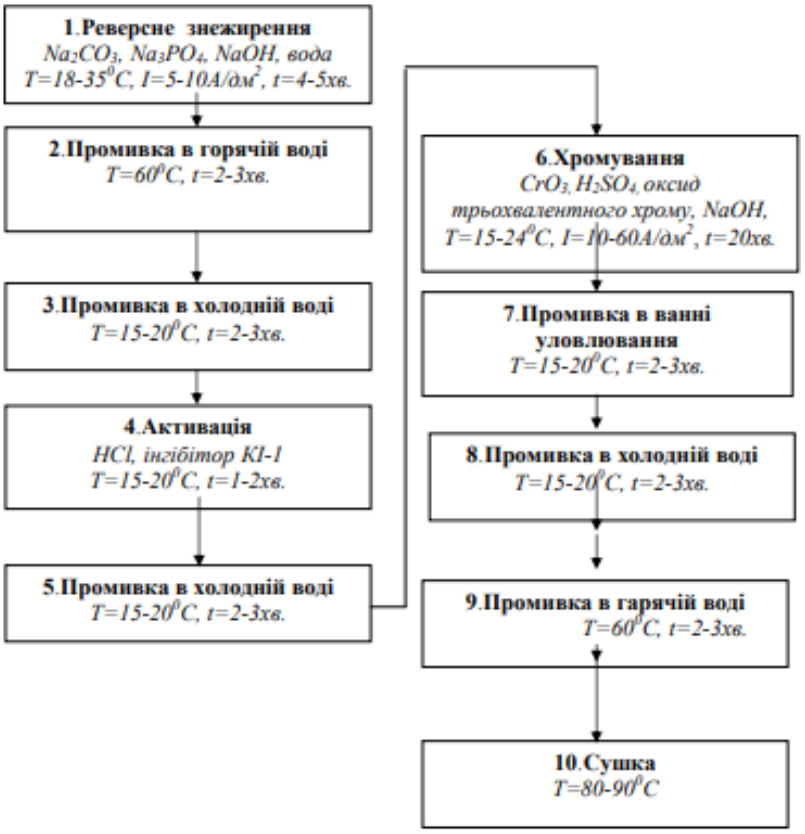



Рис. 2.1 – Схема технологічного процесу нанесення хромового покриття

Після нанесення покриття вали піддаються контролю для визначення товщини покриття, також проводиться огляд зовнішнього вигляду покриття. Якщо покриття неякісне його видаляють і наносять заново.

У таблиці 2.3 наведено перелік видів та обсягів забруднюючих речовин, які викидаються в атмосферне повітря стаціонарними джерелами у ТОВ «Флекса Друк» (Додаток С).

Таблиця 2.3 - Перелік видів та обсягів забруднюючих речовин, які викидаються в атмосферне повітря стаціонарними джерелами

| № | Найменування забруднюючої речовини | Фактичний обсяг викидів | Потенційний обсяг викидів | Порогові значення |
|---|---|---|---|---|
| Найбільш поширені забруднюючі речовини | | | | |
| 1 | Оксиди азоту | 0,43624 | 0,43624 | 1,0 |
| 2 | Речовини у вигляді суспендованих твердих часток недиференційованих за складом | 0,0033597 | 0,0033597 | 3,0 |
| 3 | Діоксид сірки | 0,000017 | 0,000017 | 1,5 |
| 4 | Озон | 0,0000075 | 0,0000075 | 0,1 |
| 5 | Оксид вуглецю | 0,43978 | 0,43978 | 1,5 |
| | Усього | 0,8794042 | 0,8794042 | - |

| Небезпечні забруднюючі речовини | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Мідь та її сполуки | 0,00144 | 0,00144 | 0,01 |
| 2 | Нікель та його сполуки | 0,00018 | 0,00018 | 0,001 |
| 3 | Сульфатна кислота | 0,00054 | 0,00054 | 0,5 |
| 4 | Хром та його сполуки | 0,00094 | 0,00094 | 0,02 |
| 5 | Водню хлорид | 0,0072 | 0,0072 | 0,1 |
| 6 | Манган та його сполуки | 0,0014 | 0,0014 | 0,005 |
| 7 | Залізо та його сполуки | 0,02363 | 0,02363 | 0,1 |
| 8 | Кислота оцтова | 0,4212 | 0,4212 | 0,8 |
| | Усього | 0,45653 | 0,45653 | - |
| Інші забруднюючі речовини | | | | |
| 1 | НМЛОС | 0,00023 | 0,00023 | 1,5 |
| 2 | Кислота борна | 0,00045 | 0,00045 | - |
| 3 | Натрію гідроксид | 0,0045 | 0,0045 | - |
| 4 | Метан | 0,0086 | 0,0086 | 10,0 |
| | Усього | 0,01378 | 0,01378 | - |

Як видно з перевищення порогових значень виявлено у розділі «Небезпечні забруднюючі речовини»:

− Нікель та його сполуки: фактичний викид — 0,00018, при порозі 0,001 (перевищення в 1,8 разів).

− Манган та його сполуки: фактичний викид — 0,0014, при порозі 0,005 (перевищення в 2,8 разів).

Усі інші речовини не перевищують порогові значення. Таким чином, загальний рівень забруднення знаходиться в межах допустимих норм, за винятком викидів нікелю та мангану, які перевищують порогові значення і потребують додаткового контролю чи обмеження.

Гальванічне виробництво формують два основних типи стічних вод:

– технічні промивні стоки, які утворюються після обробки деталей у ваннах гарячої та холодної промивки;

– концентровані залишки гальванічних та хімічних розчинів, що надходять після зливу відпрацьованих електролітів або під час періодичних очищень ванн.

Через використання різноманітних типів покриттів (нікель, хром, мідь тощо), склад забруднень у стічних водах значно варіюється. За агрегатним

станом та хімічною природою домішок, усі забруднення поділяють на чотири основні категорії:

- дрібнодисперсні тверді частинки та емульсії, які перебувають у завислому стані;
- колоїдні системи та полімерні сполуки;
- органічні речовини, розчинені у воді (наприклад, залишки поверхнево-активних речовин);
- мінеральні домішки, зокрема розчинені солі, кислоти та луги.

Процес нанесення металевих покриттів генерує великі обсяги стічних вод, які можуть містити ціаніди, важкі метали, розчинники, поверхнево-активні речовини, олії і мастила. Стічні води необхідно направляти до систем очищення, щоб відповідати українським екологічним нормам. Ця обробка стічних вод призводить до утворення твердих гальванічних відходів, які також називають гальванічним шламом.

## 2.2 Оцінка складу гальванічних відходів та системи очищення стічних вод

Процес нанесення металевих покриттів генерує великі обсяги стічних вод, які можуть містити ціаніди, важкі метали, розчинники, поверхнево-активні речовини, олії і мастила. Стічні води необхідно направляти до систем очищення, щоб відповідати екологічним нормам. Ця обробка стічних вод призводить до утворення твердих гальванічних відходів, які також називають гальванічним шламом. У хімічних процесах гальванізації відбуваються хімічні реакції за участю заліза, хрому, нікелю та міді. При взаємодії діоксиду хрому з залізним сульфатом і сірчаною кислотою утворюються сульфати хрому та заліза з виділенням води:

$$2CrO_3 + 6FeSO_4 + 6H_2SO_4 \rightarrow Cr_2(SO_4)_3 + 3Fe_2(SO_4)_3 + 6H_2O.$$

Далі тривалентний сульфат заліза реагує з амоніаком, утворюючи гідроксид заліза та сульфат амонію:

$$Fe_2(SO_4)_3 + 6NH_4OH \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 3(NH_4)2SO_4.$$

Подібним чином сульфати нікелю і міді взаємодіють з амоніаком, утворюючи відповідні гідроксиди та сульфати амонію:

$$NiSO_4 + 2NH_4OH \rightarrow Ni(OH)_2 + (NH_4)_2SO_4;$$

$$CuSO_4 + 2NH_4OH \rightarrow Cu(OH)_2 + (NH_4)_2SO_4.$$

Гідроксид хрому також утворюється з сульфату хрому та амоніаку:

$$Cr_2(SO_4)_3 + 6NH_4OH \rightarrow 2Cr(OH)_3 + 6(NH_4)_2SO_4.$$

Подальше додавання амоніаку веде до комплексоутворення:

$$Ni(OH)_2 + 4NH_4OH \rightarrow Ni(NH_3)_{42} + 4H_2O;$$

$$Cu(OH)_2 + 4NH_4OH \rightarrow Cu(NH_3)_{42} + 4H_2O;$$

$$Cr(OH)_3 + 6NH_4OH \rightarrow Cr(NH_3)_{63} + 6H_2O.$$

Ці реакції є важливою частиною технологічних процесів, що використовуються у виробництві покриттів та обробці металів. Компоненти, що використовуються в ваннах хромування, показані в таблиця 2.4.

Таблиця 2.4 - Склад хімічних компонентів, що використовуються у ваннах хромування

| Склад ванни | Компоненти | Обсяг споживання, кг\рік |
|---|---|---|
| Знежирювач | Гідроксид натрію | 1200 |
| Кислота-Активатор | Сульфатна кислота | 3576 |
| Лужний - Мідь | Натрій Ціанід | 840 |
| | Ціанід міді | 3600 |
| Кислота - Мідь | Сульфат міді | 2400 |
| | Сульфатна кислота | 1200 |
| Нікель | Сульфат нікелю | 300 |
| | Хлорид нікелю | 120 |
| | Борна кислота | 60 |
| Хром | Хромова кислота | 1200 |
| | Сульфатна кислота | 24 |
| Всього | | 14520 |

Стічні води з pH<7, направляють до очисної ємності, в якій хром відновлюється додаванням натрію піросульфіту ($Na_2S_2O_5$) та сульфатної кислоти ($H_2SO_4$). Схема очищення стічних вод показана на рисунку 2.2.

Лужні стічні води направляються до резервуара для ціанідного

окислення, де використовується гіпохлорит натрію (NaOCl). Ці два типи очищених стічних вод направляються до резервуара для нейтралізації, де метали осаджуються додаванням гідроксиду кальцію ($Ca(OH)_2$). Регулювання pH для нейтралізації здійснюється шляхом додавання гідроксиду натрію (NaOH).

