

УДК 669.536

Шафорост Ю.А., к.х.н., доц.  0000-0002-0002-2803;Жабковська О.А., к.х.н., доц.  0000-0002-0288-4255;Смалиус В.В., к.х.н., доц.  0009-0000-5841-1708;Галаган Р.Л., лаб.  0000-0003-1791-8486;Беляєв А.М., студ.  0009-0002-9108-9591.

## ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ УТИЛІЗАЦІЇ ШЛАМОВИХ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА ВІСКОЗНОГО ВОЛОКНА

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,  
18031, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 81,  
e-mail: ZdorYulia@ukr.net

У роботі досліджено проблему тривалого зберігання шламових відходів на території колишнього підприємства ВАТ «Черкаське хімволокно» в місті Черкаси. Шлами, що утворилися під час роботи виробництва віскозного волокна, десятиліттями зберігаються у відкритих шламонакопичувачах і становлять значну екологічну загрозу через вміст токсичних речовин, зокрема важких металів та органічних сполук. Основну увагу приділено вивченню термічних, хімічних і фізичних властивостей шламів для розробки ефективних методів їх утилізації. Проведено термогравіметричний і диференційно-скануючий калориметричний аналіз для визначення поведінки відходів за високих температур.

Результати дослідження свідчать про доцільність поетапної термічної обробки шламів при температурах до 800 °С, що дозволяє зменшити обсяги відходів, видалити органічні компоненти та розкласти неорганічні сполуки, зокрема карбонати та сульфати. Також визначено оптимальні умови для вилучення цінного металу, такого як цинк, за допомогою кислотної обробки прожареного шламу. Запропоновані методи дозволяють знизити енергетичні витрати та підвищити економічну ефективність утилізації.

Показано, що кінцевими продуктами переробки можуть бути порошок для гіпсування солончаків, гіпс, ферум(III) оксид, цинк оксид, металічний цинк, хімічно осаджена крейда, натрію нітрат, амоній нітрат. З використанням іоннообмінної технології, на завершальному етапі, отримано амоній нітрат.

Дослідження має практичне значення для впровадження екологічно безпечних і економічно ефективних технологій переробки промислових відходів, сприяючи зниженню їх негативного впливу на довкілля та раціональному використанню вторинних ресурсів.

**Ключові слова:** промислові відходи; шлами; екологічна безпека; утилізація; термічна обробка; важкі метали; органічні сполуки; рентгенофлуоресцентний аналіз; термогравіметрія; оптимізація технології.

### Вступ

На території міста Черкаси, в зоні розташування колишнього підприємства ВАТ «Черкаське хімволокно», зберігаються залишки промислових відходів – шламів, що виникли під час виробництва віскозного волокна та потребують утилізації. Тривале зберігання відходів без належного контролю створює серйозні екологічні ризики, що негативно позначаються на стані природних ресурсів, здоров'ї населення та загальній

екологічній безпеці регіону. Як зазначає Я.Є. Нижниченко, ефективне управління відходами є фундаментальним елементом національної безпеки, а інтеграція інноваційних технологій та гармонізація законодавства з міжнародними стандартами дозволяє мінімізувати негативний вплив на довкілля та сприяти сталому розвитку країни [1]. В Україні, як і у світі загалом, питання утилізації промислових відходів набуває дедалі більшої актуальності у зв'язку з

підвищенням вимог екологічного законодавства, необхідністю зменшення техногенного навантаження на довкілля та зростанням суспільного інтересу до екологічної безпеки [2-3].

Загальна площа шламонакопичувачів ВАТ «Черкаське Хімволокно» становить 14 гектарів, а глибина котловану сягає 6 метрів. З часом поверхня накопичувача частково вкрилася водною рослинністю, коренева система якої утворила щільний шар на поверхні шламових відкладень. Шламові відходи містять токсичні речовини, зокрема важкі метали та органічні сполуки, які становлять потенційну загрозу для екосистем і здоров'я людей. У разі відсутності ефективних методів утилізації ці відходи залишаються серйозною екологічною проблемою.

Ефективна утилізація шламових відходів є важливим завданням, яке потребує всебічного вивчення їхніх термічних, хімічних і фізичних властивостей. Дослідження хіміко-технологічних процесів, що можуть бути застосовані для переробки шламів, є ключовим етапом у розробці сучасних методів утилізації. Ці підходи не лише сприятимуть зменшенню обсягів відходів, а й дозволять забезпечити повторне використання цінних компонентів, таких як метали та мінерали [4]. Як підкреслюють автори роботи, присвяченої проблемам переробки промислових техногенних відходів [5], комплексне використання таких матеріалів, як фосфогіпс, металевий шлам і червоний бокситовий шлам, сприяє отриманню ефективних будівельних матеріалів, що дозволяє зменшити екологічне навантаження на довкілля. Вивчення таких процесів відкриває перспективи впровадження інноваційних технологій, які знижуватимуть негативний вплив на довкілля та підвищуватимуть ефективність виробництва.

Основною проблемою є наявність значних обсягів шламів, утилізація яких ускладнена через їх неоднорідний склад, високий вміст води (до 80%) та органічних залишків. Традиційні методи переробки супроводжуються ризиком значного забруднення довкілля, а також високими енергетичними витратами, що знижує їхню економічну доцільність.

Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю створення екологічно безпечних, енергетично ефективних і економічно вигідних методів термічної обробки шламів. Це дасть змогу мінімізувати їхній негативний вплив на навколишнє середовище, вилучати корисні компоненти для повторного використання, а також зменшити обсяги відходів, що підлягають зберіганню або утилізації. Окрім того, розробка таких підходів є важливою для забезпечення екологічної безпеки регіонів, що потребують активних заходів з утилізації промислових відходів.

Реалізація природоохоронних заходів і програм вимагає значних фінансових ресурсів. Одним із способів вирішення екологічних проблем є вдосконалення технологічних процесів у виробництві. Якщо на поточному етапі розвитку така можливість відсутня, раціональним підходом буде зосередження уваги на питаннях утилізації відходів, утворення яких є неминучим [6-7].

У країнах, де широко застосовувалася технологія виробництва віскози з використанням кальцію гідроксиду для нейтралізації технологічних розчинів, за десятиліття накопичено величезні обсяги відходів у вигляді шламів. Ці відходи є складним об'єктом для утилізації, що обумовлено їх неоднорідним складом і значним вмістом токсичних речовин. Проблема їхньої переробки присвячено численні наукові огляди та публікації [8-10].

Проте більшість досліджень, які стосуються утилізації таких шламів, зосереджувалися лише на вилученні одного або двох цінних продуктів. Найпоширенішими прикладами є одержання металічного цинку або цинкового купоросу, які мають значну комерційну цінність. Незважаючи на це, комплексний підхід до переробки шламів, який дозволив би ефективно утилізувати всі основні компоненти відходів, залишається недостатньо розробленим. Це створює потребу в подальших дослідженнях і розробці інноваційних методів, які могли б забезпечити не тільки економічну вигоду, але й мінімізувати негативний екологічний вплив накопичених відходів.

Таким чином, пошук нових технологій, що дозволять максимально використовувати

ресурси шламів, є надзвичайно актуальним завданням для країн з розвинутою текстильною промисловістю.

З огляду на це, дослідження має практичне значення та створює основу для подальших наукових і технологічних розробок у сфері екології та промислової технології.

Основною **метою даної роботи** є оптимізація умов утилізації шламових відходів виробництва віскозного волокна для підвищення економічної ефективності процесу та забезпечення раціонального використання отриманих продуктів.

Для досягнення мети роботи були поставлені такі завдання:

1. Дослідити хімічний склад, термічну стійкість і фізичні властивості шламових відходів.
2. Встановити економічно доцільні температурні та технологічні режими термічної обробки.
3. Визначити шляхи вилучення цінних компонентів для їх подальшого використання.
4. Виділити  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  як продукт останньої стадії використовуючи іонний обмін.

#### **Експериментальна частина та результати досліджень**

Для проведення досліджень було здійснено відбір проб шламу в чотирьох різних точках цього шламонакопичувача. Проби брали з глибини 15-20 см від поверхні, де утворився шар, укріплений кореневою системою водної рослинності. Кожен зразок вагою приблизно 1 кг, зібраний із зазначених точок, поміщався в пластиковий контейнер і змішувався для отримання однорідної проби. Осереднення здійснювалося шляхом ретельного перемішування всіх компонентів.

Дослідження порошкової дифракції зразків проводили на рентгенівському дифрактометрі Rigaku SmartLab. Ця рентгенографічна система обладнана джерелом рентгенівського випромінювання з обертовим анодом PhotonMax потужністю 9 кВт, що забезпечує високий потік, у поєднанні з напівпровідниковим детектором NuPiX-3000, який відрізняється високою енергетичною роздільною здатністю.

Дослідження зразків синтезованих речовин, отриманих із шламу, проводилися за допомогою рентгенофлуоресцентної

спектроскопії (РФС). Для дослідження шламу також використовувався термогравіметричний прилад STA 449F Yupiter, виробництва компанії NETZSCH. Цей пристрій поєднує в собі термогравіметричний (ТГ) аналіз та диференційний скануючий калориметр (ДСК), що дозволяє проводити одночасний термічний і гравіметричний аналіз матеріалів при нагріванні з заданою швидкістю.

Прилад STA 449F Yupiter забезпечує точне вимірювання змін маси зразка в залежності від температури, що дозволяє вивчати процеси, пов'язані з втратою води, термічним розкладом, окисленням та іншими фізико-хімічними змінами. ТГ аналіз є важливим для оцінки термічної стійкості матеріалів, а також для визначення їх складу і механізмів деградації.

На термограмі, зображеній на рис. 1, показано результати одночасного термогравіметричного (ТГ) та диференційного скануючого калориметричного (ДСК) аналізу шламових відходів віскозного виробництва. Як видно з графіку, перший етап (перші ендотермічні піки) супроводжуються втратою маси (втрата маси  $\sim 7\%$ ), можуть свідчити про дегідратацію зразка, тобто втрату вільної та зв'язаної води. Перший пік, ймовірно, відповідає виходу фізично зв'язаної води (вільної води), яка видаляється з поверхні матеріалу. Другий ендотермічний пік може відповідати видаленню води з гідратованих структур або виділенню хімічно зв'язаної води з гідратів.

