

О. Р. Мокроусова^{1,4}
О. А. Охмат¹
Д. В. Маріїн²
А. А. Кулик³
Г. В. Сакалова²

УТИЛІЗАЦІЯ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД ШКІР'ЯНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ. ЕНЕРГЕТИЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ

¹Київський національний університет технологій та дизайну;

²Вінницький національний технічний університет;

³Вінницький кооперативний інститут;

⁴Державний торговельно-економічний університет, Київ

Зростаюча кількість шламових відходів і стічних вод шкіряного виробництва, що утворюються в результаті обробки шкіри, часто піддається неконтрольованому захороненню або відкритому скиданню, вивільняючи значну кількість шкідливих забруднювальних речовин, включно з канцерогенним хромом (Cr), у повітря, воду та ґрунт. Тому стале поводження з осадами стічних вод шкіряного виробництва за допомогою сучасних технологій валоризації стає життєво важливим для досягнення цілей сталого розвитку та пом'якшення негативного впливу на навколишнє середовище, здоров'я та соціальну сферу.

Осади стічних вод шкіряних заводів, як біомасу, можна розглядати як відновлюване джерело енергії для виробництва біоенергії, що може бути життєздатним рішенням для дотримання сучасних екологічних стандартів і прискорення переходу до економіки замкненого циклу.

Шлам шкіряних заводів як доступний ресурс успішно застосовується у анаеробному збродженні, виробництві біогазу, біодизелю, технічної олії. Запропоновано критичний огляд технологій валоризації шламів шкіряних заводів з метою отримання енергії.

Багато досліджень довели, що типове анаеробне збродження стічних вод шкіряних заводів та осади стічних вод потребує тривалого періоду з низькою ефективністю утилізації та виходом біогазу. А вилуговування хрому є основною проблемою у разі компостування та анаеробного збродження таких відходів.

Загалом, використання осаду шкіряного заводу виявляється дуже перспективною альтернативою для виробництва біодизелю.

Досліджено екологічну небезпеку хромвмісних стічних вод шкіряних виробництв та шламів. Валоризація осадів стічних вод дублення є чутливим і критичним питанням через потенційний ризик перетворення Cr(III) на Cr(VI) в процесі. Тому існує нагальна потреба розглянути ефективні та цілісні технології валоризації шламів дублення на етапах проектування, впровадження та експлуатації, щоб уникнути будь-яких загроз для довкілля та здоров'я людей.

Ключові слова: шкіряні відходи, осади стічних вод, біопаливо, біогаз, біодизель.

Вступ

Зменшення запасів викопного палива та зростання його вартості, глобальне потепління, ціни на сировину, урядова політика, обізнаність споживачів та подальший технологічний розвиток — це лише деякі з факторів, що мають значний вплив на розвиток промислових біохімічних технологій. На жаль, війна в Україні значно загострює енергетичну кризу. Тому використання альтернативних джерел енергії має велике значення.

Викопна органічна енергосировина повністю домінує як паливо для багатьох цілей, особливо на виробництвах і транспорті. На ринку екологічними альтернативами такої сировини є етанол,

біодизель та біогаз. Паливні елементи зараз є життєздатною технологією, яку можна легко впровадити у виробництво, і в усьому світі витрачається багато коштів на розвиток цієї технології. Прикладом можуть бути нові органічні паливні елементи, вироблені з промислових відходів [1].

В обробці шкіри задіяна низка фізичних, біологічних, механічних і хімічних процесів. Ці процеси спричиняють утворення величезної кількості твердих і рідких відходів, що містять хром. Щороку шкіряні заводи по всьому світу генерують велику кількість твердих і рідких відходів, більшість з яких зазвичай викидаються на звалища. З однієї тони шкур отримують приблизно 150...200 кг готової шкіри, а також близько 750...850 кг твердих відходів. Більше того, в процесі утворюється приблизно 50...15 000 м³ стічних вод і 500 кг вологого шламу (мулу) [2]. Повідомляється, що у світі щорічно утворюється близько 600 млн м³ стічних вод шкіряно-хутрових виробництв. Стічні води шкіряних заводів є одними з найзабруднювальніших серед промислових відходів шкіряної промисловості.

