

**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: «Моніторинг стану атмосферного повітря в зоні діяльності  
теплових електростанцій та розробка природоохоронних заходів для  
зменшення забруднення повітря»**

Виконав: студент групи Еко-61

спеціальності 101 «Екологія»

АГРЕС Владислав Володимирович

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  
**Агресу Владиславу Володимировичу**

1. Тема роботи: «Моніторинг стану атмосферного повітря в зоні діяльності теплових електростанцій та розробка природоохоронних заходів для зменшення забруднення повітря»

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 Вплив теплоенергетичного сектору на екологічну безпеку

- 1.2 Емісійні джерела теплової генерації та їх екологічні наслідки

- 1.3 Нормативні вимоги щодо моніторингу якості атмосферного повітря для стаціонарних джерел забруднення в зоні ТЕС

- 2 Об'єкт, умови та методика досліджень

- 2.1 Енергетичні та природно-кліматичні детермінанти формування якості атмосферного повітря в Україні

- 2.2 Характеристика репрезентативних кейсів у системі теплової енергетики України як джерел забруднення атмосферного повітря

- 2.2.1 Характеристика Бурштинської ТЕС як моделі критичного навантаження

- 2.2.2 Характеристика Трипільської ТЕС як моделі паливно-енергетичної трансформації

- 2.3 Методи інтегрованого моделювання та моніторингу поширення атмосферних забруднень у зоні впливу енергетичних об'єктів

- 3 Результати дослідження

- 3.1 Екологічні наслідки діяльності теплових електростанцій України в умовах енергетичної кризи та військового конфлікту

3.2 Вплив типу палива на структуру викидів та просторові паттерни забруднення від ТЕС

3.3 Оцінка просторово-часової диференціації забруднення повітряного басейну в зоні впливу ТЕС України

3.4 Верифікація викидів ТЕС за супутниковими реаналізами (CAMS, ERA5) та порівняльний аналіз сезонних патернів забруднення Охорона праці

3.5 Вплив метеорологічних умов та кліматичних змін на розсіювання забруднюючих речовин у зонах впливу ТЕС

3.6 Природоохоронні заходи та можливості підвищення ефективності екологізації теплової енергетики України

4 Охорона праці та захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

4.1 Аналіз стану охорони праці на теплових електростанціях

4.2 Заходи щодо покращення гігієни праці, техніки безпеки та пожежної безпеки на теплових електричних станціях

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 | Іванків М. Я. 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 | При-мітка |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------|
| 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 \_\_\_\_\_

(підпис)

Владислав АГРЕС

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

Мар’яна ІВАНКІВ

УДК 504.064:621.311.22:504.062

Моніторинг стану атмосферного повітря в зоні діяльності теплових електростанцій та розробка природоохоронних заходів для зменшення забруднення повітря. Агрес Владислав Володимирович. Кваліфікаційна робота. Кафедра екології та захисту довкілля. Львів, ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького, 2025. 78 с.

78 ст. текст. част., 20 табл., 25 рис., 48 джерел

У роботі досліджено сучасні підходи до моніторингу атмосферного повітря та встановлено, що найбільш інформативною є інтегрована модель, яка поєднує наземні вимірювання, супутникові спостереження і дисперсійне моделювання. Такий підхід забезпечує виявлення просторово-часової диференціації забруднення, пікових концентрацій і небезпечних «застійних епізодів».

Ключовим результатом став порівняльний аналіз Бурштинської та Трипільської ТЕС як репрезентативних об'єктів теплової енергетики України. З'ясовано, що Бурштинська ТЕС, розташована в передгірській долині Західної України, характеризується переважно сірково-пиловим типом забруднення. Частка  $\text{SO}_2$  та твердих частинок ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ) у структурі викидів перевищує 65–70 %, а середні концентрації  $\text{PM}_{2.5}$  у зоні 10–20 км у періоди температурних інверсій перевищують фонові значення у 3–5 разів. Для Трипільської ТЕС виявлено азотно-металевий тип техногенного навантаження: частка  $\text{NO}_2$  у структурі газових викидів перевищує 50 %, а супутникові дані фіксують витягнуті шлейфи  $\text{NO}_2$  довжиною до 30–50 км у напрямку Київської агломерації. Сезонні середні концентрації  $\text{NO}_2$  у зоні впливу Трипільської ТЕС на 40–60 % вищі, ніж у районі Бурштинської ТЕС, тоді як пилове навантаження є відносно нижчим.

Проаналізовано вплив метеорологічних чинників і обґрунтовано, що поєднання типу палива, рельєфу та атмосферної циркуляції визначає масштаби впливу ТЕС. Для Бурштинської ТЕС критичними є часті температурні інверсії, висока вологість і слабка вентиляція, тоді як для Трипільської ТЕС – адвективні переноси та інтенсивні фотохімічні процеси з утворенням вторинного озону. Встановлено перевищення фактичних зон впливу над нормативними межами санітарно-захисних зон. Обґрунтовано комплекс природоохоронних заходів (деазотування, десульфуризація, модернізація систем пилогазоочищення, рекультивация золовідвалів, інтеграція супутникового моніторингу).