Цей етап зазвичай відбувається при нижчих температурах (до  $\sim 200^\circ\text{C}$ ), і втрата маси залежить від кількості вільної та зв'язаної води.

Наступні екзотермічні піки, які також супроводжуються втратою маси ( $\sim 10\%$ ), можуть бути спричинені окисленням та згорянням органічних речовин, таких як залишки віскози та інші органічні компоненти, що містяться в шламах. Цей процес екзотермічний, оскільки при згорянні виділяється тепло. Піки в цьому температурному діапазоні вказують на енергію, що виділяється під час згоряння.

Зазвичай цей етап відбувається у проміжку між  $200\text{--}500^\circ\text{C}$ , залежно від

природи органічних компонентів та умов нагрівання.

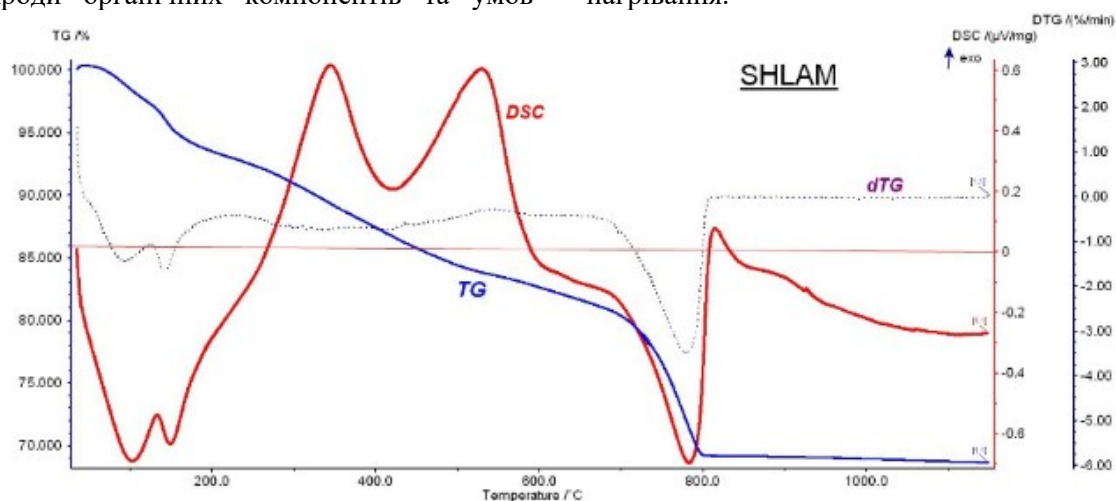


Рис. 1. Термограма шламових відходів віскозного виробництва, отримана методом ТГ-ДСК.

Різкий ендотермічний пік та втрата маси при  $\sim 800^\circ\text{C}$  швидше за все, пов'язані з розкладом неорганічних сполук, таких як карбонати та сульфати. У цьому випадку розклад кальцій карбонату ( $\text{CaCO}_3$ ) та цинк сульфату ( $\text{ZnSO}_4$ ) є типовими реакціями, які супроводжуються значною втратою маси через виділення газоподібних продуктів.

Розклад карбонатів та сульфатів зазвичай відбувається при температурі від  $700$  до  $900^\circ\text{C}$  і викликає помітний ендотермічний ефект на термограмі через поглинання тепла під час розриву хімічних зв'язків і виділення газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ).

Ці етапи добре показують поступову деградацію зразка за температурою, де кожен етап має власний діапазон температур і механізми.

Виходячи з описаних результатів термогравіметричного та диференційного скануючого калориметричного аналізу шламових відходів віскозного виробництва, можна зробити наступні висновки:

1. Втрата маси, пов'язана з випаровуванням води: Перший етап (до  $200^\circ\text{C}$ ), на якому спостерігаються ендотермічні піки та втрата маси приблизно на 7%, свідчить про наявність вільної та зв'язаної води в шламах. Це підтверджує, що відходи містять як вологу, так і кристалогідратні форми певних речовин, що важливо враховувати при розробці умов сушіння або підготовки до подальшої обробки.

2. Горіння органічних складників: Екзотермічні піки та подальша втрата маси

(близько 10%) в діапазоні температур  $200$ – $500^\circ\text{C}$  вказують на окиснення органічних компонентів, таких як залишки віскози чи інші органічні домішки. Це свідчить про те, що шлами містять горючі речовини, які потенційно можна видалити термічно. Цей аспект може бути корисним для зменшення органічної частини відходів перед їх остаточним перетворенням чи утилізацією.

3. Розклад неорганічних сполук: Різкий ендотермічний пік при близько  $800^\circ\text{C}$ , пов'язаний із розкладом карбонатів та сульфатів (ймовірно кальцій карбонату та цинк сульфату), вказує на присутність мінеральних компонентів, що стабільні за нижчих температур, але розкладаються при високих. Це може бути корисним для видалення вуглекислого газу та отримання оксидів металів, які мають інші властивості та можуть бути використані або легше утилізовані.