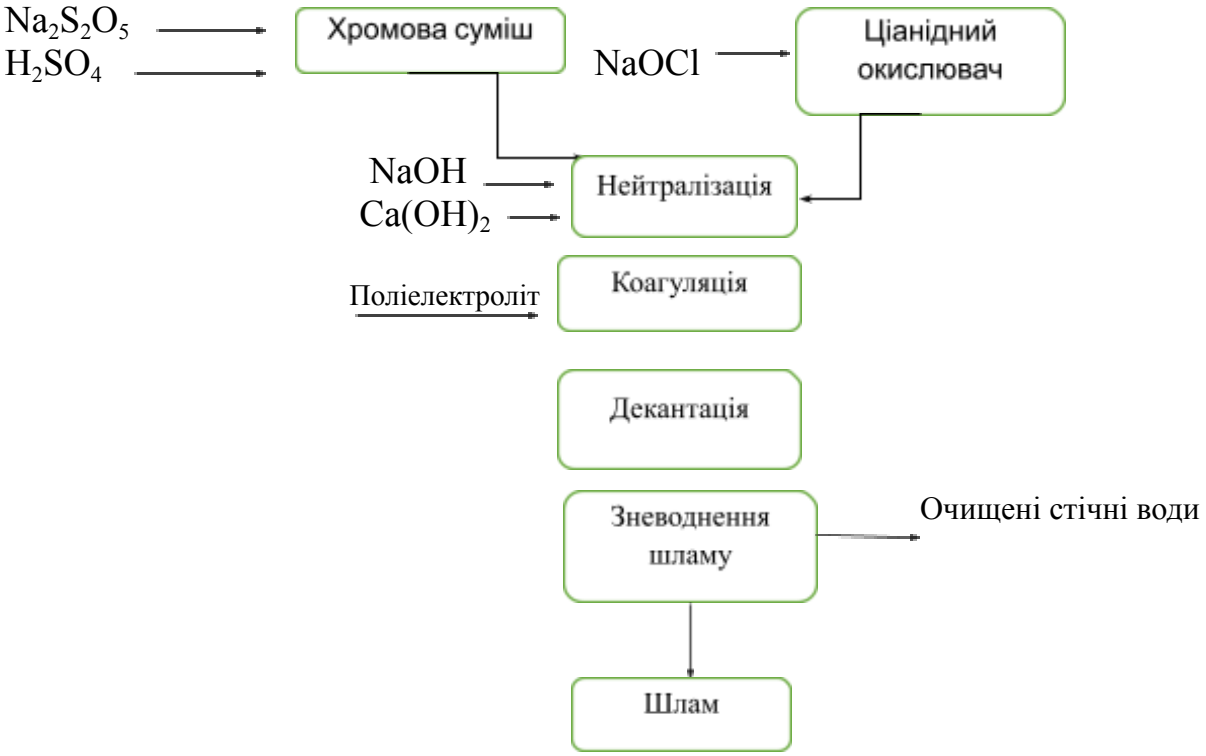



Рис. 2.2- Схема очищення стічних вод комбінованим методом редокс-процес, нейтралізації та коагуляції

Після нейтралізації стічні води направляються до коагуляційного резервуара, де додається поліелектроліт, який призводить до утворення пластівців, які видаляються під час поетапної декантації. Очищені стічні води направляються в систему очищення стічних вод та шлам, що утворюється на дні резервуара, проходить через фільтр-прес для зневоднення перед зберіганням. Результат очищення наведено в таблиці 2.5.

Шлам зберігається в залізних бочках з поліетиленовими мішками і передається компанії, яка займається збором гальванічних відходів та перевозить їх до кінцевого місця переробки.

Таблиця 2.5 – Результат очищення стічних вод методом флокуляції

| Хімічний елемент | ГДК $_{м.р.}$ | Значення показника до очищення, мг/л | Значення показника після очищення методом флокуляції, мг/л | Ступінь очистки, % (проект) |
|---|---|---|---|---|
| Cr (VI) | 0,05 | 92,65 | 0,78 | 99,1 |
| Cr (III) після відновлення | 0,5 | - | - | - |
| Fe | 0,3 | 4,56 | 0,74 | 83,77 |
| Ni | 0,1 | 2,87 | 0,18 | 93,73 |
| Cu | 0,1 | 86,71 | 0,56 | 99,3 |
| Zn | 1,0 | 4,12 | 0,17 | 95,87 |

Гальванічний шлам, перш ніж його відправили на хімічний та фізико-хімічний аналіз, пройшов процес сушіння при температурі 105ºС протягом 24 годин. Вологу та суху масу осаду, вміст вологи в цьому залишку оцінювався в 63,5%. Це вимірювання підтверджує високий вміст вологи в гальванічному осаді, який в середньому становить 60%. Ефективний процес зневоднення дозволить зменшити кількість утвореного осаду, зменшивши витрати на зберігання та утилізацію.

Першим проведеним аналізом був рентгенофлуоресцентний аналіз для виявлення основних елементів, присутніх у залишку. Результати представлені в порядку поширеності в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Гальванічний шлам (якісна характеристика)

| Рівень поширеності | Елементи |
|---|---|
| Поширені | Кальцій і Сірка |
| Середній пропорції | Мідь, Хром, Залізо і Нікель |
| Сліди елементів | Кремній, магній, Фосфор, Цинк |

На основі якісного аналізу було проведено кількісний аналіз атомно-емісійної спектроскопії (ICP-AES). Результат кількісного аналізу наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Хімічний склад (на суху наважку) шламу, обробленого

при різних температурах

| Види сполук, хімічний елемент | Вміст компонентів,% T=125°C | Вміст компонентів,% T=600°C |
|---|---|---|
| Ca | 23,65 | 24,05 |
| Cr | 3,66 | 3,66 |
| Fe | 1,89 | 1,89 |
| Ni | 0,56 | 0,56 |
| Cu | 3,98 | 3,98 |
| Zn | 1,54 | 1,54 |
| Ba | 0,01 | 0,01 |
| Pb | 0,01 | 0,01 |
| Всього | 35,30 | 35,70 |

Результати аналізу зразка, обробленого при 105ºC, демонструють, що найпоширенішим елементом у залишку за цієї температури є гідратований сульфат кальцію $(Ca(SO_4)\times(H_2O)_{0,5}$, а потім карбонат кальцію ($CaCO_3$) та сульфід міді та залізо ($CuFeS_2$), гістограма наведено в Додатку Д.

При 600ºC відбулася дегідратація сульфату кальцію ($Ca(SO_4)$) та утворення хромату кальцію ($Ca(CrO_4)$) (Додаток Д, рис. 5).

Щоб визначити вартість металевих елементів, присутніх у твердому гальванічному залишку, спочатку було вимірювали масу елементів, присутніх у залишку. шляхом множення аналізу ICP-AES на загальну кількість сухого гальванічного шламу (*4065 кг*), результат наведено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Маса хімічного елементу в гальванічному шламі

| Види сполук, хімічний елемент | Вміст компонентів,% T=125°C | Маса елементу в залишку, кг |
|---|---|---|
| Ca | 23,65 | 961,37 |
| Cr | 3,66 | 148,78 |
| Fe | 1,89 | 76,83 |
| Ni | 0,56 | 22,76 |
| Cu | 3,98 | 161,79 |
| Zn | 1,54 | 62,60 |
| Ba | 0,01 | 0,41 |
| Pb | 0,01 | 0,41 |
| Всього | 35,30 | 1434,95 |

Визначення елементів ванни для елементів, зазначених у таблиці 2.5, було необхідним для кількісної оцінки того, який внесок кожен компонент

вносить у загальний відсоток елемента в залишку. Це значення було розраховано на основі маси компонентів, використаних у кожній ванні, а результат наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Маса елементів в гальванічному шламі

| Види сполук, хімічний елемент | Вміст компонентів,% T=125°C | Склад гальванічної ванни | % елемента у ванні | Маса елементу у залишку, кг |
|---|---|---|---|---|
| Cu | 3,98 | $Cu(CN)_2$ | 0,71 | 28,86 |
| | | $CuSO_4$ | 3,27 | 132,93 |
| Ni | 0,56 | $NiSO_4$ | 0,40 | 16,26 |
| | | $NiCl_2$ | 0,16 | 6,51 |
| Cr | 3,66 | $CrO_3$ | 3,66 | 148,78 |
| Всього | 35,30 | 1434,95 | | 333,34 |

Формула для гальванічної ванни:

$$\text{Маса елементу у залишку} = \frac{\text{Відсоток елемента у ванні}}{100} \times 4065, \text{ кг} \qquad (2.1)$$

Масу втраченої в процесі композиції ванни визначали шляхом проведення стехіометричних розрахунків з урахуванням маси елементу в залишку, наведеної в таблиці 2.5. Втрачені компоненти маси ванни, а результат цього розрахунку представлено в таблиці 2.10.

Формула для розрахунку втраченої маси солі/сполуки в ванні:

$$\text{Маса сполуки (кг )} = \frac{\text{Маса елементав осаді,кг*Молекулярна маса сполуки}}{\text{Молекулярна маса елемента}} \qquad (2.2)$$

Таблиця 2.10 – Маса втраченої солі/сполуки в гальванічній ванні

| Склад гальванічної ванни | Маса елементу у залишку, кг | Маса втраченої солі/сполуки, кг |
|---|---|---|
| $Cu(CN)_2$ | 28,86 | 68,83 |
| $CuSO_4$ | 132,93 | 333,86 |
| $NiSO_4$ | 16,26 | 42,87 |
| $NiCl_2$ | 6,51 | 14,38 |
| $CrO_3$ | 148,78 | 286,14 |
| 1434,95 | 333,34 | 746,08 |

*Молекулярні маси елемента та сполук

$CuSO_4 \approx 159.61$ г/моль

$Cu \approx 63.55$ г/моль

$NiSO_4 \approx 154.75$ г/моль

$NiCl_2 \approx 129.60$ г/моль

$Ni \approx 58.69$ г/моль

$CrO_3 \approx 100.00$ г/моль
Cr ≈ 51.996 г/моль
$Cu(CN)_2 \approx 151.57$ г/моль

1. $CuSO_4$:
Маса Cu = 133.52 кг
Маса $CuSO_4$:
132.93×159.61/63.55=333.86 кг

2. $Cu(CN)_2$
Маса Cu = 28.86 кг
Маса $Cu(CN)_2$:
28,86×151,57/63,55= 68,83

3. $NiSO_4$
Маса Ni= 16,26 кг
Маса $NiSO_4$:
16,26×154.75/58.69= 42.87 кг

4. $NiCl_2$
Маса Ni = 6.51 кг
Маса $NiCl_2$ :
6,51×129.60/58.69= 14,38кг

5. $CrO_3$
Маса Cr = 148.78 кг
Маса $CrO_3$:
148,78×100.00/51.996= 286,14кг

З таблиці 2.10 видно, що втрати в процесі металізації призводять до щорічних збитків для підприємства, що відповідають приблизно 18,35% вартості отримання продукції.

Ці результати свідчать про те, що система очищення стічних вод працює неефективно. Утворення об'єму осаду, більшого, ніж необхідно для очищення стічних вод, призводить до непотрібного споживання хімічних речовин, їх зберігання та остаточної утилізації підприємством.

### 2.3 Оцінювання ризику екологічної небезпеки від зберігання гальванічних відходів

Найпоширенішим методом видалення важких металів є осадження. Важкі метали осідають у вигляді гідроксиду при обробці гідроксидом натрію

(NaOH) або гідроксидом кальцію ($Ca(OH)_2$ ). Це осадження відбувається при pH близько 8,5.

Гальванічний шлам - це осад, який накопичується при дно декантера та проходять через процес зневоднення, який може здійснюватися за допомогою фільтр-пресу, сушильного шару тощо. Класифікація тверді відходи за їхніми потенційними ризиками для здоров'я та навколишнього середовища наведена в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Класифікація гальванічних відходів за потенційними ризиками

| Клас небезпеки | Ступінь токсичності | Середня смертельна доза хімічного інгредієнта $LD_{50}$ | Lg (LD50) |
|---|---|---|---|
| I | Надзвичайно небезпечні | 15 | 1,176 |
| II | Високонебезпечні | 150 | 2,176 |
| III | Помірно небезпечні | 5000 | 3,699 |
| IV | Малонебезпечні | >5000 | 3,778 |

Найменування відходів: гальванічний шлам із застосуванням осаджувачів, зокрема лугу та соди (шлами від ванн травлення).

