

УДК 628.31

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-02>

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ЦЕЛЮЛОЗНО-ПАПЕРОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ В КОНТЕКСТІ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНИ

Копаниця Олексій Борисович

Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

Анотація. Целюлозно-паперова промисловість належить до найбільш водоємних галузей економіки та створює значне навантаження на водні ресурси через утворення великих обсягів забруднених стічних вод. Стаття присвячена аналізу сучасного стану очищення стічних вод підприємств целюлозно-паперової промисловості України та визначенню перспективних напрямів вдосконалення систем водоочищення в контексті євроінтеграційних процесів. Метою дослідження є оцінка екологічних проблем, пов'язаних із скиданням недостатньо очищених стічних вод целюлозно-паперових підприємств, та визначення шляхів імплементації сучасних технологій очищення відповідно до вимог європейського законодавства. У роботі проаналізовано характеристики забруднювачів стічних вод целюлозно-паперових підприємств, включаючи високий вміст органічних речовин, лігніну, целюлози, токсичних хімікатів та підвищене біохімічне споживання кисню. Розглянуто традиційні методи очищення (механічні, хімічні, біологічні) та сучасні технології третинного очищення, зокрема озонування, мембранну фільтрацію, адсорбцію на активованому вугіллі та комбіновані гібридні системи. Проведено порівняльний аналіз ефективності різних технологічних схем очищення з урахуванням економічних та екологічних показників. Особливу увагу приділено

аналізу нового законодавства Європейського Союзу, зокрема переглянутої Директиви 2024/3019 про очищення міських стічних вод, яка встановлює жорсткіші вимоги до видалення біогенних речовин та мікрозабруднювачів. Визначено ключові виклики для української целюлозно-паперової промисловості, включаючи застаріле обладнання очисних споруд, недостатність впровадження замкнених систем водопостачання та необхідність значних капіталовкладень у модернізацію. Запропоновано стратегічні напрями розвитку систем водоочищення на підприємствах галузі, що включають поетапне впровадження найкращих доступних технологій, створення систем повторного використання очищених стічних вод та досягнення енергетичної нейтральності очисних споруд відповідно до європейських стандартів. Результати дослідження можуть бути використані для розробки національної стратегії модернізації очисних споруд целюлозно-паперових підприємств та імплементації відповідного європейського законодавства в процесі підготовки України до вступу в Європейський Союз.

Ключові слова: целюлозно-паперова промисловість, очищення стічних вод, третинне очищення, озонування, мембранні технології, європейське екологічне законодавство, найкращі доступні технології.

PROBLEMS AND PROSPECTS OF WASTEWATER TREATMENT IN PULP AND PAPER INDUSTRY IN THE CONTEXT OF UKRAINE'S EUROPEAN INTEGRATION

Abstract. *The pulp and paper industry is one of the most water-intensive sectors of the economy and creates significant pressure on water resources through the generation of large volumes of polluted wastewater. The article analyzes the current state of wastewater treatment at Ukrainian pulp and paper enterprises and identifies promising directions for improving water treatment systems in the context of European integration processes. The aim of the study is to assess environmental problems associated with the discharge of inadequately treated wastewater from pulp and paper enterprises and to determine ways of implementing modern treatment technologies in accordance with European legislation requirements. The work analyzes the characteristics of pollutants in pulp and paper wastewater, including high content of organic substances, lignin, cellulose, toxic chemicals, and increased biochemical oxygen demand. Traditional treatment methods (mechanical, chemical, biological) and modern tertiary treatment technologies, including ozonation, membrane filtration, activated carbon adsorption, and combined hybrid systems are considered. A comparative analysis of the effectiveness of different technological treatment schemes is conducted, taking into account economic and environmental indicators. Special attention is paid to the analysis of new European Union legislation, particularly the revised Directive 2024/3019 on urban wastewater treatment, which establishes stricter requirements for the removal of nutrients and micropollutants. Key challenges for the Ukrainian pulp and paper industry are identified, including outdated wastewater treatment equipment, insufficient implementation of closed water supply systems, and the need for significant investment in modernization. Strategic directions for the development of water*

treatment systems at industry enterprises are proposed, including phased implementation of best available techniques, creation of treated wastewater reuse systems, and achievement of energy neutrality of treatment plants in accordance with European standards. The research results can be used to develop a national strategy for modernizing treatment facilities of pulp and paper enterprises and implementing relevant European legislation in the process of preparing Ukraine for accession to the European Union.