Дослідження теплової поведінки шламів дозволяє оцінити їхній склад та реактивність за підвищених температур, що є важливим для розробки ефективної технології утилізації. Отримані результати вказують на доцільність поетапної термічної обробки для видалення води, окиснення органічних компонентів і розкладу карбонатів і сульфатів, що може зменшити об'єм та небезпечність відходів, а також підготувати їх до подальшої переробки чи знешкодження.

Отже, для поетапної утилізації шламів, доцільно використовувати температурний

режим з підвищенням до 800 °С із утриманням на проміжних етапах (200 °С та 300–500 °С), щоб досягти повного видалення води, органічних складників та розкладу неорганічних солей. Такий підхід оптимізує утилізацію шламових відходів та сприяє синтезу корисних речовин з мінімальною кількістю побічних продуктів.

Раніше проведені нами дослідження [11] показали, що прожарювання шламу при 600 °С недостатнє для повного видалення органічних домішок, і ефективне очищення можливе при температурі 900 °С протягом 1 години.

Однак ми встановили, що аналогічного результату можна досягти, знизивши температуру прожарювання до 800 °С, що дозволяє зменшити енергетичні витрати. Завдяки цьому підходу ми досягаємо зниження витрат на енергію, що є важливим аспектом у розробці економічно ефективної методики утилізації.

Отже, вихідний шлам був прожарений нами при температурі 800 °С при перемішуванні кожні 10 хвилин протягом 30 хв. Перед початком прожарювання у муфельній печі, зразок шламу поміщали у фарфорову чашку. Після прожарювання маса шламу зменшувалася через високий вміст вологи, який складав близько 80 % від маси вихідного шламу. Гази CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, які виділялися не вловлювалися та не аналізувалися.

Для вилучення кислоторозчинних компонентів із прожареного шламу його обробляли концентрованою HNO<sub>3</sub>. Під час цієї обробки в розчин перейшли Ферум, Цинк та Кальцій, що перебували у вигляді оксидів. Нітратна кислота також здатна окиснювати залишкові кількості ферум(II)-іонів, які могли залишитися в шламі після прожарювання. Ми вважаємо, що повне окиснення Феруму до трьохвалентного стану є важливим для максимального розділення його від Цинку, що сприятиме більш ефективному вилученню обох елементів. Шлам, який витримували при температурі 800 °С протягом 30 хвилин, був проаналізований на рентгенофлуоресцентному спектрометрі для визначення вмісту металічних елементів. Результати спектрального аналізу представлені на рис. 2.

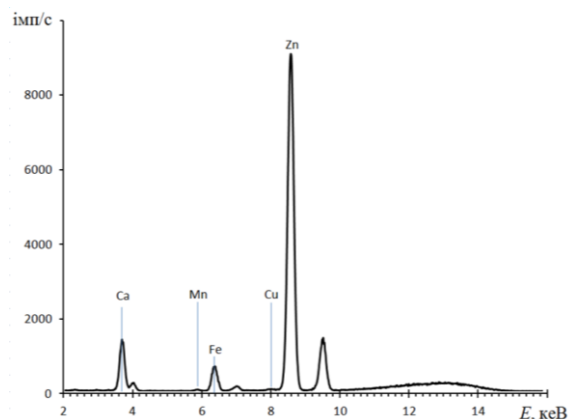


Рис. 2. Спектр рентгенівської флуоресценції після процесу прожарювання.

Цей спектр надає лише якісну інформацію про наявність металічних елементів, оскільки для їх точного кількісного визначення потрібне ретельне калібрування приладу за допомогою стандартів. Згідно із законом Мозлі, можна зробити висновок, що основним металічним елементом у складі шламу є кальцій. Масова частка заліза, яке потрапляє у шлам через корозію технологічного обладнання, за результатами хімічного аналізу становить від 2 до 4 %.

Процес переробки шламу, описаний у даній роботі, ґрунтується на використанні термічної обробки, кислотних та лужних реакцій, а також методів фільтрації для отримання корисних компонентів. Високотемпературне прожарювання шламу при 800 °С дозволяє розкласти органічні компоненти та змінювати фізико-хімічні властивості матеріалу, що полегшує подальше вилучення металів. Використання нітратної кислоти у поєднанні з натрієм гідроксидом забезпечує ефективне видалення заліза та цинку у формі гідроксидів, які можна подальше обробляти.

Крім того, переробка шламу не лише сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище, а й створює можливості для економічної вигоди. Вилучені з шламу метали, такі як цинк та натрій нітрат, можуть бути використані в різних промислових процесах, що підвищує загальну ефективність ресурсного управління.

У ході розробки лабораторного методу фракційного розділення шламу кожного разу відбирали 10 г прожареного зразка.

Відібраний, ретельно подрібнений шлам переносили у мірний стакан об'ємом 500 мл, після чого додавали 20 мл концентрованої нітратної кислоти. Для інтенсифікації взаємодії фаз суміш перемішували скляною паличкою. Після завершення реакції та охолодження в реакційну суміш доливали 200 мл дистильованої води.

Щоб ефективно відокремити малорозчинний кальцій сульфат від рідкої фази, суспензію піддавали центрифугуванню протягом 5 хвилин при 3000 об/хв. Отриманий осад додатково промивали приблизно 50 мл дистильованої води, перемішували і фільтрували під вакуумом через паперовий фільтр. Об'єднаний фільтрат позначали як фільтрат 1, який містив розчинні форми кальцію, феруму і цинку.