Фізичні характеристики: маса пастоподібної консистенції, коричневого кольору. Загальна характеристика: цей тип відходів утворюється в процесі травлення трубної продукції в спеціалізованому цеху.

Обробка здійснюється із використанням розчинів сірчаної кислоти. У шламі накопичуються переважно сполуки заліза (у формі сульфату) та сторонні нерозчинні домішки.

Для нейтралізації використовуються розчини кальцинованої соди або їдкого натру, що дозволяє досягти рівня pH у межах 3–12.

Кислотність водної витяжки: pH розчину становить 5,33, що вказує на слабокисле середовище.

Для визначення класу небезпеки гальванічних шламів враховували вміст хімічних речовин, їх розчинність у воді, реакцію середовища та токсикологічні показники [17,18].

Дані щодо концентрацій речовин та їх токсикологічної класифікації подано в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Концентрація та клас токсичності речовини

| Показник | Концентрація, мг/кг (X), клас токсичності речовини | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pb(1) | Fe(3) | Zn(1) | Cu(2) | Ca | Cr(2) | Ni(2) |
| Середній вміст у шламі, мг/кг | 0,01 | 0,0183 | 0,0154 | 0,0398 | 0,2365 | 0,0366 | 0,0056 |
| Розчинність,% | Не розч. | Не розч. | 56,5 | Не розч. | - | 16 | Не розч. |
| ГДК, мг/кг | 32,0 | 2.0 | 230 | 66 | Не норм. | 100,0 | 40 |

Методика встановлення класу небезпеки складного відходу полягає в тому, що для кожного хімічного компонента, який входить до складу відходів, обчислюється *індекс токсичності.* Розрахунок здійснюється за спеціальною формулою, яка враховує токсикологічні характеристики речовини (зокрема, значення $LD_{50}$**),** масову частку інгредієнта у відході, його розчинність у воді, а також показники реакції середовища (pH). На основі отриманих індексів для всіх компонентів визначається узагальнений показник токсичності відходу, що дозволяє віднести його до відповідного класу небезпеки.

$$K_c = \frac{\lg lg\left(LD_{50}\right) i}{\left(S+0{,}1F+C_v\right) i} \qquad (2.3)$$

де, $LD_{50}$ — це середня смертельна доза речовини при пероральному надходженні, яка викликає загибель 50% піддослідних тварин, $S$ — коефіцієнт, що характеризує ступінь розчинності речовини у воді; $F$ — показник леткості речовини, що враховує її здатність випаровуватись; $Cw$ — вміст конкретного інгредієнта у складі відходів, який може бути виражений як частка від загальної маси (в тоннах на тонну відходу); $i$ — номер компонента у переліку речовин, що входять до складу відходу.

Після визначення індексів токсичності для всіх компонентів, обирають від двох до трьох речовин, які мають найнижчі значення показника $Kc$.

Під час цього відбору повинно виконуватись правило:

$K_1 < K_2 < K_3$, а також співвідношення: $2 + Kc > K_3$

На основі цих обраних компонентів розраховується зведений індекс токсичності шляхом підстановки їх значень у відповідну формулу.

Зокрема, індекс токсичності розраховували на основі $LD_{50}$ для теплокровних організмів. Найменшу токсичність серед присутніх речовин виявили у сполуках кальцію**.**

Розрахунок індексу токсичності проводили за формулою:

$К_с = \lg(150) / (1,0 + 0,0 + 0,56) = 1,39$

де $К_с$ — індекс токсичності відходів за $LD_{50}$ .

Оскільки значення $К_с$ перебуває в межах $1,3 < К_с < 3,3$, такі відходи відносяться до II класу небезпеки – високо небезпечні. У зв'язку з цим, при поводженні з ними обов'язкове дотримання правил безпеки, особливо з урахуванням їх лужної реакції (pH витяжки — 11,68). Після нейтралізації небезпека шламів може знизитись.

За результатами аналізу встановлено, що вміст токсичних елементів у шламі становить: хрому – 3,66 кг/т, нікелю – 0,56 кг/т. Для оцінки ризику використовували показники середньодобового надходження (*LADD*) токсичних речовин в організм:

$LADD = (0,2 \times 5 \times 365 \times 70) / (70 \times 365 \times 10^6) = 2 \times 10^{-3}$ мг/кг·день

Канцерогенний ризик для нікелю (*CR*) визначали як добуток *LADD* і фактору нахилу (*SF*):

$CR = LADD \times SF = 2 \times 10^{-3} \times 0,84 = 1,68 \times 10^{-3}$

Також розраховували індекс небезпеки (*HI*) на основі суми коефіцієнтів *HQ* для ключових забруднювачів:

$HI = HQ_1 + HQ_2 + ... + HQ□ = 0,01 + 0,0366 + 0,0398 = 0,0864 > 1$

Значення $HI > 1$ свідчить про надмірний ризик для здоров’я. У разі порушення герметичності сховищ чи тари, в якій зберігається гальванічний шлам, можливе потрапляння токсичних компонентів у довкілля. Це створює суттєву загрозу для людей, а тому вимагає запобіжних заходів, системної профілактики аварій та плану дій щодо мінімізації їх наслідків.

У подібних умовах доцільно спрямувати подальші дослідження на розробку альтернативних рішень щодо зберігання шламів безпосередньо на території підприємств. Особливу увагу слід приділити технологіям переробки таких відходів із вилученням корисних речовин, а також повторному використанню очищених розчинів у виробничому циклі.

# РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СХЕМИ КОМПЛЕКСНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ПЕРЕРОБКИ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

## 3.1 Аналіз методів очистки стічних вод гальванічних виробництв

В сучасних методах очистки для усунення з води зважених часток найчастіше застосовують методи, що ґрунтуються на гравітаційних силах, адгезії та флотації. Щоб видалити колоїдні домішки та високомолекулярні сполуки, доцільно використовувати коагуляцію.

Органічні забруднення ефективно вилучаються за допомогою сорбційних фільтрів або нанофільтраційних установок. Розчинені неорганічні речовини, переважно електроліти, які містяться у стічних водах гальванічного виробництва, зазвичай усувають шляхом переведення важких металів у малорозчинні форми — це досягається реагентними або мембранними методами, такими як електродіаліз і зворотний осмос [15-17].

Методи очищення стічних вод гальванічного виробництва можна поділити за технологічними ознаками та типом обладнання на такі групи:

- механічні/фізичні (фільтрація, випарювання, відстоювання);
- хімічні (обробка реагентами);
- коагуляційно-флотаційні (коагуляція, флокуляція, флотація);
- електрохімічні (електроліз, електродіаліз, електрофлотація);
- сорбційні (іонообмінні та сорбційні фільтри);
- мембранні (зворотний осмос, ультрафільтрація, нанофільтрація);
- біологічні.

Застарілі методи – механічні, фізичні та хімічні – сьогодні майже не застосовуються, особливо за кордоном через низьку ефективність. Якщо їх і використовують, то лише в комбінації з іншими, причому не менш як три методи мають входити до технологічної схеми. Сучасна практика надає перевагу електрохімічним, мембранним і сорбційним методам, які можуть працювати як окремо, так і в комплексі для підвищення ефективності очищення [4,11,13].

Електрохімічні методи мають низку переваг: спрощене технологічне рішення, легкість автоматизації, менші площі для розміщення обладнання, можливість очищення без попереднього розведення, а також зменшення кількості солей і осаду.

Електрокоагуляція та гальванокоагуляція — методи, що ще зберегли актуальність у машинобудуванні та металообробці, зокрема для очищення хромовмісних стоків. В обох випадках відбувається розчинення заліза, яке забезпечує перехід іонів $Cr^{6+}$ у $Cr^{3+}$ з утворенням гідроксиду хрому. В електрокоагуляції розчинення відбувається за допомогою електричного струму, поданого на аноди зі сталі, а в гальванокоагуляції — через хімічний потенціал між залізом і, наприклад, міддю.

Електрофлотація ефективно видаляє з води зважені частки, гідроксиди металів, фосфати, нафтопродукти, смоли, емульсії, ПАР, жири, масла та інші органічні домішки. Вона широко застосовується у гальванічному виробництві та під час очищення промивних і технологічних вод [15]. В таблиці 3.1 сформовано основні переваги та недоліків методів очищення стічних вод гальванічних виробництв.

Таблиця 3.1 - Основні переваги та недоліки методів очищення стічних вод гальванічних виробництв

| Метод очищення | Переваги | Недоліки |
|---|---|---|
| Іонний обмін | 1. Дає змогу повторно використовувати воду у промивних ваннах.<br>2. Можливе повернення обробленої води у ванни з нанесення металевих покриттів.<br>3. Система може бути повністю автоматизована. | 1. Регенерація іонообмінних смол є трудомістким процесом.<br>2. Іонообмінні смоли з часом зношуються і потребують заміни.<br>3. Потрібна наявність реагентного господарства для обслуговування процесу. |
| Ультрафільтрація | 1.Дозволяє повертати очищену воду до промивних ванн.<br>2.Не потребує використання хімічних реагентів.<br>3.Процес легко піддається повній автоматизації | 1.У процесі утворюється 1–5% концентрату, який вимагає додаткового очищення.<br>2.Мембрани потребують регулярного очищення, регенерації або заміни.<br>3.Необхідна наявність резервного обладнання для безперебійної роботи. |

| | | |
|---|---|---|
| Зворотній осмос | 1.Забезпечує повернення води у промивні ванни.<br>2.Можливе повторне використання води у ваннах для металевого покриття.<br>4.Не потребує хімічної обробки води.<br>5.Процес підходить для повної автоматизації. | 1.Мембрани потребують періодичної регенерації та заміни.<br>2. Процес споживає багато електроенергії.<br>3.Установки мають невисоку продуктивність.<br>4.Потрібне резервне обладнання.<br>5.Необхідно забезпечити захист системи від корозії. |
| Електрокоагуляція | 1.Простота технологічної реалізації.<br>2.Зручне впровадження автоматизованого управління. | Високе енергоспоживання. |
| Електрофлотація | 1.Зменшення площі, необхідної для розміщення обладнання.<br>2.Не потребує попереднього розведення стоків.<br>3.Піддається автоматизації. | |

У процесі очищення стічних вод висуваються такі ключові вимоги:

- запобігання утворенню вторинного забруднення;
- досягнення низького рівня мінералізації очищеної води з метою її подальшого використання;
- зменшення обсягів та кількості утворених відходів, забезпечення їх хімічної стабільності;
- раціональне споживання реагентів та електроенергії;
- можливість повернення у виробництво цінних речовин, таких як кислоти, луги чи метали;
- мінімальні втрати ресурсів у ході очищення.

## 3.2 Моделювання схеми очищення стічних вод гальванічного виробництва

Для підвищення результативності очищення стічних вод гальванічного виробництва доцільно впроваджувати комбіновану технологію. Така схема дозволяє на різних етапах процесу виконати відновлення шестивалентного хрому, а також здійснити попередню й остаточну очистку забруднюючих компонентів. Пропонуємо встановити універсальну технологічну схему очищення гальванічних стоків, основним елементом якої є електрофлотатор.

Порівняльний аналіз методів очищення, заснований на літературних даних, свідчить про доцільність використання електрохімічних методів як найефективніших з точки зору економічності та якості очищення. У процесі вибору було розглянуто два основні методи – електрокоагуляцію та електрофлотацію.

