

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут нафтогазової інженерії

Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

Боднар Уляна Олегівна

УДК 628.3:628.336.3

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Водоочищення стічних вод комунального об'єкта та утилізація мулових

відходів

Технології захисту навколишнього середовища

(назва освітньої програми)

183 Технології захисту навколишнього середовища

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня _____ Боднар Уляна Олегівна

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Челядин Любомир Іванович, д. т. н., професор

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

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

Івано-Франківськ

2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут нафтогазової інженерії

Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

ОПП Технології захисту навколишнього середовища

Затверджую

Зав. кафедри ТЗБП

Галина Грицуляк _____

(ім'я та прізвище) (підпис)

“ ____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Боднар Уляна Олегівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Водоочищення стічних вод комунального об'єкта та утилізація мулових відходів»

керівник роботи Челядин Любомир Іванович, д. т. н., професор

(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання керівника)

затверджені наказом університету від “ ____ ” _____ 20__ р. №

2. Термін здачі закінченої роботи “ ____ ” _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

Аналіз існуючих методів очищення комунальних стічних вод, дослідження складу та властивостей шламів, що утворюються у процесі водоочищення, та розробка рекомендацій щодо їх екологічно безпечної утилізації або повторного використання.

1. Аналіз джерел формування стічних вод на комунальному об'єкті.
2. Визначення кількісних та якісних характеристик стічних вод.
3. Обґрунтування вибору технологічної схеми очищення.

4. Розрахунок основних етапів технологічного процесу очищення (механічне, біологічне, доочищення).
5. Обґрунтування методів обробки та утилізації мулових відходів.
6. Екологічна та санітарно-гігієнічна оцінка ефективності обраної технології.
7. Розрахунок екологічно-економічної ефективності запропонованих заходів.
8. Оформлення графічної частини (технологічна схема, діаграми, плани).
9. Орієнтовний перелік текстового та графічного матеріалу в презентації _____

Календарний план виконання бакалаврської роботи

№	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	<u>ВСТУП</u>		
2	<u>РОЗДІЛ 1.</u> Аналіз стану водоочищення та утилізації мулових відходів		
3	<u>РОЗДІЛ 2.</u> Характеристика комунального об'єкта та аналіз існуючої системи очищення		
4	<u>РОЗДІЛ 3.</u> Методи і утилізація та переробка мулових відходів		
5	<u>РОЗДІЛ 4</u> Розрахунок екологічно-економічної ефективності запропонованих заходів		
6	ВИСНОВКИ ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА ДОДАТКИ		

Студентка Боднар Уляна Олегівна _____

(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник Челядин Любомир Іванович, д. т. н., професор

(підпис) (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота присвячена аналізу технологій очищення стічних вод комунального об'єкта та розробці ефективних рішень щодо утилізації мулових відходів.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю забезпечення екологічної безпеки водних об'єктів та впровадження ресурсозберігаючих технологій поводження з відходами.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан водоочищення та методи утилізації мулових осадів. Розглянуто наявні технологічні підходи, їх переваги, недоліки та ступінь впровадження в Україні.

У другому розділі наведена характеристика комунального об'єкта – очисних споруд, на яких базується дослідження. Проведено оцінку складу та обсягів стічних вод, а також аналіз існуючої системи очищення на предмет її ефективності та відповідності нормативним вимогам.

Третій розділ присвячено аналізу способів утилізації та переробки мулових відходів. Оцінено можливості застосування методів компостування, анаеробного зброджування, термічної обробки та агротехнічного використання. Обґрунтовано вибір оптимального способу з урахуванням екологічних та економічних чинників.

У четвертому розділі здійснено розрахунок екологічно-економічної ефективності запропонованих заходів. Визначено потенційне зменшення впливу на довкілля, скорочення витрат на експлуатацію споруд та можливості вторинного використання продуктів утилізації.

У роботі наведено висновки, список використаних літературних джерел та додатки, що включають технологічні схеми, діаграми й розрахункові таблиці.

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації процесів водоочищення та утилізації відходів на комунальних підприємствах водопостачання та водовідведення.

Метою бакалаврської роботи є аналіз існуючих технологій очищення стічних вод на комунальному об'єкті, вибір та обґрунтування ефективної технологічної схеми водоочищення з урахуванням нормативних вимог до якості скиду, а також розробка оптимального способу обробки та утилізації мулових відходів з екологічної та економічної точок зору.

Ключові слова: стічні води, комунальні очисні споруди, біологічне очищення, мулові відходи, утилізація, водоочищення, технологічна схема, екологічна безпека, санітарні норми, водні ресурси, очищення стічних вод, шламові технології.

ABSTRACT

The bachelor's thesis is devoted to the analysis of wastewater treatment technologies for a municipal facility and the development of effective solutions for the utilization of sludge waste. The relevance of the study is driven by the need to ensure the environmental safety of water bodies and the introduction of resource-saving waste management technologies.

The first section analyzes the current state of water treatment and methods of sludge utilization. The existing technological approaches, their advantages, disadvantages, and the degree of implementation in Ukraine are considered.

The second section describes the municipal facility, i.e., the wastewater treatment plant, on which the study is based. The composition and volumes of wastewater are assessed, and the existing treatment system is analyzed for its efficiency and compliance with regulatory requirements.

The third section is devoted to the analysis of methods of utilization and processing of sludge waste. The possibilities of applying composting, anaerobic digestion, heat treatment, and agrotechnical use are assessed. The choice of the optimal method is substantiated, taking into account environmental and economic factors.

The fourth section calculates the environmental and economic efficiency of the proposed measures. The potential reduction of environmental impact, reducing the cost of operation of structures and the possibility of secondary use of recycling products have been determined.

The work provides conclusions, a list of used literary sources and annexes, including technological schemes, diagrams and settlement tables.

The results of the study can be used to optimize the processes of water purification and disposal of waste at the utility companies of water supply and drainage.

The purpose of bachelor's work is to analyze existing wastewater treatment technologies on a municipal facility, to choose and substantiate an effective technological scheme of water purification, taking into account the regulatory

requirements for the quality of discharge, as well as the development of the optimal method of processing and disposal of silt waste from environmental and economic.

Keywords: wastewater, communal treatment facilities, biological treatment, silt waste, disposal, water cleaning, technological scheme, environmental safety, sanitary standards, water resources, wastewater treatment, sludge technologies.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 Аналіз стану водоочищення та утилізації мулових відходів.....	12
1.1. Загальна характеристика, основні джерела та склад забруднень стічних вод комунального походження.....	12
1.2. Системи очищення стічних вод в Україні та світі.....	15
1.3. Проблеми та виклики утилізації осадів на очисних спорудах.....	23
1.4. Нормативно-правова база водоочищення та поводження з мулом.....	27
РОЗДІЛ 2. Характеристика комунального об'єкта і системи очищення стічних вод.....	3
2.1. Загальна характеристика та опис технологічної схеми очищення	39
2.2. Аналіз ефективності діючої системи очищення.....	39
2.3. Методи контролю якості очищених вод: комплексний підхід.....	41
РОЗДІЛ 3. Утилізація та переробка мулових відходів.....	53
3.1. Сучасні технології переробки комунальних шламів водоочищення	
3.2 Дослідження утилізації шламів водоочищення комунального об'єкта	
. РОЗДІЛ 4	
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	69

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку міст та зростання антропогенного навантаження на довкілля питання раціонального використання водних ресурсів та ефективного очищення стічних вод набуває особливої актуальності. Місто Івано-Франківськ, як обласний центр з розвиненою промисловістю, житловою та соціальною інфраструктурою, щодня генерує значні об'єми стічних вод, які потребують якісного очищення перед скиданням у природні водні об'єкти.

Актуальність теми. Стан водних ресурсів України, зокрема в межах міста Івано-Франківськ, зазнає постійного антропогенного впливу, що зумовлює необхідність впровадження ефективних заходів з охорони довкілля. Значна частка забруднення поверхневих вод припадає на недостатньо очищені комунальні стічні води, які містять біогенні елементи, завислі речовини, важкі метали та органічні забруднювачі. Наявні очисні споруди, що експлуатуються на території Івано-Франківська, часто функціонують за застарілими технологічними схемами, мають високий рівень енерговитрат та не завжди забезпечують відповідність якості очищеної води чинним нормативам.

Особливої уваги потребує проблема поводження з муловими відходами, які утворюються в процесі очищення. Утилізація осаду, за умови неналежної організації, може становити серйозну екологічну загрозу — через забруднення ґрунтів, водоносних горизонтів та повітряного середовища. З іншого боку, за умови впровадження сучасних технологій, мулові відходи можуть стати джерелом вторинних ресурсів, зокрема біогазу, компосту або технічного ґрунту.

У контексті євроінтеграційних процесів, вимог сталого розвитку та гармонізації екологічного законодавства з європейськими стандартами, питання модернізації комунальних очисних споруд і впровадження ефективних методів утилізації мулу є надзвичайно актуальними. Крім того, це сприяє підвищенню екологічної безпеки міста, поліпшенню стану навколишнього середовища та якості життя населення.

Таким чином, дослідження технологій водоочищення на прикладі міста Івано-Франківськ, а також обґрунтування доцільних способів утилізації мулових осадів є важливим та своєчасним завданням, що має як теоретичне, так і практичне значення.

Комунальне підприємство «Івано-Франківськводокотехпром» здійснює централізоване водопостачання та водовідведення, включаючи експлуатацію очисних споруд міста. Однак у процесі функціонування системи водоочищення виникають певні проблеми, пов'язані з застарілими технологіями, надмірними навантаженнями на окремі елементи очисного комплексу, високим рівнем енергоспоживання, а також накопиченням значної кількості мулових відходів, які потребують екологічно безпечної утилізації.

Метою даної бакалаврської роботи є аналіз існуючої системи очищення стічних вод у місті Івано-Франківськ, зокрема на очисних спорудах комунального підприємства, а також розробка та обґрунтування ефективних способів утилізації утворених мулових осадів з урахуванням сучасних екологічних вимог та економічної доцільності.

Об'єктом дослідження виступає система очищення стічних вод КП «Івано-Франківськводокотехпром», а *предметом* — технологічні процеси водоочищення та методи поводження з муловими залишками.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено такі основні *завдання*: проаналізувати сучасний стан систем очищення стічних вод і методів утилізації мулових відходів на комунальних об'єктах, зокрема в місті Івано-Франківськ; надати характеристику підприємства, що здійснює очищення стічних вод, та дослідити якісний і кількісний склад стоків, які надходять на очисні споруди; розглянути існуючу технологічну схему очищення та оцінити її ефективність відповідно до чинних екологічних норм і стандартів; дослідити сучасні методи поводження з муловими залишками та обґрунтувати доцільність вибору оптимального способу утилізації; здійснити розрахунки обсягів утворення мулу, його властивостей та впливу на навколишнє середовище; запропонувати шляхи підвищення ефективності водоочищення і утилізації осадів з урахуванням можливостей ресурсозбереження та

екологічної безпеки; а також оцінити економічну та екологічну ефективність впровадження рекомендованих технологічних рішень.

У роботі проаналізовано структуру стічних вод, досліджено ефективність існуючих очисних споруд, охарактеризовано проблематику поводження з осадами, здійснено підбір доцільних технологій їх утилізації та виконано оцінку екологічно-економічного ефекту від запропонованих заходів. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації очисних процесів у межах міста Івано-Франківськ та інших подібних комунальних систем.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ВОДООЧИЩЕННЯ ТА УТИЛІЗАЦІЇ МУЛОВИХ ВІДХОДІВ

1.1. Загальна характеристика, основні джерела та склад забруднень стічних вод комунального походження

Стічні води комунального походження являють собою складну багатокомпонентну систему, що формується внаслідок життєдіяльності населення у міських та сільських поселеннях. Ці води містять широкий спектр забруднювальних речовин органічного та неорганічного походження, які потрапляють до каналізаційної системи з житлових будинків, комунально-побутових підприємств, установ охорони здоров'я, освіти та громадського харчування [1,34].

Основними джерелами утворення комунальних стічних вод є господарсько-побутова діяльність населення, включаючи використання води для питних потреб, приготування їжі, особистої гігієни, прання, миття посуду та інших побутових цілей. До складу таких вод потрапляють продукти життєдіяльності людини, залишки їжі, миючі та дезінфікуючі засоби, а також атмосферні опади з урбанізованих територій [3, 14].

Комунальні стічні води характеризуються високим вмістом органічних речовин, представлених білками, жирами, вуглеводами та продуктами їх розкладання. Концентрація органічних забруднень зазвичай оцінюється за показниками біохімічного споживання кисню (БСК) та хімічного споживання кисню (ХСК). Типові значення БСК₅ для комунальних стічних вод становлять 200-400 мг/л, а ХСК - 400-800 мг/л [4, 7].

Комунальні стічні води мають каламутний сіро-жовтий колір та специфічний запах, який посилюється при тривалому зберіганні внаслідок процесів гниття. Температура таких вод зазвичай вища за температуру природних водойм та становить 12-20°C, що сприяє розвитку біохімічних процесів. Водневий показник (рН) коливається в межах 6,5-8,5, що відповідає слабколужному або нейтральному середовищу [8, 23].

Суспендовані речовини в комунальних стічних водах представлені органічними частинками різного розміру - від грубодисперсних включень до колоїдних систем. Концентрація завислих речовин може досягати 300-500 мг/л, при цьому значна частина має органічне походження та здатна до біологічного розкладання [9, 15].

Особливістю комунальних стічних вод є висока мікробіологічна забрудненість, обумовлена присутністю патогенних та умовно-патогенних мікроорганізмів. У складі мікрофлори присутні бактерії групи кишкової палички, ентерококи, сальмонели, віруси та інші збудники інфекційних захворювань. Загальна кількість мікроорганізмів може досягати 10^6 - 10^8 клітин на мілілітр, що створює епідеміологічну небезпеку та вимагає обов'язкового знезараження стічних вод перед їх скиданням [13, 22].

Комунальні стічні води містять значні кількості біогенних елементів - азоту та фосфору, які потрапляють до стоків у результаті життєдіяльності людини та використання синтетичних миючих засобів. Концентрації загального азоту зазвичай становлять 40-85 мг/л, а загального фосфору - 8-15 мг/л. Ці елементи можуть спричинити евтрофікацію водойм при скиданні недостатньо очищених стічних вод [11,31].

Незважаючи на переважно побутове походження, комунальні стічні води можуть містити токсичні речовини, включаючи важкі метали (свинець, кадмій, хром, цинк), залишки фармацевтичних препаратів, пестициди та інші ксенобіотики. Концентрації цих речовин зазвичай невисокі, але їх присутність може ускладнювати процеси біологічного очищення та вимагає спеціальних методів видалення [6, 29].

Розуміння загальних характеристик комунальних стічних вод є основою для розробки ефективних технологій їх очищення та забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів.

Стічні води містять різноманітні забруднення залежно від їх походження. Основними джерелами стічних вод є побутові води, що надходять з житлових будинків, офісів, готелів та містять органічні речовини з кухонь, ванних кімнат та туалетів. Промислові стічні води утворюються на

підприємствах різних галузей - хімічної, текстильної, харчової, металургійної промисловості, їх склад залежить від специфіки виробництва. Дощові та талі води змивають забруднення з вулиць, дахів, промислових майданчиків, несучи нафтопродукти, солі, сміття та інші речовини. Сільськогосподарські стоки містять добрива, пестициди, органічні відходи тваринництва.

Основні групи забруднень представлені завислими речовинами, які включають пісок, глину, органічні частинки, що каламутять воду і можуть осідати. Розчинені органічні речовини це білки, жири, вуглеводи, миючі засоби, які споживають кисень при розкладанні. Біогенні елементи представлені сполуками азоту та фосфору, що можуть спричиняти евтрофікацію водойм. Патогенні мікроорганізми включають бактерії, віруси, паразити, які становлять епідеміологічну небезпеку. Токсичні речовини представлені важкими металами, синтетичними органічними сполуками, які можуть накопичуватися в екосистемах. Солі та мінеральні речовини змінюють хімічний склад води та можуть порушувати природний баланс водойм [11,35].