Для розділення феруму та цинку використовували відмінності в умовах утворення їх гідроксидів. Згідно з літературними даними, ферум(III) гідроксид повністю осаджується при  $\text{pH} \approx 4,1$ , тоді як цинк гідроксид починає випадати лише при  $\text{pH} > 5,4$ . Відтак,  $\text{pH}$  фільтрату 1 обережно доводили до 4,1 шляхом додавання 1М розчину NaOH з постійним перемішуванням. Утворений при цьому осад 2 (рис. 3) містив переважно ферум(III) гідроксид з невеликою

домішкою цинку, що потрапляв у фазу осаду внаслідок співосадження.

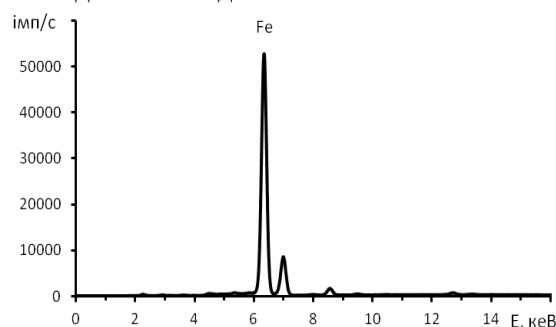


Рис. 3. Спектр рентгенівської флуоресценції осаду  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

Осад відділяли фільтруванням, а отриманий фільтрат 2 підлужнювали до  $\text{pH} \approx 8,0$  з метою осадження цинк гідроксиду. У результаті, після вилучення цинку, у рідкій фазі залишалися переважно розчинні форми кальцій нітрату та натрій нітрату. Після завершення лабораторного дослідження нами було здійснено переробку шламу у більших кількостях, що вимірювалися в кілограмах, як показано на схемі (рис. 4). Одержані результати повністю узгоджуються з проведеними нами лабораторними дослідженнями.

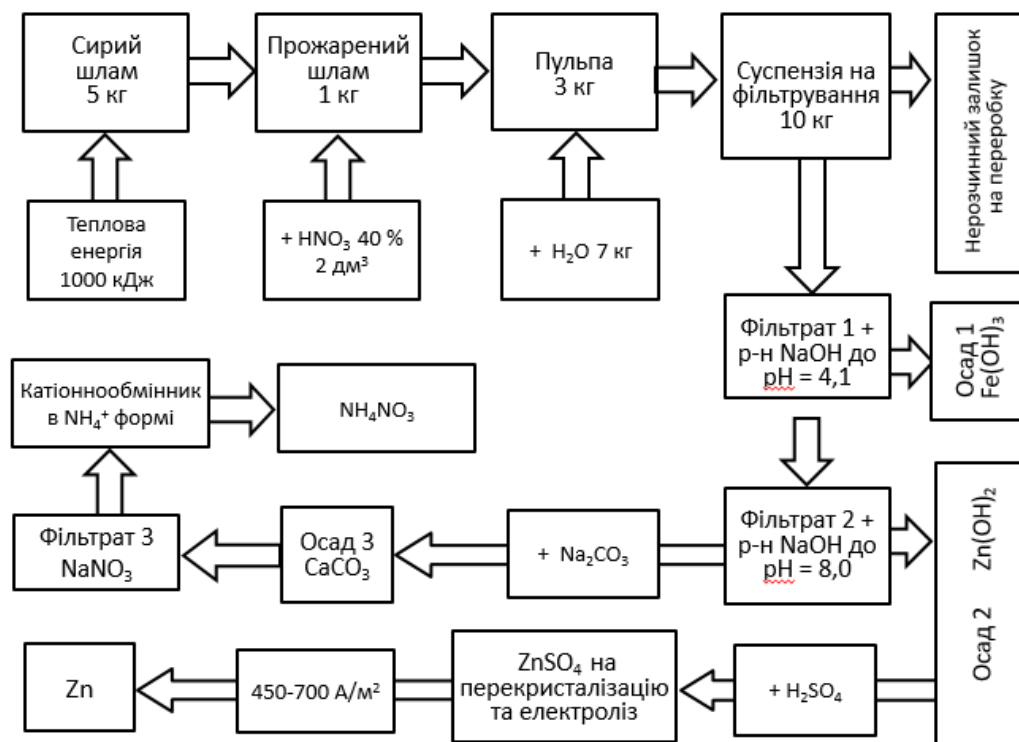


Рис. 4. Схема переробки шламів БАТ «Хімволокно».

Результати лабораторного дослідження демонструють ефективність запропонованої методики, яка може бути покладена в основу розробки промислової технології даного виду шламу.

У процесі переробки шламу були виділені такі речовини: кальцій сульфат ( $\text{CaSO}_4$ ), який після обробки дає чистий гіпс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); ферум(III) гідроксид ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), що утворюється при доведенні pH до 3,75 і відділяється фільтруванням; цинк гідроксид ( $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ), отриманий при доведенні pH до 8,0, який розчиняється у сульфатній кислоті з утворенням  $\text{ZnSO}_4$ ; цинк сульфат ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) у вигляді кристалів, отриманий випаровуванням розчину; металічний цинк, отриманий електролізом розчину  $\text{ZnSO}_4$ ; кальцій карбонат ( $\text{CaCO}_3$ ), утворений при взаємодії кальцій нітрату з кальцинованою содою (рис. 5); натрій нітрат ( $\text{NaNO}_3$ ), виділений шляхом випаровування і перекристалізації.

