

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ  
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО  
ФАКУЛЬТЕТ АГРОТЕХНОЛОГІЙ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ  
КАФЕДРА ЕКОЛОГІЇ ТА ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ**

Допускається до захисту  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

к.б.н., доцент Петро ХІРІВСЬКИЙ  
наук. ступ., вч. зв.(ім'я та прізвище)

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

### **Магістр**

(рівень вищої освіти)

**на тему: «Екологічна оцінка накопичення золошлакових відходів  
теплоенергетики Львівщини у контексті сучасних підходів до  
управління промисловими відходами»**

Виконав: студент групи Еко-62  
спеціальності 101 «Екологія»  
ПЕТРІВ Андрій Ярославович

Львів 2025

**Міністерство освіти і науки України**  
**Львівський національний університет природокористування**  
Факультет агротехнологій та екології  
Кафедра екології  
Рівень вищої освіти «Магістр»  
Галузь знань 10 «Природничі науки»  
Спеціальність 101 «Екологія»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
к.б.н., доцент Петро ХІРІВСЬКИЙ  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## **ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу студенту  
**Петрів Андрію Ярославовичу**

1. Тема роботи: «Екологічна оцінка накопичення золошлакових відходів теплоенергетики Львівщини у контексті сучасних підходів до управління промисловими відходами»

Затверджена наказом по університету № 906/к-с від 31 грудня 2024 р.

2. Термін подання студентом кваліфікаційної роботи 05 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані для кваліфікаційної роботи

Літературні джерела, нормативні документи, методики виконання досліджень, законодавча база України.

4. Зміст кваліфікаційної роботи (перелік питань, які необхідно розробити)

Вступ

- 1 Огляд літератури

- 1.1 Еколого-економічні засади управління промисловими відходами в умовах глобальних екологічних викликів

- 1.2 Золошлакові відходи як об'єкт екологічного управління

- 1.3 Міжнародні підходи управління золошлакових відходів

- 1.4 Нормативно-правове забезпечення поводження з промисловими відходами та ЗШВ в Україні

- 2 Об'єкт, умови та методика досліджень

- 2.1 Загальна характеристика теплоенергетичного сектору Львівщини

- 2.1.1 Львівська ТЕЦ-1: історичний флагман міської енергетики та центр біоенергетичної модернізації

- 2.1.2 Теплова централь «Північна»: центр екологічної синергії

- 2.1.3 Новояворівська ТЕЦ: від повернення активів до впровадження високоефективної когенерації та біопалива

- 2.1.4 Новороздільська ТЕЦ: індустріальний ренесанс

- 2.2 Зміна екологічної парадигми через розподілену генерацію

- 2.3 Характеристика геологічних та гідрогеологічних умов району для екологічного моніторингу золовідвалів

2.4 Методичні підходи до оцінки впливу великотоннажних техногенних відходів на довкілля

3 Результати дослідження

3.1 Динаміка структурно-хімічних характеристик та екологічної оцінки золошлакових матеріалів

3.2 Особливості формування золошлакових відходів у регіоні

3.3 Екологічна оцінка діяльності Добровірської ТЕС як стаціонарного джерела техногенного забруднення

3.4 Оцінка техногенного пресингу на ґрунтовий покрив та аналіз міграційних потоків важких металів

3.5 Управління золошлаковими відходами в умовах переходу до циркулярної економіки та основні сценаріїв екологічних ризиків

4 Охорона праці та захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

4.1 Аналіз стану охорони праці на об'єктах теплоенергетики

4.2 Правила охорони праці під час експлуатації золошлакозакладачів

4.3 Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

Висновки

Бібліографічний список

5. Консультанти з розділів:

| Розділ  | Прізвище, ініціали та посада консультанта          | Підпис, дата   |                  | Відмітка про виконання |
|---------|----------------------------------------------------|----------------|------------------|------------------------|
|         |                                                    | завдання видав | завдання прийняв |                        |
| 1, 2, 3 | Бальковський В.В., доцент кафедри екології         |                |                  |                        |
| 4       | Гордійчук Л.М., доцент кафедри інженерної механіки |                |                  |                        |

7. Дата видачі завдання 22 вересня 2024 року

Календарний план

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                                                                                                              | Строк виконання етапів проєкту | Примітка |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Написання вступу та розділу «Огляд літератури»                                                                                                                   | 22.09.24 р.– 31.12.24 р.       |          |
| 2     | Написання розділу «Об'єкт, умови та методика дослідження»                                                                                                        | 01.01.25 р.– 01.03.25 р.       |          |
| 3     | Написання розділу «Результати досліджень»                                                                                                                        | 02.03.25 р.– 30.09.25 р.       |          |
| 4     | Написання розділу «Охорона праці та захист населення в умовах надзвичайних ситуацій», формулювання висновків, оформлення списку використаних літературних джерел | 01.10.25 р.– 30.11.25 р.       |          |

Студент \_\_\_\_\_ Андрій ПЕТРІВ  
(підпис)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Володимир БАЛЬКОВСЬКИЙ

Екологічна оцінка накопичення золошлакових відходів теплоенергетики Львівщини у контексті сучасних підходів до управління промисловими відходами. Петрів Андрій Ярославович. Кваліфікаційна робота. Кафедра екології та захисту довкілля. Львів, ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького, 2025. 78 с.

78 ст. текст. част., 8 табл., 15 рис., 55 джерел

У магістерській роботі здійснено комплексну екологічну оцінку накопичення золошлакових відходів теплоенергетики Львівської області з акцентом на діяльність Добротвірської ТЕС як ключового об'єкта техногенного навантаження регіону. Дослідження здійснено в контексті сучасних міжнародних підходів до управління промисловими відходами, принципів циркулярної економіки та євроінтеграційних зобов'язань України.

Встановлено, що в Україні у золошлаковідвалах теплових електростанцій акумульовано понад 350–380 млн т золошлакових матеріалів на площі більш як 3000 га, тоді як рівень їх утилізації залишається низьким і становить лише 8,3–11,7 %, що суттєво контрастує з показниками країн ЄС ( $\approx 92$  %) та світових лідерів (до 100 %). Для Львівщини характерна концентрація значних обсягів золошлаків у межах обмежених територій із безпосередньою близькістю до населених пунктів (до 100 м від житлової забудови), що підсилює екологічні та соціальні ризики.

Ідентифіковано основні сценарії небезпеки: хімічне забруднення ґрунтів і вод важкими металами, пилове навантаження ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ), геотехнічні та радіаційні ризики, а також соціально-економічні наслідки деградації земель. Показано, що золошлакові матеріали Добротвірської ТЕС можуть розглядатися як цінна вторинна сировина для будівельної, дорожньої та рекультиваційної галузей, а також для синтезу цеолітів із високими сорбційними властивостями.

Обґрунтовано, що перехід від моделі захоронення до інтегрованого управління вторинними ресурсами дозволяє зменшити техногенне навантаження, скоротити площі золовідвалів і забезпечити екологічний та економічний ефект. Практичні рекомендації можуть бути використані у регіональних програмах управління відходами та післявоєнній відбудові інфраструктури України.

Проаналізовано питання охорони праці та захист населення.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                      | 7  |
| 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....                                                                                         | 9  |
| 1.1 Еколого-економічні засади управління промисловими відходами в умовах глобальних екологічних викликів .....  | 9  |
| 1.2 Золошлакові відходи як об'єкт екологічного управління .....                                                 | 11 |
| 1.3 Міжнародні підходи управління золошлакових відходів (США, ЄС, Польща, Німеччина, Японія, Австралія) .....   | 16 |
| 1.4 Нормативно-правове забезпечення поводження з промисловими відходами та ЗШВ в Україні .....                  | 20 |
| 2 ОБ'ЄКТ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....                                                                     | 22 |
| 2.1 Загальна характеристика теплоенергетичного сектору Львівщини .....                                          | 22 |
| 2.1.1 Львівська ТЕЦ-1: історичний флагман міської енергетики та центр біоенергетичної модернізації .....        | 26 |
| 2.1.2 Теплова централь «Північна»: центр екологічної синергії .....                                             | 29 |
| 2.1.3 Новояворівська ТЕЦ: від повернення активів до впровадження високоефективної когенерації та біопалива .... | 31 |
| 2.1.4 Новороздільська ТЕЦ: індустріальний ренесанс .....                                                        | 32 |
| 2.2 Зміна екологічної парадигми через розподілену генерацію ....                                                | 34 |
| 2.3 Характеристика геологічних та гідрогеологічних умов району для екологічного моніторингу золівідвалів .....  | 36 |
| 2.4 Методичні підходи до оцінки впливу великотоннажних техногенних відходів на довкілля .....                   | 37 |
| 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....                                                                                   | 39 |
| 3.1 Динаміка структурно-хімічних характеристик та екологічної оцінки золошлакових матеріалів .....              | 39 |
| 3.2 Особливості формування золошлакових відходів у регіоні ....                                                 | 43 |
| 3.3 Екологічна оцінка діяльності Добротвірської ТЕС як стаціонарного джерела техногенного забруднення .....     | 46 |

|     |                                                                                                                              |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4 | Оцінка техногенного пресингу на ґрунтовий покрив та аналіз міграційних потоків важких металів .....                          | 57 |
| 3.5 | Управління золошлаковими відходами в умовах переходу до циркулярної економіки та основні сценаріїв екологічних ризиків ..... | 61 |
| 4   | ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ .....                                                       | 67 |
| 4.1 | Аналіз стану охорони праці на об'єктах теплоенергетики .....                                                                 | 67 |
| 4.2 | Заходи щодо покращення гігієни праці, техніки безпеки та пожежної безпеки .....                                              | 68 |
| 4.3 | Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій .....                                                                        | 70 |
|     | ВИСНОВКИ.....                                                                                                                | 72 |
|     | БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....                                                                                                  | 74 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний етап розвитку України характеризується поєднанням двох взаємопов'язаних викликів, а саме потреби забезпечення енергетичної безпеки в умовах війни та післявоєнної відбудови, а також необхідності переходу до екологічно збалансованих і ресурсоефективних моделей розвитку. У цьому контексті особливого значення набуває теплова енергетика, яка з одного боку є важливою складовою паливно-енергетичного комплексу, а з іншого – формує значні обсяги промислових відходів, насамперед золошлакових [40].

За оцінками дослідників, в Україні в золошлакових відвалах теплових електростанцій накопичено понад 350–380 млн т золошлакових відходів на площі понад 3000 га, а щороку утворюється ще кілька мільйонів тонн пилоподібних відходів – золи-винесення, значна частина яких продовжує заховорюватися. За вітряної та посушливої погоди поверхня відвалів інтенсивно пилить, і дрібнодисперсні фракції пилу переносяться на значні відстані, досягаючи житлової забудови та рекреаційних зон. У таких умовах формується додатковий ризик для здоров'я населення, зростає частота респіраторних захворювань, погіршується якість атмосферного повітря та загальний стан навколишнього природного середовища. Ситуацію ускладнює той факт, що частина теплоелектроцентралей і теплоелектростанцій розміщується безпосередньо в межах або поблизу щільно заселених житлових районів великих міст, що посилює локальне екологічне навантаження.

Міжнародні організації, зокрема IPCC та UNEP, визначають управління відходами й розвиток циркулярної економіки ключовими інструментами досягнення кліматичних цілей і зменшення антропогенного навантаження на довкілля. Згідно з UNEP Global Waste Management Outlook 2024 [53], збереження інерційних моделей поводження з відходами призведе до практично дворазового зростання сукупних екологічних, соціальних і економічних витрат до 2050 року, тоді як перехід до «нульових відходів» і циркулярних підходів дає істотний економічний і екологічний вигрaш.

У 2023 році в Україні набув чинності Закон України № 2320-IX «Про управління відходами» [13], який гармонізує національне законодавство з директивами ЄС, вводить ієрархію поводження з відходами, розширену відповідальність виробника та створює рамки для інтеграції циркулярної

економіки в промисловість і енергетику. У таких умовах золошлакові відходи теплоенергетичної галузі розглядаються не лише як екологічна проблема, а й як потенційний ресурс вторинної сировини.

Для Львівської області, де функціонує низка теплоелектро- та котельних об'єктів різної потужності, питання обсягів накопичених золошлакових відходів, їхнього впливу на локальні екосистеми, а також можливостей утилізації та рекультивації мають як практичне, так і наукове значення та потребують подальших комплексних досліджень.

Згідно з офіційними даними, оприлюдненими Департаментом екології та природних ресурсів Львівської області, проведено ідентифікацію підприємств, які генерують найбільше забруднення навколишнього середовища в регіоні, серед яких визначено і Добротвірську ТЕС.

**Метою даної роботи було** дослідити, проаналізувати та оцінити накопичення золошлакових відходів теплоенергетики Львівської області та обґрунтувати науково-практичні рекомендації щодо вдосконалення системи управління цими відходами з урахуванням сучасних міжнародних підходів.

Для досягнення поставленої мети було виконано ряд **завдань**:

- проаналізувати теоретичні засади та нормативно-правові підходи до управління промисловими й золошлаковими відходами у світі, ЄС та Україні;
- охарактеризувати структуру теплоенергетики Львівщини та стан накопичення золошлакових відходів;
- оцінити вплив золошлакових відвалів на ґрунти, водні ресурси та атмосферне повітря з урахуванням сучасних критеріїв екологічного ризику та рекомендацій WHO щодо якості повітря;
- визначити потенціал утилізації золошлакових матеріалів як вторинної сировини в будівництві й інших галузях;
- розробити пропозиції щодо вдосконалення системи управління золошлаковими відходами теплоенергетики Львівщини в контексті розвитку циркулярної економіки.

**Об'єкт дослідження** – золошлакові відходи теплоенергетики Львівщини (передусім Добротвірської ТЕС) та пов'язані з ними техногенні комплекси.

**Предмет дослідження** – екологічні наслідки накопичення золошлакових відходів і можливості їхнього ресурсоефективного використання в контексті сучасних підходів до управління промисловими відходами та циркулярної економіки.

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1 Еколого-економічні засади управління промисловими відходами в умовах глобальних екологічних викликів

Фундаментальні зміни в екологічній політиці початку XXI століття зумовлені загостренням «потрійної планетарної кризи» (triple planetary crisis), яка охоплює зміну клімату, катастрофічну втрату біорізноманіття та безпрецедентний рівень забруднення довкілля. В умовах вичерпності природних ресурсів та експоненційного зростання антропогенного тиску, управління промисловими відходами трансформується із допоміжної санітарно-гігієнічної функції у ключовий інструмент макроекономічної стабільності та ресурсної незалежності.

Промислові відходи є одним із ключових чинників антропогенного тиску на довкілля, а їх обсяг у світі зростає пропорційно розвитку енергетичного, гірничодобувного та переробного секторів. За даними UNEP Global Waste Management Outlook (2024), у світі щорічно утворюється понад 12 млрд тонн промислових відходів, включно з великотоннажними потоками мінеральних техногенних матеріалів [53]. Значну частку цього обсягу становлять відходи енергетичного сектору, зокрема золошлакові відходи (ЗШВ), що утворюються під час спалювання твердого палива на теплоелектростанціях.

Індустріалізація та глобальне зростання попиту на енергоресурси зумовили збільшення використання викопних палив, насамперед вугілля, частка якого залишається високою у країнах Азії, Східної Європи та частково Центральної Європи. Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC) у своєму Шостому оцінювальному звіті (AR6, Working Group III) [42], визначила циркулярну економіку та ефективне управління промисловими відходами як одну з шести ключових стратегій декарбонізації промислового сектору. Це зумовлено тим, що видобуток та переробка первинних матеріалів є джерелом понад 34 % глобальних викидів парникових газів, при цьому близько 70 %

цих викидів припадає саме на вугільну генерацію [35]. Вплив енергетики на кліматичну систему та біосферу є комплексним, адже окрім викидів CO<sub>2</sub>, метану й оксидів азоту, ТЕС формують великі масиви твердих відходів, що накопичуються у золошлаконакопичувачах і мають довготривалі екологічні наслідки [27].

У цьому контексті важливого значення набуває концепція циркулярної економіки, яка з 2015 року стала стратегічною базою Європейського Союзу й була підтверджена у Європейському зеленому курсі (EU Green Deal, 2020). Циркулярна економіка передбачає заміну лінійної моделі «виробництво – споживання – відходи» моделлю багаторазового використання, рециклінг та відновлення ресурсів. Центральним елементом цієї теорії є поняття «декаплінгу» (decoupling) – розриву кореляції між зростанням валового внутрішнього продукту та споживанням первинних ресурсів і утворенням відходів. Організації OECD, Європейська комісія, а також UNEP підкреслюють, що перехід до циркулярних моделей у промисловості дозволяє зменшити обсяг відходів на 30–70 %, тоді як у секторі енергетики – на 50 %, а використання техногенних матеріалів як вторинної сировини може забезпечити суттєве скорочення вилучення природних ресурсів [40, 46, 47, 49]. Організація економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) у своєму звіті «Global Material Resources Outlook to 2060» наголошує, що вторинні ресурси можуть забезпечувати до 20–25 % мінеральних потреб промисловості за умови ефективної утилізації промислових відходів [49, 53].

Управління промисловими відходами сьогодні розглядають не лише як екологічне, але й як економічне питання. За оцінками Європейської комісії, використання вторинних мінеральних матеріалів у ЄС приносить економічний ефект понад 600 млрд євро щорічно та знижує викиди CO<sub>2</sub> на 12–18 % [53]. Для золошлакових матеріалів, які можуть замінювати природні нерудні ресурси, економічний ефект може бути значним: у світі відзначено зростання використання fly ash у будівельній галузі, дорожньому будівництві, цементній промисловості, виробництві геополімерів та благоустрої.

У контексті ЗШВ цей зв'язок є особливо виразним. Виробництво цементу є одним з найбільших джерел антропогенного CO<sub>2</sub>, відповідаючи приблизно за 8% світових викидів. Заміщення клінкеру (основного компонента цементу, виробництво якого потребує високих енерговитрат та супроводжується декарбонізацією вапняку) на летючу золу дозволяє суттєво знизити вуглецевий слід будівельних матеріалів. Дослідження показують, що використання геополімерних бетонів на основі золи може зменшити викиди CO<sub>2</sub> до 80% порівняно з традиційним портландцементом. Таким чином, ЗШВ стають інструментом кліматичної мітигації (пом'якшення наслідків зміни клімату).

Крім того, концепція «міського майнінгу» або вторинної розробки техногенних родовищ набуває особливої актуальності. Вилучення рідкісноземельних елементів із золовідвалів замість відкриття нових шахт дозволяє уникнути значного екологічного навантаження на нові території, зберігаючи біорізноманіття та ландшафти. Це відповідає принципам сталого розвитку, закладеним у «Європейському зеленому курсі» (European Green Deal), та стратегіям ресурсної безпеки розвинених країн.

Таким чином, управління промисловими відходами, зокрема золошлакоутворюючими компонентами, повинна розглядатися як інтегрована стратегія у контексті глобальних екологічних викликів, що поєднує мінімізацію впливу енергетики на клімат, підвищення економічної доцільності повторного використання ресурсів та інтеграції принципів циркулярної економіки у національну політику.

## **1.2 Золошлакові відходи як об'єкт екологічного управління**

Особливе місце у структурі промислових відходів посідають золошлакові відходи, які є побічним продуктом спалювання кам'яного та бурого вугілля, торфу й інших твердих палив у котлоагрегатах ТЕС і ТЕЦ.

Мінералогічний склад відходів залежить від генезису вугілля, технології спалювання, режиму охолодження та методів газоочистки, що визначає як їхній ресурсний потенціал, так і рівень екологічної небезпеки.