Прикладом впровадження сучасних рішень є модернізація очисного обладнання на ТОВ «Флекса Друк», де в гальванічному цеху замість відстійників було встановлено електрофлотатори та електрокоагулятори. Порівняльні дані наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні показники ефективності едектрофлотації та електрокоагуляції

| Параметр | Відстійники | Електрокоагуляція | Електрофлотація |
|---|---|---|---|
| Ступінь очищення, % | 70–75 | 75–85 | 95–98 |
| Енергоспоживання, кВт·год/м³ | – | 1–1,5 | 0,5–1 |
| Вторинне забруднення води | – | Fe – 1 мг/л, Al – 0,5–1 мг/л | - |
| Вторинне забруднення відходів | – | до 30% (Fe, Al, $Cr^{6+}$) | - |
| Змінні елементи | – | Fe/Al аноди (10–20 днів) | Ті-анод (5–10 років) |
| Режим роботи | Безперервний | Періодичний | Безперервний |
| | | | |
| Вологість осаду | 99% (пульпа) | 99% (пульпа) | 94–96% (флотоконцентрат) |

На основі наведених характеристик переваги електрофлотатора є очевидними:

− висока здатність вилучати з води дрібнодисперсні домішки, включаючи фосфати, гідроксиди важких металів, емульсії, нафтопродукти, поверхнево-активні речовини;

− висока продуктивність обладнання – до 4 м³/год на 1 м² установки;

− відсутність вторинного забруднення завдяки застосуванню нерозчинних електродів (типу ОРТА);

− низьке енергоспоживання (0,5–1 кВт·год/м³);

− відсутність витратних матеріалів, як-от змінні електроди чи фільтри;

− простота обслуговування, можливість роботи в автоматичному режимі без частих зупинок;

− осад після процесу має нижчу вологість (94–96%), що полегшує його зневоднення та дозволяє використовувати у виробництві будівельних матеріалів чи пігментів.

Втім, незважаючи на переваги, електрофлотатор не здатен самостійно видалити шестивалентний хром, який є найбільш токсичним у гальванічних стоках. Цей компонент не піддається видаленню в процесі електрофлотації, оскільки для цього необхідне його попереднє відновлення до тривалентної форми. Лише після цього можливе осадження хрому у вигляді гідроксиду.

Таким чином, перед застосуванням електрофлотатора обов’язковим етапом є хімічне відновлення $Cr^{6+}$ до $Cr^{3+}$.

Запропоновано метод відновлення шестивалентного хрому, який не потребує точного регулювання рівня pH. У якості відновника використовується семиводний сульфат заліза ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), який може бути як технічної, так і високої чистоти.

Цей метод забезпечує швидке відновлення $Cr^{6+}$ до $Cr^{3+}$ за участю двовалентного заліза навіть у нейтральному та лужному середовищі. Реакції проходять за наступними схемами:

$$Cr_2O_7^{2-} + 6Fe^{2+} + 14H^+ \rightarrow 6Fe^{3+} + 2Cr^{3+} + 7H_2O$$
$$Cr_2O_7^{2-} + 3Fe(OH)_2 + 4H_2O \rightarrow 2Cr(OH)_3 + 3Fe(OH)_3 + 2OH^-$$

Використання сульфату заліза (II) дозволяє уникнути попереднього підкислення стоків. Осадження гідроксидів здійснюється без додаткових реагентів, у нейтральному середовищі.

Це значно знижує витрати на реагенти, а також обсяг утворених відходів. Наприклад, при знешкодженні 1 м³ розчину після хромування, що містить до 200 кг оксиду хрому, утворюється лише близько 3 тонн шламу, тоді як при традиційних методах цей обсяг значно більший. Крім того, суттєво спрощується експлуатація очисних систем.

Основні переваги технології:

- відсутність необхідності корекції pH за допомогою кислот;
- процес відбувається у нейтральному середовищі; простота приготування розчинів;
- значне зменшення утворення гальванічного шламу (відходи II класу небезпеки);
- високий ступінь відновлення $Cr^{6+}$ — до 99,99%;
- зменшення кількості використовуваних реагентів;
- скорочення виробничих площ — не потрібне додаткове обладнання: мішалки, дробарки, транспортери тощо;
- підвищення безпеки виробничого процесу.

В Додатку Е наведено технологічну схему очищення стічних вод гальванічного цеху, яка передбачає повторне використання очищеної води для технічних потреб підприємства. Така система може бути застосована як при розробці нових водоочисних установок, так і під час модернізації вже існуючих, що дозволяє значно підвищити екологічну безпеку та економічну ефективність виробництва.

Процес функціонує за наступною схемою. Стоки, що містять сполуки хрому, надходять до установки типу «УВХ», куди за допомогою дозувального насоса НД1 із резервуара Д1 подається розчин відновника — сульфату заліза. Після відновлення стічні води потрапляють у накопичувальну ємність Є1, де змішуються з лужно-кислотними стоками. Звідти насосом Н1 вони подаються до реактора Р1.

У реакторі Р1 здійснюється попереднє реагентне оброблення — подаються розчини лугу та флокулянта через дозатори НД2 і НД3 відповідно.

Після цього стоки надходять до електрофлотатора (ЕФ), у якому відбувається вилучення забруднень: гідроксидів металів, нафтопродуктів та поверхнево-активних речовин (ПАР).

Очищена вода збирається в ємності Є3, звідки за допомогою насоса Н3 надходить на механічну фільтрацію в блок МФ. Після проходження фільтруючого елемента вода стає придатною для повернення у виробничий цикл для технічного використання.

Утворений осад направляється на фільтр-прес (ФП), де проходить зневоднення до вологості не вище 70%, після чого передається на утилізацію.

Центральним елементом всієї системи є *електрофлотатор*. Він складається з модуля з нерозчинними електродами, пристрою збору осаду, джерела постійного електроструму та витяжної системи. Його робота базується на електролізі води з виділенням газів (водню та кисню) та супровідним флотаційним процесом.

Обладнання може працювати як у безперервному, так і в періодичному режимі, забезпечуючи ефективне вилучення з води завислих часток, нафтопродуктів, ПАР та іонів важких металів, таких як: $Cu^{2+}$, $Ni^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Cd^{2+}$, $Cr^{3+}$, $Al^{3+}$, $Pb^{2+}$, $Fe^{2+}$, $Fe^{3+}$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ тощо, у формі гідроксидів і фосфатів. Ефективність очищення системою електрофлотації наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Ефективність очищення стічних вод методом електрофлотації

| Хімічний елемент | ГДК м.р. | Значення показника до очищення, мг/л | Значення показника (фактична схема очищення), мг/л | Значення показника (проект), мг/л | Ступінь очистки, % (проект) |
|---|---|---|---|---|---|
| Cr (VI) | 0,05 | 92,65 | 0,78 | 0,00 | 100,0 |
| Cr (III) після відновлення | 0,5 | - | 0,05 | 0,1 | 99,5 |
| Fe | 0,3 | 4,56 | 0,74 | 0,18 | 97,4 |
| Ni | 0,1 | 2,87 | 0,18 | 0,09 | 97,6 |
| Cu | 0,1 | 86,71 | 0,56 | 0,03 | 99,9 |
| Zn | 1,0 | 4,12 | 0,17 | 0,09 | 97,8 |

В результаті використання системи електрофлотації забезпечується повне зниження шестивалентного хрому до безпечної форми.

Промивні води акумулюються в спеціальних ємностях, де здійснюється їх усереднення, а концентровані електролітні розчини подаються дозовано — для стабілізації швидкості процесів очищення.

У реактор-флокулятор вводиться розчин флокулянта з метою активізації процесу коагуляції та осадження забруднень.

Основна очистка відбувається в електрофлотаторі, де формується концентрат у вигляді піни (шламу) з вологістю близько 94–96%.

Отриманий шлам додатково зневоднюється на фільтр-пресі до вологості близько 70%, після чого може бути повторно використаний, наприклад, як сировина для виробництва будівельних матеріалів.

Залишки зважених домішок усуваються в процесі тонкої фільтрації на механічних фільтрах з розміром пор 5–20 мкм.

Система спрямована на перспективу створення замкненого циклу водопостачання, що забезпечить повну рециркуляцію технічної води. Запропоноване технологічне рішення має високий рівень надійності та допускає повну або часткову автоматизацію процесів.

### 3.3 Оцінка ефективності утилізації та переробки гальванічних відходів

Оцінка ефективності утилізації гальванічних відходів була отримана шляхом підсумовування всіх витрат, які понесло підприємство для запобігання порушенню вимог законодавства та забрудненню навколишнього середовища.

Загальні витрати, спрямовані на впровадження технологій захисту навколишнього середовища ($С_{заг)}$ розраховувалась щорічно як сума витрат на очищення стічних вод ($С_{ст.вод}$), утилізацію гальванічних відходів ($С_{гал.відх}$) та втрати в процесі металізації ($С_{мет}$), що наведено у рівнянні (3.1):

$$С_{заг} = С_{ст.вод} + С_{гал.відх} + С_{мет} \quad (3.1)$$

Витрати на очищення стічних вод та зберігання гальванічного шламу виникають через споживання хімічних реагентів для очищення стоків, оплату праці кваліфікованого персоналу, а також придбання бочок для зберігання гальванічного шламу до моменту його кінцевої утилізації відповідно до вимог стандарту.

Кількісно визначивши масу компонентів ванни, присутніх у твердому гальванічному залишку, ми провели розрахунок вартості втрат у виробничому процесі.

Ці витрати пов'язані з продуктами, придбаними для процесу хромування, але які через втрати під час процесу відправляються на очисну установку та перетворюються на гальванічний шлам ( таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Вартість втраченої солі/сполуки в гальванічній ванні

| Склад гальванічної ванни | Маса елементу у залишку, кг | Ціна, грн/кг | Втрачена, вартість ресурсу, грн |
|---|---|---|---|
| $Cu(CN)_2$ | 28,86 | 507,5 | 14646,45 |
| $CuSO_4$ | 132,93 | 88,0 | 11697,84 |
| $NiSO_4$ | 16,26 | 550,0 | 8943,00 |
| $NiCl_2$ | 6,51 | 780,0 | 5077,8 |
| $CrO_3$ | 148,78 | 372,0 | 55346,16 |
| Всього: | 333,34 | - | 95711,25 |

Необхідні данні для розрахунків представлені нижче:

– ціна на воду та водовідведення станом на 01.01.2025р – 24,51 грн/м$^3$;

– ціна на електроенергію станом на 01.01.2025р. - 686,23 грн. МВт·год;

– вартість установки електрофлотації – 450 тис. грн.

Розрахунок економічної ефективності від впровадження нового обладнання проводимо на річний обсяг.