Сьогодні методи перетворення осадів стічних вод шкіряного виробництва на енергію є перспективними, економічно вигідними та технологічно можливими через високий вміст у них органічних речовин, оптимальне співвідношення в біомасі Карбону і Нітрогену, а також їхній рідкий агрегатний стан.

Виробництво біогазу та біодизелю з біомаси набуло значного поширення в багатьох країнах. Розвинені країни ЄС, активно впроваджують біоенергетику для боротьби з виснаженням ресурсів та викидами вуглецю від викопного палива. Для промислових виробництв це чудова перспектива практичної реалізації оборотного циклу «виробництво енергії ↔ переробка відходів». З огляду на це можливо розглядати осади стічних вод як потенційне джерело біомаси для виробництва біоенергії, що може значно пом'якшити екологічні та соціальні наслідки.

На сьогодні в Україні відходи шкіряної промисловості не використовуються як самостійний сировинний ресурс у виробництві біопалива. Відомий метод використання суміші біомаси тваринного походження та базових рослинних відходів у виробництві біогазу [1], [3], також набули деякого поширення термічні методи утилізації шкіряних відходів, зокрема, піролізний процес [2]. Проте стічні води шкіряної промисловості та осади стічних вод залишаються поза увагою українських біоенергетиків. В цій роботі авторами вперше розглянуто перспективи використання таких відходів у вітчизняній біоенергетиці.

Метою роботи є визначення та аналіз перспективних методів перетворення стічних вод шкіряних заводів та шламу дублення в біогаз та біодизель.

Результати дослідження

Характеристики рідких відходів шкіряних заводів та їхній вплив на навколишнє середовище

Стічні води шкіряних заводів є одними з найзабруднювальніших серед промислових відходів. Вони поділяються на такі типи: стічні води, що не містять хрому (стічні води відмочувально-зольної стадії, стічні води танідного дублення, яке використовується для виробництва важких шкір, таких як підошви взуття, сумки, ремені та ремінці) та стічні води хромового дублення, які містять хром та іони інших важких металів (використовується для виробництва легких шкір). Стічні води шкіряних заводів містять від 30 до 120 кг БСК і від 75 до 320 кг ХСК на тонну сирової або обробленої шкіри [2], [3].

Осади стічних вод — це основний побічний продукт очищення стічних вод на очисних спорудах, який утворюється на первинному, вторинному та третинному етапах водопідготовки. Він належить до групи відходів, що біологічно розкладаються (біовідходів), а це означає, що ці відходи найкраще піддаються анаеробному зброджуванню та аеробному розкладанню.

Шлами шкіряного заводу — це тверді відходи зі значним вмістом вологи, що утворюються в процесі виробництва шкіри та очищення стічних вод шкіряного заводу, які в основному містять певну кількість сульфідів, хрому, крові, олії, вапна, розчиненого волосся та білка. Дуже часто концентровані стічні води та осади стічних вод також відносять до шламів [2].

Очисні споруди шкіряних заводів утворюють велику кількість осаду, а вміст твердих речовин залежить від сировини, типу технологічного процесу, хімікатів, що використовуються в процесі, та інших заходів контролю на заводі.

Для розуміння потенціалу рекуперації енергії важливими є попередній аналіз осадів стічних вод. Попередній аналіз надає інформацію про основні компоненти, такі як леткі речовини, вміст вологи, золи та вміст фіксованого вуглецю, а елементарний дає інформацію про склад елементів,

включно з Карбоном, Гідрогеном, Нітрогеном, Сульфуром та Оксигеном. Склад осадів стічних вод шкіряного виробництва проаналізовано за інформацією декількох джерел і узагальнено в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико – хімічні властивості осадів стічних вод шкіряних виробництв [4]—[6]

Параметр	Первинний осад	Вторинний осад
Зольність, %	42 ±1	26 ±1
Загальна вологість, %	30 ±1	19 ±0,5
Вміст летких речовин, %	28, 6 ±1	24,5 ±1
Органічна складова, %	57,6 ±1	72,3 ±1,5
Вміст сухої речовини, %	70 ±1	76 ±1
Вміст сульфуру, %	2 ±0,2	1, 5±0,2
Вміст Карбону загальний, %	32 ±0,6	40 ±1
Вміст фіксованого Карбону, %	18 ±1	3 9±1
Нижчий рівень теплоти згорання, МДж/кг	8,7 ±0,6	10,8 ±0,5