Золошлакові матеріали є продуктом високотемпературних фазових перетворень мінеральної частини твердого палива (табл. 1.1). У процесі спалювання при температурах 1200–1700°C глинисті мінерали, кварц, карбонати та сульфідні, що містяться у вугіллі, плавляться або спікаються, утворюючи алюмосилікатне скло та нові мінеральні фази. Основними компонентами є  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ , а також домішки важких металів – Pb, Cd, Zn, Cu, Cr, Ni, миш'яку, селена й ванадію [2, 4]. Часто у золошлаку присутні залишки незгорілого вуглецю, поліциклічні ароматичні вуглеводні та природні радіонукліди (K-40, Ra-226, Th-232).

У структурі золошлакових відходів переважають:

- зола-винос (*fly ash*) – тонкодисперсний матеріал, що виноситься потоками димових газів;
- шлакова частина (*bottom ash*) – важча, грубодисперсна фракція, що накопичується під топкою котлоагрегату.

Таблиця 1.1 – Детальний огляд складу і властивостей золошлакоутворюючих компонентів [27]

| Зовнішній вигляд складових золошлакових відходів                                    | Характеристика золошлакових відходів                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                   | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|  | <p>Летюча зола (<i>fly ash</i>) – є тонкодисперсним матеріалом, розмір його часток варіюється від мікронних значень до 0,315 мм. Вторинний продукт, що залишився після згорання палива на ТЕС, що виноситься з топки димовими газами та вловлюється системами газоочистки (електрофільтри, рукавні фільтри). Становить 70–85% від загального обсягу твердих продуктів згорання. Завдяки сферичній формі часток та пуцолановій активності є найбільш цінним компонентом для будівельної індустрії.</p> |

| 1                                                                                  | 2                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p>Зволожена зола-виносу – є вторинною сировиною, що утворюється на ТЕС після згоряння палива у формі частинок з номінальним розміром менше ніж 0,315 мм. Після вловлювання фільтрами, ці частки направляються і складуються на золовідвалах.</p>                           |
|   | <p>Суміш золошлакова – є частиною відходів виробництва, що формуються при згорянні палива на ТЕС. Ця суміш являє собою поєднання двох фракцій: золи-виносу (дрібні частки, розмір яких менше ніж 0,315 мм) та шлаку (крупні частинки, розмір яких більше ніж 0,315 мм).</p> |
|  | <p>Шлак паливний – вторинна сировина, що є крупною складовою відходів, які утворюються після згоряння палива на теплових електростанціях. Його основу складають ніздрюваті склоподібні частинки, розмір яких перевищує 0,315 мм.</p>                                        |

Попри високий ресурсний потенціал, ЗШВ містять концентрований набір токсичних елементів, які спочатку були присутні у вугіллі в слідових кількостях. У процесі спалювання органічна частина палива окислюється, а важкі метали концентруються в твердому залишку. До пріоритетних забруднювачів належать миш'як (As), свинець (Pb), ртуть (Hg), кадмій (Cd), хром (Cr), селен (Se), талій (Tl) та бор (B).

Важливо зазначити, що визначення водневого показника (pH) водних екстрактів, отриманих із золошлакоутворюючих компонентів, є критично важливим етапом для розуміння їхньої екологічної та технологічної поведінки. Цей показник прямо впливає на реакційну здатність матеріалу та його довготривалу хімічну стабільність. Крім того, оцінка pH є необхідною для визначення потреби у додатковій корекції кислотності чи лужності перед

впровадженням ЗШВ у будь-який процес утилізації чи рециклінгу.

Аналізуючи водні екстракти зразків золошлаків, відібраних на Сумській ТЕЦ, дослідниками Залевською Іриною та Блинним Євгеном [2], виявлено виражену лужну реакцію. Зафіксовані значення водневого показника становили рН 8,96 та рН 8,18, що однозначно підтверджує їхній лужний характер. Слід підкреслити, що ця лужність має подвійний вплив, оскільки висока лужність потенційно може змінювати якість поверхневих і ґрунтових вод, які контактують із золовідвалами, спричиняючи вторинне залужнення водних об'єктів; по друге лужне середовище сприяє іммобілізації (закріпленню) низки важких металів, зокрема заліза, алюмінію та марганцю. Цей процес відбувається завдяки їхньому гідролізу та подальшому утворенню малорозчинних гідроксидних осадів. Такий механізм є корисним екологічним фактором, оскільки значно зменшує вилигування цих токсичних елементів у навколишнє середовище.

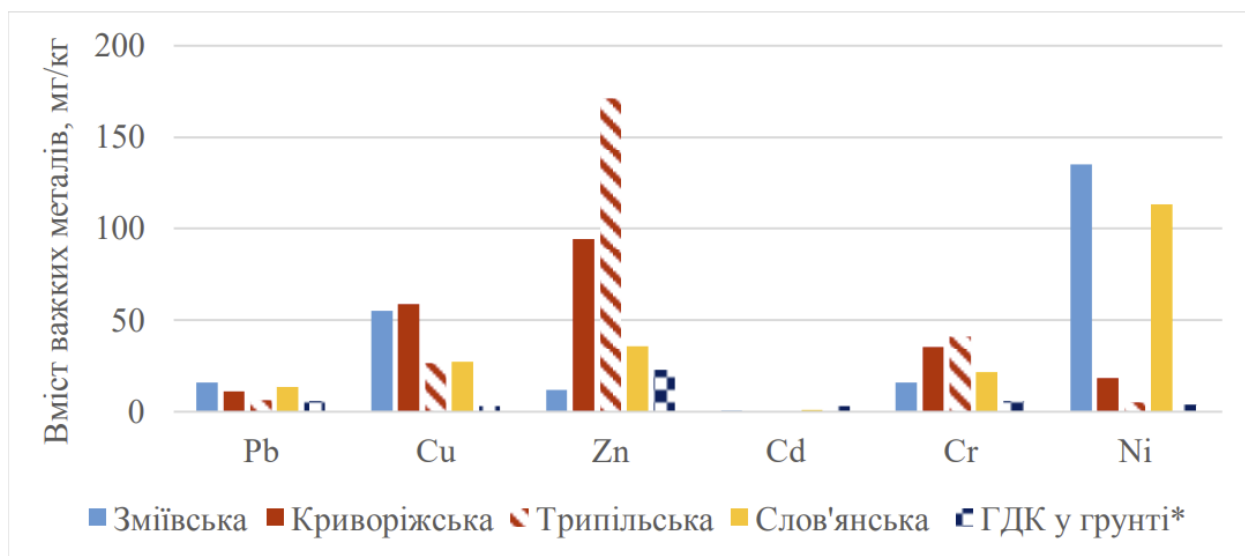


Рисунок 1.1 – Вміст рухомих форм важких металів у золошлакових відкладах теплових електростанцій [2]

З'ясовано, що токсикологічні властивості золошлаку визначаються високою рухомістю водорозчинних форм важких металів, наявністю дрібнодисперсних частинок, здатних переноситися на значні відстані, та ризиком забруднення підземних вод. Зольний пил містить кристалічний кремнезем та адсорбовані важкі метали. ВООЗ у 2021 році радикально

переглянула рекомендації щодо якості повітря, встановивши середньорічну граничну концентрацію для  $PM_{2.5}$  на рівні **5  $мкг/м^3$** , що підкреслює надзвичайну небезпеку навіть низьких доз. Дослідження WHO (2021) підкреслюють, що частинки  $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$ , які містяться у золошлаковому пилю, здатні проникати глибоко в легені та спричиняти респіраторні, серцево-судинні та онкологічні захворювання [54].

Накопичення золошлакових відходів у відвалах і гідровідстійниках супроводжується низкою серйозних екологічних загроз:

- ґрунтове забруднення – формування техногенних ґрунтів із підвищеним вмістом важких металів, що у випадку ТЕС України концентрація цих металів може перевищувати фонові показники у 2–10 разів;
- забруднення поверхневих і підземних вод унаслідок вилугування мобільних форм металів і високого вмісту солей. Дослідження Агентства з охорони довкілля США (EPA) виявили, що золовідвали є джерелами забруднення ґрунтових вод свинцем, кадмієм і хромом, причому їхні концентрації перевищують нормативи у 3–20 разів [54];
- пилове навантаження – перенесення дрібнодисперсних частинок золошлаків вітром, що сприяє підвищенню концентрацій  $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$  в приземному шарі повітря [38, 41, 44, 51];
- ризики техногенних аварій (прориви дамб, ерозія схилів), які можуть призвести до масштабного залпового забруднення територій. За оцінками українських дослідників (2020–2024), площа золовідвалів в Україні перевищує 20–25 тис. га, що порівнюється до площі середнього українського району [9];
- радіаційний фактор (деякі золошлакові відходи мають підвищений вміст природних радіонуклідів, що потребує радіаційно-гігієнічної оцінки перед використанням у будівництві (норми ДБН В.1.4-1.01-2012)).

У складі ЗШВ також можуть бути присутні незгорілі фракції вуглецю, що посилюють адсорбційні властивості та здатність до акумуляції токсикантів.

### 1.3 Міжнародні підходи управління золошлаковими відходами (США, ЄС, Польща, Німеччина, Японія, Австралія)

Управління золошлаковими відходами значно відрізняється між країнами залежно від нормативної бази, економічних пріоритетів та рівня розвитку технологій.

Для України проблема накопичення є критичною, адже у золошлаковідвалах вже нагромаджено понад 360 млн. т відходів, а щорічне утворення оцінюється у межах від 8 до 30 млн т. Значні розбіжності в оцінках пояснюються відмінностями методологій обліку та різними періодами статистичних вимірювань. Попри потенційно високу придатність таких матеріалів до вторинного використання, рівень їх утилізації в Україні традиційно залишається низьким і коливається у межах 8,3–11,7 % [1, 2]. Це різко контрастує з показниками провідних країн ЄС, де середній рівень повторного використання золошлаків становить близько 92 %, та світових лідерів – Австралії, Японії та Нової Зеландії – де цей показник сягає 100 %.

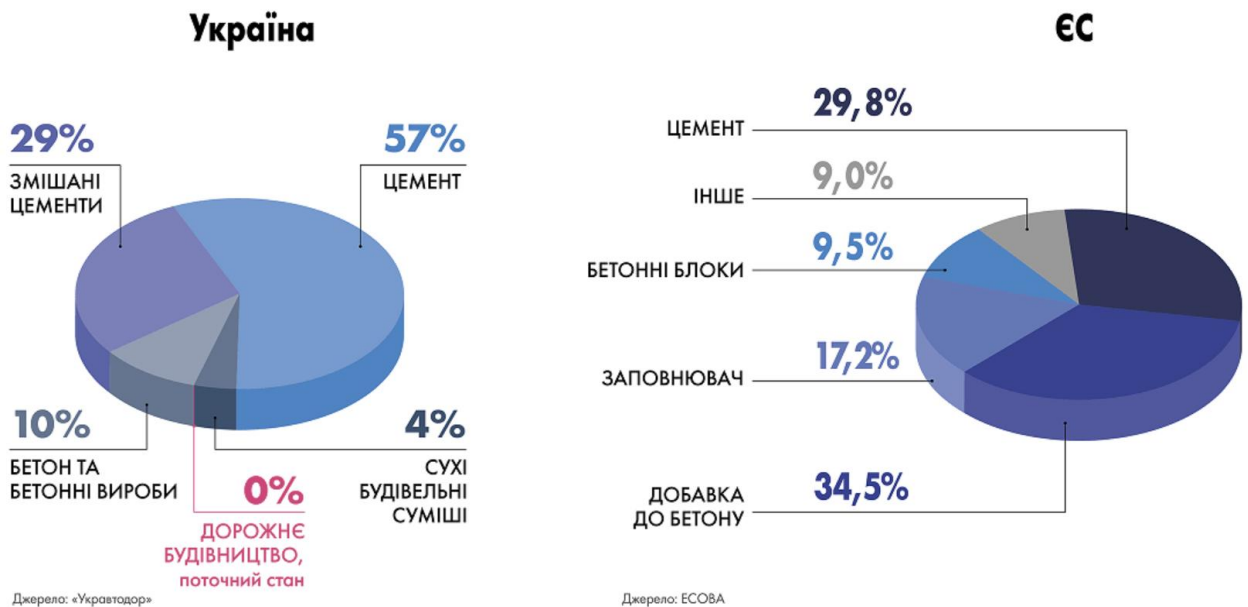


Рисунок 1.2 – Основні вектори повторного використання золошлакових відходів [49, 53]

Аналізуючи міжнародний досвід поводження з золошлаковими матеріалами, можна констатувати, що ці відходи мають значний потенціал

для повторного використання у різних секторах економіки. Зокрема, зростає практика залучення золошлаків до виробництва будівельних матеріалів, дорожнього будівництва, виготовлення цементу. Показовим є приклад Німеччини, де золошлакові матеріали широко використовують як заповнювач у нев'язких сумішах для облаштування насипів, дорожніх основ чи під час спорудження захисних гідротехнічних споруд. Подібні практики демонструють можливість трансформації традиційних золошлакових відвалів із джерела екологічної небезпеки на цінний вторинний ресурс за умови дотримання вимог екологічної та технічної безпеки.

Показовим прикладом високого рівня утилізації золошлакових матеріалів (fly ash) є США, де частка повторного використання золи та шлаків сягає близько 80 % від річного утворення. У Великій Британії більшу частину відходів згорання вугілля застосовують насамперед як мінеральні компоненти у дорожньому будівництві, зокрема в конструкціях асфальтобетонних покриттів.

У Польщі ефективність використання золошлаку значною мірою забезпечується мінімізацією логістичних витрат між підприємствами теплоенергетики та споживачами вторинної сировини. Це дозволяє активно залучати вугільну золу в проєкти з будівництва та ремонту автомобільних доріг.

Франція також демонструє успішний досвід переробки золошлаків: там зола від спалювання вугілля широко застосовується у сумішах із піском, камінням, вапняковими матеріалами, сульфатними та іншими мінеральними домішками для формування основ дорожнього полотна.

У Японії та Австралії широко розвинена технологія геополімерних матеріалів, що дозволяє використовувати золошлаки для виробництва високоякісних та екологічно безпечних конструкційних матеріалів.

Аналіз світового досвіду застосування золошлакових матеріалів представлено на рис. 1.3.

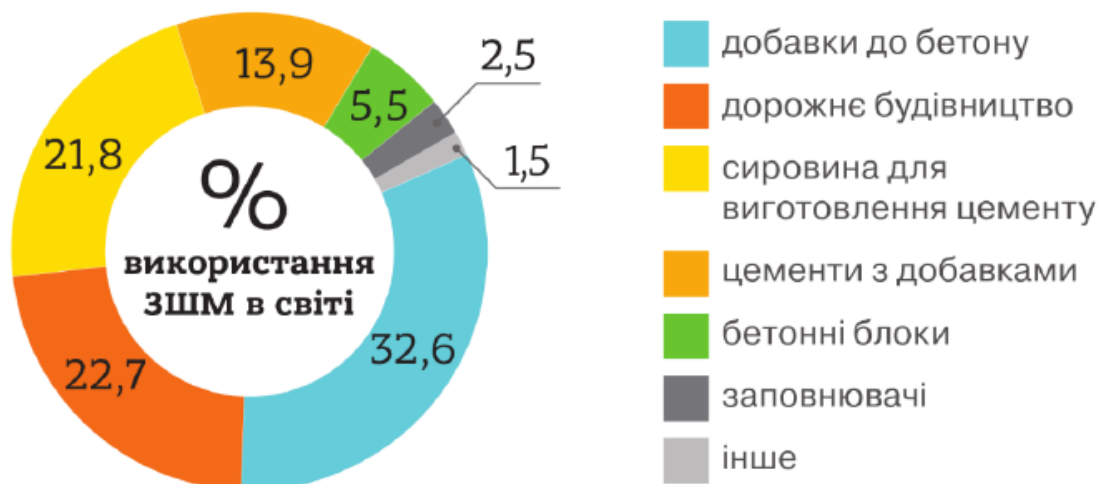


Рисунок 1.3 – Світова практика використання золошлаковідходів [34]

На основі світового досвіду можна зробити висновок, що золошлакоутворюючі компоненти (тверді відходи ТЕЦ) активно використовуються в різних секторах будівництва, зокрема у виробництві будівельних матеріалів, при будівництві доріг та для заповнення шахт.

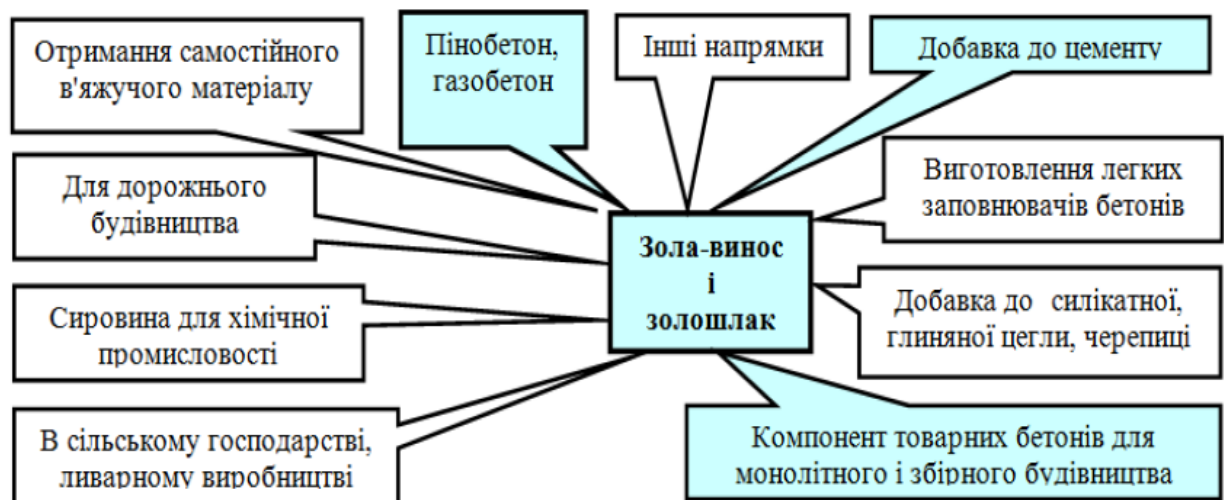


Рисунок 1.4 – Основні напрями рециклінгу золи-виносу та золошлаків [29]

Натомість в Україні низька частка утилізації золошлаку пояснюється низьким попитом на вторинну сировину, відсутністю налагоджених логістичних ланцюгів та недостатнім рівнем екологічного менеджменту у сфері поводження з промисловими відходами.

Важливо зазначити, що залучення золошлакових матеріалів як

вторинної сировини передбачає ретельний аналіз їхнього хімічного складу та умісту природних радіонуклідів, показники яких значною мірою залежать від виду та родовища вугілля.

За результатами досліджень українських учених, Печеним В.Л., Петруком Р.В. встановлено, що у золовідходах зазвичай фіксується наявність вуглецю у формі різноманітних модифікацій, включно з коксовими залишками [2, 27]. Для золи, отриманої у процесі спалювання кам'яного вугілля, вміст коксових частинок може становити 3–12 %, при цьому частка незгорілих частинок є вищою у грубодисперсних фракціях і меншою – у тонкодисперсних. Така морфолого-хімічна структура відходів визначає їхню потенційну токсичність та вплив на екосистеми.