Keywords: *pulp and paper industry, wastewater treatment, tertiary treatment, ozonation, membrane technologies, European environmental legislation, best available techniques.*

Постановка проблеми.

Целюлозно-паперова промисловість є однією з найбільш водоемних галузей світової економіки та створює значне навантаження на водні екосистеми через утворення великих обсягів забруднених стічних вод. За даними міжнародних досліджень, на виробництво однієї тонни паперу витрачається від 40 до 80 м³ води, що зумовлює формування відповідних обсягів стічних вод із складом забруднювачів, які становлять загрозу для навколишнього середовища та здоров'я населення [1].

В Україні целюлозно-паперова промисловість (ЦПП) налічує близько 100 підприємств, проте розвинена недостатньо і не задовольняє потреб економіки та населення [2]. Більшість підприємств галузі експлуатують фізично та морально застаріле обладнання та очисні споруди, які не забезпечують належного рівня очищення стічних вод відповідно до сучасних екологічних вимог [3]. За результатами моніторингу водних об'єктів України, значна кількість річок

мають порушення за хімічними показниками [4]. Саме стоки ЦПП суттєво забруднюють водне середовище й важко доводяться до нормативів, тому їхній внесок у загальне промислове забруднення об'єктивно великий [5].

В контексті євроінтеграції України та підготовки до вступу в Європейський Союз актуальності набуває проблема гармонізації національного екологічного законодавства з європейськими нормами та імплементації найкращих доступних технологій (НДТ) очищення стічних вод. Новий перегляд Директиви ЄС про очищення міських стічних вод (Директива 2024/3019), прийнятий у листопаді 2024 року, встановлює ще жорсткіші вимоги до якості очищених стічних вод, включаючи необхідність видалення мікрозабруднювачів та досягнення енергетичної нейтральності очисних споруд до 2045 року [6].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо модернізації систем очищення стічних вод на підприємствах целюлозно-паперової промисловості України для досягнення відповідності європейським екологічним стандартам та забезпечення сталого розвитку галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика очищення стічних вод целюлозно-паперової промисловості є предметом активних наукових досліджень у світі. За результатами комплексного огляду проблем очищення стічних вод ЦПП встановлено, ця галузь продовжує генерувати значні обсяги стічних вод, характер забруднення яких залежить від типу сировини, технологічних процесів та кінцевої продукції [1]. Автори наголошують на важливості сталого використання та безпечної обробки стічних вод для зменшення екологічного навантаження та підвищення ефективності використання ресурсів.

Сучасні дослідження фокусуються на розробці та впровадженні передових методів очищення стічних вод. За результатами досліджень доведено високу ефективність послідовного застосування озонування та біологічного очищення для деструкції токсичних органічних сполук у стічних водах ЦПП [7]. Озонування як стадія попередньої обробки дозволяє трансформувати вихідні забруднювачі у менш токсичні сполуки з низькою молекулярною масою, ефективно руйнує лігнін та фенольні сполуки після чого стоки стають менш токсичними, а Подальше біологічне очищення забезпечує мінералізацію 80–90% для ЦПП-стоків [8].

Порівняння різних методів, таких як коагуляція-флокуляція, озонування, комбінація озонування з гранульованим активованим вугіллям (O₃+GAC) та мембранна система ультрафільтрації зі зворотним осмосом (UF+RO), для очищення стічних вод ЦПП довело, що комбінація O₃+GAC є найбільш привабливою з екологічної та економічної точок зору, особливо при повторному використанні очищених стічних вод [9].

Важливий внесок у розуміння специфіки очищення стічних вод целюлозно-паперової промисловості зробили дослідники, які вивчали інноваційні біологічні методи. Зокрема, застосування мембранних біореакторів (MBR) та реакторів з рухомим біоплівковим завантаженням (MBBR) демонструє високу ефективність у видаленні органічних забруднювачів та створює можливості для енергетичного відновлення та рециркуляції води [10].