Згідно з дослідженнями, вологість осадів стічних вод коливається від 0,14 % до 4,52 %, що підтверджує можливість його енергетичної валоризації. Вміст летких речовин в осадах коливається від 13,61 % до 78,90 %, що також свідчить про їхню хорошу горючість. Вміст фіксованого вуглецю, про який повідомлялося в роботах [3], [6], коливається від 0,03 % до 39,15 %, що сприяє підвищенню енергетичної цінності паливної сировини. Проте вміст важких металів, таких як Cr, становить серйозну проблему для отримання енергії, оскільки діапазон його вмісту коливається від 13,11 % до 58,8 % [6].

Cr(III) та інші неорганічні речовини видаляються на стадії очищення стічних вод, якщо їхній вміст у відходах значний. В іншому випадку такі відходи непридатні для біохімічного очищення. Наявні технології вилучення хрому (також при сумісному вмісті інших металів) подані в табл. 2.

Згідно з деякими дослідженнями, якщо частка відходів, що біологічно розкладаються, становить менше 60 %, ефективнішим є використання термічних методів переробки відходів.

Таблиця 2

Технології вилучення Cr зі стічних вод шкіряно-хутрових виробництв [5]—[7]

Процес	Ефективність видалення, %
Термічна обробка за температури 100...1000 °C в часовому інтервалі 4 години	98,00
Метод збагачення	43,49
Процес біологічного вилуговування	92,50
Магнітна флокуляція	99,12
Біовилуговування на основі сіркоокислювальних бактерій	98,00
Лужно-окислювальне вилуговування з подальшим кислотним вилуговуванням	92,60
Сапонін-окислювальна обробка на основі H ₂ O ₂	70,00
Метод окислення	70,00
Ультразвукова обробка	99,60
Гідрометалургійні процеси та кислотний розклад	97,00
Біологічне вилуговування на основі <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	91,20
Електрокінетичний процес	80,01
Тристадійний процес: вилучення Cr з відходів, окислення Cr(III) до Cr(VI) та відновлення Cr(III)	83,00
Відновлення — хлорування	98,39

Найчастіше розчинений тривалентний хром, присутній у стічних водах, видаляється шляхом фізико-хімічної обробки з використанням вапна та неорганічних коагулянтів [7], оскільки такі методи дешеві, швидкі і забезпечують задовільне вилучення хрому. Хромовмісний дубильний шлам утворюється з осадженого хрому з неорганічними та органічними компонентами і класифікується як небезпечні відходи через високу концентрацію Cr(III).

До того ж осади і шлами стічних вод шкіряних заводів містять сульфіді, органічні забруднювачі, деякі метали, такі як магній (Mg), залізо (Fe), цинк (Zn), кальцій (Ca), нікель (Ni) тощо, а також патогенні мікроорганізми, що створює проблему для їхнього безпечного захоронення та використання.

Виробництво біогазу зі стічних вод та осадів стічних вод шкіряних заводів

Стічні води шкіряних заводів обробляються для отримання поживних речовин традиційними біологічними методами (в аеротенках), але сполуки азоту видаляються незначною мірою. Вони є перспективними для перетворення на біогаз, але основними проблемами їхньої ефективної метанізації є високий вміст азоту та наявність речовин, що не піддаються біологічному розкладанню (сполуки Cr, Al тощо) [8].

Дослідники активно вивчають питання перетворення шкідливих шкіряних шламів на альтернативні відновлювані джерела енергії [6]—[10]. Анаеробне зброджування — це широко розповсюджений процес біологічного очищення з використанням анаеробних мікроорганізмів для виробництва біогазу з осаду стічних вод шкіряного заводу. На основі останніх досліджень виявлено, що «класичне анаеробне зброджування» стічних вод та шкіряних шламів потребує тривалого періоду, а ефективність утилізації осаду та вихід біогазу низькі [7]. Іншими словами, ефективне використання органічної речовини з осаду шкіряного заводу для анаеробного зброджування, що розкладається на біогаз, передбачає використання специфічних методик і прийомів.