Особливої уваги потребує проблема пилового навантаження. Дрібнодисперсні частинки золошлаку здатні переноситися вітром на значні відстані, що сприяє забрудненню повітряного басейну, формуючи ризики для здоров'я населення, насамперед щодо розвитку респіраторних патологій. Висока частка дрібних фракцій сприяє їх тривалому перебуванню у повітрі, що погіршує екологічний стан прилеглих територій, особливо тих, що межують із житловою забудовою.

Варто також зазначити, що об'єкти тривалого складування золошлаків займають великі площі земель, які потенційно могли б бути інтегровані в інфраструктурний розвиток територій, але натомість формують зони підвищеної техногенної небезпеки.

Подібна ситуація властива багатьом регіонам України, що підтверджує потребу у системних та оперативних управлінських рішеннях, спрямованих на екологізацію теплоенергетичного сектору та впровадження сучасних ресурсоефективних моделей поводження з відходами.

#### **1.4 Нормативно-правове забезпечення поводження з промисловими відходами та ЗШВ в Україні**

Україна перебуває на етапі складної та масштабної реформи системи управління відходами, метою якої є гармонізація національного законодавства з європейськими стандартами на виконання зобов'язань за Угодою про асоціацію з ЄС. Цей процес ускладнюється умовами воєнного стану та значними руйнуваннями енергетичної інфраструктури.

В Україні нормативну рамку сучасних підходів формують:

- Закон України «Про управління відходами» № 2320-IX (2022, чинна редакція 2025) [13], який імплементує ключові положення директив ЄС у сфері відходів, вводить розширену відповідальність виробника, ієрархію поводження з відходами та вимоги до планів управління відходами на рівні регіонів і підприємств, а також змінює класифікацію відходів, приділяючи особливу увагу великотоннажним потокам техногенних матеріалів, зокрема золошлаковим. Це відкриває можливості для інституціоналізації підходів циркулярної економіки в управлінні золошлаковими відходами теплоенергетики;
- Національна стратегія управління відходами до 2030 року та Національний план управління відходами до 2033 року, де промислові відходи, включно з золошлаковими, визначено одним із пріоритетних потоків для зменшення захоронення та розвитку переробки й утилізації [21];
- Стратегія державної екологічної політики України до 2030 року, яка передбачає інтеграцію принципів циркулярної економіки та зменшення ресурсомісткості промислового виробництва, зокрема в енергетиці [12].

На європейському рівні для великих спалювальних установок діють довідники найкращих доступних технологій Єврокомісії, які охоплюють, серед іншого, системи сухого й напівсухого золовидалення, ущільнення та рекультивації золовідвалів, утилізацію золи в будівельних матеріалах і жорсткі норми щодо викидів пилу та важких металів.

Сучасні підходи до управління промисловими відходами, що закріплені в документах ЄС, IPCC і UNEP, базуються на ієрархії поводження з відходами: запобігання утворенню – повторне використання – переробка – відновлення (включно з енергетичним) – видалення. Концепція циркулярної економіки передбачає не лише збільшення частки переробки, а й проектування технологій таким чином, щоб промислові побічні продукти (в тому числі золошлаки) з самого початку розглядалися як потенційна сировина для інших процесів. IPCC відзначає, що застосування циркулярних практик управління промисловими відходами призводить до одночасного зменшення прямих викидів, скорочення потреби в первинній сировині та досягнення цілей сталого розвитку.

Глобальні та регіональні ініціативи (UNEP, IPCC, WHO, FAO, ЄС) наголошують на необхідності переходу до моделей «екологічно безпечного поводження з відходами», скорочення їх утворення та циркуляції акумульованих техногенних матеріалів у повторний ресурсний обіг шляхом впровадження ресурсозберігаючих технологій та перетворення відходів на вторинну сировину [38, 42, 44, 45, 46-49].

Отже, теоретичний та нормативно-методичний аналіз свідчить, що золошлакові відходи слід розглядати в подвійній площині: як джерело екологічних ризиків та як потенційний ресурс для розвитку циркулярних моделей у будівельній, дорожній та інших галузях. Саме в цьому контексті здійснюється подальший аналіз теплової енергетики Львівщини та накопичення золошлакових відходів.

Війна загострила протиріччя між екологічними зобов'язаннями Національного плану скорочення викидів та енергетичною безпекою, що вимагає розробки гнучких, адаптивних стратегій управління золошлаковими відходами на перехідний період відновлення країни.

## **2 ОБ'ЄКТ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **2.1 Загальна характеристика теплоенергетичного сектору Львівщини**

Теплоенергетичний комплекс Львівської області є фундаментальною складовою енергетичної безпеки Західного регіону України, який історично сформувався як вузол генерації та транскордонного перетоку електроенергії. Структура цього сектору характеризується складною архітектурою, що поєднує потужності базової генерації, орієнтовані на використання місцевих видів палива, та розгалужену мережу тепlopостачання [15, 16, 19, 21]. Аналіз стану галузі у 2023–2025 роках свідчить про критичні трансформації, зумовлені як необхідністю інтеграції до європейського енергетичного простору (ENTSO-E), так і безпрецедентними викликами, пов'язаними з повномасштабною військовою агресією та цілеспрямованим руйнуванням інфраструктури.

Важливо зазначити, що в умовах сучасної євроінтеграції, реформування системи управління відходами та переходу до принципів циркулярної економіки саме тепла енергетика стає індикатором здатності регіону поєднати енергетичну безпеку з екологічною відповідальністю [21].

Домінантою теплової генерації регіону виступає Добротвірська тепла електростанція, яка входить до складу операційного холдингу АТ «ДТЕК Західенерго» (рис. 2.1). Цей об'єкт, введений в експлуатацію у 1950-х роках, залишається одним із найстаріших та водночас стратегічно найважливіших вузлів енергосистеми України. Проектна потужність станції становить 510 МВт, проте реальна доступна потужність варіюється залежно від технічного стану енергоблоків, які працюють поза межами свого паркового ресурсу, та поточної паливної кон'юнктури [4, 16, 19].

Об'єкт розміщений у західній частині України – на відстані близько 60 км на північ від м. Львова та 14 км від м. Кам'янка-Бузька, на лівобережжі р. Західного Бугу. Промисловий майданчик Добротвірської ТЕС охоплює

територію площею 45 га. У безпосередній близькості до станції розташовані: з південного та південно-східного напрямків – смт Добротвір; у північному та північно-західному – с. Старий Добротвір; зі східного боку – водосховище ТЕС. Найближчі житлові будівлі знаходяться на відстані приблизно 100 м від меж промислового майданчика, що зумовлює важливість ретельного контролю екологічних ризиків та впливів на довкілля.



Рисунок 2.1 – Вигляд Добротвірської ТЕС

Добротвірська ТЕС виконує унікальну подвійну функцію в енергобалансі. По-перше, вона забезпечує покриття базових та пікових навантажень у Львівському енерговузлі, стабілізуючи напругу в мережі регіону. По-друге, станція відіграє ключову роль у експортному потенціалі держави, будучи з'єднаною виокремленою лінією електропередачі напругою 220 кВ «Добротвір–Замость» (Dobrotvir–Zamosc) з енергосистемою Польщі. Цей інтерконектор дозволяє здійснювати передачу електроенергії до країн Європейського Союзу обсягом до 2 ТВт·год на рік, що є критично важливим для валютних надходжень та підтримки частоти в об'єднаній енергосистемі континентальної Європи.

Окрім генерації електричної енергії, Добротвірська ТЕС є безальтернативним джерелом централізованого теплопостачання та постачання гарячої води для селища Добротвір (Шептицький район) та прилеглих промислових споживачів, що надає їй статусу містоутворюючого підприємства з високою соціальною відповідальністю.

Доповнюють структуру теплоенергетики регіону комунальні теплоелектроцентралі міста Львова – Львівська ТЕЦ-1 та теплова централь «Північна» (колишня ТЕЦ-2), **а також Новояворівська ТЕЦ та Новороздільська ТЕЦ** [15, 16, 19, 21, 22].

Львівська ТЕЦ-1 та ТЦ «Північна», що перебувають в управлінні ЛМКП «Львівтеплоенерго», інтегруються в європейські фінансові інструменти (ЄБРР, NEFCO) з акцентом на синергію з муніципальними відходами та стічними водами. На відміну від вугільної генерації Добротвірської ТЕС, ці об'єкти переважно орієнтовані на спалювання природного газу (й розглядаються для переведення на біопаливо та RDF-компонент твердих побутових відходів) та забезпечують тепловою енергією житловий фонд обласного центру. В рамках євроінтеграційних процесів та співпраці з міжнародними фінансовими інституціями, зокрема GIZ та ЄБРР, на цих підприємствах впроваджуються проєкти з енергоефективності, спрямовані на модернізацію теплових мереж та інтеграцію теплових насосів у систему централізованого опалення, як це реалізується у пілотному проєкті в районі Сихів.

Державно-корпоративний сектор (зокрема міста Новояворівськ і Новий Розділ) стає полігоном для реалізації пілотних проєктів національного масштабу з переведення систем централізованого опалення на агро-біомасу (зокрема, соломі та тріску). Це стало можливим завдяки тому, що активи, які були вилучені у приватних власників через корупційні ризики, були передані в управління ТОВ «Нафтогаз Тепло», що ініціює впровадження нових енергетичних рішень.

Хоча формально Бурштинська ТЕС розташована в Івано-Франківській області, її золовідвали й водойми-охолоджувачі в басейні р. Гнила Липа та в

зоні впливу Галицького національного природного парку безпосередньо впливають на транскордонні для областей водні системи й екосистеми, пов'язані з Львівщиною. Таким чином, при аналізі промислових відходів теплоенергетики регіону доцільно враховувати й «сусідні» вугільні потужності, що формують спільний екологічний ризик.

Період 2022–2024 років став етапом найважчих випробувань для теплоенергетики Львівщини за всю історію її існування. Внаслідок масованих ракетно-дронових атак з боку російської федерації, енергетична інфраструктура зазнала безпрецедентних руйнувань, що призвело до зміни режимів роботи та стратегічного переосмислення розвитку галузі.

Аналіз подій показує, що Добротвірська ТЕС неодноразово ставала ціллю атак. Зокрема, удари у 2024 році (квітень, жовтень) спричинили масштабні пожежі, пошкодження турбінних відділень, розподільчих пристроїв та допоміжного обладнання. За офіційними даними, станом на середину 2024 року Україна втратила близько 9 ГВт маневрових потужностей, значна частина яких припадає на теплові електростанції, включаючи об'єкти ДТЕК. Це призвело до вимушених аварійних відключень споживачів у Львівській області та необхідності імпорту електроенергії для покриття дефіциту.

Критичним наслідком атак стала зміна режимів експлуатації вцілілого обладнання. Енергоблоки змушені працювати у надзвичайно напружених маневрових режимах (часті пуски та зупинки) для балансування енергосистеми в умовах дефіциту потужності. Такий режим роботи («рваний графік») є нехарактерним для обладнання, спроектованого для базового навантаження, що призводить до:

- прискореного зносу металу поверхонь нагріву котлів та лопаток турбін;
- зниження ефективності спалювання палива, що супроводжується збільшенням недопалу (вмісту вуглецю) у золі та зростанням питомих витрат палива;
- погіршення якості золошлакових відходів як вторинної сировини через нестабільність їхнього хімічного та гранулометричного складу.

У відповідь на загрози централізованій генерації, у регіоні активізувалися процеси децентралізації. Розробляються та реалізуються проекти встановлення газотурбінних установок та когенераційних модулів малої та середньої потужності, які є менш вразливими до ракетних ударів та можуть забезпечувати живлення критичної інфраструктури в умовах блекаутів. Водночас тривають масштабні відновлювальні роботи, які потребують значних капіталовкладень: лише у 2023 році компанія ДТЕК інвестувала близько 4 млрд грн у ремонтну кампанію ТЕС [4].

### **2.1.1 Львівська ТЕЦ-1: історичний флагман міської енергетики та центр біоенергетичної модернізації**

Львівська ТЕЦ-1 – одна з найстаріших теплоелектроцентралей України, розташована у південній частині міста (на вул. Козельницькій) є не просто інфраструктурним об'єктом (рис. 2.2), а історичним пам'ятником промислової архітектури, який продовжує нести критичне навантаження. Станція була введена в експлуатацію у 1908–1909 роках під керівництвом видатного інженера Юзефа Томіцького. Первісно вона проектувалася як електростанція змінного струму для розвантаження міської мережі постійного струму, яка на початку XX століття вже не справлялася з потребами електрифікації Львова та розширення трамвайних ліній.

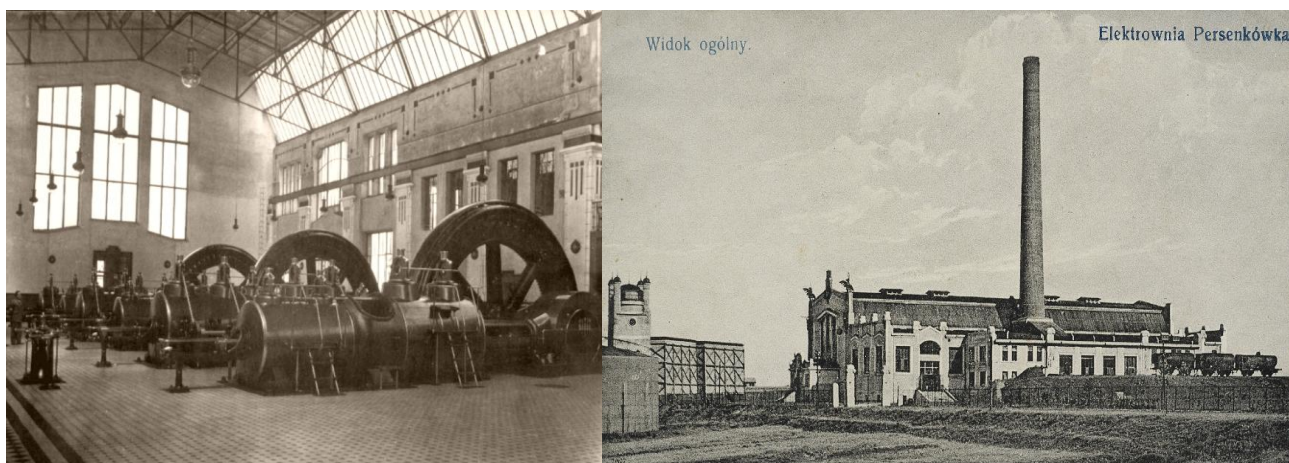


Рисунок 2.2 – Львівська ТЕЦ-1 [15]

Під час Другої світової війни значна частина обладнання була демонтована або знищена. Відновлення станції відбувалося з використанням обладнання,

вивезеного з Німеччини (зокрема з міста Одерталь) в якості репарацій. Це створило унікальний технологічний мікс, де поруч із радянськими модернізаціями 1950-х років функціонували вузли європейського виробництва першої половини століття. У 1950-х роках, після запуску Добротвірської ТЕС, ТЕЦ-1 змінила профіль, перейшовши з режиму основної електрогенерації в режим теплофікації (комбінованого виробництва тепла та електроенергії).

Сучасні технічні характеристики:

- основою виробничих потужностей ТЕЦ-1 є паротурбінний цикл. Історично встановлена електрична потужність сягала 68 МВт (формувався турбогенераторами 4x15 МВт + 8 МВт). Однак фактична робоча потужність варіюється залежно від технічного стану зношених турбін;

- встановлена теплова потужність близько 800 Гкал/год. Станція забезпечує теплом та гарячою водою ключові житлові масиви: Сихівський (найбільший спальний район міста), Франківський та Личаківський райони.

- основне паливо – природний газ. Мазутне господарство зберігається як стратегічний резерв на випадок перебоїв з газопостачанням, проте його використання обмежене через високу в'язкість палива, необхідність постійного підігріву та жорсткі екологічні обмеження щодо викидів сірки та ванадію.

Станом на 2025 рік підприємство функціонує як складний теплоенергетичний комплекс, що поєднує історичні потужності з новітніми елементами розподіленої генерації. Модернізація ТЕЦ-1 відбувається за двома векторами: фізична реабілітація обладнання та цифрова трансформація мереж.

Критичним етапом стала капітальна реконструкція парового котла № 9 (ПК-9) та котла № 3. Знос ПК-9 свого часу призвів до аварійної зупинки, що залишила Сихів без гарячої води на тривалий час. Реконструкція, проведена силами ЛМКП «Львівтеплоенерго» за підтримки міського бюджету (інвестиції понад 14 млн грн на етапі 2019 року), фактично означала будівництво нового котла в існуючому каркасі [19]. Це дозволило підвищити ККД агрегату та надійність теплопостачання в пікові зимові періоди.

Проект «Енергоефективний район Львова» (Sykhiv District) дозволив ТЕЦ-1 стати базою для пілотного проєкту за підтримки уряду Німеччини (GIZ) та Швейцарії. Проєкт фокусувався не лише на генерації, а й на

споживанні. У районі Сихів було впроваджено систему індивідуальних теплових пунктів у житлових будинках. Це дозволило перейти від кількісного регулювання (зміни обсягу теплоносія) до якісного (зміни температури), що знизило температуру «зворотки» (води, що повертається на ТЕЦ) і підвищило загальну ефективність системи.

У січні 2024 року «Львівтеплоенерго» стало об'єктом цілеспрямованої кібератаки з використанням шкідливого програмного забезпечення "FrostyGoop". Атака була спрямована на контролери ENCO, що керують теплопостачанням, і призвела до тимчасового відключення опалення у понад 600 будівлях. Цей інцидент підкреслив, що модернізація ТЕЦ-1 сьогодні – це не лише заміна труб, а й впровадження захищених SCADA-систем та ізольованих контурів управління.

Львівська ТЕЦ-1 розглядається як ключовий майданчик для декарбонізації теплопостачання міста.

У співпраці з НАК «Нафтогаз України» та міською владою розроблено проєкт будівництва потужної біопаливної установки. Загальна потужність запланованих об'єктів у Львові складає 90 МВт теплової та 11 МВт електричної енергії. Основним паливом має стати деревна тріска, доступна завдяки розвиненому лісовому господарству регіону. Також розглядається можливість використання RDF (твердого відновлюваного палива) у майбутньому. Заміщення природного газу для покриття базового навантаження. Планується, що біопаливна установка зможе покривати до 25% потреби міста в теплі, що є критично важливим для економічної стабільності підприємства в умовах волатильних цін на газ.

Окрім біомаси, розглядаються проєкти встановлення високоманеврових газових турбін або газопоршневих двигунів. Зокрема, «Укрнафта» анонсувала плани будівництва сучасної парогазової установки потужністю до 320 МВт у Львівській області, що може бути інтегрована в існуючу інфраструктуру для балансування енергосистеми та забезпечення автономності критичних вузлів.

У 2025 році завершено реконструкцію відкритих розподільчих пристроїв для підвищення стійкості до зовнішніх перенапруг та аварійних режимів.

### 2.1.2 Теплова централь «Північна»: центр екологічної синергії

Теплова централь «Північна» (раніше відома як ТЕЦ-2), розташована у північній промисловій зоні Львова (на вул. Пластовій), є другою міською теплоелектроустановкою у Львові, що обслуговує житловий фонд північної частини міста (рис. 2.3). Спроектвана у 1979 році інститутом «Львівтеплоелектропроект», вона мала стати потужною вугільною ТЕЦ з електричною потужністю 380/440 МВт, що працювала б на вугіллі Львівсько-Волинського басейну.