Однак, попри наявність численних наукових досліджень світового рівня, в Україні бракує комплексних праць, які б аналізували стан очищення стічних вод целюлозно-паперової промисловості з урахуванням специфіки вітчизняних підприємств та

викликів євроінтеграції. Недостатньо висвітленими залишаються питання економічної доцільності впровадження сучасних технологій очищення в умовах обмежених фінансових ресурсів та необхідності поетапної модернізації виробничих потужностей.

Визначення цілей статті. Метою статті є аналіз сучасного стану систем очищення стічних вод на підприємствах целюлозно-паперової промисловості України, оцінка їх відповідності європейським екологічним стандартам та визначення пріоритетних напрямів модернізації в контексті підготовки до вступу України в Європейський Союз.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. Проаналізувати характеристики забруднювачів стічних вод целюлозно-паперових підприємств та їх вплив на водні екосистеми.

2. Дослідити традиційні та сучасні технології очищення стічних вод, що застосовуються у світовій практиці.

3. Оцінити стан впровадження систем очищення стічних вод на підприємствах целюлозно-паперової промисловості України.

4. Проаналізувати вимоги нового екологічного законодавства ЄС до очищення стічних вод.

5. Визначити стратегічні напрями вдосконалення систем водоочищення для досягнення відповідності європейським стандартам.

Виклад основного матеріалу дослідження

Стічні води целюлозно-паперових підприємств характеризуються складним та різноманітним складом забруднювачів, що визначається типом використовуваної сировини, специфікою технологічних процесів, видом кінцевої продукції та режимом водокористування.

Стічні води ЦПП характеризуються складним багатоконпонентним складом забруднювачів (рис. 1).

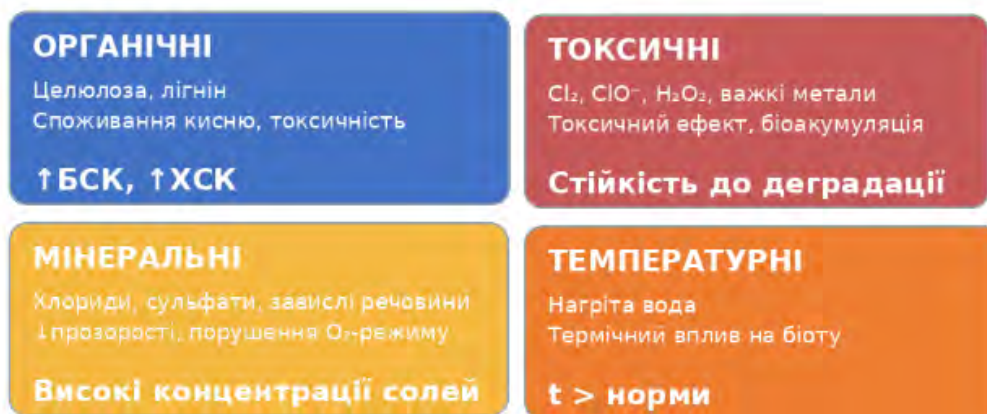


Рис. 1. Характеристика основних забруднювачів стічних вод целюлозно-паперових підприємств

Джерело: розробка автора

До основних категорій забруднювачів належать органічні речовини, представлені целюлозою, лігніном та їх похідними. Ці сполуки є причиною підвищеного біохімічного споживання кисню (БСК) та хімічного споживання кисню (ХСК) у стічних водах [5]. Лігнін та його похідні надають

стічним водам характерного коричневого забарвлення та специфічного запаху, а також чинять токсичний вплив на водні організми.

Токсичні речовини у складі стічних вод представлені хімічними реагентами, що застосовуються у виробництві: хлор, гіпохлорити,

пероксид водню, сполуки важких металів [11]. Особливу небезпеку становлять хлорорганічні сполуки, що утворюються при відбілюванні целюлози з використанням хлорвмісних реагентів. Ці речовини характеризуються високою стійкістю до біологічної деструкції та здатністю до біоаккумуляції у водних екосистемах [7].

Мінеральне забруднення стічних вод включає підвищений вміст солей (хлориди, сульфати), що порушує сольовий баланс водойм-приймачів. Високі концентрації завислих речовин (наповнювачі, волокна, барвники) спричиняють зниження прозорості води

та порушення кисневого режиму через утруднення процесів фотосинтезу та реаерації. Температурне забруднення також є характерним для ЦПП, оскільки багато технологічних процесів потребують нагрівання води, яка потім скидається у водойми з підвищеною температурою, що негативно впливає на гідробіоти [1].