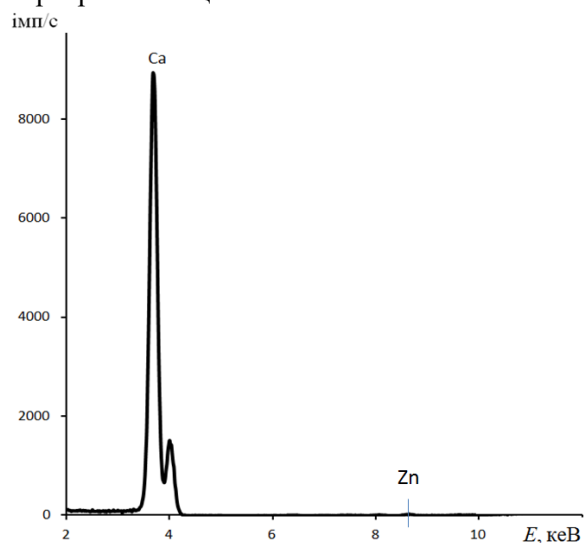
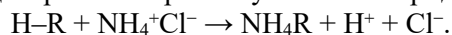


Рис. 5. Рентгенівсько-флюоресцентний спектр осаду кальцій карбонату ( $\text{CaCO}_3$ ).

У ході дослідження перед нами також стояло додаткове завдання – виділення продукту останньої стадії, а саме амоній нітрату ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), з використанням методу іонного обміну. З огляду на попередній досвід розділення іонів металів, для реалізації цього процесу було вирішено застосувати іонообмінну колонку, заповнену катіонітом у формі  $\text{NH}_4^+$ .

Іонообмінну колонку заповнювали катіонітом КУ-2-8 у формі Н-формі. Перед використанням іонообмінник переводили в

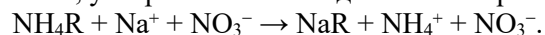
$\text{NH}_4^+$ -форму шляхом пропускання концентрованого розчину амоній хлориду:



Про готовність колонки до використання свідчило зникнення кислоти на виході (визначалося за індикаторним папірцем).

Стан катіоніту контролювали шляхом вимірювання електропровідності промивної води, яка витікала з катіоніту. На початку промивки спостерігалось низьке значення опору (близько 300 Ом), що свідчило про наявність залишкового  $\text{NH}_4^+$  у розчині. У міру промивки опір різко зростає, що сигналізувало про завершення етапу промивання.

Після цього через колонку пропускали розчин натрій нітрату, що призводило до іонного обміну і заміщення іонів натрію на амоній, утворюючи на виході амоній нітрат:



Поява амоній нітрату у вихідному розчині супроводжувалася різким зниженням опору. Після завершення виділення  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  промивку продовжували дистильованою водою до досягнення стабільно високого опору, що свідчило про завершення процесу.

Після завершення іонообмінної операції амоній нітрат із розчину можна виділити традиційними методами кристалізації або випарювання. Таке поєднання методів осадження й іонного обміну дозволяє ефективно розділити компоненти шламу і одержати цінні продукти з достатнім рівнем чистоти.

Отриманий розчин з амоній нітратом випарювали на водяній бані, а далі переносили в чашку Петрі для остаточного висушування в сушильній шафі при помірній температурі. Після висушування тверду речовину зважували для визначення виходу продукту.

Для підтвердження складу одержаної речовини проводили рентгеноструктурний аналіз (РСА) на дифрактометрі типу ДРОН. Аналіз дифрактограми із застосуванням бази даних PDF дозволив достовірно ідентифікувати амоній нітрат.

Неорганічні речовини, отримані внаслідок переробки прожареного шламу, мають потенціал для різного застосування в промисловості та сільському господарстві. Залишок, нерозчинний у нітратній кислоті та

збагачений кальцій сульфатом із домішками оксидів цинку та заліза, можна використовувати для гіпсування засолених ґрунтів степової зони України та Причорномор'я.

Кальцій сульфат дигідрат (гіпс), виділений з технологічних розчинів, є корисним як у медицині для фіксуючих пов'язок, так і в харчовій промисловості, де він використовується як добавка при виготовленні ковбасних виробів.

Ферум(III) оксид з невеликою домішкою цинк оксиду, який залишився після нейтралізації, підходить для застосування як мінеральний пігмент у виробництві будівельних матеріалів, наприклад, облицювальної плитки.

Цинк оксид, після очищення від домішок оксиду заліза, можна використовувати в лакофарбовій промисловості, а також у фармацевтичній промисловості.

Цинковий купорос застосовується у багатьох галузях, включаючи консервування деревини, а також може бути доочищений і проданий як хімічний реактив.

Хоча металічний цинк має широкий спектр застосування, його виробництво безпосередньо на базі переробки шламу може бути економічно недоцільним.