Проаналізовано питання охорони праці та захисту населення.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                                        | 6  |
| 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....                                                                                                           | 8  |
| 1.1 Вплив теплоенергетичного сектору на екологічну безпеку .....                                                                  | 8  |
| 1.2 Емісійні джерела теплової генерації та їх екологічні наслідки                                                                 | 11 |
| 1.3 Нормативні вимоги щодо моніторингу якості атмосферного повітря для стаціонарних джерел забруднення в зоні ТЕС .....           | 14 |
| 2 ОБ'ЄКТ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....                                                                                       | 17 |
| 2.1 Енергетичні та природно-кліматичні детермінанти формування якості атмосферного повітря в Україні .....                        | 17 |
| 2.2 Характеристика репрезентативних кейсів у системі теплової енергетики України як джерел забруднення атмосферного повітря ..... | 23 |
| 2.2.1 Характеристика Бурштинської ТЕС як моделі критичного навантаження .....                                                     | 24 |
| 2.2.2 Характеристика Трипільської ТЕС як моделі паливно-енергетичної трансформації .....                                          | 29 |
| 2.3 Методи інтегрованого моделювання та моніторингу поширення атмосферних забруднень у зоні впливу енергетичних об'єктів .....    | 33 |
| 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....                                                                                                     | 37 |
| 3.1 Екологічні наслідки діяльності теплових електростанцій України в умовах енергетичної кризи та військового конфлікту .....     | 37 |
| 3.2 Вплив типу палива на структуру викидів та просторові паттерни забруднення від ТЕС .....                                       | 42 |
| 3.3 Оцінка просторово-часової диференціації забруднення повітряного басейну в зоні впливу ТЕС України .....                       | 51 |
| 3.4 Верифікація викидів ТЕС за супутниковими реаналізами (CAMS, ERA5) та порівняльний аналіз сезонних патернів забруднення .....  | 60 |
| 3.5 Вплив метеорологічних умов та кліматичних змін на розсіювання забруднюючих речовин у зонах впливу ТЕС .....                   | 63 |
| 3.6 Природоохоронні заходи та можливості підвищення ефективності екологізації теплової енергетики України .....                   | 67 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ .....                                                          | 69 |
| 4.1 Аналіз стану охорони праці на теплових електростанціях .....                                                                  | 69 |
| 4.2 Заходи щодо покращення гігієни праці, техніки безпеки та пожежної безпеки на теплових електричних станціях .....              | 70 |
| 4.3 Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій .....                                                                         | 72 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                                     | 73 |
| БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....                                                                                                       | 75 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Енергетичний сектор як структурний компонент сучасної цивілізації визначає економічну стабільність, рівень промислового розвитку, технологічний прогрес та енергетичну безпеку держави. Розвиток електроенергетики у світі відбувається швидкими темпами, але з різницею у напрямках: у розвинених країнах різко зменшується роль вугілля, натомість зростає частка відновлюваних джерел. За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2023 році частка вугільної генерації в світовому виробництві електроенергії склала близько 35 % [39].

В енергетичному балансі України, попри тенденції до декарбонізації та розвитку відновлюваних джерел енергії, теплові електричні станції, значна частина яких була збудована ще у другій половині ХХ століття, досі становлять основу виробничих потужностей. Ця історична залежність обумовлює значне техногенне навантаження на довкілля.

Теплоенергетичні об'єкти одночасно є одними з найпотужніших антропогенних чинників впливу на довкілля. Технологічний процес перетворення хімічної енергії палива (вугілля, газу, нафтопродуктів) на електричну супроводжується масштабними емісіями забруднюючих речовин. У процесі їх експлуатації в атмосферу викидається значна кількість оксидів сірки та азоту, які є основними прекурсорами утворення кислотних опадів. Окрім газоподібних сполук, повітря забруднюється твердими мікрочастинками золи та залишками неповністю згорілого палива. Ці викиди є основною причиною респіраторних та серцево-судинних захворювань, що підтверджується численними дослідженнями Всесвітньої організації охорони здоров'я. Щороку понад 2,5 мільйони передчасних смертей у світі пов'язують із забрудненням атмосферного повітря, значна частка яких припадає на викиди від енергетичного сектору [39, 42, 47, 48].

Додаткову екологічну загрозу становить наявність у вугільній сировині пустої породи, що містить природні радіонукліди. Під час спалювання вугілля ізотопи уранорадієвого та торієвого рядів, які залишаються у леткій фракції золи, вивільняються з вуглецевої маси, концентруються та потрапляють у довкілля. Це може призводити до радіоактивного забруднення атмосферного повітря та ґрунтів, рівень якого інколи перевищує показники, характерні для нормальної експлуатації ядерних енергетичних об'єктів [34].

Крім того, золівдали й шлакові накопичувачі займають значні території, що призводить до деградації земельних ресурсів і спричиняє забруднення як підземних, так і поверхневих вод.