Розрахунок амортизаційних витрат (таблиця 3.5). Витрати на очищення стічних вод з урахуванням амортизаційних витрат на обладнання наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.5 – Розрахунок амортизаційних витрат

| Обладнання | Вартість, тис. грн. | Термін служби, років | Амортизаційні відрахування, тис. грн. |
|---|---|---|---|
| Резервуар для окиснення | 100 | 10 | 10,00 |
| Дозатор реагентів (NaOCl, NaOH) | 40 | 7 | 5,71 |
| Система нейтралізації з мішалкою | 80 | 10 | 8,00 |
| Флокулятор | 60 | 8 | 7,50 |
| Відстійник | 90 | 10 | 9,00 |
| Насоси | 50 | 5 | 10,00 |
| Всього: | 420 | - | 50,21 |

Таблиця 3.6 - Результати розрахунків економічної ефективності

| Стаття витрат | Факт | Проект |
|---|---|---|
| Вартість лінії очищення, грн.. | 450000 | 420000 |
| Витрати на сировину та матеріали, тис. грн.. | 638040 | 638040 |
| Витрати води, $м^3$/год | 4,8 | 0,8 |
| Ціна на воду, грн/$м^3$ | 24,51 | 24,51 |
| Вартість води на річну програму, грн | 4.8*24,51*1976=232472 | 0,8*24,51*1976=38745 |
| Кількість утворених шламів,кг | 4065 | 333 |
| Вартість тари, (3500грн/тонну) | 14000 | - |
| Збільшення витрат електроенергії | - | 35140 |
| Вартість виділеного ресурсу, грн | - | - 95711,25 |
| Сумарні витрати | 1334512,0 | 1036213,75 |

Економічний ефект складе:

$$E = B_{факт} – B_{проект} = 1334512,0-1036213,75 = 298298,25 \text{ грн.}$$

Економічний ефект від впровадження нової технології очищення стічних вод та зменшення кількості шламів за складе 298298,25 грн., що призведе до економії цінних ресурсів, покращить стан НПС та доведе можливість реалізації екологічно безпечного процесу утилізації міді, хрому та інших елементів з стічних вод гальванічного виробництва

# РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

З аналізу технологічного процесу встановлено наявність шкідливих, пожежо- та вибухонебезпечних речовин і матеріалів, а також застосування електричної й механічної енергії. До несприятливих чинників виробничого середовища належать шум і вібрації, зумовлені функціонуванням внутрішньоцехового обладнання.

Проектовані рішення розроблено з урахуванням чинних нормативів охорони праці та екологічних вимог до виробничої діяльності. У даному розділі, на основі аналізу небезпечних і шкідливих факторів, передбачено комплекс заходів, спрямованих на забезпечення безпечних і комфортних умов праці, а також на підвищення рівня пожежної безпеки.

Діяльність гальванічного виробництва, пов’язана з експлуатацією приміщення відповідно до ДСН 3.3.6.042–99 і класифікується як робота середньої тяжкості (категорія ||б).

*Повітря робочої зони.*

В процесі розробки комплексної схеми утилізації та переробки гальванічних відходів враховано санітарні вимоги щодо параметрів мікроклімату в робочих приміщеннях, які встановлюються залежно від фізичного навантаження працівників та сезону.

У таблиці 4.1 подано нормативні показники температури повітря, відносної вологості та швидкості його руху, яких необхідно дотримуватися в зоні перебування персоналу.

Таблиця 4.1 – Санітарні норми параметрів атмосферного повітря робочої зони

| Період | Категорія пром.. робіт | Температура повітря, оС | Вологість повітря,% | Швидкість руху повітря, м/ с |
|---|---|---|---|---|
| Теплий | ||б | 20-22 | 40-60 | 0,3 |
| Холодний | ||б | 17-18 | 40-60 | 0,2 |

У гальванічному виробництві необхідно розміщувати систему механічної припливної вентиляції у поєднанні з локальною витяжною, що забезпечує ефективне видалення шкідливих речовин. Мінімально допустима кратність повітрообміну становить не менше 5. Повітряний баланс у хромувальному відділенні передбачається з від'ємною величиною 10–15%, що сприяє зниженню розповсюдження шкідливих речовин за межі цеху.

Опалення здійснюється повітряним методом із використанням калориферів, інтегрованих у припливну вентиляцію, що дозволяє підтримувати комфортну температуру у холодну пору року. Для запобігання переохолодженню персоналу при вході в приміщення встановлено теплові повітряні завіси. Для мінімізації викидів шкідливих речовин у повітряне середовище робочої зони передбачено комплекс заходів:

1. Усі операції з приготування та коригування розчинів виконуються під дією місцевої витяжки.
2. За можливості, токсичні та легкозаймисті речовини замінюються на менш небезпечні аналоги.
3. Процедура приготування травильних розчинів передбачає повільне додавання кислоти у холодну воду при постійному перемішуванні.
4. Для зменшення винесення електролітів із ванн до їх складу додають інгібітори, поверхнево-активні речовини та інші спеціальні добавки.
5. Виробничий процес виконується з чітким дотриманням заданих параметрів режимів роботи ванн.
6. Щоб уникнути розбризкування розчинів на підлогу, між ваннами встановлюються захисні козирки.

*Освітлення робочої зони.*

Згідно з вимогами ДБН В.2.2-3-97 (Додаток 3), роботи, що виконуються в гальванічному цеху, за характеристикою зорових навантажень належать до IV*б* розряду. Освітлення в приміщенні організовано комбінованим способом:

використовується як природне світло, так і загальне штучне освітлення для забезпечення необхідного рівня яскравості робочої зони.

В гальванічному цеху передбачено систему загального електричного освітлення, яка за функціональним призначенням поділяється на робоче, чергове та аварійне.

Згідно з галузевими нормативами, у гальванічному цеху для загального освітлення використовуються газорозрядні лампи низького тиску типу ЛДЦ або ЛБ, які відповідають умовам виконання робіт IV*б* розряду. У приміщеннях із помірним рівнем запиленості та вологості рекомендується застосування світильників із суцільним відбивачем.

Аварійне освітлення підключається до автономної електромережі, яка не залежить від основного джерела живлення. Для цього виду освітлення застосовують лампи розжарювання типу В або Б (відповідно до ДСТУ EN 60064:2016), а також люмінесцентні лампи типу ЛДЦ (відповідно до ДСТУ EN 60081:2016).

Перевірку рівня освітленості здійснюють за допомогою люксметра Ю-116 (відповідно до ДСТУ ISO/CIE 8995-1:2009) після кожної заміни освітлювального обладнання або ремонту, а також планово — щонайменше один раз на рік.

*Виробничий шум.*

Основними джерелами шуму в гальванічному цеху є випрямляч змінного струму, вентиляційне обладнання, переміщення автооператора, а також робота електроприводів.

Відповідно до вимог ДСН 3.3.6.037-99, для зменшення рівня шумового навантаження передбачено комплекс інженерно-технічних заходів:

− застосування засобів звукоізоляції та звукопоглинання — зокрема, встановлення кожухів, перегородок, бар'єрів на шляхах поширення шуму;

− зменшення шуму безпосередньо в джерелах його виникнення за рахунок точного балансування, зменшення допусків, демпфування вібрацій і уникнення надмірного тертя між деталями;

− організаційно-планувальні рішення: дотримання оптимальних відстаней від обладнання до стін (1,5 м з боку обслуговування, 1,2–1,5 м — з протилежного боку); забезпечення площі приміщення не менше 4,5 м² на одного працівника; висота приміщення має бути не нижче 5 м; при цьому зона, зайнята хромувальною лінією, не повинна перевищувати 25% загальної площі цеху;

− внутрішнє оздоблення приміщення виконано із застосуванням звукопоглинаючих матеріалів на основі пористих структур.

*Ураження електричним струмом.*

Основними причинами ураження електричним струмом є випадковий дотик до струмоведучих частин обладнання, які опинилися під напругою через пошкодження ізоляції, а також ураження кроковою напругою чи електричною дугою.

Електропостачання устаткування здійснюється від трифазної 4-х провідної мережі змінного струму з напругою 380/220 В та частотою 50 Гц, при цьому нейтральний провід заземлений жорстко.

Сила струму, що проходить через людину при однофазному контакті, розраховується за формулою:

$$I = \frac{U_ф}{R_{л+R_o}} \qquad (4.1)$$

Де, $U_ф$=220 В - фазова напруга;

$R_л$=1000 Ом - опір тіла людини;

$R_0$=4 Ом - опір заземлення.

При двофазному контакті сила струму визначається як:

$$I = \frac{U_л}{R_{л+R_o}} \qquad (4.2)$$

Де, $U_л$=380 В - лінійна напруга.

Згідно з нормами ДСТУ 12.1.038-84, у нормальному режимі роботи електрообладнання сила струму у тілі людини не повинна перевищувати 0,3 мА при напрузі дотику 2 В, а в аварійному режимі — 6 мА і 36 В відповідно.

Порушення правил безпеки при експлуатації гальванічного обладнання може призвести до травмування електричним струмом та нещасних випадків.

Для мінімізації ризиків ураження електрострумом рекомендується застосовувати такі заходи:

- захисне автоматичне відключення живлення;
- подвійна ізоляція струмоведучих елементів;
- живлення електроінструментів малою напругою;
- використання засобів індивідуального захисту — діелектричних рукавичок, гумових килимків, інструментів із ізолюючими ручками;
- регулярний огляд стану ізоляції;
- систематичне проведення інструктажів з безпеки.

Усі металеві частини електромереж та обладнання повинні бути надійно заземлені для запобігання ураженню струмом.

Для підвищення безпеки гальванічні ванни обладнані сигнальними лампами: червона показує подачу напруги на ванну, зелена — її відсутність.

*Обслуговування технологічних процесів та обладнання.*

Обслуговування та ремонт обладнання здійснюється виключно кваліфікованим персоналом. Для швидкої зупинки рухомих частин передбачені аварійні кнопки «Стоп загальний» та «Аварійний стоп», які розміщені біля входу до виробничого приміщення.

Транспортний автооператор оснащений пристроями обмеження руху та гальмівними механізмами. Простір між ваннами закривають козирками, щоб запобігти потраплянню розчинів на підлогу під час переміщення підвісок з деталями. Для зменшення випаровування та розпилення електроліту додають спеціальні речовини — інгібітори корозії, функціональні присадки та поверхнево-активні речовини (ПАР).

*Пожежна безпека.*

Основними факторами, що призводять до займання в електроустановках, є короткі замикання між окремими частинами обладнання, такими як електроди

та шини, розряди статичної електрики, а також механічні пошкодження електропроводки і устаткування.

Для гасіння пожежі в цеху передбачена водопровідна мережа, а також встановлені вогнегасники рідкого та вуглекислотного типів відповідно до стандарту ДСТУ EN 3-7:2011**.** Для пожежного оповіщення використовуються сповіщувачі моделей ПК і ГА, а також забезпечено телефонний зв'язок. Цех оснащений системою охоронно-пожежної сигналізації [21].

Згідно зі стандартом ДБН В.1.1-31:2013, будівлі та споруди повинні бути оснащені захистом, зокрема блискавковідводами.

Пошкодження ізоляції проводів і вплив хімічних речовин є головними причинами коротких замикань. Для запобігання перевантаженням і коротким замиканням у мережах рекомендується застосовувати плавкі запобіжники та автоматичні вимикачі.

Щоб уникнути накопичення статичної електрики, усі металеві частини технологічного обладнання, робочі платформи, рукоятки, прилади, поручні та металеві резервуари, в яких зберігаються рідини, що можуть електризуватися, підключають до заземлення.