Ефективна очистка стічних вод вимагає комплексного підходу, що враховує весь спектр забруднень та їх специфічні властивості. Різні типи забруднень потребують застосування відповідних методів очистки для забезпечення екологічної безпеки та відповідності нормативним вимогам.

Природні джерела забруднення існували задовго до появи людини і є невід'ємною частиною природних процесів на Землі. Хоча екосистеми частково адаптувалися до цих впливів протягом мільйонів років еволюції, вони все ще можуть становити значну загрозу для довкілля та людського здоров'я [1, 34].

Вулканічна діяльність є одним з найпотужніших природних джерел забруднення атмосфери. Під час виверження вулкани викидають у повітря величезні кількості сірчистого газу, попелу, вуглекислого газу та інших токсичних речовин. Наприклад, виверження вулкана Піннатубо у 1991 році призвело до глобального похолодання на 0,5°C протягом двох років через викид сірчаних аерозолів у стратосферу [18, 36].

Лісові пожежі щорічно спалюють мільйони гектарів лісів, випускаючи в атмосферу чадний газ, вуглекислий газ, оксиди азоту та безліч органічних сполук. Природні пожежі, спричинені блискавками або спонтанним займанням, є важливим фактором кругообігу вуглецю в природі, але також створюють серйозні проблеми для якості повітря на великих територіях.

Пилові бурі виникають у посушливих регіонах і переносять мільйони тонн дрібних частинок на тисячі кілометрів. Сахарський пил регулярно досягає Америки, впливаючи на якість повітря та кліматичні умови. Ці частинки можуть містити патогенні мікроорганізми, солі та інші хімічні сполуки [19, 37].

Розкладання органічних речовин у болотах, озерах та інших водоймах призводить до утворення метану, сірководню та інших газів. Метан є потужним парниковим газом, а сірководень токсичний для живих організмів. Цей процес особливо інтенсивний у тропічних регіонах з високою температурою та вологістю.

1.2. Системи очищення стічних вод в Україні та світі

Системи очищення стічних вод є невід'ємною частиною сучасної цивілізації та відіграють ключову роль у збереженні навколишнього середовища і забезпеченні санітарно-епідеміологічного благополуччя населення. З розвитком міст і промисловості питання ефективного очищення стічних вод стає все більш актуальним як для України, так і для всього світу. Перші системи водовідведення з'явилися ще в стародавніх цивілізаціях. Римська імперія славилася своїми акведуками та каналізаційними системами, а в стародавній Індії використовувалися складні системи дренажу. Однак сучасні методи очищення стічних вод почали розвиватися лише в XIX столітті після епідемій холери в європейських містах, коли стало зрозуміло, що забруднена вода є джерелом хвороб [22,39].

Перша станція біологічного очищення була побудована в Англії в 1914 році, і з тих пір технології постійно вдосконалювалися. У XX столітті розвиток

хімічної промисловості привів до появи нових методів фізико-хімічного очищення, а в ХХІ столітті акцент зміщується на енергоефективні та екологічно чисті технології.

Система водовідведення та очищення стічних вод в Україні сформувалася переважно в радянський період і сьогодні потребує кардинальної модернізації. За даними Державної служби статистики України, централізованими системами каналізації охоплено близько 65% міського населення, що значно нижче за європейські стандарти. Загальна довжина каналізаційних мереж в Україні становить понад 25 тисяч кілометрів, а кількість очисних споруд перевищує 3 тисячі об'єктів різної потужності. Однак більшість з них були введені в експлуатацію 30-50 років тому і не відповідають сучасним екологічним вимогам [13, 24, 32].

Українська система очищення стічних вод стикається з численними викликами. По-перше, це критичний стан інфраструктури. Більшість каналізаційних мереж та очисних споруд мають високий ступінь зносу - понад 70% обладнання відпрацювало свій нормативний термін служби. Це призводить до частих аварій, витоків неочищених стічних вод та забруднення водних ресурсів.

По-друге, технічна відсталість. Більшість очисних споруд використовують застарілі технології, які не забезпечують належного рівня очищення. Особливо це стосується видалення біогенних елементів (азоту та фосфору), що призводить до евтрофікації водойм.

По-третє, фінансові проблеми. Недостатнє фінансування галузі унеможливує проведення необхідних ремонтів та модернізації. Тарифи на послуги водовідведення часто не покривають реальних витрат на експлуатацію та оновлення обладнання.

Стан систем очищення значно відрізняється по регіонах України. Найкращий стан спостерігається в великих містах західних областей, де активно реалізуються міжнародні проекти модернізації. Зокрема, у Львові, Тернополі, Чернівцях були побудовані або реконструйовані сучасні очисні споруди з використанням європейських технологій [16, 38].

Складна ситуація склалася в промислових регіонах Донецької та Луганської областей, де через воєнні дії багато об'єктів інфраструктури були пошкоджені або зруйновані. Це створює серйозні екологічні ризики для басейну річки Сіверський Донець.

Попри численні проблеми, в Україні реалізується низка проектів модернізації систем очищення стічних вод. Європейський банк реконструкції та розвитку фінансує проекти в Києві, Харкові, Маріуполі та інших містах. Світовий банк підтримує програми водопостачання та водовідведення в малих містах [32, 35].

Особливу увагу приділяється впровадженню енергоефективних технологій. Наприклад, на Бортницькій станції аерації в Києві планується будівництво біогазової установки для використання метану, що утворюється при зброджуванні осаду.

У розвинених країнах системи очищення стічних вод досягли високого рівня розвитку. Сінгапур є світовим лідером у галузі водних технологій. Програма NEWater дозволяє отримувати з очищених стічних вод воду питної якості через багатоступеневу мембранну обробку. Сьогодні NEWater забезпечує близько 40% потреб Сінгапуру в воді.

Нідерланди розробили унікальну концепцію управління дощовими водами через систему "water squares" - багатофункціональних просторів, які в сухий час служать парками та спортивними майданчиками, а під час дощів збирають та очищують стічні води.

Данія стала піонером у створенні енергопозитивних очисних споруд. Станція Aarhus ReWater не лише очищує стічні води, але й виробляє на 150% більше енергії, ніж споживає, завдяки ефективному використанню біогазу та теплових насосів.

Сучасні технології очищення стічних вод розвиваються в напрямі підвищення ефективності, зниження енергоспоживання та вилучення корисних речовин. Мембранні біореактори (MBR) поєднують біологічне очищення з мембранною фільтрацією, забезпечуючи високу якість очищеної води при компактних розмірах споруд.

Технології на основі природних процесів (Nature-Based Solutions) набувають все більшої популярності. Побудовані водно-болотні угіддя ефективно очищають стічні води, створюючи при цьому цінні екосистеми. Системи фітоочищення використовують здатність рослин поглинати забруднення з води [28, 32].

Перспективним напрямом є анаеробне очищення стічних вод з одночасним виробництвом біогазу. Це дозволяє зменшити енергоспоживання очисних споруд та отримати відновлюване джерело енергії.

У країнах, що розвиваються, підходи до очищення стічних вод часто базуються на децентралізованих та низькотехнологічних рішеннях. Індія активно впроваджує системи фітоочищення та побудовані водно-болотні угіддя для очищення стічних вод малих міст та сіл [29, 31].

Бразилія розробила ефективні системи анаеробного очищення, адаптовані до тропічного клімату. UASB-реактори (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) широко використовуються для первинного очищення стічних вод з подальшою доочисткою в лагунах або фільтрах.

Механічне очищення є першим етапом обробки стічних вод і включає видалення великих твердих частинок, піску, жирів та масел. Основні споруди механічного очищення включають решітки, пісковловлювачі, первинні відстійники та жироловлівачі.

Сучасні системи механічного очищення все частіше використовують автоматизовані решітки з дрібним кроком, що дозволяє більш ефективно видалити завислі речовини. Флотаційні установки використовуються для видалення жирів та легких фракцій.

Біологічне очищення базується на життєдіяльності мікроорганізмів, які розкладають органічні забруднення. Найпоширенішим методом є очищення активним мулом в аеротенках. Процес включає змішування стічних вод з активним мулом при інтенсивній аерації, після чого суміш надходить у вторинні відстійники для розділення очищеної води та мулу.

Сучасні системи біологічного очищення забезпечують не лише видалення органічних речовин, але й нітрифікацію та денітрифікацію для видалення сполук азоту, а також біологічне видалення фосфору.

Біофільтри та біодиски використовуються як альтернатива активному мулу, особливо для малих очисних споруд. Ці системи мають нижчі експлуатаційні витрати, але потребують більших площ.

Фізико-хімічні методи використовуються для видалення специфічних забруднень, які важко видалити біологічними методами. Коагуляція та флокуляція ефективні для видалення завислих речовин та фосфору. Адсорбція на активованому вугіллі використовується для видалення мікрозабруднень та поліпшення органолептичних властивостей води [19, 37].

Мембранні технології, включаючи мікрофільтрацію, ультрафільтрацію, нанофільтрацію та зворотний осмос, забезпечують високий ступінь очищення і можуть використовуватися для повторного use очищеної води.

Дезінфекція є заключним етапом очищення стічних вод перед їх скиданням у водойми або повторним використанням. Традиційно використовується хлорування, але через утворення токсичних хлорорганічних сполук все частіше застосовуються альтернативні методи.

Ультрафіолетове опромінення є ефективним методом дезінфекції без утворення побічних продуктів. Озонування забезпечує не лише дезінфекцію, але й окиснення органічних речовин.

Неочищені або недостатньо очищені стічні води є одним з основних джерел забруднення водних ресурсів. Органічні речовини призводять до зниження вмісту кисню у воді, що може спричинити загибель риби та інших водних організмів. Біогенні елементи (азот та фосфор) викликають евтрофікацію водойм - надмірний розвиток водоростей та вищих водних рослин [25, 31].

Мікрозабруднення, включаючи фармацевтичні препарати, пестициди та промислові хімікати, можуть мати довгострокові наслідки для екосистем та здоров'я людини, навіть у низьких концентраціях.

Сучасні підходи до очищення стічних вод розглядають їх не як відходи, а як ресурс. Концепція циркулярної економіки передбачає максимальне вилучення корисних речовин зі стічних вод. Фосфор може бути вилучений у вигляді струвіту - цінного добрива. Азот може бути перетворений на аміак або нітрати для використання в сільському господарстві.

Органічні речовини можуть бути перетворені на біогаз через анаеробне зброджування. Цей біогаз може використовуватися для отримання електроенергії та тепла, роблячи очисні споруди енергонезалежними або навіть енергопозитивними.

Будівництво та експлуатація систем очищення стічних вод потребують значних інвестицій. Вартість будівництва сучасних очисних споруд може становити від 500 до 2000 доларів на одного жителя залежно від технології та місцевих умов. Експлуатаційні витрати включають електроенергію, реагенти, заробітну плату персоналу та утилізацію осаду. Для зниження цих витрат впроваджуються енергоефективні технології та автоматизація процесів.

У розвинених країнах фінансування систем очищення стічних вод здійснюється переважно за рахунок тарифів користувачів та державних субсидій. У країнах, що розвиваються, важливу роль відіграють міжнародні організації та донори.

Нові фінансові інструменти, такі як зелені облігації та плата за екосистемні послуги, створюють додаткові можливості для фінансування проектів водної інфраструктури. Всесвітня організація охорони здоров'я та інші міжнародні організації розробили рекомендації щодо якості очищених стічних вод. Директиви Європейського Союзу встановлюють жорсткі вимоги до очищення міських стічних вод.

В Україні якість очищених стічних вод регулюється державними санітарними правилами та нормами. Нормативи постійно посилюються відповідно до європейських стандартів. Закон України "Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року" передбачає модернізацію систем водовідведення та очищення стічних вод. Майбутнє систем очищення стічних вод тісно пов'язане з цифровізацією та

впровадженням технологій Індустрії 4.0. Датчики в режимі реального часу контролюють параметри процесу очищення, штучний інтелект оптимізує роботу обладнання, а дистанційне управління дозволяє централізовано керувати мережею очисних споруд. Цифрові двійники очисних споруд дозволяють моделювати різні сценарії роботи та оптимізувати процеси без ризику для реального обладнання [26, 39].

Тенденція до децентралізації систем очищення стічних вод особливо актуальна для сільських районів та малих міст. Компактні модульні очисні споруди можуть обслуговувати окремі будинки або невеликі громади, забезпечуючи ефективне очищення при мінімальних витратах на транспортування стічних вод. Майбутні системи очищення стічних вод будуть інтегровані з системами управління дощовими водами, виробництвом енергії та навіть міським сільським господарством. Концепція "living machines" передбачає створення багатофункціональних систем, які не лише очищають воду, але й створюють екосистемні послуги.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика систем очищення стічних вод в Україні та світі

Критерій	Україна	Світ
Стан очисних споруд	Зношені, переважно 1960–80-х рр., 80% потребують модернізації	Сучасні, оновлюються, впроваджуються «зелені» та цифрові технології
Типи очищення	Механічне + біологічне, іноді хімічне	Повний цикл: механічне, біологічне, хімічне, мембранне, УФ- та озонування
Нові технології	Локальні модульні станції, біоплато, УФ-очищення, біогаз із мулу	MBR, SCADA, зворотний осмос, constructed wetlands, повторне використання стоків
Приклади міст/об'єктів	Львів, Івано-Франківськ, Надвірна, Київ (Бортницька станція аерації)	Сінгапур (NEWater), Ізраїль, Швеція, США (EPA-інновації), Німеччина (енергоєфективні БОС)

Повторне використання води	Дуже обмежене	До 85% в Ізраїлі, 40–60% у Сінгапурі та США
Біоенергетичний потенціал	Є потенціал у великих містах (біогаз із осаду)	Широко впроваджено: біогазові станції на очисних спорудах
Участь громади та освіта	Розвивається, підтримка локальних ініціатив	Активна участь населення, екопросвіта, «зелений» контроль
Екологічна політика/законодавство	ГДС, ДБН, часткова гармонізація з директивами ЄС	ЄС: Директива 91/271/ЕЕС, США: Clean Water Act, інтегроване водне управління
Фінансування та підтримка	Державні програми, гранти, міжнародні проєкти (JICA, USAID, GIZ)	Широке фінансування, приватно-державні партнерства, зелені облигації

Таким чином, системи очищення стічних вод в Україні суттєво поступаються передовим міжнародним практикам як у технічному, так і в організаційно-екологічному аспектах. Разом із тим, позитивні приклади модернізації окремих об'єктів свідчать про можливість інтеграції новітніх технологій з урахуванням національних умов [7, 12].

Успішна реалізація цих перспектив потребує скоординованих зусиль держави, бізнесу та громадськості, а також адекватного фінансування та політичної підтримки на всіх рівнях.

Таблиця 2. SWOT-Аналіз систем очищення стічних вод в Україні та світі

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)	Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
Екологічна безпека – зменшення забруднення водних ресурсів	Застарілі очисні споруди в Україні	Запровадження природоорієнтованих рішень (біоплато, геліосушіння)	Кліматичні зміни (паводки, зливи)
Інноваційні технології (мембранні біореактори, біофільтри, УФ-знезараження)	Високі експлуатаційні витрати (енергоємність процесів)	Розвиток циркулярної економіки (переробка осаду)	Військові дії, руйнування інфраструктури

Наявність законодавчої бази (Директива 91/271/ЄЕС, ДБН В.2.5-75:2013)	Недостатнє фінансування у комунальному секторі	Залучення міжнародних інвестицій (GIZ, USAID, ЄБРР)	Недотримання природоохоронного законодавства
Міжнародне співробітництво (гранти ЄС, ЄБРР)	Низький рівень автоматизації процесів	Інтеграція у концепцію сталого розвитку міст	Антибіотикостійкі мікроорганізми у воді
Повторне використання очищених вод (re-use)	Втрати ефективності у зимовий період	Підготовка нових фахівців, розвиток науки	Змішування побутових і дощових вод у мережі

Системи очищення стічних вод відіграють критично важливу роль у забезпеченні екологічної безпеки та сталого розвитку. Україна стикається з серйозними викликами в цій галузі, але поступова модернізація інфраструктури та впровадження сучасних технологій створюють перспективи для покращення ситуації [11, 24].