Рисунок 2.3 – Теплова централь «Північна»

Однак проект не було завершено в повному обсязі. Сьогодні це потужна водогрійна котельня, яка працює на природному газі. Основу складають водогрійні котли типу KBTK-100 та KBГМ-100. Об'єкт хронічно недовантажений. Проектована під потреби потужного промислового кластеру північного Львова, станція сьогодні обслуговує переважно

житловий сектор, потреби якого значно менші за проектну потужність станції.

У 2024-2025 роках ТЦ «Північна» стала полігоном для впровадження передових рішень розподіленої генерації, спрямованих на забезпечення енергонезалежності критичної інфраструктури.

Згідно з аналізом тендерної документації (UA-2024-12-12-020642-a), на об'єкті реалізовано проєкт встановлення високотехнологічних газопоршневих генераторів.

Унікальність ТЦ «Північна» полягає в її географічному сусідстві з Львівськими очисними спорудами на річці Полтва. Це дозволило реалізувати один із найбільш передових проєктів «секторальної інтеграції» в Україні. За фінансової підтримки європейських інституцій (кредит ЄБРР, гранти Е5Р та NEFCO на суму понад 31,5 млн євро) реалізується масштабний проєкт модернізації Львівськими очисними спорудами, зокрема будівництво метантенків для зброджування мулу стічних вод. Отриманий біогаз спалюється в когенераційних установках для виробництва електроенергії та тепла. Це дозволяє очисним спорудам стати енергонезалежними, а надлишок тепла може бути інтегрований у теплову мережу ТЦ «Північна».

Розглядається встановлення промислових теплових насосів для відбору низькопотенційного тепла з очищених стічних вод. Це стабільне джерело енергії, яке дозволяє підігрівати мережеву воду перед подачею в котли ТЦ «Північна», суттєво економлячи газ.

На вулиці Пластовій, у безпосередній близькості до ТЦ «Північна», триває будівництво Львівського механіко-біологічного комплексу переробки відходів. Станом на 2024-2025 роки, готовність заводу оцінюється у 65-80%. Генеральний підрядник – польська компанія Control Process S.A. Завод розрахований на переробку 250 000 тонн відходів на рік. Ключовим продуктом переробки є висококалорійне паливо RDF (тверде відновлюване паливо). Однак наразі існує технологічний розрив у його використанні:

1. ТЦ «Північна» не має котлів з киплячим шаром та систем очистки димових газів, необхідних для прямого спалювання RDF згідно з європейськими директивами;

2. поточна стратегія передбачає продаж RDF цементним заводам (зокрема, «Івано-Франківськцемент» та «Миколаївцемент»), де високі температури печей ( $1450^{\circ}\text{C}$ ) дозволяють безпечно утилізувати паливо.

Транспортування RDF на цементні заводи вирішує проблему сміття, але позбавляє Львів дешевого джерела теплової енергії. Довгострокова стратегія модернізації ТЦ «Північна» повинна передбачати встановлення котла для спалювання RDF, що замкне цикл «відходи-енергія» всередині міста.

Розташування ТЦ «Північна» у промзоні дозволяє мінімізувати вплив акустичного шуму та вібрації від газопоршневих двигунів на населення. Викиди  $\text{NO}_x$  контролюються сучасними системами управління горінням (lean-burn technology).

### **2.1.3 Новояворівська ТЕЦ: від повернення активів до впровадження високоефективної когенерації та біопалива**

Історія Новояворівської ТЕЦ (рис. 2.4) є прикладом відновлення державного контролю над критичною інфраструктурою. Станція, що належала ТОВ «Енергія-Новояворівськ», стала фігурантом розслідування НАБУ щодо розкрадання пільгового газу на суму понад 1,4 млрд грн (схема «газ для населення – електроенергія для ринку»).



Рисунок 2.4 – Новояворівська ТЕЦ

Після арешту активів та невдалого періоду управління приватним управителем («Гарант Енерго М»), що ледь не призвів до зриву опалювального сезону, об'єкт було передано в управління ТОВ «Нафтогаз Тепло».

На момент передачі «Нафтогазу» станція перебувала у критичному стані через багаторічну відсутність інвестицій у мережі. Станція використовує газотурбінну та газопоршневую технологію когенерації.

У листопаді 2024 року «Нафтогаз Тепло» оголосив тендер на будівництво когенераційного комплексу на базі газопоршневих установок загальною потужністю 75,2 МВт. Проект передбачає використання двигунів Bergen B3540V20A, що свідчить про курс на високоефективну розподілену генерацію, здатну працювати в острівному режимі.

Місто Новояворівськ, розташоване у виражено аграрному районі, було обрано як пілотний майданчик для впровадження котелень, що працюють на агро-біомасі. Проект передбачає використання таких видів сировини: тюкована солома та деревна тріска. Загальний річний обсяг використання твердих відходів та біомаси очікується на рівні близько 70 000 тонн (включно з 39000 тонн деревної тріски). За оцінками «Нафтогазу», заміщення природного газу соломою у цьому проєкті дозволить досягти значної економії – до 24 млн доларів щорічно. Проект передбачає створення повноцінного ланцюга постачання: від збору соломи на полях місцевих фермерів до її зберігання та спалювання. Це створює нові робочі місця в регіоні та монетизує аграрні відходи, які раніше просто спалювалися на полях.

Діяльність Новояворівської ТЕЦ здійснюється на підставі дозволу на викиди № 4625810500-00388, виданого у 2021 році терміном дії до 22.01.2028. Це гарантує правове поле для експлуатації існуючого обладнання, однак нові газопоршнєві установки потребуватимуть внесення змін до дозволу з урахуванням їх специфічних викидів.

#### **2.1.4 Новороздільська ТЕЦ: індустріальний ренесанс**

Новороздільська ТЕЦ (рис. 2.5) знаходиться у місті Новий Розділ Львівської області, – це класичне мономісто, життя якого оберталось навколо сірчаного комбінату. Занепад хімічної промисловості залишив місту потужну, але надлишкову енергетичну інфраструктуру та екологічні проблеми.



Рисунок 2.5 – Новороздільська ТЕЦ

Встановлена електрична потужність – близько 44 МВт, теплова – 148,5 Гкал/год. Станція оперує 9 котлоагрегатами та 4 турбінами. Після переходу під управління «Нафтогазу» було проведено масштабні гідравлічні випробування та ремонти тепломереж, які перебували в аварійному стані (виявлено численні пориви на магістральних трубопроводах).

Майбутнє Новороздільської ТЕЦ нерозривно пов'язане зі створенням Еко-індустріального парку «Новий Розділ» на базі рекультивованих земель сірчаного комбінату. ТЕЦ виступатиме гарантованим джерелом енергії для промислових резидентів парку. Концепція еко-парку передбачає встановлення сонячних та вітрових електростанцій на території санітарних зон. Гібридизація ТЕЦ з відновлюваними джерелами дозволить балансувати генерацію та пропонувати резидентам «зелену» енергію.

Планується впровадження моделей циркулярної економіки, де теплові відходи одних виробництв використовуються іншими, а ТЕЦ забезпечує загальну стабільність системи.

## 2.2 Зміна екологічної парадигми через розподілену генерацію

Масовий перехід на газопоршневі установки, як у випадку з ТЦ «Північна» та планами Нафтогазу, створює нову екологічну парадигму. Якщо раніше викиди концентрувалися у високих трубах (100-180 м), що забезпечувало ефективне розсіювання у верхніх шарах атмосфери, то нові модульні когенераційні установки мають значно нижчі труби. Це створює ризик підвищення приземних концентрацій оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) у безпосередній близькості до об'єктів. Водночас, високий електричний ККД газопоршневих установок (до 45%) порівняно зі старими паровими турбінами (25-30%) означає меншу кількість спаленого газу та, відповідно, менший сумарний вуглецевий слід на одиницю виробленої енергії.

Діяльність ТЕЦ-1 супроводжується значним впливом на атмосферне повітря, що вимагає постійного моніторингу та дозвільних процедур. ЛМКП «Львівтеплоенерго» [19] регулярно оновлює дозволи на викиди. Наприклад, згідно з реєстром повідомлення про намір отримання дозволу, датоване 10.06.2025, свідчить про активну фазу переліцензування або внесення змін у зв'язку з встановленням нового когенераційного обладнання.

Спалювання природного газу мінімізує викиди твердих часток (сажі) та діоксиду сірки, які характерні для вугільних станцій (як Добротвірська ТЕС). Основним забруднювачем залишаються оксиди азоту (NO<sub>x</sub>). Модернізація палиникових пристроїв на котлах дозволила наблизити показники до європейських нормативів, проте питання подальшого зниження NO<sub>x</sub> залишається актуальним. Крім того, ТЕЦ-1 впроваджує заходи зі зменшення забору свіжої води шляхом реконструкції градирень та систем оборотного водопостачання.

Дослідження демонструють, що Львівська область успішно впроваджує дві життєздатні моделі модернізації теплоенергетичного сектору: «європейську муніципальну», засновану на грантовій підтримці й пріоритеті міської екології, та «державну корпоративну», засновану на ресурсному заміщенні. Успішна реалізація цих проєктів до 2027-2030 років дозволить регіону скоротити споживання природного газу в теплоенергетиці на 30-40%

та суттєво підвищити стійкість інфраструктури.

Львів стоїть на порозі профіциту RDF-палива (палива, отриманого з відходів) після запланованого запуску заводу на Пластовій. Поточна схема, що передбачає вивезення цього палива на цементні заводи, хоча й є екологічно прийнятною, вважається енергетично марнотратною для міста. Необхідно повернутися до питання встановлення котла для спалювання RDF на ТЦ «Північна». Це розглядається як єдиний шлях до досягнення енергетичної автономії північної частини Львова.

Проекти в Новояворівську демонструють, що перехід теплоенергетики на соломі вимагає створення нової галузі логістики. На відміну від природного газу, який транспортується трубопроводом, солома потребує складного ланцюга постачання: збір, тюкування, зберігання в сухих умовах та доставка. Однак слід врахувати, що забезпечення паливом БіоТЕЦ потужністю 20 МВт вимагає безперервного потоку вантажівок з тріскою (одна фура кожні 20-30 хвилин). В умовах дефіциту пального та персоналу це створює критичні операційні ризики. Успіх цієї моделі залежить від ефективної співпраці з місцевими агрохолдингами. З огляду на дефіцит пального та персоналу, природний газ станом на 2025 рік залишається безальтернативним базовим паливом, а біоенергетика розвивається точково, де паливо доставляється трубою (наприклад, біогаз на очисних спорудах).

Встановлення газопоршневих установок (наприклад, як у тендері для Новояворівська на 75 МВт) та інтеграція ТЕЦ з локальними відновлюваними джерелами створює «енергетичні острови». Цей підхід є критично важливим в умовах ракетних загроз, оскільки дозволяє містам зберігати тепло та світло навіть у разі колапсу об'єднаної енергосистеми країни.

Станом на 2025 рік, теплова генерація Львівщини демонструє високу резистентність. Львівська ТЕЦ-1 та ТЦ «Північна» завдяки міжнародній підтримці (ЄБРР) та проактивній позиції міста успішно інтегрують технології розподіленої генерації, перетворюючись на гнучкі енергетичні хаби. Новояворівська та Новороздільська ТЕЦ під егідою «Нафтогаз Тепло» стабілізували свою роботу, вийшовши з кризи попередніх років, та зосередилися на відновленні базової інфраструктури (мереж) як фундаменту

для майбутньої технологічної модернізації. Ключовим вектором розвитку на найближчі роки залишиться децентралізація, підвищення енергоефективності та поступова, прагматична інтеграція відновлюваних джерел енергії там, де це економічно та логістично виправдано.

### **2.3 Характеристика геологічних та гідрогеологічних умов району для екологічного моніторингу золовідвалів**

Добротвірська ТЕС розташована в межах рівнинної частини Львівщини, у долині р. Західний Буг. Геологічний розріз характеризується:

- перешаруванням алювіальних суглинків, супісків і пісків;
- наявністю лесовидних суглинків у покрівлі;
- заляганням водоносних горизонтів у піщаних відкладах неоген-четвертинного віку.

Такі умови сприяють можливому вертикальному та латеральному перенесенню розчинених компонентів із золовідвалу до ґрунтових вод, особливо за відсутності належної протифільтраційної ізоляції.

Глибина залягання рівня ґрунтових вод у районі золовідвалів, за літературними даними, становить 2–5 м, напрямок фільтраційного потоку зорієнтований у бік прилеглих водотоків басейну Західного Бугу [16]. У зонах контакту золовідвалу з природним ґрунтовим профілем фіксується:

- підвищення мінералізації підземних вод;
- збільшення концентрацій сульфатів, хлоридів;
- підвищений вміст Mn, Fe, Zn, Cu, Ni.

Додатковим ризиком є можливе підтоплення нижніх ярусів золовідвалу в періоди надлишкового зволоження.

### **2.4 Методичні підходи до оцінки впливу великотоннажних техногенних відходів на довкілля**

Великотоннажні техногенні відходи, такі як золошлакові матеріали теплоенергетики, становлять складний об'єкт екологічного аналізу через їхню багатокомпонентність, тривалу здатність до міграції небезпечних

елементів, потенційну токсичність та ризики вторинного забруднення довкілля. Сучасні підходи до оцінки їхнього впливу базуються на поєднанні геохімічних, токсикологічних, атмосферних та геоінформаційних методів, що дозволяють отримати інтегральну картину екологічного ризику [2, 3, 20, 24].

Оцінка екологічного впливу золошлакових відходів теплоенергетики ґрунтується на поєднанні польових спостережень, лабораторних вимірювань та розрахункових індексів забруднення. У сучасній практиці досліджень промислово трансформованих територій застосовується комплексний підхід, що включає: відбір і аналіз проб ґрунтів, води, донних відкладів та золошлакових матеріалів; вимірювання вмісту важких металів, макрокомпонентів та радіонуклідів; розрахунок індексів забруднення (Igeo, CF, Zc та ін.); оцінку ризику для здоров'я населення (HQ, HI, CR); порівняння концентрацій забруднюючих речовин у повітрі з рекомендаціями WHO AQG 2021 [38-39, 53-54].

Таблиця 2.1 – Методи оцінки екологічного ризику накопичення золошлакових відходів

| Метод                            | Показники, що аналізуються                | Сильні сторони                  | Обмеження                 |
|----------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| <i>1</i>                         | <i>2</i>                                  | <i>3</i>                        | <i>4</i>                  |
| Igeo (індекс геоаккумуляції)     | Порівняння концентрацій елементів з фоном | Простий, науково визнаний       | Не враховує токсичність   |
| CF (коефіцієнт забруднення)      | Відношення концентрації до фону           | Добре працює для валових форм   | Не показує сукупний ризик |
| Zc (інтегральний показник)       | Сума перевищень елементів                 | Дозволяє оцінити сумарний вплив | Не відображає мобільність |
| HQ, HI (Hazard Quotient / Index) | Токсикологічний ризик                     | Рекомендовано ЕРА               | Потрібні детальні дані    |
| CR (Cancer Risk)                 | Канцерогенний ризик                       | Важливо для Cd, As, Cr(VI)      | Багато параметрів         |

| 1                  | 2                                | 3                         | 4                  |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------|
| GIS-моделювання    | Просторовий розподіл забруднення | Висока точність           | Потребує ГІС-даних |
| DSS/Multi-criteria | Комплексна оцінка відходів       | Сучасний системний підхід | Висока складність  |

Порівняльний аналіз паливної бази, потужності та ризиків утворення відходів дозволяє сформувати диференційований підхід до оцінки екологічного ризику: для Добротвірської ТЕС акцент робиться на геохімічній та гідрогеологічній оцінці золотшлакових накопичувачів, їхньому впливі на ґрунти, поверхневі та підземні води, а також на пиловому забрудненні (загроза  $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$ ). Для газових ТЕЦ – на аналізі відповідності фактичних викидів граничним значенням. Зокрема, це стосується норм, установлених Директивою 2010/75/ЄС, рекомендаціями WHO Air Quality Guidelines 2021 (річні рівні  $PM_{2.5} \leq 5$  мкг/м<sup>3</sup>,  $NO_2 \leq 10$  мкг/м<sup>3</sup>) та національними нормативами якості атмосферного повітря.

Для інтегральної екологічної оцінки доцільно використовувати підходи, які поєднують:

- геохімічні індекси забруднення ґрунтів і вод (індекс забруднення ґрунту, сумарний показник забруднення, геоаккумуляційний індекс тощо);
- оцінку ризику для здоров'я населення (через інгаляційні та пероральні шляхи надходження);
- просторове моделювання та картографування зон ризику із застосуванням ГІС;
- порівняння отриманих результатів із національними нормативами та рекомендаціями ВООЗ, ІРСС, ЄС.

### **3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

#### **3.1 Динаміка структурно-хімічних характеристик та екологічної оцінки золошлакових матеріалів**

Важливо зазначити, що в Україні щорічні масиви золошлаків формують один із найбільших потоків техногенних відходів енергетичного комплексу, при цьому фактичні показники їхньої утилізації залишаються низькими, що призводить до розширення площ золовідвалів, деградації ґрунтів, контамінації поверхневих і підземних вод та підвищення фонових концентрацій дрібнодисперсних аерозолів у приземному шарі атмосфери.

Регіональний акцент на Львівщині зумовлений тим, що Добротвірська ТЕС є ключовим об'єктом теплової генерації, який використовує вугілля Львівсько-Волинського басейну. Це паливо, порівняно з іншими джерелами, характеризується нижчою теплотворністю та більш високою зольністю [3, 25]. Така специфіка паливно-технологічного циклу призводить до інтенсивного накопичення золошлаків на обмеженій території, створюючи значне техногенне навантаження на навколишнє середовище, особливо у вразливих зонах навколо золовідвалів.

Актуальність проблеми управління ЗШВ підтверджується тим, що у 2013–2014 рр. компанія ДТЕК інвестувала 5,3 млн грн у проєкт нарощування 3-го ярусу золовідвалу №2. Така практика демонструє, що значні капіталовкладення спрямовуються на екстенсивне управління (утримання та розширення додаткових ємностей для складування), а не на зменшення обсягу. Такий підхід не вирішує проблему в довгостроковій перспективі, а лише відтерміновує екологічну та економічну кризу.

Території, прилеглі до ТЕС, де розташовані золовідвали, визначені як найбільш уразливі, а аграрне землекористування навколо вуглевидобувних центрів є обмеженим через техногенне забруднення. Відсутність ефективного ресайклінгу не лише погіршує екологічний стан, але й стримує розвиток

сільського господарства в цих громадах, зумовлюючи потребу у витратних заходах рекультивації.

Для оцінювання потенціалу комплексного та ресурсоефективного використання золошлакових відходів, що генеруються під час спалювання вугілля у котлоагрегатах Добровірської теплової електростанції, проведено аналіз їхніх фізико-механічних характеристик, мінералогічних властивостей та якісних показників. Окрему увагу приділено аналізу хімічного складу золошлакових сумішей, а також визначенню їх придатності як вторинної сировини для виробництва будівельних матеріалів та застосування у різних видах загальнобудівельних робіт.

До категорії твердого енергоресурсу, що використовуються у виробництві теплової енергії, відносяться різні види вугілля (бурого, кам'яного, антрациту), горючих сланців та торфу. Хімічний склад цих паливних матеріалів умовно поділяють на органічну та мінеральну складові (рис. 3.1).