Традиційні методи очищення стічних вод

Традиційна схема очищення стічних вод целюлозно-паперових підприємств включає три основні стадії: механічне, фізико-хімічне та біологічне очищення (рис. 2).



Рис. 2. Основні стадії очищення стічних вод целюлозно-паперових підприємств та їх ефективність

Джерело: розробка автора

Механічне очищення передбачає видалення завислих речовин великого розміру та волокнистих включень шляхом процідження через решітки та відстоювання у первинних відстійниках. Ця стадія дозволяє вилучити до 60-70% завислих речовин та зменшити навантаження на наступні ступені очищення.

Фізико-хімічне очищення включає процеси коагуляції та флокуляції для видалення колоїдних та дрібнодисперсних забруднювачів. Застосування коагулянтів (сульфат алюмінію, хлорид заліза) та флокулянтів (синтетичні полімери) дозволяє

агрегувати дрібні частинки у великі флокули, які легко осідають у вторинних відстійниках. Ефективність видалення завислих речовин на цій стадії може сягати 85-95%.

Біологічне очищення є основною стадією деструкції органічних забруднювачів. Найпоширенішими спорудами біологічного очищення є аеротенки з системою активного мулу. Колонія мікроорганізмів активного мулу здійснює окиснення органічних речовин у присутності кисню, який подається системою аерації. Ефективність видалення БСК₅ у правильно експлуатованих аеротенках досягає 85-

95% [10]. Однак традиційні біологічні методи мають обмежену ефективність щодо видалення стійких органічних сполук, лігніну та хлорорганічних речовин.

Для досягнення високого ступеня очищення стічних вод ЦПП та відповідності жорстким екологічним вимогам необхідне застосування третинного (глибокого) очищення. (рис. 3).



Рис. 3. Сучасні технології третинного очищення стічних вод ЦПП

Джерело: розробка автора

Озонування є одним з найефективніших методів деструкції стійких органічних сполук та знебарвлення стічних вод. Озон володіє високим окисно-відновним потенціалом (2,07 В) та здатний руйнувати складні молекулярні структури лігніну та його похідних. Встановлено, що попереднє озонування стічних вод протягом 30-60 хвилин дозволяє трансформувати токсичні органічні сполуки у низькомолекулярні органічні кислоти, які легко піддаються подальшій біологічній деструкції [7].

Комбінована система озонування з адсорбцією на гранульованому активованому вугіллі (O₃+GAC) демонструє найвищу ефективність серед досліджених технологій третинного очищення. Ця система O₃+GAC має найкращі показники як з екологічної, так і з економічної точки зору [9]. Озонування забезпечує окиснення та деструкцію органічних сполук, а наступна адсорбція на активованому вугіллі видаляє залишкові забруднювачі та продукти неповного окиснення. Така комбінація дозволяє досягти ступеня видалення ХСК до 90-95% та забезпечити високу якість

очищених стічних вод, придатних для повторного використання у виробничих процесах [12].

Мембранні технології (ультрафільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос) забезпечують високий ступінь очищення завдяки бар'єрному механізму розділення. Система ультрафільтрації зі зворотним осмосом (UF+RO) здатна видалити практично всі забруднювачі, включаючи розчинені мінеральні солі, та забезпечувати якість очищеної води на рівні технічної або навіть питної води. Однак високе енергоспоживання мембранних систем (пов'язане з необхідністю створення високого тиску) обмежує їх широке застосування [9].

Інноваційні біологічні системи, зокрема мембранні біореактори (MBR) та реактори з рухомих біоплівковим завантаженням (MBBR), дозволяють інтенсифікувати процеси біологічного очищення та досягти більш високих показників видалення забруднювачів при менших габаритах споруд. У MBR біологічне очищення поєднується з мембранною фільтрацією, що дозволяє

повністю утримувати активний мул у реакторі та досягти його високої концентрації (8-12 г/л проти 3-4 г/л у традиційних аеротенках), забезпечуючи тим самим більш ефективне окиснення органічних речовин [10].