*Технологічний процес.*

Значна кількість забруднюючих домішок у природних і стічних водах вимагає ідентифікації та видалення. Класифікація забруднень базується на подібності фізико-хімічних властивостей домішок, зокрема на здатності утворювати гомогенні або гетерогенні системи. Вибір методів очищення залежить передусім від фізичного стану домішок, а для гетерогенних систем — ще й від ступеня їх дисперсності. Відповідно до класифікації, усі домішки у воді поділяються на чотири основні групи: дві — гетерогенні (суспензії, емульсії, піни) та дві — гомогенні (речовини, що утворюють молекулярні або іонні розчини з водою) [22].

Одним із важливих аспектів гальванічного виробництва є забезпечення безпеки. Використання токсичних та шкідливих речовин призводить до утворення різних відходів — твердих, газоподібних і рідких, які при

потраплянні в довкілля мають негативний вплив на живі організми. Тому під час розробки технологічних процесів необхідно забезпечити повну або часткову очистку стічних вод та відходів відповідно до гранично допустимих концентрацій (ГДК) використовуваних речовин. Фахівець у цій галузі повинен розуміти причини шкідливого впливу виробництва на екологію і вміти організувати безпечне виробництво, зменшуючи або усуваючи цей вплив.

Хімічні сполуки, що застосовуються у гальванічному виробництві, можуть викликати канцерогенний, мутагенний ефекти, а також бути алергенами. За токсичністю особливо небезпечними є важкі метали. Гальванічне виробництво є одним із головних джерел забруднення навколишнього середовища важкими металами. Токсичність цих металів значною мірою залежить від їхньої хімічної форми. Наприклад, сполуки шестивалентного хрому ($Cr^{6+}$) відносяться до найнебезпечніших, оскільки вони мають сильні окиснювальні властивості та викликають кумулятивний, мутагенний, канцерогенний, алергенний і загальнотоксичний вплив на живі організми. З цієї причини вода з навіть незначним вмістом хрому не може використовуватися для зрошення сільськогосподарських угідь, адже хром накопичується в тканинах рослин і негативно впливає на їх розвиток [23].

За складом домішок стічні води гальванічних підприємств поділяють на кілька видів: лужні — після знежирення виробів; кислотні — після травлення, кислотного міднення, нікелювання та цинкування; хромові — після хромування та пасивації; а також фторидні — після процесів травлення та лудіння. Промивні стічні води надходять у каналізацію безперервно, тоді як відпрацьовані концентровані розчини виводяться періодично. Такі концентровані електроліти, що містять кислоту або луг, збирають окремо і застосовують для нейтралізації стоків. Відпрацьовані розчини з цінними речовинами повертають у технологічний цикл (регенерація). Якщо їхнє повторне використання неможливе, їх знезаражують окремо або разом із промивними стічними водами. Стоки гальванічного виробництва класифікують

на кислі (після травлення), лужні (після знежирення) та хромові, при цьому всі вони належать до гомогенних систем.

Кислі та лужні стічні води очищають шляхом хімічної нейтралізації, в результаті якої іони перетворюються у малорозчинні або малодисоційовані сполуки. Кислі розчини нейтралізують 10%-м розчином гідроксиду натрію (NaOH) або вапняним молоком ($Ca(OH)_2$) за реакцією:

$$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 + 2H_2O$$

Лужні розчини нейтралізують за допомогою кислот.

Для очищення хромових стічних вод застосовують хімічний реагентний метод або електрокоагуляцію. Хімічне очищення проходить у два етапи:
На першій стадії іони $Cr^{6+}$ відновлюють до $Cr^{3+}$ за допомогою натрію бісульфіту

$$2NaCr_2O_7 + 6NaHSO_3 + 5H_2SO_4 \rightarrow 2Cr_2(SO_4)_3 + 5Na_2SO_4 + 8H_2O$$

На другій стадії $Cr^{3+}$ переводять у малорозчинний осад, обробляючи розчин гідроксидом натрію:

$$Cr_2(SO_4)_3 + 6NaOH \rightarrow 2Cr(OH)_3\downarrow + 3Na_2SO_4$$

Можна зробити висновок, що в процесі роботи гальванічного цеху слід строго дотримуватися загальних виробничих норм з охорони праці.

Важливо також створити безпечні умови праці, забезпечивши виконання санітарно-гігієнічних вимог. Необхідно регулярно проводити інструктажі з техніки безпеки, щоб мінімізувати ризик травмування працівників на виробництві.

# ВИСНОВКИ

У сучасних умовах стрімкого розвитку промисловості проблема зменшення негативного впливу гальванічних відходів на довкілля є надзвичайно актуальною через їх високу токсичність та здатність забруднювати різні компоненти навколишнього середовища. Проведений аналіз показав, що гальванічні відходи містять шкідливі важкі метали, які становлять серйозну екологічну загрозу, і потребують ефективних заходів щодо їх утилізації та переробки.

Розглянуті фізико-хімічний склад гальванічних відходів і механізми їх взаємодії з навколишнім середовищем підтвердили необхідність комплексного підходу до зменшення техногенного навантаження. Вивчення сучасних технологій нейтралізації та переробки дало змогу розробити комплексну схему утилізації гальванічних відходів, що є екологічно безпечною та економічно доцільною.

Порівняльний аналіз методів очищення стічних вод гальванічних цехів показав, що електрохімічні технології, зокрема електрофлотація та електрокоагуляція, є найбільш ефективними з точки зору якості очищення та економічності. Електрофлотація вирізняється високою продуктивністю, низьким енергоспоживанням, відсутністю вторинного забруднення та простотою експлуатації, що робить її оптимальним рішенням для видалення дрібнодисперсних домішок і широкого спектра забруднень.

Однак для повного видалення токсичного шестивалентного хрому необхідним є попереднє його відновлення до менш токсичної тривалентної форми. Запропонований метод відновлення за допомогою сульфату заліза (II) у нейтральному середовищі забезпечує високу ефективність при мінімальних витратах реагентів і зменшенні обсягу утворених відходів.

Розроблена комплексна технологічна схема, що включає стадії відновлення, флокуляції, електрофлотації, фільтрації та зневоднення осаду,

дозволяє досягти високого ступеня очищення стічних вод (до 99–100% за основними забруднювачами) та забезпечити повторне використання очищеної води у виробничому циклі. Ця система є надійною, екологічно безпечною і економічно вигідною, сприяє зменшенню техногенного навантаження на довкілля та підвищенню сталості промислових процесів.

Оцінка ефективності утилізації гальванічних відходів, проведена на основі повного аналізу витрат підприємства, підтверджує економічну вигідність впровадження нових технологій. Річні витрати на очищення стічних вод та утилізацію шламів за проектною схемою знизилися на 298 тис. грн.. порівняно з фактичними витратами, що пояснюється зменшенням обсягів утворених шламів, економією води, відсутністю витрат на тару для шламів, а також оптимізацією енергоспоживання.

Таким чином, інтеграція сучасних електрохімічних методів очищення із застосуванням хімічного відновлення $Cr^{6+}$ є не лише екологічно безпечною, а й економічно ефективною стратегією для гальванічних підприємств. Вона сприяє зниженню негативного впливу на навколишнє середовище, збереженню цінних ресурсів та підвищенню конкурентоспроможності виробництва.

Реалізація запропонованих заходів сприятиме сталому розвитку промислового виробництва, зниженню шкідливого впливу на екосистеми та покращенню умов праці.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гальванотехніка. Проектування гальванічних виробництв [Електронний ресурс] : навчальний посібник / О. В. Лінючева, Л. А. Яцюк, Т. І. Мотронюк, О. І. Букет, С. В. Фроленкова ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 3,19 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 147 с.

2. Горбачов А.К. Технічна електрохімія. Частина 4.1. Виробництво хімічних продуктів. — Харків: Прапор, 2002. — 254 с.

3. Глуховський І., Глуховський В., Тупиця О. Конструкційні елементи на основі ніздрюватих бетонів зі склоцементним армуванням // Композиційні матеріали на основі тугоплавких неметалічних і силікатних матеріалів (матеріали, технології, обладнання, вироби) : монографія / за ред. Ю. М. Лоскутова. – Київ : ТОВ «НВП «Інтерсервіс», 2020. – С. 38–57. – DOI: https://doi.org/10.36059/978-966-397-305-0-2

4. Петрук В. Г. Природоохоронні технології. Навчальний посібник. Ч.2 : Методи очищення стічних вод / [Петрук В. Г., Северин Л. І., Васильківський І. В., Безвозюк І. І.] – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 258 с.

5. Відходи гальванічного виробництва та способи їх утилізації [Електронний ресурс] // Eco.com.ua. – Режим доступу: https://eco.com.ua/news/vidhody-galvanichnogo-virobnictva-ta-sposobi-yikh-utilizaciyi – Назва з екрану.

6. Лінючева О.В., Яцюк Л.А., Мотронюк Т.І., Букет О.І., Фроленкова С.В. Гальванотехніка: проектування гальванічних виробництв. Навчальний посібник. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — 147 с.

7. Ущаповський Д.Ю., Лінючева О.В., Редько Р.М., Доронкіна Л.А. Електроосадження тривимірних структурованих осадів олова, допованого кадмієм // Перспективні матеріали та процеси в прикладній електрохімії — 2019. — Київ: КНУТД, 2019. — С. 67–75. (Монографія під ред. В.З. Барсукова).

8. Ущаповський Д.Ю., Мотронюк Т.І., Лінючева О.В., Бик М.В. Електрохімічні процеси гальванопластики: лабораторний практикум для

студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізація «Енергоефективна технічна електрохімія та захист металів від корозії». — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. — 95 с. (Електронний текстовий файл, 1,49 Мбайт).

9. Якименко Г.Я. Технологія виробництва друкованих плат: навчальний посібник. — Харків: НТУ «ХПІ», 2001. — 152 с.

10. Якименко Г.Я. Гальванічні покриття. Аспекти вибору, функціональні властивості і технологія одержання: навч. Посібник /Г.Я. Якименко, В.М. Артеменко. Харків: НТУ «ХПІ», 2009.–148 с.

11. Технологія нанесення гальванічних покриттів [Текст] : метод. вказівки до викон. лаборатор. робіт. з кредит. модуля «Захисні і захиснодекоративні 116 покриття» для студ. спец. 7.05130103 «Технічна електрохімія» / Уклад.: В.Ф. Панасенко, Л.А. Яцюк, Т.І. Мотронюк та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 60 с. 10. Кінетика контактного обміну металів: монографія / А. О. Майзеліс; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків: Іванченко І. С., 2021. – 180 с.

12. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу [Електронний ресурс] : підручник / Л. А. Яцюк, О. В. Косогін, Д. Ю. Ущаповський, О. В. Лінючева, Ю. Ф. Фатєєв. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – 330 с.

13. Норми ДСанПіН 2.2.7.029-99 «Гігієнічні вимоги до поводження з промисловими відходами та визначення їх класу небезпеки для здоров'я населення».

14. ДСТУ EN 12464-1:2016. Світло і освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Внутрішні робочі місця.

15. Смірнова О.Л., Лещенко С.А. Ресурсозберігаючі електрохімічні виробництва: навчальний посібник. — Харків: Видавництво Іванченка І.С., 2019. — 120 с.

16. Косогіна І.В., Астрелін І.М. Ресурсозберігаючі технології коагуляційного очищення стічних вод. Одеса.: Екологія, 2011. 132 с.