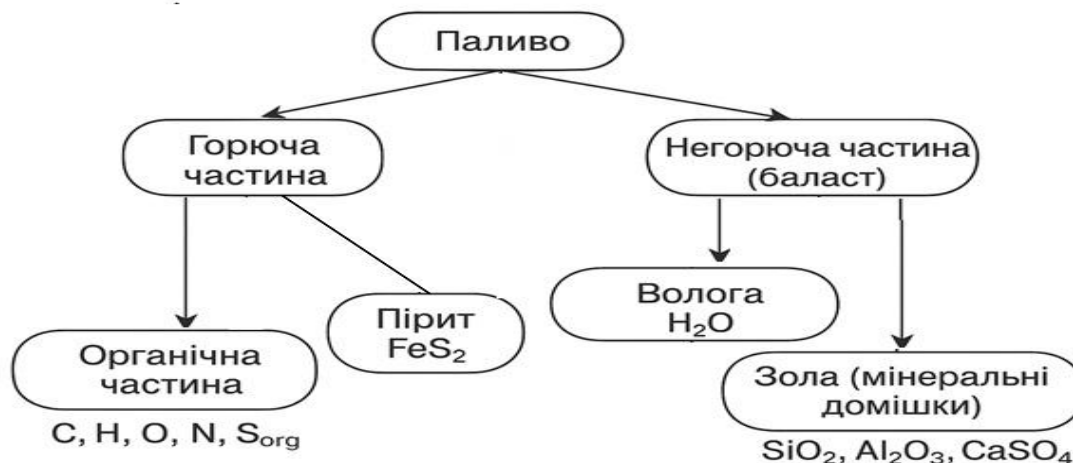


Рисунок 3.1 – Структурно-композиційний аналіз складу твердого палива

Як видно на рис. 3.1, органічна фракція представлена вуглецем (C), воднем (H<sub>2</sub>), киснем (O<sub>2</sub>) та органічною формою сірки (S). У мінеральній фракції міститься волога (W) та зола (A), при цьому значна частина золи під час процесу горіння переходить у летку фазу й надходить до повітряного басейну.

У межах роботи проаналізовано хімічний склад золошлакових матеріалів українських ТЕС за даними різних авторів (табл. 3.1) [2, 3, 5, 16, 22, 27, 30, 32].

Таблиця 3.1 – Узагальнений середній хімічний склад золошлакових матеріалів теплових електростанцій

|                           | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO        | MgO        | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> |
|---------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|------------|-------------------|------------------|-----------------|
| <b>Добротвірська [14]</b> | <b>46,7</b>      | <b>21,4</b>                    | <b>17,4</b>                    | <b>4,4</b> | <b>2,0</b> | <b>0,5</b>        | <b>1,8</b>       | <b>0,4</b>      |
| Бурштинська [10]          | 52,1–56,7        | 22,6–26,6                      | 9,3–13,0                       | 2,5–4,1    | 1,9–2,4    | 0,5               | 1,5–4,5          | 0,2–0,4         |
| Ладизинська [13]          | 46-55            | 19-25                          | 9-12                           | 1-1,6      | –          | –                 |                  | 0,5–0,7         |
| Трипільська               | 38-42            | 20-25                          | 12,1                           | 10,0       | 1,4        | –                 |                  | 1,1             |
| Зміївська                 | 40-60            | 10,7–20,4                      | 4,0–10,2                       | 2,5–9,9    | 0,5–5,0    | –                 |                  | 0,06–2,0        |
| Криворізька               | 50,8             | 21,8                           | 10,8                           | 2,4        | 1,3        | –                 |                  | 2,1             |
| Слов'янська               | 48-53            | 22-26                          | 8                              | 2-4        | 1,5        | –                 |                  | 2,4             |
| Старобешівська [12]       | 44-50            | 24-30                          | 6-8                            | 2,5-4,6    |            | –                 |                  | 1,2             |
| Краматорська ТЕЦ          | 49,4             | 22,5                           | 17,1                           | 10,1       |            | –                 |                  | –               |
| Вуглегірська [12]         | 16,7             | 40,6                           | 23,0                           | 8,4        |            | –                 |                  | 0,02            |
| Миронівська [12]          | 67,8             | 19,8                           | 10,9                           | 5,5        |            | 2,8               |                  | 2,1–7,0         |
| Запорізька [15]           | 53-57            | 18-22                          | 17-20                          | 2-3        | 1,2–1,6    | –                 |                  | 1,5             |
| Кларк у земній корі       | 55,3             | 14,3                           | 6,7                            | 4,8        | 3,3        | 3,2               | 3,2              | –               |

Хімічні показники золошлакових матеріалів істотно відрізняється від середнього складу земної кори, а концентрації окремих оксидів можуть значно перевищувати природні значення. Зокрема, вміст CaO у золошлаках інколи вищий у 4–12 разів, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – приблизно у два рази, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – у 1,5–3 рази, а MgO – у 2–3 раза порівняно з їхнім типовим геохімічним рівнем. У вугільних відходах українських теплоелектростанцій часто виявляють підвищені концентрації важких металів і металоїдів, таких як свинець, мідь, цинк, кадмій, хром, нікель,

а також природні радіонукліди. Токсичні елементи можуть бути пов'язані як із мінеральною частиною, так і з органічними залишками у складі золошлакової суміші.

У результаті комплексних досліджень, виконаних Крайнюк Оленою, Буцом Юрієм, Лоцманом Павлом та Барбашиним Віталієм, встановлено, що у структурі золошлакових матеріалів важкі метали переважно акумулюються в аморфізованих глинистих фракціях, де їхня сорбційна активність досягає максимальних значень. Значно менші концентрації цих елементів фіксуються у шлаковому склі, а найнижчі – у зернах кварцового піску, які характеризуються порівняно слабкою сорбційною активністю. Загальне співвідношення основних компонентів золошлакової суміші можна орієнтовно подати у таких межах: 8–12 % становить зола, 61–64 % – шлакові частинки, 20–31 % – кварцовий заповнювач.

Найбільш небезпечними для довкілля є ті компоненти, які переходять у повітря у складі пилових частинок (кварц, муліт, токсичні домішки, поліциклічні ароматичні вуглеводні) або у водне середовище у формі рухомих, водорозчинних мікроелементів. У таких формах важкі метали демонструють високу мобільність і токсичність, що створює загрозу для екосистем та здоров'я населення. Особливу небезпеку становить кумулятивна дія токсичних речовин, оскільки вони здатні накопичуватися в ґрунтах, біоті та організмі людини, спричиняючи деградаційні зміни екосистем і розвиток хронічних, у тому числі онкологічних захворювань [23].

Золошлакові відходи теплоелектростанцій являють собою тверді продукти високотемпературного згорання вугілля, основу яких становлять породоутворюючі мінерали. Мінеральна частина вугілля на 85–95 % сформована глинистими мінералами, аргілітами та алевролітами, тоді як залишкові 5–15 % припадають на сполуки заліза, кальцію та інші мікроелементи. Отримана суміш має дрібнозернисту структуру, при цьому приблизно третина частинок має розмір 1–5 мм.

Фізико-хімічні властивості золошлакових відходів можуть істотно

варіювати між різними енергетичними об'єктами. На їхній склад і морфологію впливають мінералогічні особливості використовуваного палива, технологія його підготовки, тип і параметри системи спалювання, ефективність апаратів очищення димових газів та спосіб транспортування й складування відходів у золовідвали. Саме тому для коректної екологічної оцінки необхідний індивідуальний аналіз складу золошлаків кожної окремої ТЕС.

Окрему групу утворюють теплоелектроцентралі та котельні, які працюють або працювали на вугіллі, мазуті, а нині частково переведені на газ чи альтернативне паливо, але мають історичні накопичення золошлакових відходів. Для багатьох із них відсутня або недостатньо деталізована інформація щодо обсягів накопичення та ступеня екологічного ризику, що ускладнює розробку цілісної регіональної стратегії управління золошлаками.

Таким чином, теплоенергетика Львівської області характеризується:

- наявністю великих накопичених обсягів золошлакових відходів, зосереджених передусім на Добротвірській ТЕС;
- високим рівнем локальних екологічних ризиків (забруднення ґрунтів, можливе забруднення вод, пилове навантаження);
- недостатньою інтегрованістю золошлакових матеріалів у регіональні програми утилізації та циркулярної економіки.

### **3.2 Особливості формування золошлакових відходів у регіоні**

Основним генератором золошлакових відходів на Львівщині залишається Добротвірська ТЕС, де накопичено великі обсяги техногенних відходів.

Функціонування теплової генерації Львівщини нерозривно пов'язане з вугледобувною промисловістю Львівсько-Волинського вугільного басейну. Специфіка місцевої паливної бази безпосередньо визначає екологічний профіль енергетики регіону. Вугілля, що видобувається на шахтах ДП «Львіввугілля» та в Червоноградському гірничопромисловому районі, належить до газової групи (марка Г) і характеризується високою зольністю, яка в окремих випадках

досягає 40–45%, та значним вмістом сірки (2,5–3,5%).

Висока зольність палива призводить до утворення значних обсягів твердих відходів спалювання на одиницю виробленої енергії, що створює підвищене навантаження на системи золовидалення та екологічну ємність територій навколо станцій. Історично логістика постачання палива була оптимізована під залізничні перевезення з шахт регіону, проте до 2022 року значна частка вугілля постачалася також із Дніпровсько-Донецького басейну (Павлоградвугілля) для забезпечення необхідних параметрів шихти.

Основні види промислових відходів теплоенергетики області:

- золошлакові відходи (зола виносу, шлак топковий, продукти десульфурації);
- осади з систем очищення стічних вод (шлами, відфільтровані завислі речовини, маслошлами);
- металевий та будівельний брухт, відпрацьовані мастила, відходи ізоляційних матеріалів та ремонтів обладнання.

Вони характеризуються високою масовістю, складним мінералогічним та хімічним складом, домішками важких металів і металоїдів, що зумовлює їхню потенційну токсичність. Умови спалювання, тип палива й особливості очисних систем визначають фізико-хімічні властивості золошлакових матеріалів, що, у свою чергу, впливає як на ступінь екологічного ризику при їхньому зберіганні, так і на можливість їх використання як вторинної сировини.

За даними українських досліджень, золовідвали ТЕС в Україні займають десятки й сотні гектарів, формуючи техногенні ландшафти з високим рівнем пиління, фільтрації забруднювачів у ґрунтові та поверхневі води й накопиченням важких металів.

По Бурштинській ТЕС у відкритих джерелах фіксуються великі площі золошлаковідвалів (понад 200 га), складна гідротехнічна система гідрозоловидалення та наявність щонайменше чотирьох хвостосховищ з золою та шлаком, що розглядаються як об'єкти підвищеної екологічної небезпеки. Окремі судові рішення останніх років стосуються фактів засмічення земель

зольними відходами та необхідності додаткової оцінки впливу на довкілля при нарощуванні дамб золівдвалів.

Золошлаки Добротвірської ТЕС акумулюються на двох золошлаконакопичувачах площею 56 га та 75 га, ємність становить – 4,5 млн м<sup>3</sup> і 8,057 млн м<sup>3</sup>.

У Звіті зі стратегічної екологічної оцінки *Державної цільової програми справедливої трансформації вугільних регіонів України до 2030 року* подано узагальнену інформацію щодо наявних об'єктів видалення відходів, утворених у процесах вуглевидобутку та теплогенерації в межах відповідних територіальних громад, зокрема, для Добротвірської ТГ (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Зведена інформація щодо місць видалення відходів теплогенерації у вугільних територіальних громадах України, зокрема Добротвірській [22, 37]

| Найменування місця видалення відходів                                        | Місце знаходження місця видалення відходів                              | Власник місця видалення відходів                                                  | Режим функціонування | Категорія екологічної безпеки | Характеристика місця видалення відходів             | Характеристика відходів                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Мулові майданчики каналізаційних споруд Добротвірської ТЕС біля с. Стриганка | за 6,0 км на пн. зх. від ТЕС, поблизу с. Стриганка                      | Відокремлений підрозділ «Добротвірська теплова електрична станція», смт Добротвір | Діюче                | В                             | 6831,340 т, 0,48 га/1,5 га, відкрите поверхнєве     | Відходи знезаражування та (або) очищення вод стічних                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Золошлаковий відстійники Добротвірської ТЕС                                  | за 2,3 км на захід від ТЕС, 1,7 км. на південний схід від смт Добротвір | Відокремлений підрозділ «Добротвірська теплова електрична станція», смт Добротвір | Діюче                | В                             | 297794,3 т, 143,0 га, відкрите поверхнєве           | Шлак паливний, пил зольний вугільний; шлам, що утворюється від освітлення води                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Сміттєзвалище побутових і будівельних відходів Добротвірської ТЕС            | за 2,3 км на захід від ТЕС                                              | Добротвірська ТЕС, смт Добротвір                                                  | Діюче                | Б                             | 21382тон, 2,23 га, відкрите поверхнєве насипне      | Відходи діяльності установ громадського харчування, технічного обслуговування і ремонту обладнання, приладів та ін.                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Сміттєзвалище побутових і будівельних відходів Добротвірської ТЕС            | за 2,3 км на захід від ТЕС, 1,7 км на пд. сх., смт Добротвір            | ВП «Добротвірська теплова електрична станція», смт Добротвір                      | Діюче                | Б                             | 54693,400 тон, 2,23 га, відкрите поверхнєве насипне | Відходи тверді, одержані від знесолення води (недопал вапна). Відходи змішані будівництва та знесення будівель і споруд. Шлам маслотовловлювачів (осад від мийки транспорту). Відходи комунальні (міські) змішані, у тому числі сміття з урн. Відходи матеріалів основних і речовин, які застосовують для знезараження та очищення води. Сульфовугілля ХВО відпрацьоване |

У табл. 3.2 наведено дані про мулові майданчики каналізаційних очисних споруд Добротвірської ТЕС, розташовані поблизу с. Стриганка, орієнтовно за 6 км на північний захід від електростанції. Об'єкт має відкритий поверхневий тип накопичення та містить близько 831,34 т

відходів, що утворюються під час знезараження та очищення стічних вод. Площа зайнятої ділянки становить 0,48 га (загальна площа – 1,5 га).

Другим об'єктом є золошлакові відстійники Добротвірської ТЕС, що розташовані на відстані близько 2,3 км на захід від станції та 1,7 км на південний схід від смт Добротвір. Відстійники функціонують як відкриті поверхневі накопичувачі, у яких зберігаються паливний шлак, пил зольний вугільного походження, а також шлам, що утворюється в результаті освітлення води. Загальна маса відходів, що міститься в цьому сховищі, досягає 297 794,3 т, а площа об'єкта – 143 га.

Представлені дані свідчать про значну територіальну та масову завантаженість об'єктів зберігання відходів, що формує суттєве екологічне навантаження на Добротвірську громаду та потребує подальшої оцінки ризиків і планування заходів зі сталого управління такими територіями.

### **3.3 Екологічна оцінка діяльності Добротвірської ТЕС як стаціонарного джерела техногенного забруднення**

Добротвірська ТЕС характеризується проєктною електричною потужністю 510 МВт. Основним енергетичним ресурсом для котлоагрегатів станції є кам'яне вугілля газової групи (марки Г та ДГ), що визначає високий рівень екологічного навантаження. Природний газ та мазут використовують винятково як допоміжне паливо: для розпалювання та «підсвічування» котлів. Природний газ також може застосовуватись як резервне паливо для забезпечення стабільності виробничих процесів.

Головними стаціонарними джерелами утворення та надходження забруднювальних речовин в атмосферне повітря є шість котлів (ст. №7–12) котлотурбінного відділення. Ці агрегати продукують основний обсяг оксидів вуглецю, сірки, азоту та твердих частинок.

Решта викидів формується допоміжними виробництвами та процесами, які, хоча й є вторинними за обсягом, вносять свій внесок у загальний екологічний слід підприємства. До цих джерел належать:

- паливно-транспортне відділення (джерело пилу вугілля);
- хімічне відділення та вуглехімічна лабораторія (технологічні викиди);
- відділення теплопостачання, підземних комунікацій та гідроспоруд;
- виробничі ділянки (автотранспортна служба, роботи з механічної обробки металу та зварювальні ділянки).

Така структура джерел викидів підкреслює комплексний характер екологічного моніторингу, який повинен охоплювати не лише основні котлоагрегати, але й процеси допоміжного виробництва, що впливають на якість приземного шару повітря.

На промисловому майданчику ДТЕК «Добровірівська ТЕС» функціонує **101** джерела викидів забруднювальних речовин в повітряний басейн, серед яких **60** джерел є організованими, а **41** – неорганізованими [4]. Така структура свідчить про комплексний характер утворення викидів у технологічному циклі станції та необхідність застосування диференційованих методів контролю.

У результаті роботи основного технологічного обладнання підприємства до атмосферного повітря надходить значна кількість різних хімічних речовин. Валові річні викиди включають широкий спектр токсичних елементів, важких металів та газоподібних сполук.

Сумарний обсяг валових викидів від усіх джерел Добровірівської ТЕС становить **2602458,36175** т/рік, що визначає підприємство одним із найбільш значимих стаціонарних джерел техногенного впливу на атмосферне повітря в регіоні.

Таблиця 3.3 – Перелік і валові викиди забруднювальних речовин ДТЕК «Доброутвірська ТЕС» [4, 37]

| №        | Забруднююча речовина                                | Валовий викид, т/рік | Примітка (форма вираження)                      |
|----------|-----------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|
| <i>1</i> | <i>2</i>                                            | <i>3</i>             | <i>4</i>                                        |
| 1        | Арсен і його сполуки                                | 1,399005             | у перерахунку на As                             |
| 2        | Ванадій і його сполуки                              | 0,048151             | у перерахунку на V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |
| 3        | Залізо та його сполуки                              | 0,08317              | у перерахунку на Fe                             |
| 4        | Мідь і її сполуки                                   | 0,953067             | у перерахунку на Cu                             |
| 5        | Нікель і його сполуки                               | 1,1170146            | у перерахунку на Ni                             |
| 6        | Ртуть і її сполуки                                  | 0,1500182            | у перерахунку на Hg                             |
| 7        | Свинець і його сполуки                              | 1,067003             | у перерахунку на Pb                             |
| 8        | Хром і його сполуки                                 | 1,168947             | у перерахунку на Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| 9        | Цинк і його сполуки                                 | 3,543009             | у перерахунку на Zn                             |
| 10       | Оксид алюмінію                                      | 0,000018             | —                                               |
| 11       | Манган і його сполуки                               | 0,005712             | у перерахунку на MnO <sub>2</sub>               |
| 12       | Суспендовані тверді частинки (TSP)                  | 5398,6989479         | недиференційовані за складом                    |
| 13       | Оксиди азоту (NO <sub>x</sub> )                     | 4412,982             | у перерахунку на NO <sub>2</sub>                |
| 14       | Закис азоту (N <sub>2</sub> O)                      | 38,94724             | —                                               |
| 15       | Аміак (NH <sub>3</sub> )                            | 1,6682               | —                                               |
| 16       | Азотна кислота (HNO <sub>3</sub> )                  | 0,013                | —                                               |
| 17       | Меркаптани                                          | 0,000420468          | —                                               |
| 18       | Діоксид сірки (SO <sub>2</sub> )                    | 25004,545            | у перерахунку на SO <sub>2</sub>                |
| 19       | Сірководень (H <sub>2</sub> S)                      | 0,108839             | —                                               |
| 20       | Сульфатна кислота (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | 0,046103             | —                                               |
| 21       | Оксид вуглецю (CO)                                  | 327,9765             | —                                               |
| 22       | Вуглецю діоксид (CO <sub>2</sub> )                  | 2566753,201          | —                                               |

| 1  | 2                                                | 3           | 4 |
|----|--------------------------------------------------|-------------|---|
| 23 | Неметанові леткі органічні сполуки (НМЛОС)       | 447,7851458 | — |
| 24 | Акролеїн                                         | 0,000006    | — |
| 25 | Гідразин                                         | 0,0409004   | — |
| 26 | Оцтова кислота                                   | 0,003       | — |
| 27 | Метан (CH <sub>4</sub> )                         | 58,93793    | — |
| 28 | Хлор (Cl <sub>2</sub> )                          | 3,341       | — |
| 29 | Газоподібні сполуки хлору (у перерахунку на HCl) | 0,009       | — |
| 30 | Легкорозчинні фториди (у перерахунку на F)       | 0,0073      | — |
| 31 | Фтор та його сполуки (у перерахунку на F)        | 0,00455     | — |
| 32 | Фтористий водень (HF)                            | 0,002555    | — |
| 33 | Фреони                                           | 0,508       | — |

Наведена структура викидів Добротвірської ТЕС демонструє яскраво виражений багатокомпонентний характер із домінуванням як масових забруднювачів, що формують регіональне фонове забруднення та беруть участь у глобальних процесах зміни клімату, так і високонебезпечних мікрокомпонентів (Hg, As, Pb, Cr), концентрації яких хоч і невеликі за масою, але є критичними у контексті токсикологічних ризиків для здоров'я населення та екосистем, оскільки вони мають високу токсичність та здатність до біоаккумуляції в екосистемах.