В Україні ЦПП представлена близько 100 підприємствами різної потужності, серед яких найбільшими є Жидачівський целюлозно-паперовий комбінат (Львівська область), Київський картонно-паперовий комбінат в Обухові (частка у випуску продукції галузі становить близько 30%), Херсонський целюлозно-паперовий комбінат, Корюківська фабрика технічних паперів (Чернігівська область). Основні центри целюлозно-паперової промисловості розташовані в Житомирській, Хмельницькій, Львівській, Закарпатській, Київській та Чернігівській областях.

Технічний стан очисних споруд на підприємствах ЦПП України залишається незадовільним. Значна частина обладнання експлуатується понад 30-40 років без капітальної модернізації, що унеможливує досягнення сучасних нормативів якості очищення стічних вод [3]. Результатом є хронічні порушення екологічних вимог та негативний вплив на стан водних екосистем.

Однією з ключових проблем є недостатнє впровадження замкнених та оборотних систем водопостачання на підприємствах галузі. Більшість підприємств використовують пряме водокористування, що призводить до нераціонального використання водних ресурсів та утворення великих обсягів стічних вод. Впровадження систем повторного використання очищених стічних вод могло б суттєво зменшити водоспоживання та скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти [13].

Європейський Союз постійно посилює вимоги до якості очищених стічних вод та захисту водних ресурсів. У листопаді 2024 року Європейським Парламентом та Радою ЄС було прийнято переглянуту Директиву 2024/3019 про очищення міських стічних вод, яка набуває

чинності з 1 серпня 2027 року [6]. Ця Директива встановлює значно жорсткіші вимоги порівняно з попередньою версією 1991 року та передбачає комплексний підхід до управління стічними водами в рамках концепції Європейського зеленого курсу та плану дій щодо нульового забруднення.

Ключові положення нової Директиви включають розширення сфери застосування на агломерації від 1000 еквівалентів жителів (раніше було 2000), що означає необхідність будівництва або модернізації очисних споруд у менших населених пунктах. Встановлено обов'язок впровадження третинного очищення для видалення біогенних речовин (азоту та фосфору) до 2039 року для всіх очисних споруд потужністю понад 150 000 еквівалентів жителів, а до 2045 року – для споруд понад 10 000 еквівалентів жителів у зонах, чутливих до евтрофікації. Це особливо важливо для запобігання евтрофікації водойм, яка є серйозною екологічною проблемою для багатьох водних об'єктів України [6].

Принципово новою вимогою є необхідність впровадження систем глибокого очищення для видалення мікрозабруднювачів, зокрема залишків фармацевтичних препаратів, засобів особистої гігієни, пестицидів. Згідно з принципом «забруднювач платить», виробники продукції, що призводить до забруднення стічних вод мікрополіюантами (фармацевтична та косметична промисловість), мають покривати щонайменше 80% витрат на додаткове очищення через систему розширеної відповідальності виробника [6]. Важливою вимогою є сприяння повторному використанню очищених стічних вод, особливо у регіонах з дефіцитом водних ресурсів. Директива доповнює Регламент ЄС про повторне використання води, встановлюючи вимоги до якості та безпеки води для різних цілей використання, насамперед для зрошення в сільському господарстві. Це дозволяє зменшити забір свіжої води та сприяє циркулярній економіці [14].

Для досягнення відповідності вимогам європейського законодавства та забезпечення сталого розвитку целюлозно-паперової промисловості України необхідна комплексна модернізація систем водоочищення на підприємствах галузі. Стратегія модернізації повинна базуватися на концепції найкращих доступних технологій (НДТ) та передбачати поетапне впровадження сучасних методів очищення з урахуванням економічних можливостей підприємств.

Першочерговим завданням є модернізація існуючих споруд механічного та біологічного очищення для забезпечення їх стабільної та ефективної роботи. Це включає заміну зношеного обладнання, впровадження автоматизованих систем контролю та управління технологічними процесами, оптимізацію режимів роботи аеротенків та відстійників. Такі заходи дозволять підвищити ефективність видалення забруднювачів на 15-25% без значних капітальних вкладень.