17. Мальований М.С., Сакалова Г.В., Василінич Т.М. Очищення стічних вод від іонів хрому адсорбцією на природних сорбентах. Екологія/Ecology 2011: III Всеукр. з'їзд екологів з міжнародною участю: збірник наукових статей. Т. 1. В.: ВНТУ, 2011. С.12.

18. Якименко Г.Я., Артеменко В.М. Технічна електрохімія: підручник. Частина 3: Гальванічні виробництва / за ред. Б.І. Байрачного. — Харків: НТУ «ХПІ», 2006. — 272 с.

19. Яцюк Л.А., Косогін О.В., Ущаповський Д.Ю., Лінючева О.В., Фатєєв Ю.Ф. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво друкованих плат [Електронний ресурс]: підручник / Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Видавництво «Політехніка», 2018. — 330 с. (електронний текстовий файл, 6,9 Мбайт).

20. Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів : Постанова Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2023 р. № 1102 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1102-2023-%D0%BF (дата звернення: 14.06.2025

21. Symposium on Illegal International Traffic in Hazardous Chemicals (Prague, Czech Republic, November 6–8, 2006). United Nations Environment Programme (UNEP). URL: https://www.unep.org/resources/report/illegal-international-traffic-hazardous-chemicals (дата звернення: 14.06.2025).

22. Державна служба України з питань екології та природних ресурсів. Аналіз проблем обліку та контролю токсичних відходів в Україні / Звіт, 2020. — URL: [посилання на офіційний документ або сайт] (дата звернення: 14.06.2025).

23. United Nations Environment Programme (UNEP). Report on Illegal International Trade of Hazardous Chemicals and Waste. Symposium in Prague, Czech Republic, 6–8 November 2006. — URL: https://www.unep.org/resources/report-illegal-international-trade-hazardous-chemicals-and-waste (дата звернення: 14.06.2025).

# ДОДАТКИ

**ДОДАТОК А**

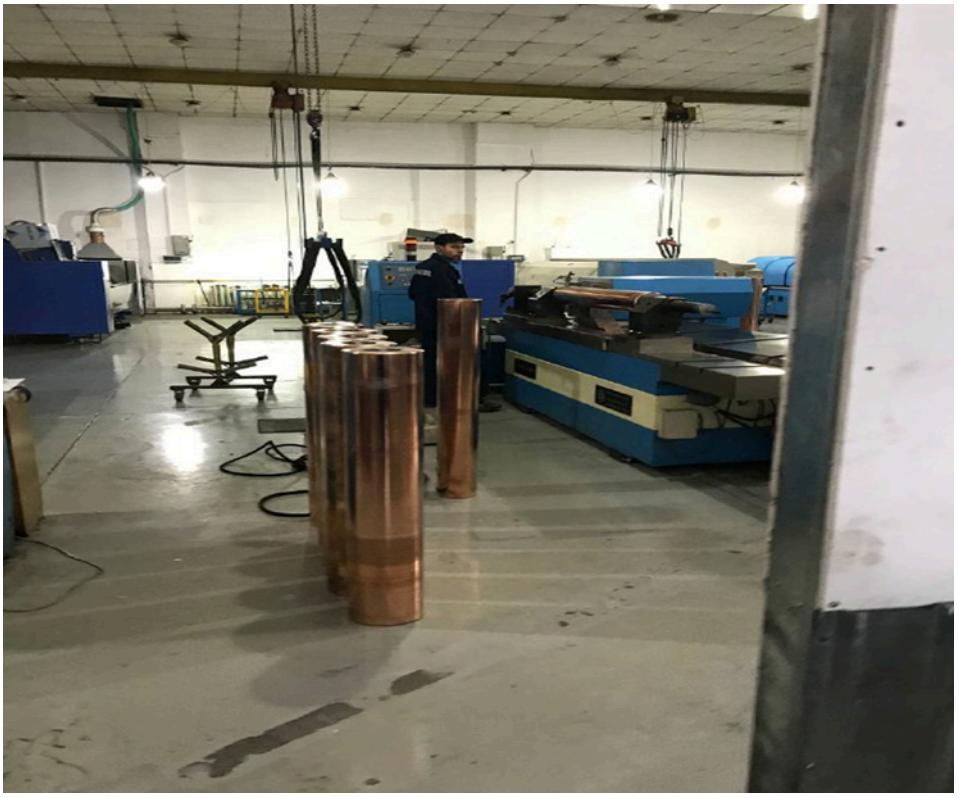
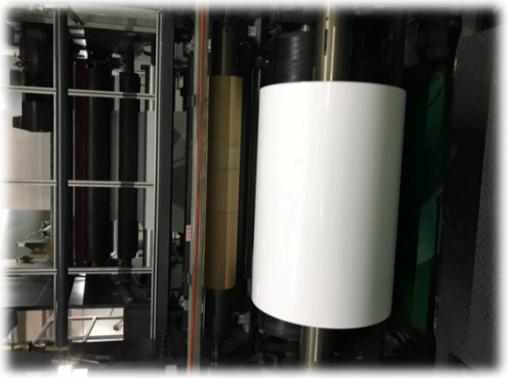


Рис.1 - Зображення гальванічного цеху та друківних валів

## ДОДАТОК В



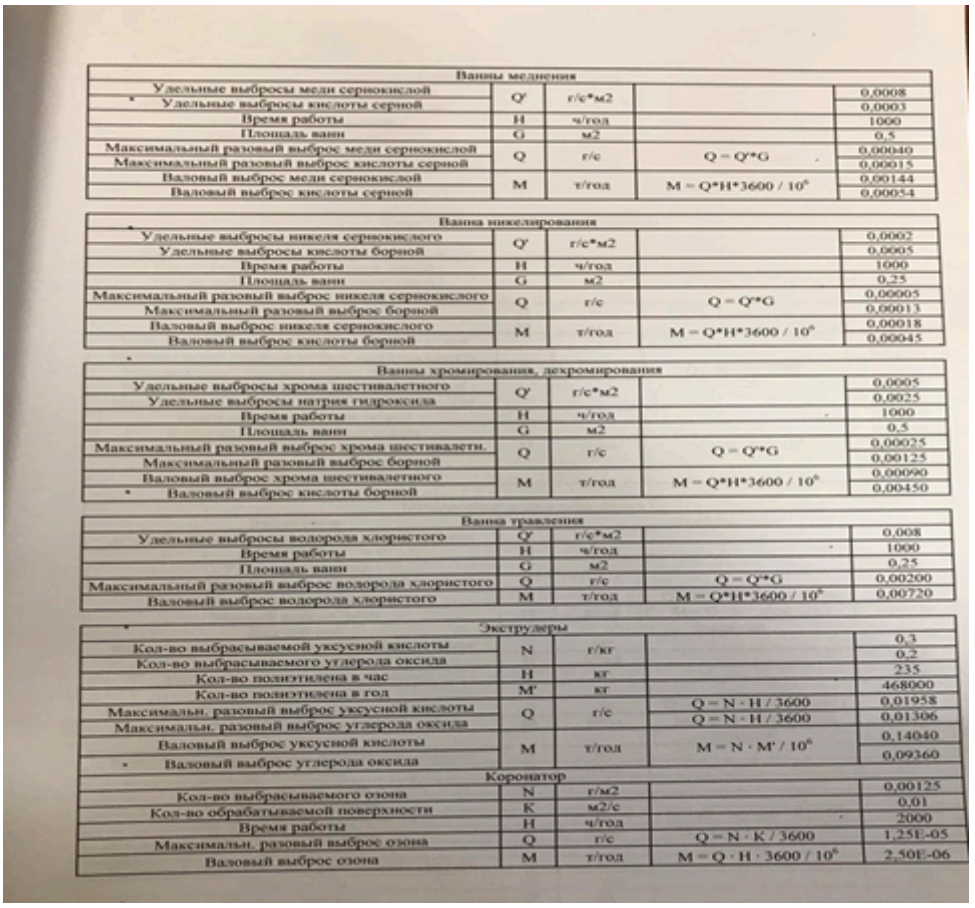
### Характеристика викидів забруднюючих речовин від основних виробництв

Таблиця 2.4

| Виробництво | Продукція, що випускається | | | Характеристика сировини, матеріалів | | | Викиди забруднюючих речовин | | | | Пит. викид на одиницю продукції |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Найменування | Одиниця виміру | Кіль-кість | Найменування | Одиниця виміру | Кіль-кість | Код | Найменування | Од. виміру | Фактичний викид | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Виробництво поліет.плівки та друківних валів | Друківні вали | шт | 1575 | Природний газ | тис.м3 | 230 | 301 | Азоту оксиди | т/рік | 0,43624 | 1,5E-04 |
| | Поліетиленова плівка | т | 1268 | Поліетилен | т | 1404 | 337 | Вуглецю оксид | -"- | 0,43978 | 1,5E-04 |
| | | | | Електроди | т | 0,17 | 410 | Метан | -"- | 0,00860 | 3,0E-06 |
| | | | | Зварювальний дріт | т | 1,87 | 140 | Мідь сірчанокисла | -"- | 0,00144 | 5,1E-07 |
| | | | | Бензин | т | 2,8 | 166 | Нікель сірчанокислий | -"- | 0,00018 | 6,3E-08 |
| | | | | Дизпаливо | т | 1,25 | 322 | Кислота сірчана | -"- | 0,00054 | 1,9E-07 |
| | | | | | | | 308 | Кислота борна | -"- | 0,00045 | 1,6E-07 |
| | | | | | | | 203 | Хром шестивалентн. | -"- | 0,00094 | 3,3E-07 |
| | | | | | | | 150 | Натрію гідроксид | -"- | 0,00450 | 1,6E-06 |
| | | | | | | | 316 | Водень хлористий | -"- | 0,00720 | 2,5E-06 |
| | | | | | | | 1555 | Кислота оцтова | -"- | 0,42120 | 1,5E-04 |
| | | | | | | | 326 | Озон | -"- | 7,5E-06 | 2,6E-09 |
| | | | | | | | 123 | Заліза оксид | -"- | 0,02363 | 8,3E-06 |
| | | | | | | | 143 | Марганцю оксид | -"- | 0,00140 | 4,9E-07 |
| | | | | | | | 10414 | Пил металевий | -"- | 0,00097 | 3,4E-07 |
| | | | | | | | 10431 | Пил абразивно-мет. | -"- | 0,00238 | 8,4E-07 |
| | | | | | | | 328 | Сажа | -"- | 9,7E-06 | 3,4E-09 |
| | | | | | | | 330 | Ангідрід сірчистий | -"- | 1,7E-05 | 5,9E-09 |
| | | | | | | | 2754 | Вуглеводні насич. | -"- | 0,00023 | 8,0E-08 |
| | | | | | | | | **Всього** | | **1,3497** | |