Світовий досвід показує, що найефективніші рішення поєднують технологічні інновації з економічною доцільністю та екологічною відповідальністю. Майбутнє галузі пов'язане з переходом від лінійної моделі "взяти-використати-викинути" до циркулярної економіки, де стічні води розглядаються як ресурс для отримання води, енергії та корисних речовин.

1.3. Проблеми та виклики утилізації осадів на очисних спорудах

Утилізація осадів стічних вод на очисних спорудах представляє собою одну з найбільш складних та багатогранних проблем сучасної екологічної інженерії. Ця сфера стикається з численними викликами, які охоплюють технічні, екологічні, економічні та соціальні аспекти.

Технічні проблеми утилізації осадів починаються з їх фізико-хімічних властивостей. Основною технічною проблемою є надзвичайно високий вміст води в свіжих осадах, який може сягати 95-99 відсотків від загальної маси. Це створює значні труднощі при транспортуванні, оскільки доводиться

перевозити величезні об'єми матеріалу з мінімальним вмістом сухої речовини. Процеси зневоднення потребують застосування складного та енергоємного обладнання, включаючи центрифуги, фільтр-преси, вакуумні фільтри та інші технічні рішення [17, 32].

Нестабільність складу осадів створює додаткові технічні виклики. Хімічний та біологічний склад осадів постійно змінюється залежно від багатьох факторів: типу промислових підприємств у водозборі, сезонних коливань у складі побутових стоків, ефективності попередніх стадій очищення та метеорологічних умов. Ця мінливість ускладнює вибір оптимального методу обробки та утилізації, оскільки технологічний процес має постійно адаптуватися до змінних умов [16, 37].

Екологічні виклики утилізації осадів пов'язані насамперед з потенційною присутністю небезпечних речовин. Важкі метали, такі як свинець, кадмій, ртуть, цинк та мідь, які надходять переважно з промислових стоків, концентруються в осадах та можуть становити серйозну загрозу для довкілля при неконтрольованому їх потраплянні в ґрунт або водні об'єкти. Особливо небезпечним є те, що деякі з цих металів можуть накопичуватися в харчових ланцюгах та в кінцевому підсумку потрапляти в організм людини.

Мікробіологічне забруднення осадів представляє окрему категорію екологічних ризиків. Патогенні бактерії, віруси, найпростіші та яйця гельмінтів можуть зберігати життєздатність в осадах протягом тривалого часу. Це створює потенціальні ризики для здоров'я людей, які можуть контактувати з необробленими осадами, а також для екосистем, куди ці осади можуть потрапити [18, 30].

Сучасні осади також містять широкий спектр органічних мікрозабруднювачів, включаючи залишки фармацевтичних препаратів, засоби особистої гігієни, гормони, пестициди та інші стійкі органічні сполуки. Ці речовини можуть мати негативний вплив на довкілля навіть у мікроконцентраціях, діючи як ендокринні руйнівники або створюючи інші довгострокові екологічні ефекти.

Економічні проблеми утилізації осадів є надзвичайно значущими для експлуатуючих організацій. Витрати на обробку та утилізацію осадів можуть становити від 50 до 60 відсотків від загальних операційних витрат очисних споруд. Ці витрати включають енергетичні затрати на зневоднення та сушіння, витрати на хімічні реагенти для кондиціонування осадів, транспортні витрати, витрати на зберігання та кінцеву утилізацію або захоронення.

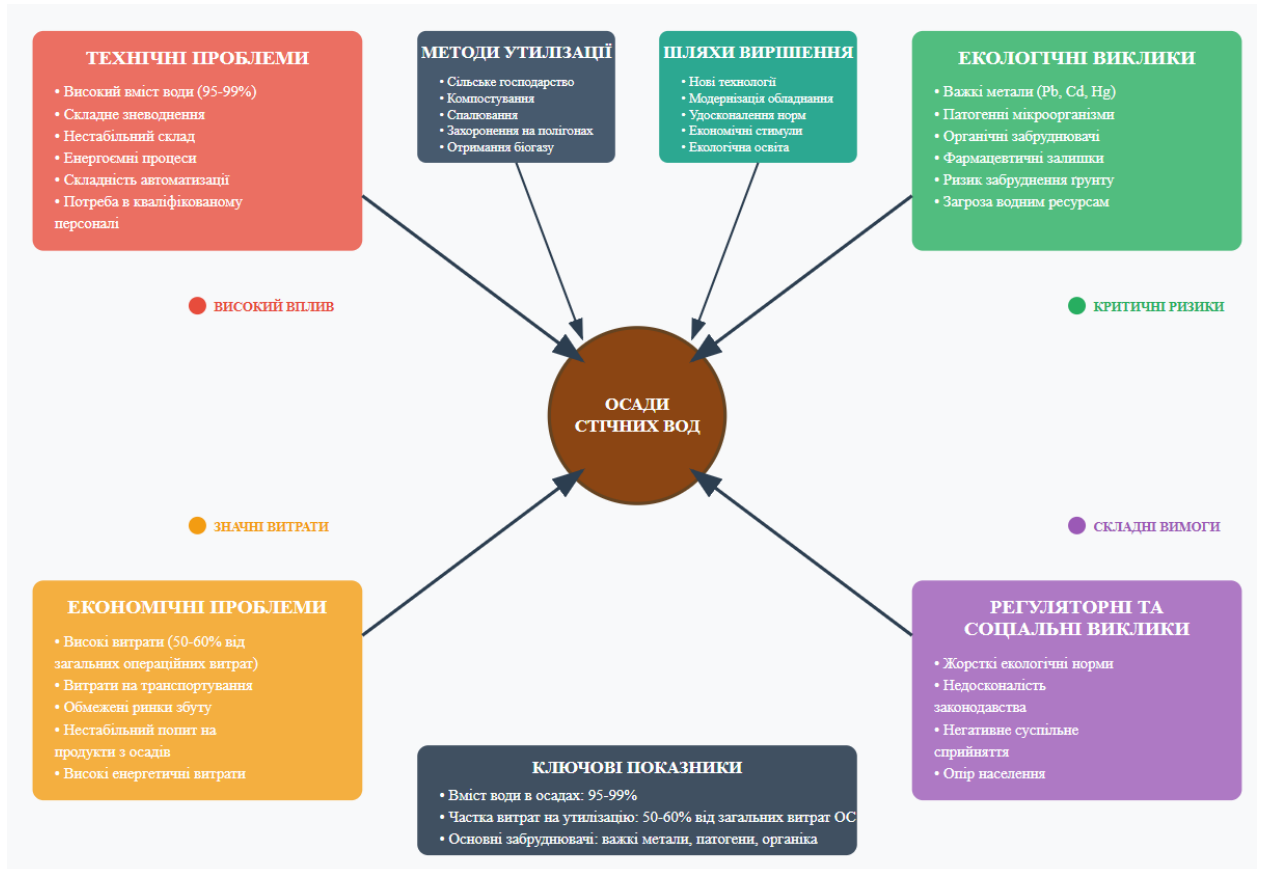


Рис.1. Проблеми та виклики утилізації осадів на очисних спорудах

Нестабільність ринків збуту продуктів, отриманих з осадів, створює додаткові економічні виклики. Попит на органічні добрива з осадів стічних вод часто залежить від сезонних факторів, регіональних особливостей сільського господарства та ставлення споживачів до такої продукції. Біогаз, який можна отримувати при анаеробному зброджуванні осадів, також має нестабільну економічну цінність залежно від цін на традиційні енергоносії.

Регуляторні виклики пов'язані з постійним посиленням екологічних вимог та стандартів. Європейські та національні норми щодо утилізації осадів стають дедалі жорсткішими, що потребує постійної модернізації обладнання та технологій. Особливо складними є вимоги щодо граничних концентрацій

важких металів, патогенних мікроорганізмів та органічних забруднювачів у осадах, які планується використовувати в сільському господарстві [18, 37].

Недосконалість законодавчої бази в багатьох країнах створює правову невизначеність щодо різних методів утилізації осадів. Часто відсутні чіткі процедури ліцензування, стандарти якості та механізми контролю за дотриманням установлених норм.

Соціальні виклики включають негативне сприйняття населенням різних методів утилізації осадів. Особливо гостро це проявляється при спробах розміщення полігонів для захоронення осадів або підприємств з їх термічної переробки поблизу населених пунктів. Суспільна думка часто негативно ставиться до використання осадів стічних вод у сільському господарстві через побоювання щодо безпечності продуктів харчування.

Технологічні обмеження сучасних методів утилізації осадів пов'язані з високою енергоємністю основних процесів. Термічне сушіння, спалювання, піроліз та інші високотемпературні процеси потребують значних енергетичних витрат, що робить їх економічно не вигідними при високих цінах на енергоносії [14, 30].

Складність автоматизації процесів обробки осадів обумовлена їх мінливими властивостями. Системи автоматичного управління мають постійно адаптуватися до змін у складі та властивостях осадів, що потребує складних алгоритмів управління та дорогого контрольно-вимірювального обладнання.

Потреба в кваліфікованому персоналі для експлуатації сучасних технологій утилізації осадів створює додаткові виклики, особливо в регіонах з обмеженими освітніми ресурсами в галузі екологічної інженерії.

Вирішення всього комплексу проблем утилізації осадів потребує системного підходу, який включає розвиток інноваційних технологій, удосконалення нормативно-правової бази, створення економічних стимулів для впровадження екологічно безпечних методів утилізації та підвищення рівня екологічної освіти та свідомості суспільства.

1.4. Нормативно-правова база водоочищення та поводження з мулом

Нормативно-правова база водоочищення та поводження з мулом в Україні представляє собою комплексну систему законодавчих актів, технічних нормативів та санітарних норм, які регулюють усі аспекти очищення стічних вод та утилізації утворених відходів. Основу законодавчого регулювання становить Водний кодекс України, який встановлює фундаментальні принципи використання та охорони водних ресурсів, включаючи детальні вимоги до скидання стічних вод у водні об'єкти. Кодекс визначає права та обов'язки водокористувачів, встановлює процедури отримання дозволів на спеціальне водокористування та скидання забруднюючих речовин [15, 24].

Значну роль у регулюванні сфери водоочищення відіграє Закон України "Про питну воду, питне водопостачання та водовідведення", який комплексно регулює діяльність у сфері централізованого водопостачання та водовідведення. Цей законодавчий акт встановлює вимоги до якості послуг водопостачання та водовідведення, технічні стандарти для інфраструктури, а також процедури ліцензування операторів у цій сфері.

Поводження з відходами водоочищення регулюється Законом України "Про відходи", який визначає правові, організаційні та економічні засади діяльності, пов'язаної з поводженням з відходами, включаючи осадки очисних споруд. Закон встановлює класифікацію відходів, вимоги до їх збирання, перевезення, зберігання, оброблення, утилізації та видалення.

Технічні аспекти водоочищення детально регламентуються державними будівельними нормами, зокрема ДБН В.2.5-75:2013 "Каналізація. Зовнішні мережі та споруди", який встановлює технічні вимоги до проектування, будівництва та експлуатації очисних споруд каналізації. Цей нормативний документ визначає технологічні схеми очищення, параметри обладнання, вимоги до якості очищення стічних вод.

Додатково застосовується ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010, який містить настанови щодо проектування інженерного обладнання будинків і споруд, включаючи системи водовідведення та локальні очисні споруди.

Санітарно-гігієнічні аспекти водоочищення регулюються системою державних санітарних правил та норм. ДСанПіН 2.2.4-171-10 встановлює гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною, що визначає цільові показники якості для систем водоочищення. СанПіН 4630-88 регламентує санітарні правила та норми охорони поверхневих вод від забруднення, встановлюючи допустимі концентрації забруднюючих речовин у стічних водах після очищення [15, 28].

Екологічні вимоги до водоочищення визначаються низкою підзаконних актів, включаючи постанови Кабінету Міністрів України про затвердження порядків ведення державного обліку водокористування та нормативів екологічної безпеки водних об'єктів. Ці документи встановлюють процедури моніторингу якості очищення, звітності про водокористування та екологічного контролю. Особливої уваги потребує регулювання поводження з мулом як продуктом водоочищення. Осади очисних споруд класифікуються як відходи відповідно до Державного класифікатора відходів і підлягають спеціальному поводженню згідно з вимогами природоохоронного законодавства. Використання осадів стічних вод як органічного добрива або для інших господарських цілей потребує проведення відповідних лабораторних досліджень на вміст важких металів, патогенних мікроорганізмів та інших забруднюючих речовин, а також отримання відповідних дозволів від органів державного екологічного контролю.

Контроль за дотриманням нормативних вимог у сфері водоочищення здійснюють органи Державної екологічної інспекції, Міністерства охорони здоров'я та місцевого самоврядування в межах їх компетенції. Порушення встановлених норм тягне за собою адміністративну або кримінальну відповідальність залежно від тяжкості наслідків та характеру правопорушення.

Досліджено сучасні підходи до обробки та утилізації мулових відходів: компостування, біогазові установки, піроліз, термічне сушіння та агротехнічне

використання. Проведено порівняльний аналіз варіантів з урахуванням екологічної безпеки, економічної доцільності та потенціалу повторного використання.

Запропоновано удосконалення системи поводження з мулом, зокрема впровадження анаеробного зброджування з утилізацією біогазу як джерела енергії та подальшого компостування стабілізованих осадів.

Проведено розрахунок екологічно-економічної ефективності впровадження рекомендованих рішень, який засвідчив можливість зниження навантаження на навколишнє середовище, зменшення витрат на експлуатацію очисних споруд та створення додаткових ресурсів у вигляді енергії та органічних добрив.

Отримані результати можуть бути використані в практичній діяльності комунальних підприємств для підвищення ефективності систем водоочищення, зменшення техногенного навантаження на довкілля та реалізації принципів циркулярної економіки.

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА КОМУНАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ

2.1. Загальна характеристика та опис технологічної схеми очищення стічних вод

Очисні споруди м. Івано-Франківська є важливим об'єктом інженерної інфраструктури, що забезпечує екологічну безпеку міста та прилеглих територій шляхом очищення стічних вод перед їх скиданням у природні водойми.

Ось схематичне зображення технологічного процесу очищення стічних вод на очисних спорудах м. Івано-Франківська. Вона відображає основні етапи: від надходження стічних вод до скидання у водний об'єкт, а також ланцюг поводження з утвореним мулом. Якщо потрібно, можу підготувати цю схему у форматі для презентації чи включення до бакалаврської роботи.

Таблиця 2.1. Технологічні етапи очищення стічних вод

№ п/п	Етап очищення	Обладнання	Опис функції	Примітки
1	Механічне очищення	Решітка, пісковловлювач	Видалення великих механічних домішок: гілки, пластик, пісок	Підготовка стічних вод до подальших етапів очищення
2	Первинне відстоювання	Первинний відстійник	Осадження завислих речовин, зменшення БСК	Збір осаду на дні для подальшої утилізації
3	Біологічне очищення	Аеротенк, мікроорганізми	Розкладання органічних речовин біоценозом активного мулу	Аерація сприяє росту аеробних бактерій
4	Вторинне відстоювання	Вторинний відстійник	Осадження активного мулу після	Частина мулу повертається в аеротенк

			біологічного очищення	
5	Дезінфекція	Хлорувальні установки / УФ-реактори	Знезараження очищених стоків від патогенних мікроорганізмів	Перед скиданням у водойму або повторним використанням
6	Обезводнення осаду	Центрифуга / фільтр-прес	Зменшення вологості осаду	Осад після зневоднення транспортується на полігон або утилізується

Очисні споруди м. Івано-Франківська розташовані в селі Ямниця Івано-Франківського району та є стратегічним об'єктом комунальної інфраструктури, що забезпечує повну біологічну очистку стічних вод з подальшим скиданням у річку Бистриця.