На другому етапі необхідне впровадження систем третинного очищення для видалення стійких органічних сполук, лігніну, біогенних речовин. З урахуванням результатів міжнародних досліджень, найбільш доцільним є застосування комбінованої системи озонування з адсорбцією на гранульованому активованому вугіллі (O_3+GAC) [9]. Альтернативним варіантом для невеликих підприємств може бути застосування систем на основі мембранних біореакторів, які компактні та забезпечують стабільно високу якість очищених стічних вод.

Важливим напрямом є впровадження замкнених та оборотних систем водопостачання з максимальним повторним використанням очищених стічних вод у виробничих процесах. Це дозволить суттєво зменшити споживання свіжої води (на 40-60%) та обсяги скидів у водні об'єкти. Для технічних потреб – охолодження обладнання, підготовки сировини – може застосовуватись вода після вторинного або третинного

очищення, що зменшує навантаження на природні водойми [15].

Досягнення енергетичної нейтральності очисних споруд передбачає комплекс заходів з енергозбереження та виробництва енергії з відновлюваних джерел, зокрема впровадження енергоефективного обладнання, оптимізацію режимів аерації, утилізацію біогазу з метантенків для виробництва електроенергії та тепла, встановлення сонячних панелей. Згідно з досвідом європейських країн, такі заходи дозволяють зменшити споживання електроенергії на 30-50% та досягти енергетичної незалежності очисних споруд [16].

Фінансування модернізації очисних споруд може здійснюватися за рахунок різних джерел: власних коштів підприємств, кредитів міжнародних фінансових організацій, грантів у рамках програм міжнародної технічної допомоги, коштів державного та місцевих бюджетів. В контексті підготовки до вступу в ЄС Україна може розраховувати на фінансову підтримку в рамках інструменту Ukraine Facility обсягом 50 млрд євро, частина якого може бути спрямована на модернізацію екологічної інфраструктури, включаючи очисні споруди [17].

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження дозволяє зробити наступні висновки щодо проблем та перспектив очищення стічних вод целюлозно-паперової промисловості України в контексті євроінтеграції:

1. Стічні води целюлозно-паперових підприємств характеризуються складним багатокомпонентним складом забруднювачів, включаючи високі концентрації органічних речовин, лігніну, целюлози, токсичних хімікатів, що зумовлює необхідність застосування комплексних систем очищення з механічними, фізико-хімічними, біологічними та третинними методами.

2. Аналіз світового досвіду свідчить про високу ефективність сучасних технологій третинного очищення, зокрема

комбінованої системи озонування з адсорбцією на гранульованому активованому вугіллі (О₃+GAC), яка забезпечує найкращі показники з екологічної та економічної точок зору при можливості повторного використання очищених стічних вод.

3. Стан систем водоочищення на підприємствах целюлозно-паперової промисловості України характеризується високим ступенем зносу обладнання, недостатньою ефективністю очищення та систематичним перевищенням нормативів скидів забруднюючих речовин, що вимагає термінової модернізації очисних споруд.

4. Нова Директива ЄС 2024/3019 про очищення міських стічних вод встановлює значно жорсткіші вимоги до якості очищених стічних вод, включаючи необхідність третинного очищення для видалення біогенних речовин та мікрозабруднювачів, повторного використання води та досягнення енергетичної нейтральності очисних споруд до 2045 року.

5. Стратегія модернізації систем водоочищення на підприємствах галузі повинна передбачати поетапне впровадження найкращих доступних технологій, включаючи реконструкцію існуючих споруд, впровадження третинного очищення, створення замкнених систем водопостачання з повторним використанням очищених стічних вод та досягнення енергетичної нейтральності.

Перспективами подальших досліджень є розробка детальних технологічних рішень та економічних моделей впровадження сучасних систем водоочищення для різних типів целюлозно-паперових підприємств з урахуванням їх потужності, асортименту продукції та фінансових можливостей; дослідження можливостей використання вітчизняних матеріалів та обладнання для зменшення капітальних витрат на модернізацію; розробка нормативно-методичного забезпечення імплементації вимог європейського законодавства у сфері водоохорони; оцінка екологічних та

економічних ефектів від впровадження систем повторного використання очищених стічних вод.