Багато дослідників вивчали вплив певних сполук, присутніх у стічних водах шкіряних заводів, на виробництво біогазу. Стічні води та осад стічних вод містять NaCl, Na₂CO₃, антисептики та антибіотики. Ці сполуки є інгібіторами процесу бродіння з утворенням метану. Додавання Na₂CO₃ зменшує утворення метану з 220 до 38 мл/г. У присутності NaCl утворення метану становило 594 мл/г, тоді як без хлориду натрію воно досягало 113 мл/г. Високі концентрації антибіотиків тетрациклінового та норфлораксацинового ряду (25...100 мл/г) призводять до значного зменшення утворення біогазу. Отже, антибіотики пригнічують асоціацію мікроорганізмів з самого початку ферментації. Різні літературні дані вказують на основні речовини осаду шкіряного заводу, що знижують ефективність виробництва біогазу зі стічних вод: гідрокарбонати, сульфати і хлориди [8], [9].

Останнім часом дослідники зосереджуються на підвищенні продуктивності зброджування шляхом додавання ферментів. Наприклад, деякі вчені [10] провели дослідження спільного зброджування для отримання біогазу, використовуючи шлам, мул, або концентровані стоки шкіряного заводу як субстрат. Під час процедури спільного зброджування додавали ліпазу для покращення стадії гідролізу, що обмежує швидкість анаеробного зброджування. Порівняно з контрольною групою без додавання ліпази, результати показали, що виробництво біогазу збільшилося приблизно на 15 %, а період зброджування скоротився приблизно на 30 % [12]. Також пропонуються [8], [10], [11] методи попередньої обробки для анаеробного зброджування осаду шкіряного заводу для збільшення виходу біогазу шляхом додавання ферменту.

Вчені [13] використовували озонування як альтернативу для підвищення хімічної потреби в розчинному кисні, враховуючи, що гідроліз осаду потребує тривалішого часу відстоювання. Використання озону для розчинення клітин і гідролізу осаду стічних вод руйнує клітинну стінку і вивільняє ХСК, тим самим збільшуючи виробництво біогазу. Дозування 0,18 г O₃/г загальної кількості твердих речовин призвело до значного збільшення виробництва біогазу (до 310 мл/г). В іншому дослідженні використання ферментів для попередньої обробки не призвело до значних змін у виробництві біогазу, збільшивши його з 379 до 389 мл/г. Через високу вартість ферментативної обробки немає підстав для її широкого використання.

Різні дослідження вивчали ефективність спільного зброджування для виробництва біогазу. До прикладу, досліджено ефективність виробництва біогазу у разі спільного зброджування побутових відходів та коров'ячого гною. Виявлено, що найкращі результати досягнуто за вагового співвідношення 70 : 30 % (коров'ячий гній до осаду шкіряного заводу) за мезофільних температурних умов [13], [14].

Багато досліджень показують, що спільне зброджування осаду стічних вод та інших відходів шкіряного або харчопереробного виробництва може бути чудовим ресурсом для виробництва біогазу. Їх можна використовувати безпосередньо на шкіряних заводах як джерело тепла або для виробництва електроенергії [12]—[14]. Так вчені дослідили потужність виробництва біогазу шляхом комбінування вихідної сировини з метою встановлення оптимальних умов для виробництва біогазу. Осади стічних вод шкіряного заводу використовувалися разом з трьома видами біомаси для оцінки ефективності: біомасою мікроводоростей, волоссям ВРХ та промисловим силіконом. Результати показали, що спільне зброджування шкіряного шламу та стружки з мікроводоростями підвищує ефективність виробництва біогазу. У цьому випадку швидкість виробництва біогазу збільшилася на 43,3 мл/г, разом зі збільшенням співвідношення C : N [15].

Перетворення осадів стічних вод шкіряних виробництв на біодизель

Біологічному перетворенню осадів стічних вод шкіряних заводів для виробництва біодизелю приділяється відносно мало уваги [6], [16], [17]. До прикладу, розроблено інноваційний процес виробництва біодизелю зі стічних вод з використанням фотокаталітичної дії. Для перетворення жирів використовували багатий на жири шлам від дублення свинячої шкіри і новий фотокаталізатор під назвою «CdS».