Очисні споруди розташовані в селі Ямниця, Івано-Франківського району. Загальна потужність підприємства становить 145,0 тис. м³ на добу. Здійснюється повна біологічна очистка стічних вод, після чого очищені стоки скидаються у водоприймач — річку Бистриця. Очисні споруди мають дві черги: перша черга була введена в експлуатацію у 1970 році та має проектну потужність 70,0 тис. м³/добу, друга черга дозволила збільшити загальну потужність до 145,0 тис. м³/добу.

Технологічна лінія очистки включає приймальну камеру для прийому стічних вод, пісколовки для видалення механічних домішок, чотири первинні відстійники для осадження завислих речовин, три біореактори (аеротенки), в яких відбувається біологічна очистка за допомогою активного мулу, сім вторинних відстійників для відокремлення мулу, контактні резервуари для знезараження очищених стоків, мулові майданчики для сушіння та обробки осаду, а також повітрорудні станції, які забезпечують процеси аерації.

Каналізаційна система міста є загальносплавною, має загальну довжину мереж 264 км і включає самопливні колектори, напірні трубопроводи, вісім насосних станцій і головну каналізаційну насосну станцію (ГКНС-2).

Експлуатуюча організація:

Комунальне підприємство «Івано-Франківськводокотехпром», засноване у 1940 році, є міським монополістом у сфері водопостачання та водовідведення. Юридична адреса підприємства: м. Івано-Франківськ, вул. Ботанічна, 2.

Модернізація очисних споруд (2012–2014 рр.): Проєкт реалізовано в рамках програми Світового банку «Розвиток міської інфраструктури в Україні». Основні заходи:

- ✓ Капітальний ремонт первинних та вторинних відстійників, біореакторів;
- ✓ Будівництво камер нітрифікації та денітрифікації;
- ✓ Встановлення системи видалення фосфору (станція РІХ);
- ✓ Модернізація аерації, заміна енергетичних систем, арматури;
- ✓ Встановлення 4 нових енергоефективних повітродувок з автоматичним регулюванням потужності.

Особливості експлуатації: Через загальносплавну систему каналізації на очисні споруди надходять не лише побутові та промислові стоки, а й дощові та талі води, що значно підвищує навантаження у періоди опадів. Очисні споруди приймають: побутові стоки; промислові стоки; атмосферні опади з урбанізованих територій.

Історичний розвиток системи: Початок каналізування Івано-Франківська сягає кінця ХІХ століття, зокрема 1897–1898 рр., коли були збудовані перші бетонні труби. Історичні етапи включають діяльність фірми «Джуліані», спорудження каналізацій до 1914 р., та активне розширення інфраструктури у 1920–30-х рр. Сучасні очисні споруди було введено в експлуатацію у 1970 році.

Екологічне значення: Очисні споруди м. Івано-Франківська мають критичне значення для: захисту річки Бистриця від забруднення; підтримки

екологічної безпеки регіону; виконання вимог екологічного законодавства; реалізації принципів сталого міського розвитку.

Перспективи: Івано-Франківськ є учасником нового проєкту Світового банку «Розвиток міської інфраструктури – 2», що передбачає подальшу модернізацію очисних споруд і підвищення їх енергоефективності.

Технологічна схема очищення стічних вод включає послідовність процесів, спрямованих на видалення механічних, хімічних, органічних та біологічних забруднень з води з метою її подальшого використання або безпечного скидання у навколишнє середовище. Основні етапи цієї схеми такі:

✓ **Попередня очистка:** На цьому етапі стічна вода проходить через решітки або сітки, які затримують великі тверді частинки, побутове сміття, гілки та інші великі включення. Додатково може проводитися видалення піску в пісколовках та жирів у жировловлювачах. Ці операції захищають обладнання наступних етапів очищення від механічних пошкоджень.

✓ **Первинна механічна очистка:** Стічні води надходять до первинних відстійників, де внаслідок гравітації важкі частинки осідають на дно, а легші піднімаються на поверхню. Утворений осад періодично видаляється. Цей етап дозволяє знизити вміст завислих речовин і органічного навантаження на біологічну очистку.

✓ **Вторинна (біологічна) очистка:** Основна мета — розклад розчинених органічних речовин мікроорганізмами. Найпоширенішим методом є застосування активованого мулу в аеротенках, куди подається повітря для підтримки аеробних умов. Мікроорганізми поглинають і перетравлюють органіку, утворюючи біомасу. Після цього вода надходить у вторинні відстійники, де мул осідає, а частина повертається до аеротенків для підтримки процесу.

✓ **Третинна (доочистка) обробка:** Цей етап включає хімічні, фізичні або біологічні методи для видалення залишкових домішок. Можуть застосовуватись фільтрація через пісок або активоване вугілля, хімічне осадження фосфатів, денітрифікація, сорбція або мембранні технології. Також

проводиться дезінфекція води за допомогою хлору, озону або ультрафіолетового випромінювання.

✓ **Обробка осаду:** Осад, що утворюється на різних етапах, зневоднюється (центрифугами, фільтр-пресами) і може підлягати стабілізації (анаеробне бродіння, компостування) або утилізації (вивезення на полігони, спалювання, використання як добрива за умови відповідності нормам).

✓ **Сучасні доповнення:** У новітніх схемах можуть бути передбачені елементи енергоефективності (використання біогазу з осаду), автоматизовані системи керування процесами, а також елементи повторного використання очищеної води для технічних потреб.

Таким чином, технологічна схема очищення стічних вод є складною багаторівневою системою, яка включає механічну, біологічну, хімічну та фізичну очистку з метою досягнення нормативної якості очищеної води та зменшення навантаження на природні водні об'єкти.

Очисні споруди м. Івано-Франківська представляють собою сучасний комплекс повної біологічної очистки стічних вод, який після масштабної модернізації 2012-2014 років відповідає сучасним технологічним та екологічним вимогам. Потужність споруд у 145,0 тис. м³/добу забезпечує потреби міста та створює резерв для подальшого розвитку. Комплексний підхід до реконструкції, що включав оновлення як технологічного обладнання, так і інженерних систем, дозволив значно підвищити ефективність очистки та знизити енергоспоживання.

Стічні води — це води, які відводяться з територій після їх використання в побуті, промисловості чи інших сферах. Їх аналіз передбачає визначення кількісних і якісних показників, що необхідно для проектування систем очищення та оцінки впливу на навколишнє середовище.

1. Кількісний склад стічних вод: Кількість стічних вод залежить від джерела їх утворення. Основними джерелами є:

✓ **Побутові стічні води** — утворюються внаслідок життєдіяльності людини (мешканці житлових будинків, заклади громадського харчування тощо).

✓ **Промислові стічні води** — формуються у результаті виробничих процесів (харчова, хімічна, текстильна, нафтова промисловість).

✓ **Змішані стічні води** — містять побутові, промислові та дощові стоки.

До основних кількісних показників належать:

Добовий об'єм стічних вод ($\text{м}^3/\text{добу}$) — може коливатись від 100 до десятків тисяч м^3 на добу залежно від об'єкта.

Гідравлічне навантаження — витрата стічних вод у літрах за секунду або $\text{м}^3/\text{год}$.

Пікове навантаження — максимальні об'єми скиду у пікові години, зазвичай становлять 120–150% від середнього значення.

2. Якісний склад стічних вод-Якісний склад визначається за фізичними, хімічними та біологічними показниками.

А) Фізичні показники: Температура — в межах $+10\dots+35\text{ }^\circ\text{C}$; Колір, запах і мутність — характеризують органолептичні властивості; Вміст завислих речовин — може досягати 300 мг/л.

Б) Хімічні показники: рН — показник кислотності, нормальний діапазон: 6,5–8,5; Хімічне споживання кисню (ХСК) — 300–1000 $\text{мгO}_2/\text{л}$, характеризує рівень органічного забруднення; Біохімічне споживання кисню за 5 діб (БСК₅) — 150–400 $\text{мгO}_2/\text{л}$, свідчить про кількість органіки, яку можуть переробити мікроорганізми; Вміст азоту (амонійного, нітритного, нітратного) — до 50 мг/л; Фосфор — 5–20 мг/л.; Сірководень — може з'являтися у анаеробних умовах, токсичний; Мінералізація — загальна кількість розчинених солей, часто до 1000 мг/л або більше у промислових стоках; Важкі метали (свинець, кадмій, мідь, хром, цинк) — можуть бути присутні у концентраціях до 1–2 мг/л і більше.

В) Біологічні показники: Наявність патогенних мікроорганізмів — бактерії, віруси, яйця гельмінтів; Кількість коліформних бактерій — показник фекального забруднення; Загальна мікробна чисельність — свідчить про ступінь бактеріального забруднення.

3. Класифікація стічних вод за видом забруднення: Органічне забруднення — рештки їжі, жири, білки, вуглеводи. Джерела: побут, харчова промисловість.

Неорганічне забруднення — кислоти, луги, солі, метали. Джерела: хімічна, гірничо-промисловість.

- ✓ Біологічне забруднення — мікроорганізми, віруси. Джерела: лікарні, тваринницькі ферми.
- ✓ Теплове забруднення — підігріті води від ТЕС або промислових процесів.
- ✓ Радіоактивне забруднення — рідкісне, але небезпечне, з'являється у сфері медицини або атомної енергетики.

Комплексна характеристика стічних вод є надзвичайно важливим етапом у системі екологічного управління, раціонального водокористування та охорони довкілля. Вона дозволяє всебічно оцінити рівень забруднення, джерела його походження та потенційні ризики для навколишнього середовища, здоров'я населення й ефективності роботи систем водовідведення.

На основі даних про якісний та кількісний склад стічних вод: здійснюється обґрунтоване проектування очисних споруд із урахуванням специфіки забруднень (органічного, неорганічного, біологічного чи токсичного характеру); відбувається вибір ефективних технологій очищення, таких як біологічне, фізико-хімічне, мембранне або комбіноване очищення, залежно від наявних показників БСК, ХСК, рН, вмісту завислих речовин, важких металів та патогенних мікроорганізмів; забезпечується зниження екологічного навантаження на водні об'єкти – річки, озера, ґрунтові води, що є особливо важливим у період зміни клімату та дефіциту чистої води; створюються умови для впровадження систем екологічного моніторингу, ведення обліку і контролю якості води згідно з вимогами чинного законодавства України (ДСТУ, СанПіН, ВБН, ISO) та міжнародних норм.

Регулярний лабораторний контроль за фізичними, хімічними та біологічними показниками стічних вод дозволяє не лише оперативно виявляти зміни в складі забруднень, а й прогнозувати небезпечні тенденції у стані навколишнього середовища. Це дає змогу вчасно приймати управлінські рішення, впроваджувати нові технології очищення, зменшувати

антропогенний тиск на екосистеми та гарантувати безпеку водокористування для населення. У сучасних умовах зростання техногенного навантаження та урбанізації комплексна оцінка складу стічних вод виступає не лише технічною процедурою, а й важливим інструментом сталого екологічного розвитку, що сприяє збереженню водних ресурсів для майбутніх поколінь.

2.2. Аналіз ефективності діючої системи очищення

Оцінка ефективності діючої системи очищення є важливою складовою екологічного моніторингу, що дозволяє визначити ступінь відповідності фактичної роботи очисних споруд встановленим нормативним вимогам. Для забезпечення екологічної безпеки та раціонального природокористування необхідно не лише впроваджувати сучасні системи очищення, але й систематично аналізувати їх результативність у динаміці.

На досліджуваному об'єкті функціонує система багатоступеневого очищення, яка включає механічний, біологічний та, частково, фізико-хімічний етапи. Основна мета системи — зниження концентрацій забруднюючих речовин до рівнів, що не перевищують гранично допустимі концентрації (ГДК), встановлені чинним законодавством України. Механічне очищення передбачає видалення великих фракцій, завислих речовин, піску та плаваючих домішок за допомогою решіток, пісколовок і відстійників. Біологічне очищення здійснюється за допомогою аеротенків, де активний мул переробляє органічні сполуки. В деяких випадках застосовується біофільтрація. Фізико-хімічне доочищення включає процеси коагуляції, нейтралізації та знезараження (наприклад, хлорування або ультрафіолет).

Установки забезпечують пропускну здатність до N м³/добу і обслуговують об'єкти [населеного пункту/промислового комплексу тощо].

Для оцінки ефективності системи було проведено лабораторні дослідження складу забруднюючих речовин у стоках до та після проходження усіх етапів очищення. Аналіз здійснювався згідно з методиками, затвердженими ДСТУ ISO 5667, ДСТУ 2730, ГОСТ 24460 тощо.

Таблиця 2.1. Лабораторні дослідження складу забруднюючих речовин у стоках

Показник	До очищення, мг/дм ³	Після очищення, мг/дм ³	Ефективність очищення, %	ГДК для скиду у водойму
БСК ₅	320	18	94,4	≤ 20
Завислі речовини	270	22	91,8	≤ 35
Нафтопродукти	12	0,6	95,0	≤ 0,3
Азот амонійний	28	12	57,1	≤ 2,0
Фосфати	9	5	44,4	≤ 1,0
Сульфати	160	75	53,1	—
Колі-фаги (МФА)	10 ³ КУО/100 мл	50 КУО/100 мл	—	≤ 100 КУО/100 мл

Як видно з наведених даних, найбільшу ефективність система демонструє щодо органічних речовин (БСК₅) та завислих часток. Значно гірші результати спостерігаються у видаленні азоту та фосфатів, що свідчить про необхідність впровадження додаткових стадій денітрифікації та хімічного осадження фосфатів.

На підставі порівняння вихідних даних з гранично допустимими концентраціями, встановленими відповідно до: Законів України "Про охорону навколишнього природного середовища" та "Про питну воду та питне водопостачання"; ДСП 173-96 "Санітарні правила охорони поверхневих вод від забруднення"; Наказу МОЗ № 721 "Гігієнічні нормативи якості води"; можна зробити висновок, що за більшістю показників система працює в допустимих межах, однак перевищення щодо азоту амонійного та фосфатів фіксується систематично.

Враховуючи енергоємність обладнання, середнє споживання електроенергії на 1 м³ очищених стоків становить 1,2 кВт·год/м³. При тарифі 4,5 грн/кВт·год вартість електроспоживання на очищення 1 м³ становить 5,4

грн. Загальні витрати на експлуатацію споруд складаються з вартості енергії, реагентів (коагулянти, дезінфектанти), заробітної плати та обслуговування.

Виявлені недоліки в системі очищення стічних вод включають високі концентрації залишкового фосфору і азоту у скидах, що спричиняє евтрофікацію водних об'єктів; нерівномірність навантаження на очисні споруди, внаслідок чого у години пікового надходження стоків спостерігається зниження ефективності очищення; зношене обладнання аеротенків та систем аерації, яке потребує модернізації; а також відсутність повної автоматизації процесу очищення, що ускладнює контроль та оперативне реагування на зміну параметрів. З метою підвищення ефективності пропонується впровадити технологію біологічної денітрифікації шляхом додавання окремої зони анаеробної обробки або використання аеробно-анаеробного циклу; здійснювати хімічне осадження фосфатів із застосуванням алюмінієвих або залізовмісних реагентів; встановити мембранні модулі для доочищення, які забезпечать стабільно високий рівень видалення забруднювачів; запровадити автоматизацію контролю параметрів очищення за допомогою SCADA-систем; а також провести енергоаудит та замінити застарілі повітрорудки на енергоефективні моделі з частотними перетворювачами.

2.3. Методи контролю якості очищених вод: комплексний підхід

Контроль якості очищених вод являє собою багатокомпонентну систему аналітичних методів, що включає фізико-хімічні, мікробіологічні та біологічні підходи для забезпечення відповідності води встановленим стандартам та нормативам. Сучасні методи контролю базуються на принципах комплексності, точності та оперативності отримання результатів.