Кальцій карбонат (крейда), отриманий із шламу, є достатньо чистим і підходить для використання в харчовій та фармацевтичній промисловості. Також він може продаватися як хімічний реактив.

Натрій нітрат (натрієва селітра) можна використовувати як добриво, а після очищення – реалізовувати як хімічний реактив.

Натрій нітрат ( $\text{NaNO}_3$ ) є важливою сировиною для отримання амоніачної селітри (амоній нітрату,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) та кальцієвої селітри (кальцій нітрату,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ).

### Висновки

Було оптимізовано процес безвідходної переробки шламу, що утворюється у виробництві віскозного волокна, розроблений науковцями кафедри хімії та наноматеріалознавства ЧНУ ім. Б. Хмельницького. Для розділення сполук Феруму та Цинку застосували кальцій

гідроксидний метод, використовуючи для осадження гідроксиди натрію та калію.

Виходячи з результатів термогравіметричного та диференційного скануючого калориметричного аналізу шламових відходів віскозного виробництва доцільно використовувати температурний режим з підвищенням до  $800\text{ }^\circ\text{C}$  із утриманням на проміжних етапах ( $200\text{ }^\circ\text{C}$  та  $300\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$ ), щоб досягти повного видалення води, органічних складників та розкладу неорганічних солей.

Встановлено, що зниження температури прожарювання шламу до  $800\text{ }^\circ\text{C}$  забезпечує аналогічну комплексну переробку шламів з помітним зниженням енергетичних витрат. Це є важливим фактором для економічно ефективної методики утилізації, що дозволяє оптимізувати витрати без втрати якості результату.

Температурний режим в  $800\text{ }^\circ\text{C}$  не лише видаляє органічні компоненти, але й сприяє початковому розкладу деяких неорганічних сполук, зокрема карбонатів та сульфатів. Обраний підхід дозволив досягти необхідної підготовки шламу для подальшої переробки, забезпечивши ефективність та економічність процесу. Використовуючи іонний обмін одержали продукт останньої стадії  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .

Отримані кінцеві продукти з переробленого шламу виробництва віскозного волокна характеризуються широким спектром застосування в промисловості та сільському господарстві. Наявність таких компонентів, як сульфат і карбонат кальцію, феруму(III) оксид, сполуки цинку, амоній нітрат та натрій нітрат, відкриває можливості для їх використання в різних галузях..

### Список використаних джерел

1. Нижниченко Я.Є. Управління відходами як фундаментальний елемент національної безпеки. *Здобутки економіки: перспективи та інновації*. 2024, 11. 1–22. Doi: 10.5281/zenodo.14080483.
2. UNEP International Solid Waste Association. *Global waste management outlook 2024: beyond an age of waste: turning rubbish into a resource*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2024. 115 p.

3. Гербут Я.О., Самусевич Я.В. Проблеми та перспективи розвитку сфери управління побутовими відходами в Україні. *Економіка та суспільство*, 2024, 68. Doi: 10.32782/2524-0072/2024-68-169.
4. Атамась Г.М., Столяренко Г.С. Фізико-хімічні властивості та кінетичні дослідження переробки цинковмісних шлаків БАТ «Черкаське хімволокно», як альтернативного джерела сировини для виробництва цинкового купоросу. *Питання хімії та хімічної технології*, 2008, 3. 76–79.
5. Лемешев М.С., Сівак К.К., Стаднійчук М.Ю., Сівак Р.В. Сучасні підходи комплексної переробки промислових техногенних відходів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 2021, 2. 37–44. Doi: 10.31649/2311-1429-2021-2-37-44.
6. Тарасова Т. В., Губіна В. Г., Квашук Л. П., Горлицький Б. О., Єременко М. В. Промислові відходи України. Проблеми та шляхи їх вирішення; ред. Б. О. Горлицький; НАН України, ДУ «Ін-т геохімії навколиш. середовища НАН України». Київ: *Логос*, 2011. С. 199.
7. Abkhoshk E., Jorjani E., Al-Harashsheh M.S., Rashchi F., Naazeri M. Review of the hydrometallurgical processing of non-sulfide zinc ores. *Hydrometallurgy*, 2014, 149. 153–167. Doi: 10.1016/j.hydromet.2014.08.001.
8. Ejtemaei M, Gharabaghi M, Irannajad M. A review of zinc oxide mineral beneficiation using flotation method. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2014, 206. 68–78. Doi: 10.1016/j.cis.2013.02.003.
9. Ma N. Recycling of basic oxygen furnace steelmaking dust by in-process separation of zinc from the dust. *J. Cleaner Prod.*, 2016, 112(5). 4497–4504. Doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.009.
10. Jha M.K, Kumar V, Bagchi D, Singh R.J., Lee J.C. Processing of rayon waste effluent for the recovery of zinc and separation of calcium using thiophosphinic extractant. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 145(1/2). 221–226.
11. Шафорост Ю.А., Галаган Р.Л., Король Я.Д., Лут О.А. Основи безвідходного перероблення шламових відходів БАТ «Черкаське хімволокно». *Питання хімії та хімічної технології*, 2022, 6. 108–114.