Вчені [16] також запропонували жировмісні осади стічних вод використовувати як потенційний матеріал для виробництва біодизелю. Екстракцію ліпідів проводили за допомогою надкритичного етанолу. Досягнуто вихід 98 %, що є вражаючим результатом.

У нещодавньому дослідженні, висвітленому у [18], застосовано екстракцію ліпідів із вторинного осаду шкіряного заводу за допомогою переестерифікації «in situ». Автори підтвердили, що хлороформ-метанольний метод дає вищий вміст ліпідів (22,8 %) з ефективністю вилучення ліпідів 98,5 %. З огляду на ці результати, біодизель з вторинного осаду стічних вод шкіряного заводу можна розглядати як перспективний енергетичний варіант з техніко-економічною доцільністю [6], [16], [18].

З розвитком технології термічної обробки осаду, шлам шкіряного заводу може бути використаний для отримання олії після піролізу. Для приготування олії дослідники [19] оцінили вплив трьох каталізаторів натрієвої солі на приготування олії, отриманої в результаті піролізу осаду шкіряного заводу. На наступному етапі здійснювали переестерифікацію отриманого продукту, тобто біодизель отримують при послідовному застосуванні термічного та біохімічного перетворення. Охарактеризувавши характеристики кінцевих продуктів за допомогою термогравіметричного та спектрофотометричного методів визначено, що хімічні компоненти цих продуктів подібні до дизелю промислових марок [20].

Узагальнюючи представлені дослідження та практики, варто виділити такі рекомендації:

1. Осади стічних вод, що містять лише поллютанти, які піддаються біорозкладу мають значний потенціал як сировина для виробництва біогазу. «Свіжі» і «старі» осади можуть бути перероблені у біогаз з однаковою ефективністю, якщо правильно підібрати ферменти для зброджування.

2. Наявність в осадах стічних вод шкіряної промисловості та у концентрованих стоках неорганічних полютантів (в першу чергу іонів хрому) обмежує їхнє використання у виробництві біогазу, значно збільшує собівартість енергетичного продуктів внаслідок необхідності видалення таких полютантів хімічним, або фізико-хімічним методом.

3. Біодизель з осаду стічних вод шкіряного заводу можна розглядати як перспективний енергетичний варіант, проте економічна доцільність такого перетворення є дискусійною.

Висновки

Існує значна потреба у впровадженні сталих практик на всіх етапах поводження зі шкіряними відходами та розвитку зелених технологій, а також інноваційних методів біоремедіації на регіональних підприємствах шкіряної промисловості.

Окреслено основні тенденції виробництва відновлюваної енергії з осадів стічних вод шкіряного виробництва, включно з біоінженерними інноваціями, попередньою обробкою відходів та їхньою подальшою біохімічною трансформацією, наведено багато конкретних прикладів. Зрештою, успіх промислових біохімічних технологій залежить від економічної ефективності конкретних зазначених технологічних процесів.

Через значний вміст іонів важких металів, карбонатів, сульфатів, хлоридів, антисептиків і антибіотиків, існують значні обмеження щодо утилізації осадів стічних вод шкіряних заводів у біоенергетиці. Вартість утилізації становить додаткові витрати для підприємств. Тому, щоб підтримувати процес виробництва шкіри, повинен існувати механізм перетворення шкіряних відходів у високоцінні матеріали, які можна використовувати для різних цілей, зокрема, як енергетичну сировину.