Фізико-хімічні методи аналізу становлять основу контролю якості очищених вод і включають широкий спектр інструментальних підходів. Спектроскопічні методи забезпечують високоточне визначення концентрацій різноманітних забруднювачів у водному середовищі. Атомно-абсорбційна спектроскопія базується на поглинанні світла атомами досліджуваного

елемента при характерних довжинах хвиль і дозволяє визначати концентрації металів з високою точністю. Електротермічна атомно-абсорбційна спектроскопія забезпечує визначення слідових кількостей важких металів, таких як свинець, кадмій та ртуть, на рівні мікрограмів на літр, що критично важливо для оцінки токсичності води. Полум'яна атомно-абсорбційна спектроскопія використовується для визначення вищих концентрацій лужних та лужноземельних металів, забезпечуючи швидкий та економічно ефективний аналіз.

Атомно-емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою характеризується винятково високою продуктивністю завдяки можливості одночасного визначення декількох десятків елементів в одній пробі. Температура плазми, що досягає 6000-8000 градусів Цельсія, забезпечує повну атомізацію проби, що значно підвищує точність та відтворюваність результатів аналізу. Мас-спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою вважається найчутливішим методом для визначення слідових кількостей металів, з межами виявлення на рівні нанограмів на літр для більшості елементів періодичної системи. Цей метод також унікальний своєю здатністю проводити ізотопний аналіз, що відкриває додаткові можливості для дослідження походження забруднювачів.

Рентгенівська флуоресцентна спектроскопія особливо ефективна для швидкого напівкількісного аналізу елементного складу води, а розвиток портативних приладів робить цей метод незамінним для польових досліджень та експрес-контролю. Ультрафіолетова та видима спектрофотометрія широко застосовуються для визначення органічних забруднювачів, біогенних елементів, зокрема сполук азоту та фосфору, а також для оцінки загальної окисності води. Принцип методу базується на фундаментальному законі Бера-Ламберта-Бугера, що встановлює прямий зв'язок між поглинанням світла та концентрацією речовини у розчині.

Інфрачервона спектроскопія дозволяє ідентифікувати функціональні групи органічних молекул та визначати типи органічних забруднювачів, включаючи нафтопродукти, пестициди та інші хімічні сполуки. Особливо

цінною є можливість якісного аналізу складних сумішей органічних речовин без попереднього розділення компонентів.

Хроматографічні методи забезпечують найвищу селективність при аналізі складних сумішей забруднювачів. Газова хроматографія незамінна для аналізу летких органічних сполук, які часто присутні у стічних водах промислових підприємств. Поєднання газової хроматографії з мас-спектрометричним детектуванням забезпечує надійну ідентифікацію сполук завдяки можливості інтерпретації унікальних мас-спектрів кожної речовини. Техніка аналізу парової фази особливо ефективна для визначення летких галогенованих вуглеводнів, які є одними з найбільш токсичних забруднювачів водного середовища.

Рідинна хроматографія високого тиску використовується для аналізу термолабільних та полярних органічних сполук, які не можуть бути проаналізовані методами газової хроматографії. Поєднання вискоефективної рідинної хроматографії з тандемною мас-спектрометрією забезпечує винятково високу селективність та чутливість при визначенні фармацевтичних препаратів, гормонів, пестицидів та інших мікрозабруднювачів у воді на рівні нанограмів на літр.

Іонна хроматографія спеціалізується на аналізі неорганічних іонів і характеризується високою селективністю та можливістю одночасного визначення декількох аніонів або катіонів в одному аналізі. Метод особливо ефективний для визначення хлоридів, сульфатів, нітратів, фосфатів серед аніонів та амонію, лужних і лужноземельних металів серед катіонів. Гель-проникна хроматографія дозволяє фракціонувати органічні речовини за молекулярною масою, що надзвичайно важливо для характеристики природної органічної речовини у воді та оцінки її впливу на процеси водопідготовки.

Електрохімічні методи аналізу характеризуються простотою виконання та високою чутливістю для багатьох аналітів. Потенціометрія включає визначення водневого показника, окисно-відновного потенціалу та концентрації специфічних іонів за допомогою іон-селективних електродів. Сучасні іон-селективні електроди забезпечують високоточне визначення

фторидів, нітратів, амонію, важких металів з межами виявлення на рівні міліграмів на літр. Кондуктометрія оцінює загальну мінералізацію води через вимірювання електропровідності розчину і широко використовується для експрес-контролю якості води завдяки простоті виконання та швидкості отримання результатів.

Полярографія та вольтамперометрія ефективні для визначення слідових кількостей металів та органічних речовин з електроактивними функціональними групами. Інверсійна вольтамперометрія забезпечує межі виявлення на рівні мікрограмів та навіть нанограмів на літр завдяки стадії попереднього концентрування аналітів на електроді. Кулонометрія використовується для найточнішого визначення концентрації речовин через пряме вимірювання кількості електрики, витраченої на повну електрохімічну реакцію з аналітом.

Мікробіологічне тестування води включає як традиційні культуральні методи, так і сучасні молекулярно-біологічні підходи. Визначення загального мікробного числа проводиться висіванням серійних розведень води на неселективні поживні середовища з подальшою інкубацією при стандартних умовах та підрахунком колоній, що вирости. Цей показник дає загальне уявлення про мікробне навантаження води та ефективність процесів знезараження.

Коліформні бактерії традиційно використовуються як індикатори фекального забруднення води. Загальні коліформи виявляються при культивуванні на лактозних середовищах, тоді як термотолерантні коліформи визначаються при підвищеній температурі інкубації, що підвищує специфічність тесту щодо фекального походження забруднення. Ентерококи характеризуються вищою стійкістю у водному середовищі порівняно з коліформними бактеріями, тому використовуються як додатковий індикатор більш віддаленого в часі фекального забруднення.

Клостридії, як спороутворюючі анаеробні бактерії, здатні зберігатися у водному середовищі протягом тривалого часу та служать індикатором давнього фекального забруднення, що особливо важливо для оцінки історії

забруднення водного об'єкта. Виявлення патогенних мікроорганізмів, включаючи сальмонели, шигели, вібріони та легіонели, вимагає використання високоселективних поживних середовищ та застосування специфічних біохімічних тестів для надійної ідентифікації.

Сучасні молекулярно-біологічні методи революціонізували мікробіологічний контроль води завдяки своїй швидкості та специфічності. Полімеразна ланцюгова реакція забезпечує швидке та високоспецифічне виявлення патогенних мікроорганізмів без необхідності їх культивування, що значно скорочує час аналізу з днів до годин. Кількісна полімеразна ланцюгова реакція в реальному часі дозволяє не тільки виявити присутність патогенів, а й точно визначити їх кількість у пробі води.

Мультиплексна полімеразна ланцюгова реакція представляє особливу цінність завдяки можливості одночасного виявлення декількох різних патогенів в одній реакційній суміші, що значно підвищує ефективність та економічність аналізу. Секвенування нового покоління відкриває безпрецедентні можливості для комплексного аналізу мікробіому води, дозволяючи виявляти некультивовані мікроорганізми та оцінювати загальне біорізноманіття мікробної спільноти.

Флуоресцентна гібридизація *in situ* дозволяє не тільки виявляти мікроорганізми, а й оцінювати їх життєздатність та метаболічну активність безпосередньо у водному середовищі без попереднього культивування. Проточна цитометрія забезпечує швидкий підрахунок мікробних клітин та їх характеристику за морфологічними та флуоресцентними властивостями, що дозволяє отримувати результати протягом хвилин.

Віруси та найпростіші потребують спеціальних підходів до виявлення через їх малі розміри та специфічні біологічні властивості. Концентрування вірусів з великих об'ємів води проводиться методами адсорбції-елюції на різних сорбентах, ультрафільтрації через мембрани з певним розміром пор або осаджування поліетиленгліколем з подальшим виявленням методами полімеразної ланцюгової реакції або культивування на клітинних культурах.

Найпростіші та гельмінти виявляються переважно мікроскопічними методами після концентрування проби фільтруванням або седиментацією.

Біологічні методи оцінки якості води базуються на використанні живих організмів як тест-систем для визначення токсичності та екологічного стану водного середовища. Гострі біотести дозволяють швидко оцінити токсичний вплив води на живі організми. Біотест на *Daphnia magna* є стандартизованим міжнародним методом оцінки гострої токсичності, при якому реєструється відсоток загибелі дафній за 24-48 годин експозиції у тестованій воді.

Біотест з використанням *Vibrio fischeri*, відомий як Microtox-тест, базується на унікальній властивості цих морських бактерій продукувати біolumінесценцію, яка знижується під дією токсичних речовин. Головною перевагою цього методу є надзвичайно швидке отримання результатів протягом 15-30 хвилин. Альтотест використовує одноклітинні водорості як тест-об'єкти, при цьому оцінюється пригнічення росту культури під впливом токсичних речовин у воді.

Рибний біотест традиційно проводиться на молоді коропових риб, форелі або данію регіо, при цьому визначається середня летальна концентрація, яка викликає загибель 50% тест-організмів за певний період експозиції. Хронічні біотести дозволяють оцінити довгострокові ефекти впливу забруднювачів на живі організми. Довгострокові тести на дафніях оцінюють вплив води на репродуктивну функцію, ріст та поведінкові реакції протягом повного життєвого циклу організму.

Тести на водоростях визначають вплив забруднювачів на швидкість росту, інтенсивність фотосинтезу та морфологічні характеристики клітин, що особливо важливо для оцінки евтрофікуючого потенціалу води. Рибні тести раннього онтогенезу оцінюють вплив токсичних речовин на найчутливіші стадії розвитку риб, включаючи ембріональний розвиток, процес виклюву та ріст личинок.

Біоіндикація представляє особливий підхід до оцінки якості води, заснований на використанні організмів-індикаторів, які характеризуються підвищеною чутливістю до певних типів забруднення або змін у водному

середовищі. Макробезхребетні широко використовуються як біоіндикатори завдяки своїй здатності відображати довгострокові зміни якості води, при цьому застосовуються різноманітні індекси, засновані на видовому складі та чисельності бентосних безхребетних.

Перифітон, який представляє собою спільноту мікроорганізмів, що обростають підводні поверхні, виявляється особливо чутливим до евтрофікації та токсичного забруднення води. Аналіз видового складу діатомових водоростей у складі перифітону дозволяє оцінити трофічний стан водойми та ступінь її забруднення. Риби як біоіндикатори дозволяють оцінити стан водної екосистеми на найвищому трофічному рівні, інтегруючи вплив всіх факторів середовища.

Автоматизовані системи моніторингу якості води представляють сучасний підхід до безперервного контролю водних об'єктів. Стаціонарні автоматичні станції обладнуються датчиками для безперервного моніторингу базових параметрів, включаючи водневий показник, температуру, мутність, вміст розчиненого кисню, електропровідність та окисно-відновний потенціал. Сучасні системи також включають спеціалізовані датчики для контролю специфічних забруднювачів, таких як нітрати, нітрити, амоній, фосфати, важкі метали та нафтопродукти.

Біологічні параметри можуть контролюватися за допомогою флуориметрів для визначення концентрації хлорофілу-а як показника біомаси фітопланктону, турбідиметрів для оцінки мутності як непрямого показника біологічної активності, та датчиків біолюмінесценції для моніторингу мікробної активності. Портативні прилади та мультипараметричні зонди дозволяють швидко оцінювати основні показники якості води безпосередньо в польових умовах без необхідності транспортування проб до лабораторії.

Експрес-тести, засновані на колориметричних, імуноферментних та біосенсорних принципах, забезпечують швидке визначення специфічних забруднювачів протягом хвилин або годин. Розвиток портативних спектрометрів дозволяє проводити польовий аналіз металів та органічних речовин з точністю, наближеною до лабораторної.

Дистанційний моніторинг відкриває нові можливості для контролю якості води у важкодоступних або великих за площею водних об'єктах. Супутниковий моніторинг дозволяє оцінювати якість води у великих водоймах через аналіз спектральних характеристик водної поверхні, що дає змогу виявляти цвітіння водоростей, забруднення нафтопродуктами та інші масштабні зміни якості води.

Безпілотні літальні апарати, обладнані спеціалізованими датчиками, забезпечують моніторинг важкодоступних водних об'єктів з високою просторовою роздільністю. Телеметричні системи забезпечують надійну передачу даних від віддалених постів моніторингу до центральних станцій управління в режимі реального часу.

Комплексні індекси та інтегральні показники дозволяють об'єднати результати різноманітних аналізів у єдині показники, що спрощує інтерпретацію даних моніторингу та прийняття управлінських рішень. Канадський індекс якості води враховує кількість параметрів, що перевищують нормативні значення, частоту таких перевищень та величину відхилень від нормативів, забезпечуючи комплексну оцінку стану води.

Національний індекс санітарного фонду базується на дев'яти ключових параметрах якості води з урахуванням різних вагових коефіцієнтів, що відображають їх відносну важливість для здоров'я людини та стану екосистеми. Індекс органічного забруднення об'єднує такі показники як біохімічне споживання кисню, хімічне споживання кисню, азот амонійний та вміст розчиненого кисню для оцінки ступеня органічного забруднення води.

Інтегральні показники включають сумарний показник забруднення, який розраховується як сума відношень концентрацій забруднювачів до їх граничних допустимих значень, комбінований індекс забруднення води, що враховує клас небезпеки речовин та ступінь перевищення нормативів, та екологічний індекс, який інтегрує хімічні та біологічні показники для комплексної оцінки стану водної екосистеми.

Інноваційні підходи та нові технології в контролі якості води включають революційні сенсорні технології, застосування штучного інтелекту

та розвиток омікс-технологій. Біосенсори використовують біологічні елементи, такі як ферменти, антитіла або цілі мікроорганізми, для селективного визначення специфічних речовин у воді. Ферментні біосенсори особливо ефективні для визначення пестицидів та важких металів через їх здатність пригнічувати активність відповідних ферментів.

Імуносенсори забезпечують високоспецифічне виявлення патогенних мікроорганізмів, токсинів та інших біологічно активних речовин завдяки використанню специфічних антитіл. Нанотехнологічні сенсори базуються на унікальних властивостях наноматеріалів, включаючи графен, вуглецеві нанотрубки та квантові точки, для досягнення надвисокої чутливості, здатної виявляти речовини на рівні поодиноких молекул.

Оптичні сенсори, включаючи флуоресцентні, колориметричні системи та сенсори поверхневого плазмонного резонансу, забезпечують швидке визначення забруднювачів без складної попередньої підготовки проби. Електрохімічні сенсори нового покоління використовують модифіковані електроди, іон-селективні мембрани нового типу та наноструктуровані матеріали для підвищення селективності та чутливості аналізу.

Штучний інтелект та машинне навчання знаходять все ширше застосування в аналізі та інтерпретації даних моніторингу якості води. Нейронні мережі успішно застосовуються для прогнозування якості води на основі історичних даних, метеорологічних факторів та характеристик водозбірного басейну. Алгоритми машинного навчання дозволяють виявляти приховані закономірності та взаємозв'язки між різними параметрами якості води, що сприяє оптимізації схем відбору проб та підвищенню ефективності моніторингу. Системи підтримки прийняття рішень інтегрують дані моніторингу з нормативними вимогами та економічними факторами для розробки оптимальних стратегій управління якістю води. Комп'ютерний зір застосовується для автоматичного аналізу мікроскопічних зображень планктону, визначення мутності та колірності води без участі оператора.