Аналіз річних обсягів викидів (тонн/рік) чітко виділяє три ключові групи пріоритетних забруднювачів, типових для вугільної генерації (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Річні обсяги емісії основних атмосферних забруднювачів  
Доброутвірської ТЕС [4]

| Група забруднювачів | Основні компоненти                                           | Річний обсяг (т/рік) | Примітка                                                                   |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Парникові гази      | Вуглецю діоксид (CO <sub>2</sub> )                           | 2566753,20           | Домінує у валовому викиді, визначаючи кліматичний слід                     |
| Діоксид сірки       | Діоксид сірки (SO <sub>2</sub> )                             | 25004,55             | Найбільший обсяг серед техногенних забруднювачів, спричиняє кислотні опади |
| Суспендовані частки | Тверді частинки (пил, PM <sub>2,5</sub> / PM <sub>10</sub> ) | 5398,70              | Складають основу пилового навантаження, найбільш небезпечні для здоров'я   |
| Оксиди азоту        | NO <sub>x</sub><br>(у перерахунку на NO <sub>2</sub> )       | 4412,98              | Сприяють утворенню приземного озону та кислотних опадів                    |

Подані у табл. 3.4 дані демонструють чітко виражену домінуючу роль парникових газів, насамперед вуглекислого газу, у структурі річних викидів Доброутвірської ТЕС. Обсяг CO<sub>2</sub> становить 2566753,20 т/рік, що значно перевищує всі інші категорії забруднювачів. Це відповідає загальносвітовим тенденціям для вугільних електростанцій та підтверджує високу вуглецеву інтенсивність виробництва електроенергії, характерну для енергетики, яка базується на спалюванні твердого палива.

Другим за величиною потоком є діоксид сірки – 25004,55 т/рік, що зумовлено високим вмістом сірки у кам'яному вугіллі, яке використовується станцією. Це вказує на високу частку сірчистих компонентів у паливі та обмежену ефективність наявних систем газоочищення. Саме SO<sub>2</sub> визначає основне техногенне навантаження на регіон: він сприяє формуванню кислотних дощів, деградації рослинного покриву, закисленню ґрунтів та поверхневих вод, а також негативно впливає на органи дихання людини. Відповідно до рекомендацій ВООЗ [23-24], концентрації SO<sub>2</sub> у повітрі не повинні перевищувати 40 µg/m<sup>3</sup> як середньодобове значення, тоді як обсяги

викидів, характерні для Добротвірської ТЕС, потенційно призводять до регулярного перевищення цих нормативів у зоні впливу.

Суспендовані частинки (пил,  $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$ ) становлять понад **5398 т/рік**, що підтверджує значне пилове навантаження на прилеглі території, характерне для підприємств із великими обсягами золошлакових відходів. Саме ці частинки є основними переносниками важких металів та поліароматичних сполук. Особливу екологічну небезпеку становлять дрібні фракції  $PM_{2.5}$ , які легко проникають у глибокі відділи легенів та пов'язані з підвищеним ризиком серцево-судинних та респіраторних захворювань [54].

Важливим екологічним індикатором є обсяг оксидів азоту ( $NO_x$ ) – 4412,98 т/рік, які відіграють ключову роль у формуванні вторинного аерозолі, фотохімічного смогу та тропосферного озону. Такі обсяги викидів свідчать про суттєве техногенне навантаження, що перевищує типові показники для газових електростанцій і характерне саме для вугільних ТЕС.

Загалом, структура викидів Добротвірської ТЕС характеризується:

1. значним вуглецевим навантаженням, що формує регіональний кліматичний слід;
2. значний рівень сірчаного забруднення ( $SO_2$ ) – типовий маркер застарілих технологій очищення димових газів;
3. суттєвими пиловими викидами, пов'язаними із золошлаковими матеріалами, що потребує модернізації пилогазоочисних систем;
4. стійку присутність  $NO_x$ , що формує додаткові ризики для якості повітря та здоров'я населення;
5. наявністю токсичних важких металів у концентраціях, що становлять екологічний та санітарний ризик.

З екологічної точки зору Добротвірська ТЕС належить до об'єктів із високим техногенним навантаженням, потребує модернізації систем пилогазоочищення, перехід на менш токсичні види палива, мінімізацію утворення та повторне використання золошлакових відходів відповідно до вимог європейських екологічних стандартів, а також впровадження систем постійного моніторингу викидів.

Накопичення золошлакових відходів у Львівській області є прямим наслідком термохімічної переробки мінеральної складової вугілля. Розуміння генезису цих відходів вимагає детального аналізу технологічних процесів спалювання та систем видалення продуктів згоряння. Процес формування відходів відбувається в умовах високотемпературного факельного спалювання вугільного пилу. При температурах 1200–1500 °C у ядрі факела органічна частина палива окислюється, а мінеральні домішки (глинисті мінерали, кварц, пірит, карбонати) зазнають глибоких фазових перетворень. Залежно від поведінки в газовому тракті котла, утворюються два основні типи твердих відходів:

1. **Летка зола** (fly ash) – це тонкодисперсний порошок, що складається з мікроскопічних сферичних частинок, які вимиваються з топки потоком димових газів. На Добротвірській ТЕС, обладнаній пиловугільними котлами, летка зола становить 80–90% від загальної маси твердих продуктів згоряння. Мінералогічно вона є продуктом плавлення та швидкої кристалізації алюмосилікатів, що формує її склоподібну структуру. Вловлювання золи здійснюється в електрофільтрах, де під дією електричного поля заряджені частинки осідають на електродах. Ефективність сучасних електрофільтрів перевищує 99%, однак навіть за таких умов тисячі тонн золи щороку потребують утилізації.

2. **Паливний шлак** (bottom ash) – це грубодисперсна фракція, що утворюється внаслідок агломерації та спікання частинок золи, які під дією гравітації опадають у нижню частину топки (холодну воронку) або видаляються з поверхонь нагріву під час розшлакування. Шлак

характеризується пористою, ніздрюватою структурою та високою щільністю. Його частка становить 10–20% від загального обсягу відходів.

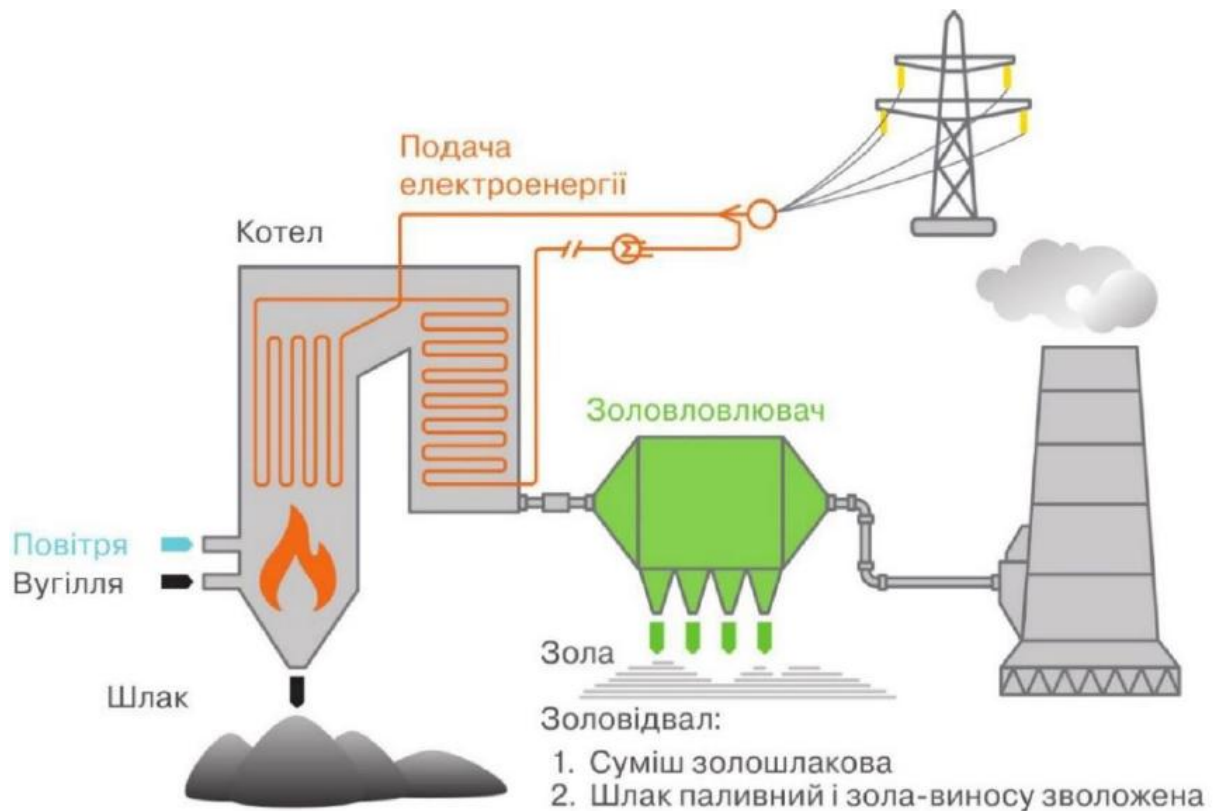


Рисунок 3.2 – Загальна схема генерування золашлакоутворюючих компонентів [27]

Визначальним фактором, що формує властивості накопичених відходів, є спосіб їх транспортування. На Добротвірській ТЕС історично застосовується система гідравлічного золовидалення.

Технологічний процес гідравлічного золовидалення передбачає змішування вловленої електрофільтрами сухої золи та подрібненого шлаку з технічною водою у співвідношенні 1:10–1:20. Утворена пульпа (водо-золашлакова суміш) багерними насосами перекачується по системі трубопроводів (золопроводів) на спеціальні гідротехнічні споруди — золовідвали. Цей метод має ряд критичних недоліків з точки зору подальшої утилізації:

- втрата гідравлічної активності через контакт з водою, що призводить до гідратації вільного оксиду кальцію ( $\text{CaO}$ ) та інших активних компонентів ще на етапі транспортування, що знижує в'язучі властивості золи;

- у тілі золовідвалу відбувається гравітаційне розшарування матеріалу, зокрема важкі фракції шлаку осідають поблизу випусків пульпи, тоді як дрібна зола мігрує далі, формуючи шарувату неоднорідну структуру техногенного масиву;

- вилуговування, а саме технічна вода, циркулюючи у системі, насичується розчинними солями важких металів, перетворюючись на екологічно небезпечний фільтрат, що створює ризики для підземних вод.

Попри те, що в енергетиці України існують приклади успішного впровадження систем сухого відбору золи (наприклад, на Придніпровській ТЕС компанії ДТЕК), на Добротвірській ТЕС основним методом залишається гідровидалення. Про це свідчать регулярні тендери та звіти про ремонтні роботи з заміни кілометрів зношених золошлакопроводів, які страждають від абразивного зносу пульпою.

При спалюванні вугілля у печі ТЕС разом із паливом у зону горіння надходить значна частка пустої породи, зокрема сланців, що природно містять радіоактивні елементи, такі як ізотопи урану-238 ( $\text{U-238}$ ) та торію-232 ( $\text{Th-232}$ ). У ході термічного розкладу мінеральні компоненти вугілля плавляться й переходять у склоподібний шлаковий залишок, тоді як частинки легкої золи захоплюються потоком гарячих димових газів. Саме у цих твердих аерозольних частинках концентруються природні радіонукліди уранового та торієвого рядів, а також ізотоп калію-40 ( $\text{K-40}$ ), частина яких виноситься в атмосферне повітря. Таким чином, ТЕС є джерелом надходження природних радіоактивних ізотопів у довкілля, що призводить до радіоактивного забруднення та додаткового опромінення населення на прилеглий території.

Радіонукліди, що надходять в атмосферу з димовими газами ТЕС, розсіюються у просторі, формуючи аерозольне поле зі спаданням

концентрації від зони виходу з труби до периферії факела викиду. Формування такої просторової конфігурації визначається сукупністю чинників, серед яких ключову роль відіграють маса та дисперсність частинок, інтенсивність і швидкість виходу газового потоку, висота димової труби та загальний об'єм викинутих продуктів згоряння, а також метеорологічними умовами – напрямом і силою вітру, вертикальними температурними градієнтами та ступенем турбулентності повітря. Сукупність цих чинників зумовлює інтенсивність перенесення, осадження та локальне накопичення радіонуклідів, що формує реальний радіоекологічний вплив викидів ТЕС.

Оцінювання впливу викидів Добротвірської ТЕС на радіоекологічний стан довкілля у 2016 році, виконане науковцями Погребенником В. Д. та Паславським М. М., дало змогу встановити внески активності радіонуклідів у формування загальної радіоактивності вугілля, золи та шлаку.

Таблиця 3.5 – Розподіл питомої активності радіонуклідів між вугіллям, золою та шлаком Добротвірської ТЕС (за матеріалами Погребенника В.Д. та Паславського М.М.) [50]

| Радіонуклід       | Питома активність радіонуклідів, Бк/кг |              |              |
|-------------------|----------------------------------------|--------------|--------------|
|                   | у вугіллі                              | у золі       | у шлаці      |
| $^{40}\text{K}$   | $338 \pm 35$                           | $558 \pm 53$ | $625 \pm 55$ |
| $^{214}\text{Bi}$ | $58 \pm 8$                             | $103 \pm 13$ | $123 \pm 13$ |
| $^{226}\text{Ra}$ | $105 \pm 15$                           | $192 \pm 18$ | $247 \pm 22$ |
| $^{208}\text{Tl}$ | $16 \pm 4$                             | $31 \pm 7$   | $35 \pm 7$   |
| $^{232}\text{Th}$ | $49 \pm 7$                             | $68 \pm 9$   | $97 \pm 10$  |
| $^{212}\text{Pb}$ | $57 \pm 8$                             | $100 \pm 11$ | $122 \pm 12$ |
| $^{214}\text{Pb}$ | $65 \pm 10$                            | $110 \pm 15$ | $133 \pm 15$ |
| $^{212}\text{Bi}$ | $45 \pm 7$                             | $76 \pm 10$  | $116 \pm 13$ |
| $^{228}\text{Ac}$ | $51 \pm 7$                             | $66 \pm 10$  | $92 \pm 14$  |

Аналіз питомої активності природних радіонуклідів свідчить про суттєве зростання радіоактивності золи та шлаку порівняно з вихідним вугіллям, що відповідає типовим закономірностям концентрування радіонуклідів у твердих залишках після спалювання органічного палива. Найвищі значення активності зафіксовано для ізотопу калію  $^{40}\text{K}$ , який зростає у шлаку майже вдвічі відносно вугілля. Значні підвищення характерні також для ізотопів радію ( $^{226}\text{Ra}$ ) та свинцю ( $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ), що мають важливе радіоекологічне значення через включеність у уран-торієві ряди. Концентрація радіонуклідів у золі та шлаку збільшується в 1,5–2,5 рази для більшості ізотопів, що свідчить про потенційно підвищений радіологічний ризик за умови неупорядкованого накопичення чи вторинного пилового перенесення цих відходів. Отримані результати вказують на необхідність контролю поводження з твердими відходами ТЕС та врахування їхнього внеску у формування радіоекологічного стану прилеглої території.

Отже, внаслідок ефекту радіоактивного збагачення, питома активність радіонуклідів у золі є вищою, ніж у вихідному паливі.

Для золи Добротвірської ТЕС характерні наступні показники:

- основні дозоутворюючі нукліди: Радій-226, Торій-232, Калій-40;
- питома ефективна активність ( $A_{\text{eff}}$ ) знаходиться в діапазоні 370–740 Бк/кг;

Згідно з Нормами радіаційної безпеки України (НРБУ-97), будівельні матеріали класифікується наступним чином:

- I клас ( $A_{\text{eff}} \leq 370$  Бк/кг) – використання без обмежень у житловому будівництві;
- II клас ( $370 < A_{\text{eff}} \leq 740$  Бк/кг) використання у промисловому та дорожньому будівництві в межах населених пунктів.

Більшість партій золи Добротвірської ТЕС потрапляє до **II класу**, що дозволяє їх широке використання у дорожньому будівництві, зведенні дамб та промислових об'єктів, але накладає обмеження на використання у житлових приміщеннях. Це вимагає суворого вхідного радіаційного контролю кожної партії золи, що відвантажується споживачеві.

### 3.4 Оцінка техногенного пресингу на ґрунтовий покрив та аналіз міграційних потоків важких металів

Ґрунтовий покрив у зоні впливу Добротвірської ТЕС виступає як первинний бар'єр та депонуюче середовище для аерозольних викидів та продуктів вітрової ерозії золовідвалів. Оцінка рівня забруднення ґрунтів базувалася на визначенні валових форм важких металів та порівнянні їх із гранично допустимими концентраціями та регіональними фоновими рівнями. Результати моніторингу свідчать про формування стійких геохімічних аномалій, просторова конфігурація яких визначається розою вітрів та рельєфом місцевості. Науковцем Погребенником В. Д. якісний та кількісний склад важких металів у ґрунтових зразках було визначено із застосуванням рентгенофлуоресцентного аналізатора EXPERT 3L, що забезпечило високу точність та достовірність аналітичних результатів [50].