Запропоновано загальні практичні рекомендації для шкіряної промисловості з погляду сталого розвитку біоенергетики, а також визначено прогалини в дослідженнях щодо переробки і утилізації осадів стічних вод шкіряної промисловості, які майбутні дослідники та промислові виробництва можуть використати у своїх роботах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] I. Voytovych, M. Malovanyu, V. Zhuk, and O. Mukha, "Facilities and problems of processing organic wastes by family-type biogas plants in Ukraine," *J. Water & Land Develop.*, vol. 45, no. IV-VI, pp. 499, 185-189, 2020. <https://doi.org/10.24425/jwld.2020.133493>.
- [2] М. П. Жалдак, В. О. Полюга, і О. Р. Мокроусова, *Запровадження принципів сталої біоекономіки у переробці сировини біогенного походження. Зелена трансформація та стала біоекономіка*, моногр. Київ: КНУТД, 2024, с. 383-415. ISBN 978-617-7763-34-4.
- [3] I. Tymchuk, M. Malovanyu, O. Shkvirko, and K. Yatsukh, "Sewage Sludge as a Component to Create a Substrate for Biological Reclamation," *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, vol. 22, no. 4, pp. 229-237, 2021. <https://doi.org/10.12912/27197050/137863>.
- [4] O. Savchuk, P. Rebrikova, T. Vovk, N. Raksha, L. Ostapchenko, and O. Mokrousova, "Use of waste from the leather industry for the production of biotechnological products based on collagen," in IOP Conf. Series: *Mater. Scienc. Engin.*, 2019, no. 500, pp. 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/500/1/012020>.
- [5] Maistrenko L., et al., "Collagen Obtained from Leather Production Waste Provides Suitable Gels for Biomedical Applications," *Polymers*, vol. 14, no. 21, pp. 47-49, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14214749>.
- [6] K. Chojnacka, et al., "Progress in sustainable technologies of leather wastes valorization as solutions for the circular economy," *J. Clean. Prod.*, no. 313, pp. 127902, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127902>.
- [7] Li Yanchun, Guo Ruijun, Lu Wenhui, and Zhu Deyi, "Research progress on resource utilization of leather solid waste," *Journal of Leather Science and Engineering*, vol. 1, no. 6, 2019. <https://doi.org/10.1186/s42825-019-0008-6>.
- [8] R. Korol, H. Sakalova, "Methanogenesis of waste in technical systems as an energy conservation factor," *Personal. Environ. Is.*, no. 2, pp. 22-25, 2022. [https://doi.org/10.31652/2786-6033-2022-1\(2\)-22-25](https://doi.org/10.31652/2786-6033-2022-1(2)-22-25).
- [9] G. D. Zupančič, and A. Jemec, "Anaerobic digestion of tannery waste: semi continuous and anaerobic sequencing batch reactor processes," *Bioresour Technol.*, vol. 101, no. 1, pp. 26-33, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.200907028>.
- [10] Y. Li, S. Y. Park, and J. Zhu, "Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 821-826, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.201007042>.
- [11] C. B. Agustini, J. T. Da Fontoura, B. Mella, and M. Gutierrez, "Evaluating co-substrates to supplement biogas production from tannery solid waste treatment – cattle hair, microalgae biomass, and silicone," *Biofuels. Bioprod. Biorefin.*, vol. 12, no. 6, pp.1095-1102, 2018. <https://doi.org/10.1002/bbb.1929>.
- [12] N. B. Golub, M. B. Shinkarchuk, A. V. Shynkarchuk, Zh. Y. Xinhua, and O. A. Kozlovets, "Vulnerabilities in the Production of Biogas from the Fat-Containing Tannery Waste," *Innov. Biosyst Bioeng.*, vol. 3, no. 4, pp. 253-260, 2019. <https://doi.org/10.20535/ibb201934185425>.
- [13] Md. Abdul Moktadir, Ren Jingzheng, and Zhou Jianzhao, "A systematic review on tannery sludge to energy route: Current practices, impacts, strategies, and future directions," *Science of the Total Environment*, no. 901, pp.901166244, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166244>.
- [14] V. Muralidharan, S. Palanivel, and M. Balaraman, "Turning problem into possibility: a comprehensive review on leather solid waste intra-valorization attempts for leather processing," *J. Clean. Prod.*, no. 367, pp. 133021, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133021>.
- [15] SB. K. Kameswari, C. Kalyanaraman, S. Porselvam, and K. Thanasekaran, "Enhancement of biogas generation by addition of lipase in the co-digestion of tannery solid wastes," *Clean Soil Air Water*, no. 20, pp. 10004, 2010. <https://doi.org/10.1002/clen.20100040>.
- [16] M. Yuliana, et al., "A one-pot synthesis of biodiesel from leather tanning waste using supercritical ethanol: process optimization," *Biomass Bioenergy*, no. 142, pp.105761, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105761>.
- [17] L. Šánek, J. Pecha, K. Kolomazník, M. Bařinová, "Biodiesel production from tannery fleshings: feedstock pretreatment and process modeling," *Fuel.*, no.148, pp. 16-24, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.084>.
- [18] V. K. Booramuthy, R. Kasimani, and S. Pandian, "Biodiesel production from tannery waste using a nano catalyst (ferric-manganese doped sulphated zirconia)," *Energy Sources, Part A.: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 4 no. 11, pp. 1092-110, 2019. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1639849>.
- [19] E. Souza, and L. Silva, "Energy recovery from tannery sludge wastewaters through photocatalytic hydrogen production," *J. Environ. Chem. Eng.*, no. 4, pp. 2114-2120, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.03.040>.
- [20] V. Kumar, and I. S. Thakur, "Extraction of lipids and production of biodiesel from secondary tannery sludge by in situ transesterification," *Bioresour. Technol. Rep.*, no. 11, pp.100446, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100446>.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.01.2025