Стаття надійшла до редакції: 18.07.2025

## CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PRINCIPLES OF SLUDGE WASTE UTILIZATION FROM VISCOSE FIBER PRODUCTION

**Shaforost Yu.A., Zabkovska O.A., Smalius V.V., Galahan R.L., Bieliaiev A.M.**

*Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy,  
18031, Cherkasy, 81 Shevchenko Boulevard,  
e-mail: ZdorYulia@ukr.net*

The study addresses the issue of long-term storage of sludge waste on the territory of the former enterprise JSC «Cherkasy Khimvolokno» in the city of Cherkasy. The sludge generated during the operation of viscose fiber production has been stored for decades in open sludge storage sites and poses a significant environmental threat due to the content of toxic substances, particularly heavy metals and organic compounds. The study focuses on the thermal, chemical, and physical properties of the sludge in order to develop effective methods for its utilization. Thermogravimetric and differential scanning calorimetric analyses were conducted to determine the behavior of the waste at high temperatures.

The results of the study indicate the feasibility of stepwise thermal treatment of the sludge at temperatures up to 800 °C, which reduces waste volume, eliminates organic components, and decomposes inorganic compounds such as carbonates and sulfates. Optimal conditions were also determined for the extraction of valuable metals such as zinc by acid treatment of the calcined sludge. The proposed methods help reduce energy consumption and increase the economic efficiency of utilization.

It was shown that the end products of sludge processing may include soil-ameliorating gypsum powder, gypsum, iron(III) oxide, zinc oxide, metallic zinc, chemically precipitated chalk, sodium

nitrate, and ammonium nitrate. Using ion exchange technology at the final stage, ammonium nitrate was successfully obtained.

This research has practical significance for the implementation of environmentally safe and economically efficient industrial waste recycling technologies, contributing to the reduction of their negative environmental impact and to the rational use of secondary resources.

**Keywords:** industrial waste; sludge; environmental safety; utilization; thermal treatment; heavy metals; organic compounds; X-ray fluorescence analysis; thermogravimetry; process optimization.

### References

1. Nyzhnichenko Ya.Ye. Upravlinnia vidkhodamy yak fundamentalnyi element natsionalnoi bezpeky. *Zdobutky ekonomiky: perspektyvy ta innovatsii*. 2024, 11. 1–22. Doi: 10.5281/zenodo.14080483 (in Ukr).
2. UNEP International Solid Waste Association. *Global waste management outlook 2024: beyond an age of waste: turning rubbish into a resource*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2024. 115 p.
3. Herbuth Ya.O., Samusevych Ya.V. Problemy ta perspektyvy rozvytku sfery upravlinnia pobutovymy vidkhodamy v Ukraini. *Ekonomika ta suspilstvo*, 2024, 68. Doi: 10.32782/2524-0072/2024-68-169 (in Ukr).
4. Atamas H.M., Stoliarenko H.S. Fyzyko-khimichni vlastyvyosti ta kinetychni doslidzhennia pererobky tsyntskovmisnykh shlamiv VAT “Cherkaske khimvolokno”, yak alternatyvnoho dzherela syrovyny dlia vyrobnytstva tsyntsovoho kuporosu. *Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnolohii*, 2008, 3. 76–79 (in Ukr).
5. Lemeshev M.S., Sivak K.K., Stadniichuk M.Yu., Sivak R.V. Suchasni pidkhody kompleksnoi pererobky promyslovykh tekhnohennykh vidkhodiv. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii v budivnytstvi*, 2021, 2. 37–44. Doi: 10.31649/2311-1429-2021-2-37-44 (in Ukr).
6. Tarasova T.V., Hubina V.H., Kvashuk L.P., Horlytskyi B.O., Yermenko M.V. Promyslovi vidkhody Ukrainy. Problemy ta shliakhy yikh vyrishennia; ed. B.O. Horlytskyi; NAS of Ukraine, State Institution “Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine”. Kyiv: Lohos, 2011. 199 p. (in Ukr).
7. Abkhoshk E., Jorjani E., Al-Harahsheh M.S., Rashchi F., Naazeri M. Review of the hydrometallurgical processing of non-sulfide zinc ores. *Hydrometallurgy*, 2014, 149, 153–167. Doi: 10.1016/j.hydromet.2014.08.001.
8. Ejtemaei M., Gharabaghi M., Irannajad M. A review of zinc oxide mineral beneficiation using flotation method. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2014, 206. 68–78. Doi: 10.1016/j.cis.2013.02.003.
9. Ma N. Recycling of basic oxygen furnace steelmaking dust by in-process separation of zinc from the dust. *J. Cleaner Prod.*, 2016, 112(5). 4497–4504. Doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.009.
10. Jha M.K., Kumar V., Bagchi D., Singh R.J., Lee J.C. Processing of rayon waste effluent for the recovery of zinc and separation of calcium using thiophosphinic extractant. *J. Hazard. Mater.*, 2007, 145(1/2). 221–226.
11. Shaforost Yu.A., Halahan R.L., Korol Ya.D., Lut O.A. Osnovy bezvidkhodnogo pereroblennia shlamovykh vidkhodiv VAT “Cherkaske khimvolokno”. *Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnolohii*, 2022, 6. 108–114 (in Ukr).