Таблиця 2.2. SWOT-Аналіз методів контролю якості очищених вод: комплексний підхід

SWOT-компонента	Зміст
-----------------	-------

S (Strengths) – Сильні сторони	Висока точність і чутливість сучасних аналітичних методів (ГХ, ФЕ, ІМ та ін.) Комплексна оцінка якості води за хімічними, фізичними, біологічними показниками Відповідність міжнародним стандартам (ДСТУ, ISO, WHO) Автоматизований контроль і онлайн-моніторинг Інтеграція з ІТ-технологіями, системами GIS
W (Weaknesses) – Слабкі сторони	Висока вартість обладнання, реактивів та обслуговування Необхідність кваліфікованого персоналу Обмежена здатність традиційних методів виявляти нові полютанти Тривалість аналізу деяких показників Ризики похибок на етапі відбору і зберігання проб
O (Opportunities) – Можливості	Впровадження біосенсорних технологій для швидкого аналізу Розвиток мобільних лабораторій ІІІ та машинне навчання для обробки екоданих Міжнародне фінансування екопроектів Посилення екологічного законодавства
T (Threats) – Загрози	Недостатнє фінансування у регіонах Негативний вплив зміни клімату Збільшення нових, неідентифікованих полютантів Корупція в екологічному моніторингу Низька екологічна грамотність персоналу

Омікс-технології відкривають принципово нові можливості для розуміння біологічних процесів у водних екосистемах. Геноміка дозволяє досліджувати генетичне різноманіття мікробних спільнот, виявляти гени резистентності до антибіотиків та гени, відповідальні за деструкцію специфічних забруднювачів. Протеоміка вивчає експресію білків у мікроорганізмів як відповідь на забруднення, що дозволяє оцінити реальний фізіологічний стан мікробних спільнот.

Метаболоміка аналізує низькомолекулярні метаболіти для детального розуміння біохімічних процесів, що відбуваються у водній екосистемі під впливом різних факторів. Метагеноміка забезпечує комплексний аналіз генетичного потенціалу всієї мікробної спільноти без необхідності культивування окремих видів мікроорганізмів.

Нанотехнології в аналітичній хімії води включають використання наночастинок-носіїв для концентрування аналітів та підвищення чутливості традиційних методів аналізу. Квантові точки як флуоресцентні мітки забезпечують високочутливе виявлення біомолекул з можливістю мультиплексного аналізу. Нанопорові технології дозволяють аналізувати окремі молекули ДНК та білків, що відкриває безпрецедентні можливості в одномолекулярній біоаналітиці.

Контроль специфічних груп забруднювачів потребує застосування спеціалізованих підходів та методів аналізу. Мікрозабруднювачі, також відомі як забруднювачі, що з'являються, включають фармацевтичні препарати, які потребують високочутливих методів аналізу через їх надзвичайно низькі концентрації у водному середовищі та величезне різноманіття хімічних структур. Високоєфективна рідинна хроматографія з тандемною мас-спектрометрією в поєднанні з попереднім концентруванням методами твердофазної екстракції є золотим стандартом для аналізу фармацевтичних препаратів у воді.

Ендокринні деструктори, включаючи природні та синтетичні гормони, алкілфеноли та бісфенол А, потребують не тільки хімічного аналізу методами газової та рідинної хроматографії з мас-спектрометричним детектуванням, а й біологічного тестування на гормональну активність. Засоби особистої гігієни, такі як парабени, триклозан та ультрафіолетові фільтри, визначаються переважно хроматографічними методами після попереднього концентрування екстракцією.

Наночастинки у водному середовищі потребують принципово інших підходів до аналізу через їх унікальні фізико-хімічні властивості. Електронна мікроскопія дозволяє безпосередньо візуалізувати наночастинки та оцінювати їх морфологію, динамічне розсіювання світла визначає розподіл частинок за розмірами, а індуктивно зв'язана плазма з одночастинковим детектуванням забезпечує підрахунок та характеристику окремих наночастинок.

Радіонукліди у воді визначаються спеціалізованими радіометричними методами. Загальна альфа- та бета-активність визначається сцинтиляційними

методами або за допомогою пропорційних лічильників. Специфічні радіонукліди, такі як цезій-137, стронцій-90 та тритій, потребують попереднього радіохімічного розділення для усунення матричних впливів. Альфа-спектрометрія дозволяє ідентифікувати та кількісно визначити альфа-випромінюючі нукліди, включаючи ізотопи плутонію, америцію та радію.

Гамма-спектрометрія з використанням високочистих германієвих детекторів забезпечує одночасне визначення широкого спектру гамма-випромінюючих нуклідів з високою енергетичною роздільністю. Цианотоксини, які продукуються синьо-зеленими водоростями при їх масовому розвитку, потребують спеціалізованих методів аналізу. Мікроцистини визначаються методами вискоєфективної рідинної хроматографії з тандемною мас-спектрометрією або імуноферментного аналізу. Анатоксини, що характеризуються високою полярністю молекул, аналізуються виключно методами рідинної хроматографії з мас-спектрометричним детектуванням. Сакситоксини потребують спеціалізованих методів екстракції та очистки через їх унікальні хімічні властивості та низькі концентрації у воді.

Забезпечення якості аналітичних результатів є критично важливим аспектом контролю якості води і включає системи внутрішнього та зовнішнього контролю якості.

РОЗДІЛ 3. УТИЛІЗАЦІЯ ТА ПЕРЕРОБКА МУЛОВИХ ВІДХОДІВ

3.1. Сучасні технології переробки комунальних шламів водоочищення

Сучасні технології переробки комунальних шламів водоочищення являють собою складну та багатогранну систему інноваційних підходів, спрямованих на ефективну утилізацію, знешкодження та максимальне використання потенціалу осадів стічних вод.

Біотехнологічні методи посідають провідне місце у сучасній переробці комунальних шламів. Анаеробне зброджування є ключовим процесом, що відбувається у герметичних метантенках за повної відсутності кисню. Технологія включає чотири послідовні стадії: гідроліз, ацетогенез, кислотоутворення та метаногенез. На виході отримують біогаз, що складається переважно з метану (55-75%), та значно редуковану органічну масу. Перевагами цього методу є одночасне зменшення об'єму відходів на 40-60%, виробництво альтернативного палива та суттєве зниження патогенності шламів.

Компостування як аеробна біотехнологія перетворює органічну частину шламів на високоякісний ґрунтовий кондиціонер. Розрізняють статичне та динамічне компостування, де контролюються температура (55-65°C), вологість та інтенсивність аерації. Тривалість процесу становить від 3 до 6 місяців, результатом є екологічно чистий компост з вологістю 30-40%.

Термічні технології переробки включають спалювання, піроліз та газифікацію. Спалювання відбувається при температурах 850-1200°C, дозволяючи зменшити масу шламів на 70-80%. Сучасні сміттєспалювальні комплекси обладнані багатоступневими системами очищення викидів, що включають електрофільтри, скрубери та каталітичні нейтралізатори. Піроліз - це термічний розклад органічної речовини без доступу кисню при температурі 400-800°C, внаслідок чого утворюються піровуглець, синтез-газ та піролізні смоли. Газифікація перетворює органічну масу на горючий газ при

температурах 800-1200°C, забезпечуючи вихід синтез-газу до 60% від маси initial шламу.

Хімічні методи обробки передбачають реагентну стабілізацію та кондиціонування. Використання вапна дозволяє підвищити рН, знезаразити шлами від патогенної мікрофлори та зменшити токсичність важких металів. Флокулянти інтенсифікують процеси зневоднення та покращують структуру осадів.

Технології рекуперації ресурсів є надзвичайно перспективним напрямком. Вилучення фосфору здійснюється через осадження, мембранну фільтрацію та біологічне концентрування. Extraction важких металів реалізується електрохімічними методами, іонообмінними технологіями та біосорбцією.

Інноваційні напрямки утилізації шламів включають виробництво будівельних матеріалів. Зокрема, шлами використовуються для створення керамічної цегли, додаються до бетонних сумішей, слугують основою для ізоляційних матеріалів. Важливим напрямком є також рекультивация земель, де шлами застосовуються для відновлення порушених ґрунтів, біологічної меліорації та ландшафтного планування.

Вибір конкретної технології переробки комунальних шламів водоочищення залежить від низки факторів: хімічного складу осадів, місцевих екологічних умов, економічної доцільності та наявної інфраструктури. Найбільш ефективним є комплексний підхід, що поєднує різні технологічні рішення та максимально реалізує принципи циркулярної економіки.

Сучасні технології переробки комунальних шламів спрямовані не лише на мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище, але й на перетворення потенційно шкідливих відходів на корисні ресурси, що має значний економічний та екологічний потенціал.

3.2 Дослідження утилізації шламів водоочищення комунального об'єкта

Дослідження утилізації шламів водоочищення комунального об'єкта присвячене комплексному аналізу проблеми поводження з відходами водоочисних споруд та пошуку оптимальних шляхів їх подальшого використання. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю вирішення екологічних та економічних завдань у сфері комунального господарства. Шлами водоочищення являють собою складні багатоконпонентні суміші, що утворюються в процесі очищення питної та стічної води, і містять широкий спектр мінеральних, органічних та хімічних компонентів. До складу таких шламів входять мінеральні частинки, органічні речовини, важкі метали, мікроорганізми та хімічні реагенти, що використовуються під час водоочищення.

Методологія дослідження включала комплексний підхід, який передбачав детальний фізико-хімічний аналіз складу шламів, оцінку екологічних ризиків, вивчення потенційних напрямків утилізації та економічну оцінку запропонованих методів. У ході дослідження було встановлено, що шлами водоочищення мають значний потенціал для повторного використання в різних галузях народного господарства. Зокрема, перспективними напрямками утилізації визначено сільськогосподарське використання, виробництво будівельних матеріалів та рекультивацію земель.

Сільськогосподарський напрямок утилізації передбачає використання шламів як добрива після відповідної обробки та знезараження. Цей метод дозволяє збагатити ґрунт поживними речовинами, однак вимагає суворого контролю вмісту важких металів, повної нейтралізації патогенних мікроорганізмів та неухильного дотримання санітарно-гігієнічних норм. Виробництво будівельних матеріалів є не менш перспективним напрямком, оскільки шлами можуть бути використані для створення цегли, керамічних виробів та різноманітних будівельних сумішей шляхом спеціальної термічної обробки та підготовки компонентів.

Особливу увагу в дослідженні приділено екологічним аспектам утилізації шламів. Ключовими завданнями визначено мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище, попередження забруднення ґрунтів та

грунтових вод, а також неухильне дотримання нормативів екологічної безпеки. Економічна складова дослідження показала, що впровадження раціональних методів утилізації дозволяє суттєво зменшити витрати на захоронення відходів, отримати додаткові матеріальні ресурси та знизити екологічне навантаження на природні екосистеми.

За результатами дослідження сформульовано низку практичних рекомендацій, серед яких впровадження сучасних технологій попередньої обробки шламів, активізація науково-дослідних розробок у сфері утилізації та створення економічних стимулів для впровадження інноваційних методів переробки. Подальші наукові пошуки мають бути спрямовані на вдосконалення технологічних процесів та розширення сфер практичного застосування шламів водоочищення.

Отримані результати демонструють, що утилізація шламів водоочищення є складним, але перспективним напрямком діяльності, який потребує комплексного підходу, поєднання наукових розробок, технологічних інновацій та практичного впровадження. Успішна реалізація запропонованих методів дозволить перетворити потенційно небезпечні відходи на корисні ресурси, що матиме значний екологічний, економічний та соціальний ефект.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Система водоочищення міста Івано-Франківська експлуатується комунальним підприємством «Івано-Франківськводокотехпром», створеним у 1940 році. Протягом 2014 року на каналізаційних очисних спорудах міста була проведена масштабна реконструкція в рамках проекту «Розвиток міської інфраструктури в Україні», що фінансується Світовим банком.

Основні технологічні споруди після реконструкції:

- ✓ Первинні відстійники – 4 одиниці
- ✓ Біореактори – 3 одиниці з новими камерами нітрифікації та денітрифікації
- ✓ Вторинні відстійники – 7 одиниць
- ✓ Станція видалення фосфору (РІХ)
- ✓ Мулові майданчики для природного зневоднення осаду

Особливістю міста є наявність загальносплавної системи каналізації, що призводить до потрапляння на очисні споруди не лише стічних вод, але й поверхневого стоку з бруду та піску з доріг та тротуарів, особливо після дощів.

У процесі механічної та біологічної очистки стічних вод на очисних спорудах Івано-Франківська утворюються наступні види відходів: Надлишковий активний мул (код відходу 19 08 05); Пісок з пісколовок (код відходу 19 08 02)

На стадії первинного відстоювання у радіальних відстійниках завглибшки до 4 метрів відбувається відокремлення:

- ✓ Жирових речовин (спливають на поверхню)
- ✓ Твердих частинок (осідають у вигляді первинного мулу)
- ✓ Піску та мінеральних включень

Жири забираються спеціальним скребком, а мул відкачується на мулові карти для подальшого зневоднення.

У біореакторах (аеротенках) відбувається процес біологічного очищення за участі активного мулу, який являє собою біоценоз

мікроорганізмів-мінералізаторів. Ці мікроорганізми здатні сорбувати на своїй поверхні та окислювати органічні речовини стічної води в присутності кисню.

У вторинних відстійниках активний мул відокремлюється від очищеної води. Частина мулу повертається в аеротенки для підтримання технологічного процесу, а надлишкова кількість (надлишковий активний мул) видаляється з системи.

Розрахунок утворення надлишкового мулу

- ✓ Для розрахунку кількості утворення надлишкового активного мулу використовуються наступні параметри:

Вихідні дані для розрахунку:

- ✓ Продуктивність очисних споруд: $Q = 15\ 000\ \text{м}^3/\text{добу}$
- ✓ Концентрація зважених речовин у стічних водах: $C_{\text{зв}} = 250\ \text{мг/л}$
- ✓ Концентрація БСК₅ у стічних водах: $C_{\text{БСК}_5} = 350\ \text{мг/л}$
- ✓ Концентрація ХСК у стічних водах: $C_{\text{ХСК}} = 600\ \text{мг/л}$
- ✓ Концентрація азоту загального: $C_{\text{N}} = 45\ \text{мг/л}$
- ✓ Концентрація фосфору загального: $C_{\text{P}} = 8\ \text{мг/л}$
- ✓ Ефективність очищення по БСК₅: $\eta = 95\%$
- ✓ Приріст активного мулу: $k = 0,4\ \text{кг/кг БСК}_5$

Детальний розрахунок добового утворення мулу:

Крок 1. Розрахунок маси забруднень, що надходять на очисні

споруди:

Маса БСК₅ за добу: $M_1(\text{БСК}_5) = Q \times C_{\text{БСК}_5} / 1000 = 15\ 000 \times 350 / 1000 = 5250\ \text{кг/добу}$

Маса зважених речовин за добу: $M_1(\text{зв.реч}) = Q \times C_{\text{зв}} / 1000 = 15\ 000 \times 250 / 1000 = 3750\ \text{кг/добу}$

Маса азоту за добу: $M_1(\text{N}) = Q \times C_{\text{N}} / 1000 = 15\ 000 \times 45 / 1000 = 675\ \text{кг/добу}$

Маса фосфору за добу: $M_1(\text{P}) = Q \times C_{\text{P}} / 1000 = 15\ 000 \times 8 / 1000 = 120\ \text{кг/добу}$

Крок 2. Розрахунок маси вилучених забруднень:

Маса вилученого БСК₅: $M_2(\text{БСК}_5) = M_1(\text{БСК}_5) \times \eta = 5250 \times 0,95 = 4988\ \text{кг/добу}$

Маса вилучених зважених речовин (ефективність 90%): $M_2(\text{зв.реч}) = M_1(\text{зв.реч}) \times 0,90 = 3750 \times 0,90 = 3375\ \text{кг/добу}$

Крок 3. Розрахунок утворення надлишкового мулу:

Приріст мулу від окислення органіки: $M_3(\text{мул_орг}) = M_2(\text{БСК}_5) \times k = 4988 \times 0,4 = 1995 \text{ кг/добу}$

Приріст мулу від затримання зважених речовин: $M_3(\text{мул_зв}) = M_2(\text{зв.реч}) \times 0,8 = 3375 \times 0,8 = 2700 \text{ кг/добу}$

Загальна маса надлишкового мулу (по сухій речовині): $M_3(\text{мул_заг}) = M_3(\text{мул_орг}) + M_3(\text{мул_зв}) = 1995 + 2700 = 4695 \text{ кг/добу}$