Мокроусова Олена Романівна — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри біотехнології, шкіри та хутра Київського національного університету технологій та дизайну; професор кафедри товарознавства та митної справи Державного торговельно-економічного університету, Київ, e-mail: olenamokrousova@gmail.com ;

Охмат Олена Анатоліївна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри біотехнології, шкіри та хутра, e-mail: oxmat.ou@knutd.edu.ua .

Київський національний університет технологій та дизайну, Київ;

Кулик Анна Андріївна — завідувач кафедри природничих, правових та суспільних дисциплін, e-mail: kulykanna88@gmail.com .

Вінницький кооперативний інститут, Вінниця;

Марійн Дмитро Володимирович — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: dimamariyn@gmail.com ;

Сакалова Галина Володимирівна — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: sakalovag@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. R. Mokrousova^{1,4}

O. A. Okhmat¹

D. V. Mariin²

A. A. Kulyk³

H. V. Sakalova²

Utilization of Sewage Sludge of Leather Industry. Energy Prospects

¹Kyiv National University of Technologies and Design;

²Vinnitsia National Technical University;

³Vinnitsia Cooperative Institute;

⁴State University of Trade and Economics, Kyiv

The growing amount of tannery sludge generated by leather processing often undergoes uncontrolled landfilling, or open dumping, releasing a significant volume of harmful pollutants, including carcinogenic chromium (Cr) into the air, water, and soil. Therefore, sustainable TS management through advanced valorization technologies becomes vital to align with the Sustainable Development Goals (SDGs) and mitigate the adverse environmental, health, and social impacts.

Tannery sludge, as biomass, can be considered a renewable energy source for bioenergy generation which could be a viable solution for meeting contemporary environmental standards and expediting the transition towards a circular economy.

Tannery sludge is an available resource that has been successfully used in anaerobic digestion, biogas, biodiesel, and industrial oil production. We offered a critical review of tannery sludge valorization technologies towards energy recovery.

Many studies have shown that typical anaerobic digestion of tannery sludge requires a long period with low utilization efficiency and biogas yield. Chromium leaching is a major problem in composting and anaerobic digestion of this waste.

Overall, the use of tannery sludge is proving to be a very promising alternative for biodiesel production.

We also explored the environmental hazards of chrome-containing tannery sludge. Tannery sludge valorization is sensitive and critical due to the potential risk of transforming Cr(III) to Cr(VI) during the process. Therefore, there exists an urgent need for considering efficient and holistic tannery sludge valorization technologies in the design, implementation, and operations phases to avoid any environmental and health hazards.

Keywords: leather waste, tannery sludge, biofuels, biogas, biodiesel.

Mokrousova Olena R. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Biotechnology, Leather and Fur, Kyiv National University of Technologies and Design; Professor of the Chair of Commodity Science and Customs Affairs, State University of Trade and Economics, e-mail: olenamokrousova@gmail.com ;

Okhmat Olena A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Biotechnology, Leather and Fur, e-mail: oxmat.oa@knu.edu.ua ;

Mariin Dmytro V. — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: dimamariyn@gmail.com ;

Kulyk Anna A. — Head of the Chair of Natural, Legal and Social Sciences, e-mail: kulykanna88@gmail.com ;

Sakalova Halyna V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: sakalovag@gmail.com