Список літератури

1. Liang X., Xu Y., Yin L., Wang R., Li P., Wang J., Liu K. Sustainable Utilization of Pulp and Paper Wastewater. *Water*. 2023. Vol. 15, No. 23. P. 4135. <https://doi.org/10.3390/w15234135/>

2. Kuzo N. Ye., Kosar N. S., Tarasenko M. V. Development Trends and Competitive Market Structure of Pulp and Paper Products in Ukraine. *Sustainable Management of Environmental and Urban Systems (SMEU)*. 2022. Vol. 4, No. 1. P. 115–126. <https://doi.org/10.23939/smeu2022.01.115>.

3. Кузнєцова К. О., Дергачова Г. М., Байло О. О. Стратегія розвитку міжнародної діяльності підприємства целюлозно-паперової галузі України. *Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. 2022. № 21. <https://doi.org/10.20535/2307-5651.21.2022.254844>.

4. Dzhumelia V., Dzhumelia E. Hydrochemical analysis of surface water parameters dynamics in the Rika and Tereblia River (Ukraine). *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, No. 1. P. 26–35. <https://doi.org/10.23939/ep2025.01.026>.

5. Галиш В., Радовенчик Я., Гомеля М., Радовенчик В. Вивчення процесів очищення підсіткових вод для повторного використання в целюлозно-паперовій промисловості. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2022. № 5 (313). С. 128–133. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-313-5-128-133>.

6. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast). *Official Journal of the European Union*. 2024. L 2024/3019.

7. Amacosta J., Poznyak T., Siles S., Chairez I. Sequential Treatment by Ozonation and Biodegradation of Pulp and Paper Industry Wastewater to Eliminate Organic Contaminants. *Toxics*. 2024. Vol. 12, No. 2.

- P. 138. <https://doi.org/10.3390/toxics12020138>.
8. Zhou C., Zhang J., Cai Y., Xiong J. Catalytic Ozonation for Pulp and Paper Mill Wastewater Treatment: COD Reduction and Organic Matter Degradation Mechanism. *Separations*. 2023. Vol. 10, No. 3. P. 148. <https://doi.org/10.3390/separations10030148>.
9. Mainardis M., Ferrara C., Cantoni B., Di Marcantonio C., De Feo G., Goi D. How to choose the best tertiary treatment for pulp and paper wastewater? Life cycle assessment and economic analysis as guidance tools. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 906. P. 167598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167598>
10. Kamali M., Khodaparast Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2015. Vol. 114. P. 326-342. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.005>.
11. Gupta G. K., Sailwal M., Shukla P. Sustainable Nanotechnology Based Techniques for Mitigating the Pollutants from Pulp and Paper Industry. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9, No. 49. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06022>.
12. Leontieff D. A., Ikehata K., Inanaga Y., Furukawa S. Ozone for Industrial Wastewater Treatment: Recent Advances and Sector Applications. *Processes*. 2025. Vol. 13, No. 8. P. 2331. <https://doi.org/10.3390/pr13082331>.
13. Treatment of wastewater in the paper and pulp industry / Condorchem Envitech. Condorchem Enviro Solutions. 2025. March 17. URL: <https://condorchem.com/en/blog/treatment-of-wastewater-from-paper-and-pulp-industry/> (дата звернення: 13.11.2025).
14. Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. *Official Journal of the European Union*. 2020. L 177. P. 32–55.
15. Data Horizon Research. Global Water Reuse In Pulp/Paper Industry - Market Size, Growth, Share, & Analysis Report - 2023. 2024. URL: <https://datahorizonresearch.com/global-water-reuse-in-pulppaper-industry--market-48560> (дата звернення: 13.11.2025).
16. Jaruga M., Królikowska J., Rybicki S. M. Energy Efficiency Assessment of Wastewater Treatment Plants: Analyzing Energy Consumption and Biogas Recovery Potential. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 19. P. 5277. <https://doi.org/10.3390/en18195277>.
17. Ukraine Facility. Enlargement and Eastern Neighbourhood. European Commission. 2024. URL: https://enlargement.ec.europa.eu/funding-technical-assistance/ukraine-facility_en (дата звернення: 13.11.2025).