Крок 4. Розрахунок об'єму мулу з урахуванням вологості:

Вологість мулу: $W = 96\%$ Концентрація сухої речовини: $C_{\text{сп}} = 4\%$

Об'єм мулу за добу: $V(\text{мул}) = M_3(\text{мул_заг}) / (C_{\text{сп}} \times 10) = 4695 / (4 \times 10) = 117,4 \text{ м}^3/\text{добу}$

Річні показники утворення мулу:

- ✓ Маса сухої речовини: $M_3(\text{мул_заг}) \times 365 = 4695 \times 365 = 1714 \text{ т/рік}$
- ✓ Об'єм мулу (96% вологості): $V(\text{мул}) \times 365 = 117,4 \times 365 = 42\,851 \text{ м}^3/\text{рік}$

Крок 5. Розрахунок вмісту поживних речовин у мулі:

Вміст азоту в мулі (6% від сухої речовини): $M(\text{N_мул}) = M_3(\text{мул_заг}) \times 0,06 = 4695 \times 0,06 = 282 \text{ кг/добу}$
 $M(\text{N_мул_рік}) = 282 \times 365 = 103 \text{ т/рік}$

Вміст фосфору в мулі (2% від сухої речовини): $M(\text{P_мул}) = M_3(\text{мул_заг}) \times 0,02 = 4695 \times 0,02 = 94 \text{ кг/добу}$
 $M(\text{P_мул_рік}) = 94 \times 365 = 34 \text{ т/рік}$

Таблиця 3.1 Баланс основних компонентів у процесі очищення стічних вод

Показник	Надходження, кг/добу	Вилучення, кг/добу	Ефективність, %
БСК ₅	5250	4988	95,0
Зважені речовини	3750	3375	90,0
Азот загальний	675	405	60,0
Фосфор загальний	120	96	80,0

Детальний розрахунок утворення піску з піскоуловлювач

Вихідні дані:

Витрата стічних вод: $Q = 15\,000 \text{ м}^3/\text{добу}$

Питома кількість піску в сухий період: $q_{п1} = 0,15 \text{ л/м}^3$

Питома кількість піску в дощовий період: $q_{п2} = 0,40 \text{ л/м}^3$

Кількість сухих днів на рік: $n_c = 250 \text{ днів}$

Кількість дощових днів на рік: $n_d = 115 \text{ днів}$

Щільність піску: $\rho_p = 1,6 \text{ т/м}^3$

Вологість піску: $W_p = 15\%$

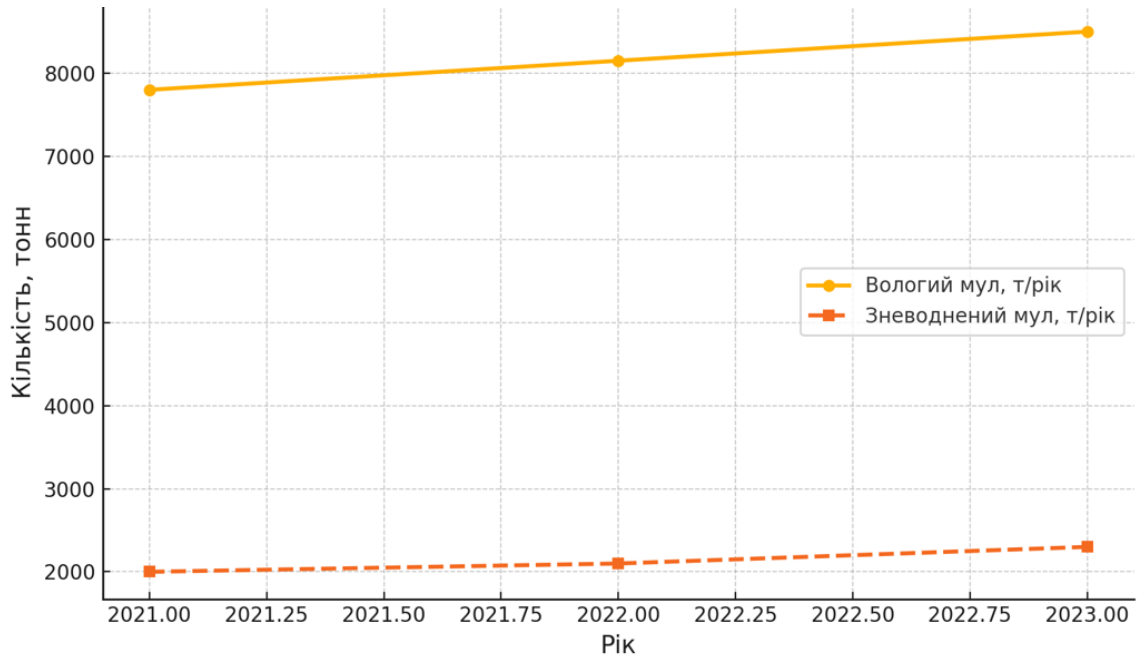


Рис.3.1. Динаміка утворення мулових відходів у місті Івано-Франківськ

Розрахунок об'єму піску:

Об'єм піску в сухий період:

$$V_{п1} = Q \times q_{п1} \times n_c / 1000 = 15\,000 \times 0,15 \times 250 / 1000 = 562,5 \text{ м}^3/\text{рік}$$

Об'єм піску в дощовий період:

$$V_{п2} = Q \times q_{п2} \times n_d / 1000 = 15\,000 \times 0,40 \times 115 / 1000 = 690 \text{ м}^3/\text{рік}$$

$$\text{Загальний об'єм піску: } V_{п} = V_{п1} + V_{п2} = 562,5 + 690 = 1252,5 \text{ м}^3/\text{рік}$$

Розрахунок маси піску:

Маса вологого піску:

$$m_{п_волог} = V_{п} \times \rho_p = 1252,5 \times 1,6 = 2004 \text{ т/рік}$$

Маса сухого піску:

$$m_{п_сух} = m_{п_волог} \times (1 - W_p) = 2004 \times (1 - 0,15) = 1703 \text{ т/рік}$$

Таблиця 3.2 Сезонна динаміка утворення піску з пісколовок

Період	Днів на рік	Питома кількість, л/м ³	Об'єм піску, м ³ /рік	Частка, %
Сухий період	250	0,15	562,5	44,9
Дощовий період	115	0,40	690,0	55,1
Всього	365	0,23	1252,5	100,0

Таблиця 3.3 Річний баланс утворення мулових відходів на очисних спорудах Івано-Франківська

Вид відходу	Об'єм, м ³ /рік	Маса (волога), т/рік	Маса (суха), т/рік	Код відходу
Надлишковий активний мул	42 851	42 851	1 714	19 08 05
Пісок з пісколовок	1 253	2 004	1 703	19 08 02

Активний мул є складною гетерогенною системою, яка характеризується високим вмістом води (96–98%) та значною часткою органічної речовини, що становить 70–90% від сухої речовини. Вміст неорганічної частини коливається в межах 10–30%.

За вмістом основних елементів у сухій речовині активний мул включає: вуглець (С) — 45–50%, азот (N) — 6–8%, фосфор (P) — 1,5–2,5%, калій (K) — 0,5–1,0%, кальцій (Ca) — 2–4%, магній (Mg) — 0,5–1,5%.

Такий склад зумовлює високу агрохімічну цінність активного мулу як потенційного органічного добрива або компонента в ґрунтових сумішах.

Мікробіоценоз активного мулу представлений широким спектром мікроорганізмів, що забезпечують його біологічну активність. У 1 мл мулу виявляють: бактерії — 10^8 – 10^9 клітин/мл, найпростіші — 10^5 – 10^6 клітин/мл, дріжджі та мікроскопічні гриби — 10^3 – 10^4 клітин/мл.

Ці мікроорганізми відіграють ключову роль у процесах біохімічного розкладу органічних сполук, очищення стічних вод, а також у трансформації сполук азоту, фосфору та інших біогенних елементів.

Основні групи бактерій: Нітрифікуючі бактерії (Nitrosomonas, Nitrobacter), Денітрифікуючі бактерії, Фосфат-акумуляуючі організми (ФАО)

Параметри свіжого мулу: рН: 6,5-7,5; Індекс мулу: 80-120 мл/г; Концентрація сухої речовини: 2-4 г/л; Зольність: 30-50%

Поживні елементи в мулі:

- ✓ Азот загальний: 40-60 г/кг сухої речовини
- ✓ Фосфор загальний: 15-25 г/кг сухої речовини
- ✓ Калій: 5-10 г/кг сухої речовини

Розподіл за фракціями: 0,2-0,5 мм: 15-25%; 0,5-1,0 мм: 40-50%; 1,0-2,0 мм: 25-35%; 2,0 мм: 5-10%.

Хімічний склад: Кварц (SiO₂): 70-85%; Глинисті мінерали: 10-15%; Органічні домішки: 3-8%; Карбонати: 2-5%.

Проблеми поводження з муловими відходами

Накопичення на мулових картах: Переповнення існуючих мулових майданчиків. Неприємні запахи через процеси гноїння та бродіння. Ризик забруднення ґрунтових вод

Зміна якості стоків: Збільшення концентрації фосфатів; Потрапляння хімічних сполук з промислових підприємств; Нестабільність складу протягом доби та тижня.

Технологічні проблеми: Застаріла технологія: Недостатня ефективність зневоднення мулу; Відсутність сучасних систем обробки осаду; Потреба в модернізації обладнання. Нерівномірність надходження стоків: Коливання об'ємів та складу стічних вод; Перевантаження системи в дощові періоди

Обов'язкові показники для контролю: Вологість (ГОСТ 26712-85); Зольність (ГОСТ 26714-85); рН (ГОСТ 26483-85); Органічна речовина (ГОСТ 26213-84)

Поживні елементи: Азот загальний (ГОСТ 26715-85); Фосфор рухомий (ГОСТ 26204-91); Калій рухомий (ГОСТ 26205-91)

Показники епідеміологічної безпеки: Коліформні бактерії, Ентерококи, Сальмонели, Яйця гельмінтів

Пріоритетні політанти: Свинець (Pb); Кадмій (Cd); Цинк (Zn); Мідь (Cu); Нікель (Ni); Хром (Cr)

Поточні витрати (на рік): Транспортування мулу: 50 000 грн; Утримання мулових карт: 30 000 грн; Лабораторні дослідження: 25 000 грн;

Всього: 105 000 грн

Потенційні доходи: При сільськогосподарському використанні:

- ✓ Реалізація зневодненого мулу: 400 грн/т
- ✓ Потенційний дохід: $728 \text{ т} \times 400 \text{ грн} = 291\,200 \text{ грн/рік}$
- ✓ Економічний ефект: $291\,200 - 105\,000 = 186\,200 \text{ грн/рік}$

У даній частині представлено результати кількісного та якісного аналізу мулових відходів, які утворюються на очисних спорудах Івано-Франківського міського комунального підприємства "Івано-Франківськводокотехпром".

Нижче наведено графік, який відображає динаміку утворення мулових відходів у вологому та зневодненому стані в період 2021–2023 років.

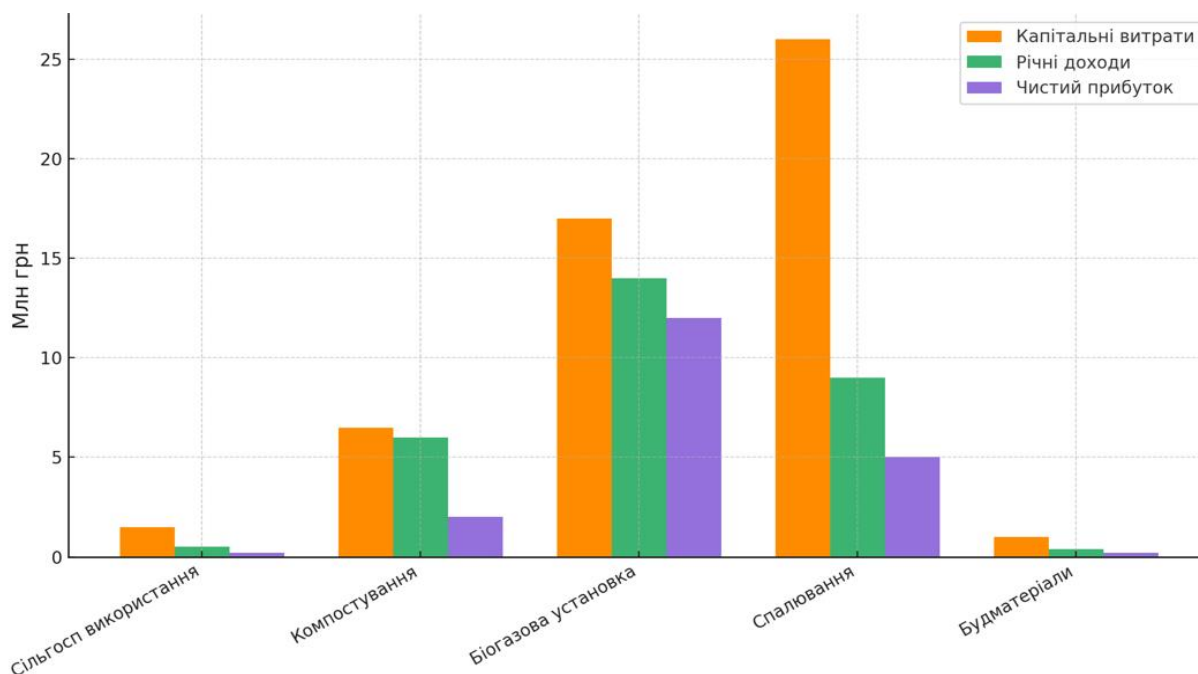


Рис.3.2. Порівняння методів утилізації мулу за економічними показниками

На графіку представлено порівняння капітальних витрат, річних доходів та чистого прибутку для п'яти варіантів використання відходів. Одиниця вимірювання – млн грн.

1. Сільгосп використання

- ✓ Капітальні витрати: приблизно 1,5 млн грн
- ✓ Річні доходи: близько 1 млн грн
- ✓ Чистий прибуток: дуже низький – менше 0,5 млн грн. *Найнижчі показники за всіма критеріями. Економічно малоефективний варіант.*

2. Компостування

- ✓ Капітальні витрати: близько 6,5 млн грн
- ✓ Річні доходи: майже 6 млн грн
- ✓ Чистий прибуток: близько 2 млн грн. Помірні витрати, прийнятний рівень доходу і прибутку.

3. Біогазова установка

- ✓ Капітальні витрати: приблизно 17 млн грн
- ✓ Річні доходи: близько 14 млн грн
- ✓ Чистий прибуток: приблизно 12 млн грн. Найвищий чистий прибуток. Висока рентабельність попри великі інвестиції.

4. Спалювання

- ✓ Капітальні витрати: 26 млн грн (найвищі серед усіх)
- ✓ Річні доходи: 9 млн грн
- ✓ Чистий прибуток: 5 млн грн. Найбільші витрати. Прибуток значно нижчий за біогазову установку при більших витратах.

5. Будматеріали

- ✓ Капітальні витрати: близько 1 млн грн
- ✓ Річні доходи: менше 0,5 млн грн
- ✓ Чистий прибуток: майже нульовий. Малий масштаб, низька рентабельність.

Біогазова установка — найефективніший варіант з точки зору прибутковості.

Спалювання — дуже капіталомісткий проєкт з помірним прибутком.

Компостування — збалансований підхід з меншими витратами та стабільним доходом.

Сільгосп використання і будматеріали — економічно найменш вигідні варіанти.

Рис. 3.3. ілюструє порівняння концентрації важких металів у мулі (жовтий стовпчик) з гранично допустимими концентраціями (ГДК, оранжевий стовпчик) для кожного з елементів. Жоден із досліджених важких металів не перевищує ГДК – отже, використання мулу як добрива чи технічного матеріалу не становить безпосередньої токсикологічної загрози.