Рис.2 – Характеристика забруднюючих речовин  гальванічного виробництва

**ДОДАТОК С**



| Ванны меднения | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Удельные выбросы меди сернокислой | Q' | г/с*м2 | | 0,0008 |
| Удельные выбросы кислоты серной | | | | 0,0003 |
| Время работы | H | ч/год | | 1000 |
| Площадь ванн | G | м2 | | 0,5 |
| Максимальный разовый выброс меди сернокислой | Q | г/с | Q = Q'*G | 0,00040 |
| Максимальный разовый выброс кислоты серной | | | | 0,00015 |
| Валовый выброс меди сернокислой | M | т/год | M = Q*H*3600 / $10^6$ | 0,00144 |
| Валовый выброс кислоты серной | | | | 0,00054 |

| Ванна никелирования | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Удельные выбросы никеля сернокислого | Q' | г/с*м2 | | 0,0002 |
| Удельные выбросы кислоты борной | | | | 0,0005 |
| Время работы | H | ч/год | | 1000 |
| Площадь ванн | G | м2 | | 0,25 |
| Максимальный разовый выброс никеля сернокислого | Q | г/с | Q = Q'*G | 0,00005 |
| Максимальный разовый выброс борной | | | | 0,00013 |
| Валовый выброс никеля сернокислого | M | т/год | M = Q*H*3600 / $10^6$ | 0,00018 |
| Валовый выброс кислоты борной | | | | 0,00045 |

| Ванны хромирования, дехромирования | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Удельные выбросы хрома шестивалетного | Q' | г/с*м2 | | 0,0005 |
| Удельные выбросы натрия гидроксида | | | | 0,0025 |
| Время работы | H | ч/год | | 1000 |
| Площадь ванн | G | м2 | | 0,5 |
| Максимальный разовый выброс хрома шестивалети. | Q | г/с | Q = Q'*G | 0,00025 |
| Максимальный разовый выброс борной | | | | 0,00125 |
| Валовый выброс хрома шестивалетного | M | т/год | M = Q*H*3600 / $10^6$ | 0,00090 |
| Валовый выброс кислоты борной | | | | 0,00450 |

| Ванна травления | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Удельные выбросы водорода хлористого | Q' | г/с*м2 | | 0,008 |
| Время работы | H | ч/год | | 1000 |
| Площадь ванн | G | м2 | | 0,25 |
| Максимальный разовый выброс водорода хлористого | Q | г/с | Q = Q'*G | 0,00200 |
| Валовый выброс водорода хлористого | M | т/год | M = Q*H*3600 / $10^6$ | 0,00720 |

| Экструдеры | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Кол-во выбрасываемой уксусной кислоты | N | г/кг | | 0,3 |
| Кол-во выбрасываемого углерода оксида | | | | 0,2 |
| Кол-во полиэтилена в час | H | кг | | 235 |
| Кол-во полиэтилена в год | M' | кг | | 468000 |
| Максимальн. разовый выброс уксусной кислоты | Q | г/с | Q = N · H / 3600 | 0,01958 |
| Максимальн. разовый выброс углерода оксида | | | Q = N · H / 3600 | 0,01306 |
| Валовый выброс уксусной кислоты | M | т/год | M = N · M' / $10^6$ | 0,14040 |
| Валовый выброс углерода оксида | | | | 0,09360 |

| Коронатор | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Кол-во выбрасываемого озона | N | г/м2 | | 0,00125 |
| Кол-во обрабатываемой поверхности | K | м2/с | | 0,01 |
| Время работы | H | ч/год | | 2000 |
| Максимальн. разовый выброс озона | Q | г/с | Q = N · K / 3600 | 1,25E-05 |
| Валовый выброс озона | M | т/год | M = Q · H · 3600 / $10^6$ | 2,50E-06 |

Рис. 3 – Виробничі рецептури гальванічних ванн

**ДОДАТОК Д**

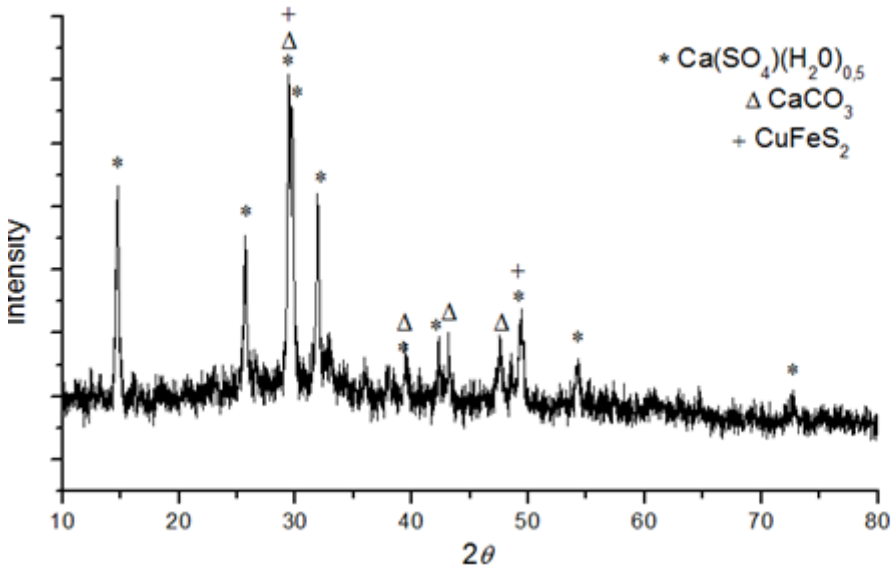



Рис.4- Гістограма елементного складу гальванічного шламу, обробленого при T=105$^0$C

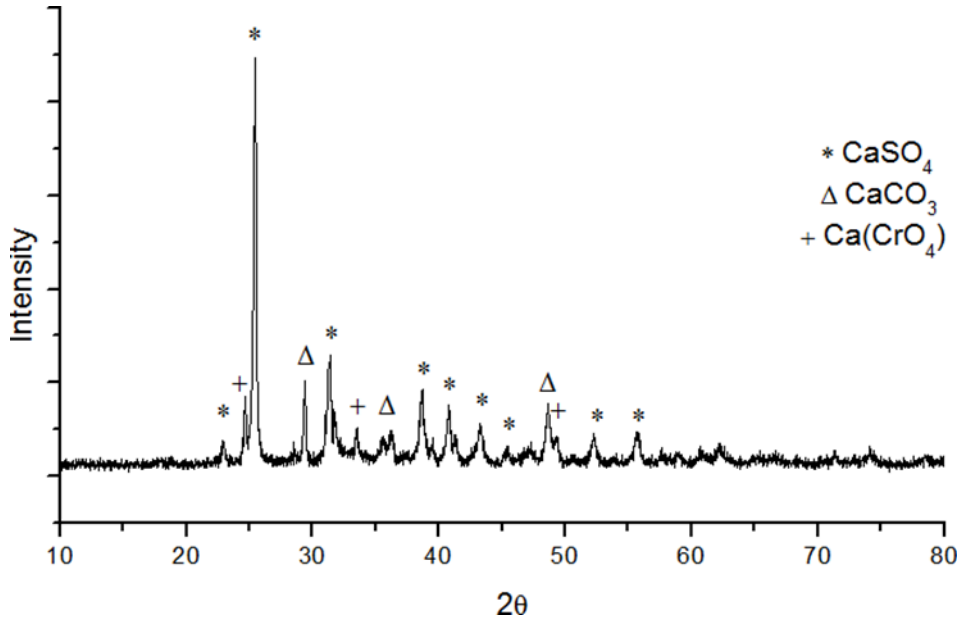



Рис.5- Гістограма елементного складу гальванічного шламу, обробленого при T=600$^0$C

## ДОДАТОК Е

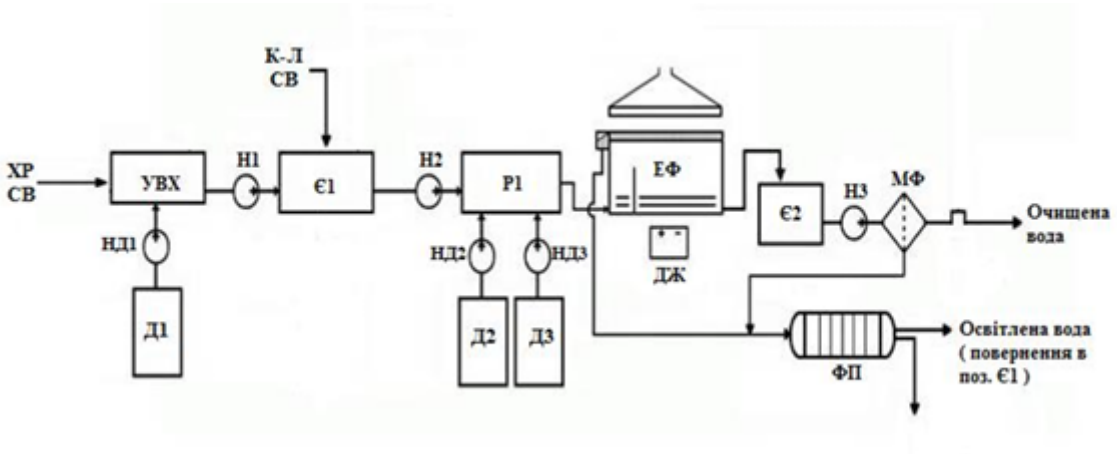



Рис.6- Процес очищення стічних вод включає наступні основні елементи:

**Є1, Є2** – накопичувальні резервуари для збору стоків перед очищенням; **Н1, Н2, Н3** – насоси;**Д1, Д2, Д3** – ємності для приготування розчинів реагентів,;**НД1, НД2, НД3** – дозувальні насоси;**Р1** – реактор змішування;**ЕФ** – електрофлотаційний блок, де за допомогою електричного струму здійснюється видалення забруднень за рахунок спінення та коагуляції;**ДЖ** – джерело живлення електрофлотаційного модуля, що забезпечує необхідну електроенергію для роботи;**ФП** – фільтр-прес; **МФ** – механічний фільтр, який виконує заключну очистку від залишкових твердих часток.

## ФОРМА ОПИСУ РОБОТИ БАКАЛАВРА*

1. Бакалаврська робота (папка рік 2025 Ivanov):
2. Робота (Ivanov.doc)
3. Реєстраційна форма (Ivanov_Forma.doc)
4.Додатки (рецензії, схеми, програмний код, акти впровадження тощо) – подаються окремими файлами в zip-архіві

**Реєстраційна форма**

| № | Назва поля | Зміст поля |
|---|---|---|
| 1. | Назва роботи | Оцінка впливу гальванічних відходів на довкілля з розробкою схеми комплексної утилізації та переробки |
| 2. | УДК | УДК 669.54:602 |
| 3. | Автор (ПІБ) | Курилюк Марія Богданівна |
| 4. | Дата (рік, місяць, день) | 26.06.2025 |
| 5. | Інститут | Нафтогазової інженерії |
| 6. | Кафедра (назва) | Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці |
| 7. | Спеціальність | 183 Технології захисту навколишнього середовища |
| 8. | Освітньо-професійна програма | Технології захисту НС<br><br>середовища середовища |
| 9. | Форма навчання | Денна |
| 10. | Тема бакалаврської роботи | Оцінка впливу гальванічних відходів на довкілля з розробкою схеми комплексної утилізації та переробки |
| 11. | Керівник (ПІБ, науковий ступінь, вчене звання) | Фомічова О.В., к.х.н., доцент |
| 12. | Рецензент/опонент | |

| | | |
|---|---|---|
| 13. | Ключові слова | |
| 14. | Анотація (до 300 символів) | |

**Перелік додаткових матеріалів**

| № | Назва поля | Ім’я файлу |
|---|---|---|
| 1. | Перелік додаткових матеріалів | .doc |
| 2. | Архів додаткових матеріалів | .zip |
| | Файл в архіві | .doc |
| 3. | Презентація | .ppt |

Виконавець бакалаврської роботи _____

_____

(підпис) (прізвище, ім’я, по батькові)