References

1. Liang, X., Xu, Y., Yin, L., Wang, R., Li, P., Wang, J., & Liu, K. (2023). Sustainable Utilization of Pulp and Paper Wastewater. *Water*, 15(23), 4135. <https://doi.org/10.3390/w15234135>
2. Kuzo, N. Ye., Kosar, N. S., & Tarasenko, M. V. (2022). Development Trends and Competitive Market Structure of Pulp and Paper Products in Ukraine. *Sustainable Management of Environmental and Urban Systems (SMEU)*, 4(1), 115–126. <https://doi.org/10.23939/smeu2022.01.115>
3. Kuznietsova, K. O., Derhachova, H. M., & Bailo, O. O. (2022). Stratehiia rozvytku mizhnarodnoi diialnosti pidpriemstva tseliulozno-paperovoi haluzi Ukrainy [Strategy for the development of international activities of the pulp and paper industry enterprise of Ukraine]. *Ekonomichniy visnyk NTUU "Kyivskyi politekhnichnyi instytut" – Economic Bulletin of NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, 21. <https://doi.org/10.20535/2307-5651.21.2022.254844>
4. Dzhumelia, V., & Dzhumelia, E. (2025). Hydrochemical analysis of surface water parameters dynamics in the Rika and Tereblia River (Ukraine). *Journal Environmental Problems*, 10(1), 26–35. <https://doi.org/10.23939/ep2025.01.026>
5. Halysh, V., Radovenchyk, Ya., Homelia, M., & Radovenchyk, V. (2022). Vyvchennia protsesiv ochyshchennia pidsitkovykh vod dlia povtornoho

- vykorystannia v tseliulozno-paperovii promyslovosti [Study of processes for cleaning white water for reuse in the pulp and paper industry]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 5(313), 128–133. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-313-5-128-133>
6. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast). (2024). *Official Journal of the European Union*, L 2024/3019.
7. Amacosta, J., Poznyak, T., Siles, S., & Chairez, I. (2024). Sequential Treatment by Ozonation and Biodegradation of Pulp and Paper Industry Wastewater to Eliminate Organic Contaminants. *Toxics*, 12(2), 138. <https://doi.org/10.3390/toxics12020138>
8. Zhou, C., Zhang, J., Cai, Y., & Xiong, J. (2023). Catalytic Ozonation for Pulp and Paper Mill Wastewater Treatment: COD Reduction and Organic Matter Degradation Mechanism. *Separations*, 10(3), 148. <https://doi.org/10.3390/separations10030148>
9. Mainardis, M., Ferrara, C., Cantoni, B., Di Marcantonio, C., De Feo, G., & Goi, D. (2024). How to choose the best tertiary treatment for pulp and paper wastewater? Life cycle assessment and economic analysis as guidance tools. *Science of The Total Environment*, 906, 167598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167598>
10. Kamali, M., & Khodaparast, Z. (2015). Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 114, 326–342. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.005>
11. Gupta, G. K., Sailwal, M., & Shukla, P. (2024). Sustainable Nanotechnology Based Techniques for Mitigating the Pollutants from Pulp and Paper Industry. *ACS Omega*, 9(49). <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06022>
12. Leontieff, D. A., Ikehata, K., Inanaga, Y., & Furukawa, S. (2025). Ozone for Industrial Wastewater Treatment: Recent Advances and Sector Applications. *Processes*, 13(8), 2331. <https://doi.org/10.3390/pr13082331>
13. Condorchem Envitech. (2025, March 17). Treatment of wastewater in the paper and pulp industry. Condorchem Enviro Solutions. Retrieved November 13, 2025, from <https://condorchem.com/en/blog/treatment-of-wastewater-from-paper-and-pulp-industry/>
14. Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. (2020). *Official Journal of the European Union*, L 177, 32–55.
15. Data Horizon Research. (2024). Global Water Reuse In Pulp/Paper Industry - Market Size, Growth, Share, & Analysis Report - 2033. Retrieved November 13, 2025, from <https://datahorizonresearch.com/global-water-reuse-in-pulppaper-industry--market-48560>
16. Jaruga, M., Królikowska, J., & Rybicki, S. M. (2025). Energy Efficiency Assessment of Wastewater Treatment Plants: Analyzing Energy Consumption and Biogas Recovery Potential. *Energies*, 18(19), 5277. <https://doi.org/10.3390/en18195277>
17. European Commission. (2024). Ukraine Facility. Enlargement and Eastern Neighbourhood. Retrieved November 13, 2025, from https://enlargement.ec.europa.eu/funding-technical-assistance/ukraine-facility_en
-