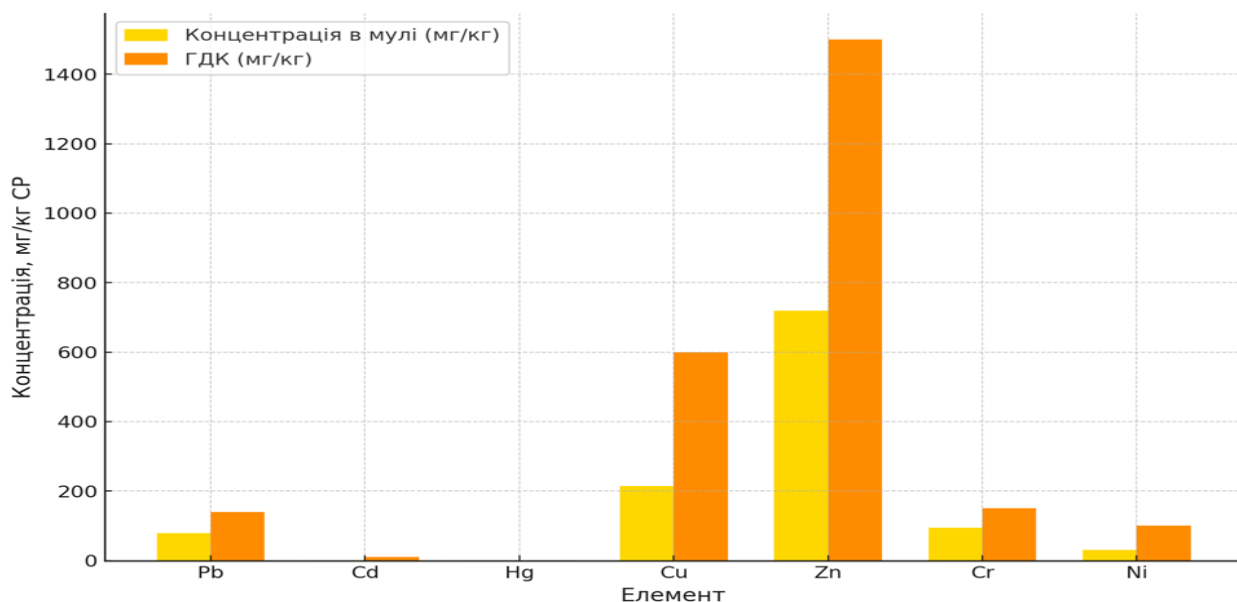


Рис. 3.3. Порівняння вмісту важких металів у мулі з ГДК

З точки зору екологічної безпеки, мул придатний до агротехнічного або техногенного використання, зокрема у: рекультивації земель, вирощуванні енергетичних культур, компостуванні з іншими відходами.

Таблиця 4.6 - Зведене порівняння варіантів утилізації

Показник	Сільгосп використання	Компостування	Біогазова установка	Спалювання	Будматеріали
Капвитрат, млн грн	1,35	4,4	18,0	25,0	0,5
Річний прибуток, млн грн	1,19	1,82	11,31	4,3	0,59
Термін окупності, років	1,1	2,4	1,6	5,8	0,8
NPV (10 років), млн грн	7,65	8,92	57,8	14,2	3,45

Показник	Сільгосп використання	Компостування	Біогазова установка	Спалювання	Будматеріали
Екологічний рейтинг	Високий	Високий	Дуже високий	Середній	Середній
Рекомендація	1-й пріоритет	2-й пріоритет	Перспективний	Не рекомендується	Додатковий

Система поводження з осадами є ефективною, з переважанням корисного вторинного використання. Подібний розподіл свідчить про високий рівень впровадження природоохоронних технологій та потенціал подальшого розвитку циркулярної економіки в галузі очищення стічних вод (рис.3.4.)

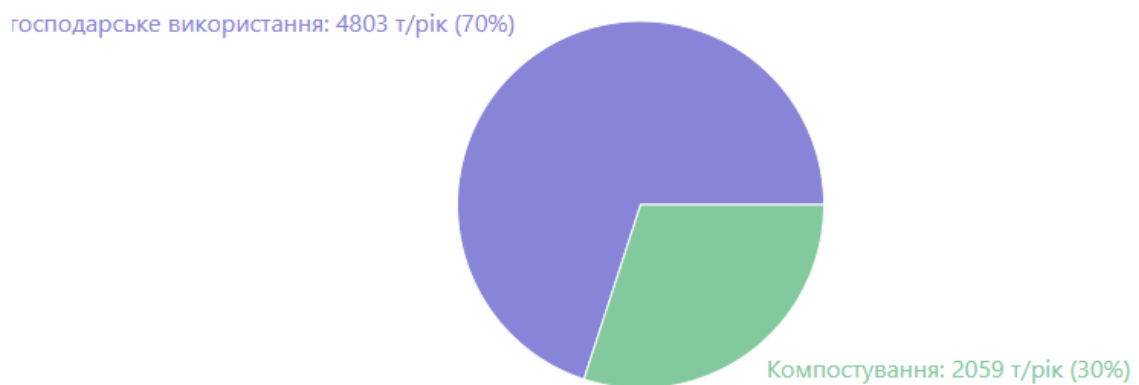


Рис. 3.4. Рекомендований розподіл мулових відходів



Рис. 3.5. Склад компостної суміші для переробки мулу

Композиція сировини є збалансованою для ефективного компостування, з оптимальним співвідношенням вуглецевмісних (тирса, солома) та азотвмісних (мул, органіка) матеріалів.

Така суміш дозволяє отримати якісне біодобриво, яке може використовуватись для: озеленення, сільськогосподарських культур, рекультивації.

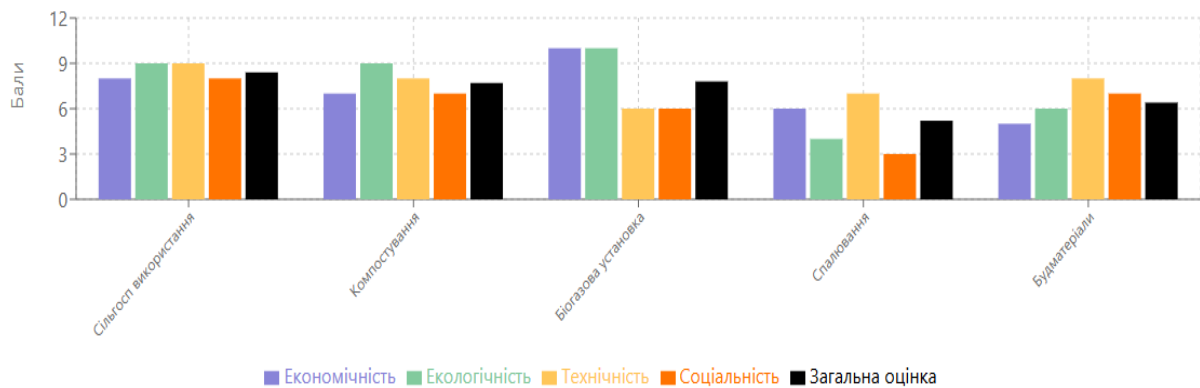


Рис.3.6. Багатокритеріальна оцінка варіантів (бали 1-10)

Згідно рис. 3.6. лідер за всіма критеріями – біогазова установка, що робить її найперспективнішим варіантом.

Сільськогосподарське використання та компостування — добре збалансовані рішення з високими оцінками.

Спалювання має найнижчі показники через екологічні та соціальні ризики.

Використання в будівельних матеріалах – технічно можливе, але потребує допрацювання в економічному та екологічному аспектах.

Рекомендації щодо вибору варіанту утилізації

Короткострокова перспектива (1-2 роки): Сільськогосподарське використання - 70% мулу; Мінімальні інвестиції та швидка окупність; Високий екологічний ефект

Середньострокова перспектива (3-5 років):

- ✓ Додавання компостування - 30% мулу
- ✓ Диверсифікація продукції
- ✓ Створення додаткових робочих місць

Загальний ефект: Повна утилізація мулових відходів з річним прибутком 2,25 млн грн та терміном окупності 2,1 року

На очисних спорудах Івано-Франківська щорічно утворюється близько 728 тонн надлишкового активного мулу та 1369 м³ піску з пісколовок.

Мулові відходи характеризуються високим вмістом органічних речовин (70-90%) та поживних елементів: азоту (6-8%), фосфору (1,5-2,5%), що робить їх цінним сільськогосподарським добривом.

Основними проблемами є переповнення мулових карт, неприємні запахи та відсутність ефективних технологій зневоднення мулу.

Впровадження сучасних технологій зневоднення та використання мулу в сільському господарстві може забезпечити економічний ефект до 186 200 грн на рік.

Необхідне впровадження системи регулярного моніторингу якості мулових відходів та розробка програми їх раціонального використання.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання бакалаврської роботи було досліджено та проаналізовано сучасний стан систем очищення стічних вод комунального об'єкта м. Івано-Франківськ, охарактеризовано структуру, склад та особливості утворення мулових відходів, а також розглянуто можливості їх екологічно безпечної утилізації.

1. Встановлено, що комунальні стічні води характеризуються значним вмістом органічних речовин, біогенних елементів та мікробіологічного забруднення, що вимагає використання комбінованих методів очищення, зокрема механічного, біологічного та фізико-хімічного.

2. Проведений аналіз технологічної схеми діючих очисних споруд Івано-Франківська засвідчив, що після модернізації вони забезпечують ефективне видалення основних забруднювачів відповідно до нормативних вимог. Разом з тим, нагальним залишається питання удосконалення процесів поводження з муловими осадами.

3. Характеристика мулових відходів показала, що вони містять високий вміст органічних речовин (70–90% сухої речовини), значну кількість біогенних елементів (С, N, P) та широкий спектр мікроорганізмів, що зумовлює як ризики для довкілля, так і потенціал для їх повторного використання.

4. Розглянуто й порівняно альтернативні методи утилізації мулу: компостування, анаеробне зброджування, термічна обробка, агротехнічне застосування. Обґрунтовано доцільність впровадження анаеробного зброджування з подальшим компостуванням стабілізованого осаду, що дозволяє отримувати біогаз та органічні добрива при мінімальних екологічних ризиках.

5. Здійснено розрахунок екологічно-економічної ефективності впровадження запропонованої схеми, який засвідчив зменшення техногенного навантаження на довкілля, скорочення витрат на експлуатацію очисних споруд та створення додаткових ресурсів.

Практичні рекомендації передбачають впровадження інтегрованої системи поводження з муловими відходами на базі КП «Івано-Франківськводоекотехпром» із залученням сучасних технологій зброджування та повторного використання осаду в сільському господарстві, за умови дотримання санітарно-гігієнічних норм.

Перспективи подальших досліджень полягають у детальному вивченні впливу продуктів утилізації осадів на агроєкосистеми, впровадженні цифрових технологій моніторингу стану очисних систем та підвищенні енергоефективності водоочисних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 8738:2017. Якість води. Терміни та визначення понять. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 17 с.
2. Водний кодекс України: Закон України від 06 черв. 1995 р. № 213/95-ВР (зі змін. і допов.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 30.05.2025).
3. Бондаренко В. І., Козлов В. О. Технології очищення стічних вод: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2010. 184 с.
4. Згурський В. А., Нікітін Є. О. Очищення стічних вод: екологічні технології. Київ: Ліра-К, 2017. 256 с.
5. Білан О. Ю. Комплексне використання осадів стічних вод у сільському господарстві. Екологія та природокористування. 2021. № 2 (38). С. 65–72.
6. Челядин М. І. Технології очищення стічних вод і утилізації осаду: навч. посіб. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018. 152 с.
7. Tchobanoglous G., Burton F. L., Stensel H. D. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2013. 1334 p.
8. Fytilli D., Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008. Vol. 12(1). P. 116–140.
9. European Commission. Sewage Sludge Directive 86/278/EEC. URL: <https://eur-lex.europa.eu>
10. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2022 році. Київ: Міндовкілля України, 2023. 344 с. URL: <https://mepr.gov.ua>
11. Мовчан Л. А., Бондаренко Т. М. Техногенна екологія. Київ: Каравела, 2009. 312 с.
12. Кальченко І. В., Паращук Л. І. Основи екологічної безпеки. Київ: Центр учбової літератури, 2011. 276 с.
13. Ільїн В. М. Екологічні аспекти утилізації мулу міських очисних споруд. Промислова екологія. 2020. № 3. С. 23–28.

14. Казаніна М. В. Біотехнології очищення стічних вод. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. 158 с.
15. Воронова В. В., Поліщук І. О. Біоенергетичне використання мулу стічних вод. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технічна екологія. 2019. № 1. С. 42–49.
16. Челядин Л.І. Екотехнології промислових об'єктів регіону: монографія. – Івано-Франківськ: 2018. – 254 с.
17. Крутько І. І., Нестеренко Л. С. Компостування осадів стічних вод з органічними відходами. Сільське господарство та лісівництво. 2022. № 2. С. 21–27.
18. Bereznieks I. Sludge treatment and reuse in Europe. *Water Science and Technology*. 2017. Vol. 75(2). P. 204–210.
19. WERF (Water Environment Research Foundation). Sustainable solids management. WEF Manual of Practice. USA, 2014.
20. Смирнов С. О., Кришталь В. О. Вплив мулових осадів на фізико-хімічні властивості ґрунтів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2020. № 91. С. 82–88.
21. Юнін Б. П., Кондратенко М. І. Біогазові установки в системах утилізації стічних осадів. *Вісник НУВГП*. 2021. № 3(95). С. 132–138.
22. Беляєв О. В., Кравченко І. П. Перспективи використання сушіння мулу на сонячних полях. *Екологічні науки*. 2022. № 1(42). С. 55–59.
23. Bień J. Sewage sludge management in Poland – current state and perspectives. *Environment Protection Engineering*. 2020. Vol. 46(3). P. 123–134.
24. Werther J., Ogada T. Waste incineration – a review. *Waste Management*. 1999. Vol. 19(6). P. 433–446.
25. Smith S. R. Organic contaminants in sewage sludge (biosolids) and their significance for agricultural recycling. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2009. Vol. 367. P. 4005–4041.
26. Kelessidis A., Stasinakis A. Reuse of sewage sludge in agriculture: current practices and future perspectives. *Waste Management*. 2012. Vol. 32. P. 1186–1195.
27. Twardowska I. et al. *Solid waste: Assessment, Monitoring and Remediation*. Elsevier, 2004. 654 p.

28. Zbytniewski R., Buszewski B. Characterization of natural organic matter (NOM) in compost. *Bioresource Technology*. 2005. Vol. 96. P. 471–478.
29. Liu W. et al. Application of sewage sludge in China: a review. *Waste Management & Research*. 2013. Vol. 31(12). P. 1108–1118.
30. Геєць В. М., Маринич О. М. Економіка природокористування. Київ: КНЕУ, 2012. 368 с.
31. Войцехович В. В., Дергачова В. І. Основи екології. Київ: Каравела, 2013. 312 с.
32. Романенко В. Д. Екологія і охорона навколишнього середовища. Київ: Лібра, 2011. 280 с.
33. Саєнко М. І., Ігнатенко О. В. Переробка відходів і охорона довкілля. Київ: Центр учбової літератури, 2015. 240 с.
34. Дунаєв О. М. Технології переробки відходів. Львів: Львівська політехніка, 2018. 216 с.
35. Склярєнко В. П. Біологічне очищення води. Харків: ХНУМГ, 2012. 180 с.
36. Дробот І. А. Технології захисту довкілля. Київ: Основа, 2020. 336 с.
37. Ситник К. М., Панасенко С. М. Механізми екологічної безпеки у водогосподарській сфері. *Економіка та держава*. 2021. № 9. С. 88–92.
38. Мельник Л. Г., Стець Ю. О. Водопідготовка та очищення стічних вод: навч. посіб. Суми: СумДУ, 2017. 260 с.
39. Тичковський С. І., Челядин Л. І. Перспективи використання технологій штучного інтелекту в системах очищення стічних вод *Research in Science, Technology and Economics*, С. 542-545 <https://doi.org/10.70286/ISU-28.05.2025>.