На рисунках 3.3 – 3.4 відображено просторові зміни коефіцієнтів забруднення в межах території впливу золошлакових відвалів

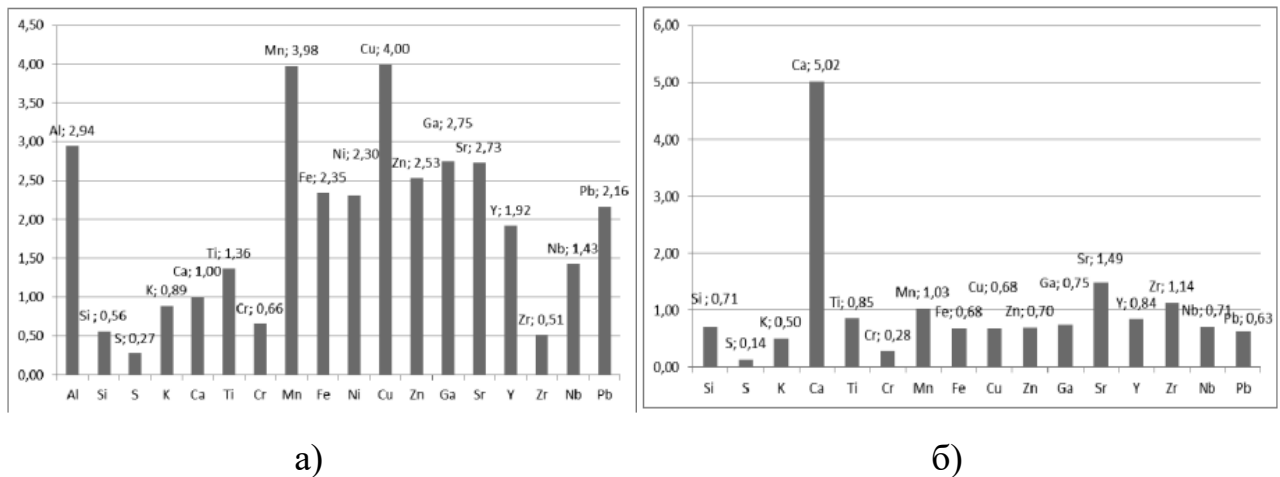


Рисунок 3.3 – Просторова динаміка коефіцієнта забруднення ґрунтів важкими металами: а) зона золошлакового відвалу; б) зона впливу на відстані 10 м [38]

Екологічна оцінка стану ґрунтів у зоні впливу Добротвірської ТЕС загалом свідчить про їх задовільну якість, однак ситуація різко погіршується в межах золошлакових відвалів та на прилеглої території. Найбільш критичний екологічний стан зафіксовано безпосередньо на території

**золошлакових відвалів.** Стан ґрунтів тут визначено як **кризовий**, оскільки вміст валових форм важких металів у ґрунті у **2–10 разів перевищує** як гранично допустимі нормативи, так і природні фонові показники. Особливо значними є перевищення для металів **I класу небезпеки** – міді (у 4,00 раза), цинку (у 2,53 раза) та свинцю (у 2,16 раза), що вказує на істотне техногенне навантаження на ґрунтовий покрив.

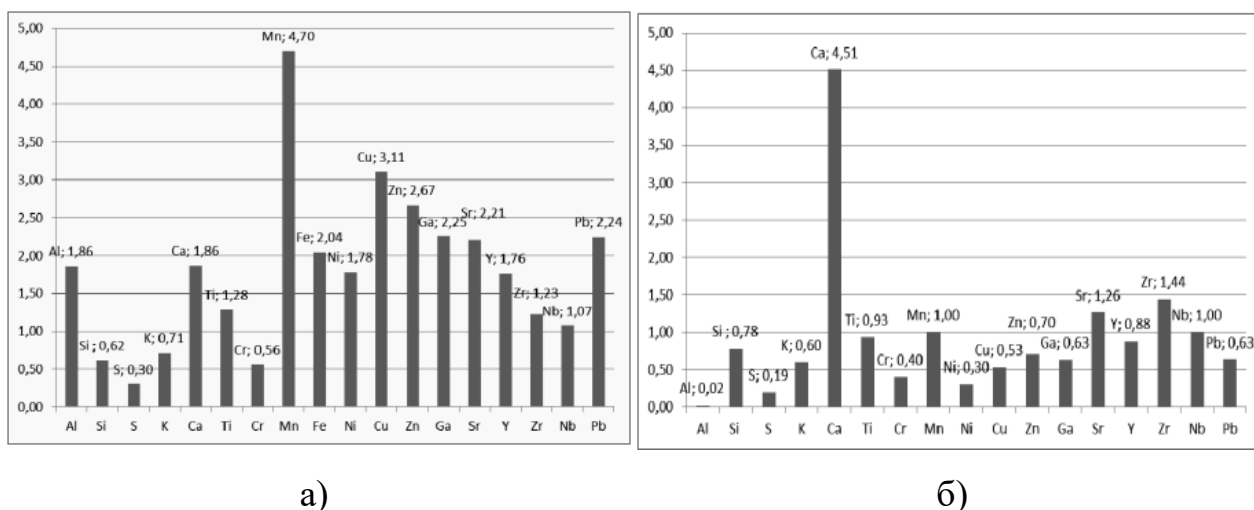


Рисунок 3.4 – Порівняння коефіцієнтів забруднення ґрунтів важкими металами: а) у проміжній зоні впливу (30 м); б) на граничній відстані (100 м)

На відстанях **10 м та 100 м** від відвалів екологічний стан ґрунтів оцінюється як **задовільний**: вміст металів дещо перевищує кларкові значення, але не досягає ні фонових, ні нормативно встановлених ГДК.

Найбільші аномалії концентрацій виявлено на відстані **30 м** від золошлакових відвалів, де вміст окремих елементів суттєво перевищує фонові рівні: марганцю – у **4,7 рази**, міді – у **3,11 рази**, цинку – у **2,67 рази**, свинцю – у **2,24 рази**. Кадмій у вибірці не виявлено, що свідчить про його відсутність або вміст нижче межі визначення.

Таке значне відхилення концентрацій важких металів на відстані 30 м від ЗШВ, яке не спостерігається на 100 м, може бути пояснене особливостями рельєфу місцевості Добровірської ТЕС. Ймовірно, мікрорельєф сприяє локальній акумуляції забруднюючих речовин, які переносяться вітровою ерозією або поверхневим стоком.

Критичним аспектом є рухомість цих елементів. Випробування на вилуговування показують, що в кислому середовищі (характерному для підзолистих ґрунтів регіону) важкі метали, такі як кадмій та свинець, можуть переходити у водорозчинні форми, мігруючи у підземні води. Водночас, при використанні золи у бетонах або стабілізованих ґрунтах, ці елементи іммобілізуються у кристалічній решітці гідратних новоутворень, що суттєво знижує екологічні ризики [36].

У гідрологічному аспекті золошлакові відвали можуть бути джерелами забруднення поверхневих і підземних вод. Вилуговування розчинних сполук сульфатів, хлоридів, а також мобільних форм важких металів і металоїдів (As, Cd, Cr, Pb, Hg, Se тощо) призводить до формування техногенних потоків забруднення, які за відсутності належних протифільтраційних екранів можуть виходити за межі проммайданчика. Подібні процеси докладно описані для низки українських ТЕС, де зафіксовано підвищені концентрації важких металів у водах, що дренують золовідвали [30, 33].

Атмосферний вплив золошлакових відходів визначається насамперед пиловими викидами з поверхні золовідвалів та під час транспортних операцій. Дрібнодисперсний пил золошлаків здатен поповнювати фракції  $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$ , які є ключовими маркерами впливу на здоров'я людини відповідно до Глобальних настанов ВООЗ щодо якості повітря [36] ВООЗ рекомендує не перевищувати середньорічні концентрації  $PM_{2.5}$  на рівні  $5 \text{ мкг/м}^3$ , а  $PM_{10}$  –  $15 \text{ мкг/м}^3$ ; при цьому навіть невеликі перевищення пов'язані з підвищенням ризику серцево-судинних і респіраторних захворювань та передчасної смертності.

Європейський і світовий досвід доводить, що викиди пилу,  $SO_2$  і  $NO_x$  та вторинних частинок можуть суттєво погіршувати якість повітря на регіональному рівні, а зменшення цих викидів до рівнів, сумісних із рекомендаціями ВООЗ, потенційно дозволяє уникнути десятків тисяч випадків передчасної смертності. В умовах Львівщини пилове навантаження від золовідвалів, поєднане з викидами від стаціонарних джерел, формує додатковий чинник ризику, особливо за відсутності рекультивації та ефективних протипилових заходів.



Рисунок 3.5 – Схема впливу об'єктів розміщення золошлаків на компоненти навколишнього середовища

На основі аналізу представленої схеми очевидно, що об'єкти складування золошлаконакопичувачі чинять негативний багатокomпонентний вплив практично на всі складові довкілля. Це свідчить про системну екологічну загрозу, де забруднення не обмежується лише зоною відведення відходів, а поширюється на:

- атмосферне повітря (через вітрову ерозію та викиди дрібнодисперсних частинок);
- ґрунти (внаслідок формування техногенних ґрунтів та акумуляції токсикантів);
- гідросферу (через вилуговування мобільних форм важких металів та високий вміст солей, що забруднюють поверхневі та підземні води).

Таким чином, золовідвали функціонують як перманентні джерела вторинного забруднення, що вимагає комплексних заходів екологічного управління та рекультивації для мінімізації їхнього довгострокового впливу на екосистеми.

### **3.5 Управління золошлаковими відходами в умовах переходу до циркулярної економіки та основні сценаріїв екологічних ризиків**

Система управління відходами теплоенергетики Львівщини перебуває у стані складної трансформації. Вона характеризується поступовим відходом від парадигми «лінійної економіки» (видобуток – спалювання – захоронення) та орієнтацією на європейську модель циркулярної економіки. Проте реалізація цього переходу значно ускладнюється економічними, нормативно-правовими та логістичними бар'єрами.

На поточний момент основним методом поводження зі золошлаковими відходами залишається їх розміщення у гідровідвалах. Ця практика, попри свою екологічну небезпеку, залишається економічно вигідною для підприємств через низьку вартість захоронення порівняно з інвестиціями у технології переробки.

Одним із ключових стримувальних чинників є розмір екологічного податку. Станом на 2024 рік ставка за розміщення відходів IV класу небезпеки становить лише 5,50 грн/т, що істотно нижче, ніж у державах ЄС, де податки на захоронення сягають десятків євро за тонну. Унаслідок цього в Україні не формується достатній економічний стимул для впровадження технологій рециклінгу.

Суттєвим бар'єром є невизначеність правового статусу золошлаків. У Європейському Союзі відповідно до Директиви 2008/98/ЄС діє механізм «End-of-Waste», який дозволяє перекласифікувати перероблену золу у побічний продукт або товар, спрощуючи їх включення до ринкового обігу. В Україні, попри ухвалення Закону «Про управління відходами», підзаконні

акти та критерії для надання статусу «побічного продукту» для золи все ще перебувають на етапі розробки та імплементації. Це створює бюрократичні перепони: споживачі (зокрема, бетонні підприємства) змушені працювати з «відходами», що вимагає спеціальних ліцензій на поводження з ними, замість того щоб купувати сертифіковану «мінеральну добавку».

На основі аналізу літератури та власних узагальнень можна виокремити такі ключові сценарії ризику, пов'язаних з експлуатацією золошлаковідвалів Львівщини:

1. хімічний ризик – вилуговування важких металів і солей у ґрунтові та поверхневі води, підвищення мінералізації водоносних горизонтів;
2. пиловий ризик – винесення дрібнодисперсного пилу на навколишні території, перевищення рівнів  $PM_{2.5}$  і  $PM_{10}$  порівняно з рекомендаціями WHO AQG, зростання ризику респіраторних захворювань;
3. геотехнічний ризик – потенційна нестійкість дамб і карт золовідвалу, небезпека проривів і ерозійних процесів, особливо за умови недостатнього дренажу та контролю за рівнем фільтраційних вод [14];
4. радіаційний ризик – можливе підвищення рівня природної радіоактивності при використанні золошлаків у будівництві без попередньої радіаційно-гігієнічної оцінки;
5. соціально-економічний ризик – втрата перспективних земельних ресурсів, формування «депресивних» територій, зниження вартості земель і житла в зоні впливу.

Таблиця 3.6 – Основні екологічні ризики накопичення золошлакових відходів теплоенергетики

| Тип ризику    | Механізм виникнення                                                                                                                                | Потенційні екологічні та санітарні наслідки                                                                                     | Індикатори оцінки ризику                                                                 |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Хімічний      | Вилуговування важких металів (Pb, Cd, Ni, Cr, Cu, Zn), сульфатів, хлоридів та лужних компонентів із тіла золовідвалу у підземні та поверхневі води | Забруднення водних ресурсів, підвищення мінералізації та токсичності вод; ризики для питного водопостачання та водних екосистем | Концентрації металів у фільтраційних водах; ступінь мінералізації; порівняння з ГДК      |
| Пиловий       | Висихання поверхні золовідвалу та перенесення PM <sub>2.5</sub> і PM <sub>10</sub> повітряними потоками на навколишні території                    | Погіршення якості атмосферного повітря; збільшення частоти респіраторних і серцево-судинних захворювань                         | Рівні PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> ; індекс якості повітря; частота еолових явищ |
| Геотехнічний  | Нестійкість дамб, просідання ґрунту, ерозія та руйнування гідротехнічних споруд золовідвалу                                                        | Аварійні прориви, раптовий винос забруднювачів, підтоплення прилеглих територій                                                 | Дані геодезичного моніторингу; рівень фільтраційних вод; стан дамб                       |
| Гідрологічний | Зміна дренажно-фільтраційного режиму, накопичення техногенно забруднених стоків                                                                    | Порушення водного балансу локальних екосистем, ризики забруднення водозаборів                                                   | Витрати фільтраційних потоків; хімічний склад поверхневих стоків                         |
| Радіологічний | Наявність природних радіонуклідів (U, Th, Ra, K-40) у складі золошлаків                                                                            | Обмеження у використанні золи в будівництві; ризики для населення у разі недотримання норм радіаційної безпеки                  | Ефективна питома активність, відповідність ДБН В.1.4-2.01                                |
| Біологічний   | Деградація ґрунтів і рослинного покриву навколо                                                                                                    | Зниження біорізноманіття, порушення                                                                                             | Проективне покриття рослинності; стан                                                    |

|                           |                                                                                                                              |                                                                                                           |                                                                                |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|                           | золовідвалів,<br>порушення<br>біоценозів                                                                                     | ландшафтної<br>стійкості,<br>формування<br>техногенних пустель                                            | грунтового<br>горизонту;<br>видовий склад<br>флори                             |
| Соціально-<br>економічний | Втрата земельних<br>ресурсів,<br>негативний імідж<br>промислових<br>територій,<br>зниження<br>інвестиційної<br>привабливості | Депресивність<br>територій,<br>знецінення землі та<br>нерухомості,<br>обмеження<br>використання<br>земель | Зміна кадастрової<br>вартості;<br>соціально-<br>економічні<br>показники громад |
| Санітарно-<br>гігієнічний | Поширення пилу,<br>забруднення води,<br>шум від роботи<br>техніки на<br>золовідвалах                                         | Погіршення стану<br>здоров'я населення,<br>збільшення<br>захворюваності                                   | Дані медичної<br>статистики;<br>результати<br>моніторингу<br>повітря та води   |

Таким чином, золошлаковідвали Львівщини, зокрема Добротвірської ТЕС виступають системоутворюючим елементом регіональних екологічних ризиків. Для мінімізації негативного впливу необхідні модернізація систем золовидалення, створення надійних протифільтраційних бар'єрів, розширення проєктів утилізації золошлаків як вторинної сировини та постійний екологічний моніторинг стану довкілля.

Отримані дані свідчать, що золошлакові матеріали можуть виступати цінним техногенним ресурсом за умови їх якісної класифікації та підготовки – зокрема, з урахуванням гранулометричного складу, вмісту силікатів, алюмініїв, оксидів заліза й домішок важких металів. Використання таких матеріалів у цементній, бетонній, дорожній та рекультиваційній галузях сприяє зменшенню потреби у природних нерудних ресурсах і знижує антропогенний тиск на довкілля.

Наявні технології дозволяють розглядати ці відходи як цінну вторинну сировину, придатну для будівельної галузі та дорожнього будівництва (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Класифікація напрямів рециклінгу золошлакоутворюючих компонентів для будівельних потреб та промисловості [29]

Проведене дослідження демонструє, що ефективна утилізація золошлакових відходів поєднує економічні переваги з вагомими екологічними результатами. Перехід від моделі «накопичення» до «керованого ресурсного циклу» дає змогу мінімізувати площі золовідвалів, скоротити пилове та хімічне забруднення, зменшити ризики інфільтрації забруднювальних речовин у водні об'єкти та забезпечити перехід до циркулярної економіки.

Узагальнюючи, золошлакові відходи теплоенергетики Львівщини становлять комплексну екологічну загрозу для ґрунтів, водних ресурсів, атмосферного повітря та здоров'я населення. Це потребує зміни підходів до управління – від пасивного зберігання до активного використання вторинних ресурсів.

У цьому контексті Європейський Союз реалізує комплексну політику у сфері циркулярної економіки та управління відходами, закріплену, зокрема, у

Плані дій ЄС з циркулярної економіки та низці галузевих стратегій. Вони передбачають поступове скорочення захоронення відходів, підвищення частки їх переробки і відновлення, а також розвиток ринку вторинної сировини з чіткими вимогами до якості та безпечності продукції. Для великотоннажних промислових відходів енергетичного сектору (включно із золошлаками) це означає перехід від «пасивного» зберігання до інтегрованого ресурсного менеджменту, коли техногенні мінеральні матеріали стають повноцінною складовою ланцюгів постачання будівельних і інфраструктурних проєктів.

Для України, яка взяла курс на імплементацію європейських екологічних стандартів, ці підходи мають не лише рекомендаційний, а й стратегічний характер. Гармонізація національного законодавства із законодавством ЄС у сфері відходів, впровадження ієрархії поводження з відходами, розвиток інституту розширеної відповідальності виробника та формування ринку вторинних ресурсів створюють передумови для системного залучення золошлакових матеріалів у повторний обіг. У цьому контексті теплоенергетика Львівщини, зокрема Добротвірська ТЕС, може виступати пілотним майданчиком для апробації циркулярних рішень – від синтезу високододаноцінних продуктів (цеоліти, геополімери, сорбенти) до масштабного використання золошлаків у дорожньому та промисловому будівництві.

Таким чином, поєднання глобальних підходів UNEP, IPCC та ЄС із регіонально орієнтованими стратегіями управління відходами створює методологічну і практичну основу для переходу від традиційної моделі захоронення золошлаків до інтегрованої системи їх ресурсної утилізації. Для магістерського дослідження це означає необхідність не лише оцінити екологічні ризики накопичення золошлакових відходів, а й обґрунтувати конкретні інструменти циркулярної економіки, які можуть бути реалізовані в умовах Львівщини з урахуванням техногенного навантаження, економічних обмежень та євроінтеграційних зобов'язань України.

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**

### **4.1 Аналіз стану охорони праці на об'єктах теплоенергетики**

Діяльність теплових електростанцій характеризується підвищеним рівнем виробничих і техногенних ризиків, що зумовлено використанням високотемпературних процесів, вибухо- та пожежонебезпечних палив, складних електротехнічних систем, а також значними обсягами викидів і відходів. У контексті дослідження моніторингу атмосферного повітря та розробки природоохоронних заходів особливої актуальності набуває оцінка стану охорони праці, виробничої безпеки та системи захисту персоналу і населення від наслідків аварій та надзвичайних ситуацій на ТЕС.

Охорона праці на теплових електростанціях регламентується Законом України «Про охорону праці», Кодексом цивільного захисту України, галузевими правилами безпеки в енергетиці, а також директивами Європейського Союзу у сфері промислової безпеки (зокрема Директива 89/391/ЕЕС та SEVESO III).

Державний нагляд з охорони праці України у листі від 21.12.1993 р. № 01-12/2552 визначив, що відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці» керівники підприємств зобов'язані чітко закріплювати у посадових інструкціях працівників їхні конкретні обов'язки, права та відповідальність у сфері охорони праці [20, 24]. Встановлено, що посадові інструкції мають розроблятися за єдиною структурою, яка включає такі обов'язкові розділи: загальні положення, функціональні завдання, службові обов'язки, права, відповідальність, а також взаємовідносини та зв'язки за посадою.

При цьому з'ясовано, що в кожному з указаних розділів необхідно передбачати положення, які регламентують питання охорони праці, з урахуванням специфіки виконуваних робіт. Обґрунтовано, що розроблення посадових інструкцій має здійснюватися відповідно до Довідника

кваліфікаційних характеристик професій працівників, затвердженого наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 16.02.1998 р. № 24 [23], що забезпечує нормативну узгодженість і системність управління охороною праці на підприємстві.

Аналіз виробничих умов на ТЕС свідчить, що основними небезпечними та шкідливими факторами є:

- високі температури та теплове випромінювання в котельних і турбінних цехах;
- підвищений рівень шуму та вібрації (турбоагрегати, димососи, вентилятори);
- запиленість повітря робочої зони (зола, вугільний пил, продукти згоряння);
- вплив хімічних речовин (оксиди сірки й азоту, аміак у системах SCR/SNCR, реагенти водопідготовки);
- ризики ураження електричним струмом при роботі з обладнанням напругою 6–750 кВ;
- пожежо- та вибухонебезпечність паливних складів (вугілля, мазут, газ).

Встановлено, що на більшості українських ТЕС значна частина обладнання експлуатується понад нормативний ресурс, що підвищує ймовірність аварійних ситуацій і травматизму. Водночас впровадження систем управління охороною праці, відповідно до стандартів ISO 45001:2018, залишається нерівномірним і потребує подальшого розвитку.

#### **4.2 Заходи щодо покращення гігієни праці, техніки безпеки та пожежної безпеки**

Покращення умов праці на теплових електростанціях має здійснюватися на основі комплексного ризик-орієнтованого підходу, який передбачає системну ідентифікацію небезпечних та шкідливих виробничих факторів, оцінку рівнів професійного ризику та впровадження превентивних заходів з урахуванням специфіки технологічних процесів і екологічних умов експлуатації ТЕС. Такий підхід відповідає вимогам Закону України «Про

охорону праці», стандарту ISO 45001:2018, а також європейській директиві 89/391/ЄЕС щодо безпеки та гігієни праці.

Основними чинниками, що формують несприятливі умови праці на ТЕС, є підвищені температури, запиленість повітря робочої зони, наявність токсичних газів і аерозолів, шум та вібрація. У зв'язку з цим першочергового значення набувають інженерно-технічні та організаційні заходи, спрямовані на зниження рівнів впливу цих факторів.

До ключових заходів належать:

- модернізація систем загальнообмінної та місцевої вентиляції, зокрема локального відсмоктування у зонах утворення пилу й газів (котельні, дробильно-паливні відділення, золовидалення), що дозволяє підтримувати концентрації шкідливих речовин нижче гранично допустимих рівнів;
- впровадження автоматизованих і дистанційно керованих технологічних процесів, що зменшує тривалість перебування персоналу в умовах підвищеної температури, шуму та хімічного впливу;
- застосування сучасних засобів індивідуального захисту, адаптованих до характеру робіт: фільтрувальних і ізолювальних респіраторів класу FFP2–FFP3, тепло- і хімістійкого спецодягу, засобів захисту органів слуху та зору;
- регулярний виробничий контроль параметрів мікроклімату, рівнів шуму, вібрації та концентрацій шкідливих речовин відповідно до вимог відповідно до ДСН та ДСТУ, із документальним фіксуванням результатів та коригуванням умов праці.

Науково обґрунтовано, що реалізація зазначених заходів дозволяє знизити ризик розвитку професійних захворювань (пневмоконіозів, теплових перевантажень, уражень органів слуху) та підвищити загальний рівень працездатності персоналу.

З огляду на використання вибухо- та пожежонебезпечних палив (вугілля, мазут, природний газ), а також наявність високотемпературного обладнання, техніка безпеки та пожежна безпека на ТЕС є критичними складовими системи охорони праці.

Основні напрями підвищення рівня технічної та пожежної безпеки

включають:

- оснащення паливних складів і технологічних приміщень автоматичними системами пожежогасіння (водяними, пінними або газовими), які забезпечують оперативну локалізацію загорянь;
- використання тепловізійного моніторингу вугільних штабелів з метою своєчасного виявлення зон самонагрівання та запобігання самозайманню;
- впровадження систем раннього виявлення загазованості, витоків палива й небезпечних концентрацій горючих газів, що дозволяє мінімізувати ризик вибухів і пожеж;
- проведення регулярних протиаварійних тренувань персоналу, оновлення та актуалізація планів локалізації і ліквідації аварійних ситуацій з урахуванням можливих сценаріїв надзвичайних подій.

Таким чином, удосконалення гігієни праці, техніки безпеки та пожежної безпеки на теплових електростанціях є важливою складовою комплексної системи екологічної та виробничої безпеки, що забезпечує захист здоров'я персоналу, зниження екологічних ризиків і підвищення загальної стійкості функціонування енергетичних об'єктів.

Реалізація зазначених заходів дозволяє зменшити рівень професійних захворювань, виробничого травматизму та аварійності, а також опосередковано сприяє зниженню неорганізованих викидів у атмосферне повітря.

#### **4.3 Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій**

Золотшлакові відвали теплоенергетичних підприємств Львівщини, як складова об'єктів теплової енергетики, є потенційними джерелами надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Теплові електростанції належать до об'єктів підвищеної небезпеки, аварії на яких можуть призводити до масштабних техногенних надзвичайних ситуацій, зокрема проривів дамб і руйнування золівідвалів, масового пиловиділення, пожеж,

вибухів, викидів токсичних газів, а також порушення систем охолодження, що в умовах воєнних дій суттєво підвищує рівень ризиків для довкілля та населення.

Захист населення в зоні впливу ТЕС регламентується Кодексом цивільного захисту України та передбачає:

- ідентифікацію потенційно небезпечних сценаріїв аварій із використанням ризик-орієнтованого аналізу;
- визначення зон можливого ураження з урахуванням метеорологічних умов і результатів атмосферного моделювання;
- створення системи оповіщення населення про загрозу або виникнення надзвичайної ситуації;
- розроблення планів евакуації та укриття населення;
- інформування громадськості про екологічні ризики та правила поведінки в умовах аварій.

Особливе значення має інтеграція систем екологічного моніторингу з механізмами цивільного захисту. Дані автоматизованих постів контролю якості повітря та супутникового спостереження можуть використовуватися для оперативного прогнозування зон поширення забруднюючих речовин і прийняття управлінських рішень у режимі реального часу.

Таким чином, охорона праці та захист населення в умовах надзвичайних ситуацій є невід'ємною складовою екологічної безпеки теплових електростанцій. Підвищення рівня виробничої безпеки, впровадження сучасних систем управління ризиками та інтеграція екологічного моніторингу з механізмами цивільного захисту дозволяють не лише зменшити ймовірність аварій, але й мінімізувати їхні екологічні та соціальні наслідки. Це відповідає сучасним вимогам сталого розвитку, євроінтеграційним зобов'язанням України та цілям забезпечення безпечного довкілля для населення.

## ВИСНОВКИ

У ході проведеного дослідження досліджено екологічні аспекти функціонування підприємств теплоенергетичного комплексу Львівської області та проаналізовано специфіку утворення, накопичення й впливу золошлакових відходів на компоненти довкілля. Особливу увагу приділено Добротвірській ТЕС та підприємствам, діяльність яких безпосередньо формує паливно-енергетичний цикл регіону.

У результаті роботи з'ясовано, що тривала експлуатація Добротвірської ТЕС та використання у її паливному балансі високозольного вугілля Львівсько-Волинського басейну зумовили формування значних обсягів золошлакових відходів. Встановлено, що у регіоні фактично утворилися потужні техногенні геологічні тіла, які функціонують як автономні джерела вторинного забруднення навколишнього середовища.

У ході оцінювання екологічних наслідків проаналізовано просторові закономірності розсіювання пилових частинок та особливості аеродинамічних процесів, що визначають токсичне навантаження на прилеглі території. Встановлено явище «30-метрової зони», у межах якої фіксується пік накопичення важких металів (Cu, Zn, Pb) у ґрунтах внаслідок турбулентного осадження дрібнодисперсної фракції золошлакового пилу (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>). Це доводить необхідність коригування санітарно-захисних зон на основі реальних моделей перенесення забруднювачів, а не виключно нормативних відстаней.

У ході виконання роботи встановлено, що існуюча система гідровидалення та складування золошлаків на Добротвірській ТЕС є морально і технологічно застарілою. Вона не відповідає вимогам найкращих доступних технологій, передбачених європейським законодавством (Директива 2010/75/ЄС, BREF LCP). Виявлено значні втрати води, нераціональне використання земельних ресурсів, ризики інфільтраційного забруднення підземних вод та інтенсифікації пилових процесів.

Виявлено суттєві перевищення фонових концентрацій важких металів у ґрунтах прилеглих територій, а також підтверджено токсичний вплив золошлакових субстратів на рослинні угруповання та ризики деградації фітоценозів. Крім того,

встановлено потенційну загрозу міграції токсичних компонентів у горизонти, що дренують водоносні системи басейну Західного Бугу.

Вивчення регіонального контексту демонструє, що теплоенергетика Львівщини перебуває у стані перехідного періоду між класичною лінійною моделлю «видобуток – спалювання – відвал» та європейською парадигмою циркулярної економіки, сформульованою у політичних і стратегічних документах (IPCC, UNEP, OECD, Європейська комісія). Нормативні зміни на національному рівні (Закон України № 2320-IX, Національна стратегія управління відходами, Нацплан до 2033 р.) створюють рамкові умови для інтеграції відходів ТЕС у моделі вторинного ресурсокористування.

На підставі всебічного аналізу запропоновано стратегічні напрями екологізації системи поводження з золошлаковими відходами у Львівській області, серед яких:

- масштабне розширення утилізації ЗШВ у будівельних матеріалах, дорожніх основах, геополімерних композиціях;
- модернізація систем пилогазоочищення та впровадження автоматизованого моніторингу відповідно до вимог ВАТ;
- перехід від гідровидалення до технологій сухого відведення або комбінованих технологій;
- екологічна рекультивация існуючих золовідвалів із застосуванням інжинірингових протиінфільтраційних бар'єрів;
- інтеграція золошлакових відходів у регіональні програми відновлення інфраструктури та дорожнього будівництва;
- посилення державного та громадського екологічного контролю шляхом використання ГІС, супутникових даних та дистанційного зондування.

Узагальнюючи, встановлено, що золошлакові відвали теплоенергетики Львівщини є об'єктами високого комплексного екологічного ризику, які чинять системний вплив на ґрунти, атмосферу та підземні води, а отже потребують термінової модернізації систем управління та впровадження сучасних технологічних рішень. Реалізація запропонованих заходів створить передумови для скорочення техногенного навантаження, зменшення кліматичних ризиків, відновлення деградованих екосистем та повернення техногенно порушених територій до потенційно продуктивного використання.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Аналіз потенційного впливу впровадження Директиви 2010/75 про промислові викиди в енергетичному секторі України. Київ: ГО “ДІКСІ ГРУП”. 2022. 216 с. URL: <https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2022/11/dixi-dozvil-report-main-17.11.pdf>
2. Бондар О.І., Машков О. А., Іващенко Т.Г., Михайлюк О.С., Печений В.Л. Сучасні методи оцінки забруднень техногенно-небезпечних об’єктів (об’єктів критичної інфраструктури). Монографія / Під загальною науковою редакцією доктора біологічних наук О. І. Бондаря. Київ: Основа. 2021. 56 с.
3. Вольчин І.А., Гапонич Л.С., Згоран І.П. Вибір технології десульфуризації димових газів для українських вугільних теплових електростанцій. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Том 24, № 4. С. 154–168. DOI: 10.24263/2225-2924-2018-24-4-18
4. ДТЕК Добротвірська ТЕС. URL: <http://surl.li/psmpg>
5. Державна служба статистики України. <https://www.ukrstat.gov.ua/>
6. ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб».
7. ДСТУ 7738:2015 «Безпека екологічна та техногенна. Терміни та визначення понять».
8. ДСТУ 3472–96 «Вугілля буре, кам’яне та антрацит. Класифікація».
9. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992. Поточна редакція від 08.08.2025., № 3855-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>
10. Закон України «Про охорону земель» від 19.06.2003. Поточна редакція від 08.11.2024, 3993-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text>
11. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 26.06.91. Поточна редакція від 08.08.2025, 3855-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>
12. Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>
13. Закон України «Про управління відходами» № 2849-IX від 13.12.2022. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>

14. Закон України «Про ринок електричної енергії». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>
15. Інтерактивний Львів. <https://lia.lvivcenter.org/uk/>
16. Інформаційна довідка про основні показники розвитку галузей паливно-енергетичного комплексу України. URL: <https://www.mev.gov.ua/statystychna-informatsiya/informatsiyna-dovidka-pro-osnovnipokaznyky-rozvytku-haluzey-palyvno>
17. Кодекс України «Про надра» 132/94-ВР від 27.07.1994 р.
18. Львівська область: природні умови та ресурси: монографія / за заг. ред. д-ра геогр. наук, проф. М. М. Назарука. Львів: Видавництво Старого Лева, 2018. 592 с.
19. ЛМКП «Львівтеплоенерго». Львівська міська рада. <https://city-adm.lviv.ua/lmr/utilities/lkp-lvivteploenerho/>
20. Машков О.А., Іващенко Т.Г., Мухіна К.Є., Печений В.Л. Інтеграція аерокосмічних технологій в систему управління екологічною безпекою: оцінка ефективності застосування системи підтримки прийняття управлінських інформаційних екологічних рішень. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*, № 4, 2023, С. 20-27.
21. Міністерство енергетики України. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. 2024. URL: <https://mev.gov.ua/>
22. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Екологічні паспорти за 2020-2024 рр. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichni-pasporty/>
23. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Інформація щодо стану якості атмосферного повітря в Україні (за даними Державної санітарно-епідеміологічної служби та інших джерел). 2024. URL: <https://mepr.gov.ua/>
24. Методичні рекомендації. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря. Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 184 від 13.04.2007. URL: <http://surl.li/pjrks>
25. Мисак Й.С., Кравець Т.Ю., Матусевич В.К., Омеляновський П.Й. Проблеми спалювання низькосортного палива в котельних установках. Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». Серія: Технічні

науки. № 49. 2003. С. 47-51.

26. Наказ «Про затвердження Правил охорони праці під час розробки родовищ корисних копалин відкритим способом». № 61 від 18.03.2010 р.

27. Печений В. Технології забезпечення екологічної безпеки золошлаковідвалів за допомогою дистанційного моніторингу: дис. ... д-ра філософії. Вінниця : ВНТУ, 2024. 178 с.

28. Рудько Г.І., Яковлев Є.О. Постмайнінг гірничодобувних районів України як новий напрям екологічно безпечного використання мінерально-сировинних ресурсів. *Мінеральні ресурси України*. 2020. № 3. С. 37–44. URL: <https://doi.org/10.31996/mru.2020.3.37-44>

29. Спасьонова Л.М., Суббота І.С., Готорук А.Є. Використання золошлакових відходів теплоелектростанцій для виробництва будівельної кераміки. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 34 (73). № 6. 2023. С. 199-208. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/29>

30. Тіщенко, М.О. Філін В.Н., Печений В.Л. Пилопригнічення на золошлаковідвалах ТЕЦ з використанням водорозчинних полімерів. *Екологічні науки*. № 4 (23), 2018. С. 60-62.

31. Техноекологія : підручник / Мальований М. С., Боголюбов В. М., Шаніна Т. П., Шмандій В. М., Сафранов Т. А. ; за ред. М. С. Мальованого. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2013. 424 с.

32. Хандогіна О.В., Дрозд О.М., Дядін Д.В. Аналіз проведення стратегічної екологічної оцінки регіональних планів управління відходами. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 2 (47). С. 232–241. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.38>

33. Чоботько І. І., Хорольський А. О., Виноградов Ю.О., Косенко А.В. Інноваційні технології використання відходів вуглевидобутку: монографія. Дніпро: ЛІРА, 2023. 170 с. URL: [https://www.researchgate.net/publication/378156682\\_Innovacijni\\_tehnologii\\_vikori\\_stanna\\_vidhodiv\\_vuglevidobutku](https://www.researchgate.net/publication/378156682_Innovacijni_tehnologii_vikori_stanna_vidhodiv_vuglevidobutku)

34. Фіалко Н. М., Сігал О.І., Халатов А. А., Падерно Д. Ю. та ін. Розвиток методів та технологій покриття пікових навантажень в енергетиці України. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. 84(3):26-38.

35. Черниченко І.О., Литвиченко О.М., Бабій В.Ф., Соверткова Л.С.

Теплові електростанції як джерело забруднення атмосферного повітря бенз/а/піреном. *Гігієна населених місць*. №66. 2015. ДУ ІГМЕ. С. 110-114.

36. Шпак Я. В. Фітостресорність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу попелу ТЕС і гумату калію: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16 / Інститут екології карпат НАНУ, Львів, 2021. 22 с.

37. Щорічна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Львівській області в 2022 році. Департамент екології та природних ресурсів Львівської ОДА. Львів, 2023. 296 с.

38. Air quality in Europe 2024: Report. *European Environment Agency*. 2024. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2024>

39. Air Pollution: Real-time Air Quality Index (AQI). <http://www.aqicn.org/>

40. Alinazarov, A. K., Khusainov, M. A., Gaybullaev, A. H. Applications of Coal Ash in the Production of Building Materials and Solving Environmental Problems. *Global Scientific Review*. 2022. Vol. 8. P. 89-95.

41. Volchyn I.A., Haponych L.S., Przybylsk W.Ja. Current state and forecast of sulfur dioxide and dust emissions at thermal power plants of Ukraine. Power supply technologies. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, № 5. P. 87-93. [https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2021/5/NVNGU05\\_2021\\_Volchyn.pdf](https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2021/5/NVNGU05_2021_Volchyn.pdf)

42. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2022. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

43. Copernicus Sentinel-5P / TROPOMI. Tropospheric NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> data over Ukraine. 2024. Дані доступні через Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/>

44. Data on global air pollutant concentrations. Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS). 2024. URL: <https://atmosphere.copernicus.eu/>

45. Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe. European Commission. 2008. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0050>

46. International Energy Agency (2024), Coal Information, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/coal-information-service>

47. International Energy Agency (2024), Emissions Factors 2024,

<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/emissions-factors-2024>

48. Monitoring air pollution from space. *European Space Agency*. Copernicus Sentinel-5P. 2024. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5p>

49. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. *International Energy Agency: special report*. 2021. (Interactive: [iea.li/nzeroadmap](https://www.iea.org/net-zero)). URL: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/05/net-zero-by-2050\\_4a1ca43f/c8328405-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/05/net-zero-by-2050_4a1ca43f/c8328405-en.pdf)

50. Pohrebennyk Volodymyr Influence of Dobrotvir thermal power plant on environmental specifications. *environmental problems*. Vol. 1, No. 1, 2016. P. 83-89.

51. Savenets Mykhailo, Nadtochii Liudmyla, Kozlenko T. V. and others. Status of atmospheric air pollution in Ukraine prior to the full-scale russian invasion. Part 2: Pollutants total content according to the satellite data. *Ukrainian hydrometeorological journal*. 2023. 32. P. 130-143. doi: 10.31481/uhmj.32.2023.09

52. Tracking Sulfur Dioxide from Space. *NASA Earth Observatory*. 2023. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/SulfurDioxide>

53. World Energy Outlook 2024. *International Energy Agency*. 2024. URL: <https://www.iea.org/>

54. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. *World Health Organization*. 2021. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

55. Zamfirova M. S., Khokhlov V. M. Air temperature and precipitation regime in Ukraine in 2021-2050 by CORDEX model ensemble. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 2020. (25), 17-27. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.02>