За оцінками фахівців, теплові електростанції відповідають приблизно за 30 % усіх антропогенних викидів твердих часток у атмосферу, 63 % – діоксиду сірки і 53 % – оксидів азоту. Крім того, в умовах дефіциту якісного палива багато ТЕС періодично спалюють важкі фракції та відходи, що ще більш погіршує екологічну ситуацію [40, 43].

Крім локального впливу, викиди ТЕС, зокрема  $\text{CO}_2$ , є основним драйвером антропогенного зміни клімату. Останні дослідження кліматологів й енергетиків однастайні: щоб стримати глобальне потепління на безпечному рівні, необхідно прискорити заміну вугільних та газових електростанцій на безвуглецеві технології [27].

Отже, створення ефективної системи моніторингу та впровадження комплексних природоохоронних заходів в зонах впливу ТЕС є не лише екологічним викликом, але й імперативом для безпеки та сталого розвитку суспільства.

**Метою даної роботи** було дослідити, проаналізувати та оцінити стан атмосферного повітря в зоні впливу теплових електростанцій України на основі системного моніторингу показників забруднення, а також розробити комплекс природоохоронних заходів, спрямованих на зменшення емісій шкідливих речовин і мінімізацію екологічних ризиків.

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

- проаналізувати сучасний стан функціонування теплової енергетики України та світу з урахуванням її екологічних наслідків;
- дослідити основні джерела та склад забруднювальних речовин, характерних для викидів теплоенергетичних об'єктів;
- оцінити рівень антропогенного навантаження на атмосферне повітря у зонах впливу теплових електричних станцій;
- визначити екологічні та соціальні наслідки забруднення повітря, спричиненого діяльністю теплової енергетики;
- обґрунтувати підходи до організації системи моніторингу атмосферного повітря в зоні діяльності ТЕС;
- запропонувати комплекс природоохоронних заходів, спрямованих на зниження рівня забруднення.

**Об'єкт дослідження** – вплив об'єктів теплоенергетики на атмосферне повітря.

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1 Вплив теплоенергетичного сектору на екологічну безпеку

Енергетичний сектор традиційно виступає одним із ключових елементів національної безпеки, забезпечуючи сталий розвиток економіки, соціальну стабільність та функціонування критичної інфраструктури. Воєнний стан, як надзвичайний суспільно-політичний чинник, у поточному контексті розвитку України зумовив масштабні зміни в структурі та функціонуванні енергетичної системи держави.

Внаслідок бойових дій було завдано значних пошкоджень об'єктам критичної енергетичної інфраструктури, включно з електричними підстанціями, магістральними газопроводами та енергоблоками атомних електростанцій. Унаслідок цього зафіксовано суттєві втрати у виробництві та транспортуванні енергоносіїв. Крім того, масова міграція населення та масштабна релокація промислових підприємств з територій активних бойових дій спричинили зниження внутрішнього попиту на енергетичні ресурси. Значна частина промисловості була вимушено зупинена або переведена в режим скороченого виробництва, що обумовило зменшення споживання електроенергій та природного газу.

У 2022 році Україна здійснила від'єднання від Об'єднаної енергосистеми держави-агресора та у надзвичайно стислі терміни синхронізувалася з європейською континентальною енергосистемою (ENTSO-E). Цей процес проходив в умовах частково зруйнованої інфраструктури та високого ризику повторного ураження об'єктів енергетики. Воєнний конфлікт також став одним із факторів дестабілізації світових ринків енергоносіїв, що призвело до різких коливань цін на нафту, природний газ і електроенергію. Це, у свою чергу, зумовило посилення інфляційного тиску та зростання тарифів на енергетичні ресурси в Україні. У відповідь на виклики енергетичної безпеки активізувалися процеси диверсифікації енергопостачання, зокрема через стимулювання розвитку відновлюваних джерел енергії як альтернативи традиційним паливно-енергетичним ресурсам.

Аналізуючи положення Енергетичної стратегії України до 2030 року та напрямки її оновлення [17, 20], можна зробити висновок, що серед можливих підходів до забезпечення регіонів паливно-енергетичними ресурсами, а саме: скорочення енергоспоживання та розвиток екологічно чистих, зокрема місцевих і відновлюваних джерел енергії, або подальша централізація енергетики шляхом розширення атомної та теплової генерації – держава

обрала переважно другий варіант. Це означає збереження і навіть потенційне збільшення ролі теплових електростанцій, що актуалізує питання постійного моніторингу стану атмосферного повітря у зонах їх впливу (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Прогнозований на 2015-2030 рр. обсяг споживання палив й енергії в Україні, млн т у. п./рік (згідно з базовим сценарієм Енергетична стратегія України)

Стійка енергетична безпека можлива лише за умови впровадження багатовекторної енергосистеми, що базується на пріоритеті регіонального енергопостачання та енергоощадності.

У табл. 1.1 подано порівняльну характеристику енергетичного балансу України із відповідними показниками світового енергобалансу, а також країн Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) та Європейського Союзу.

Таблиця 1.1 – Основні показники енергетичних балансів світу, ОЕСР, ЄС та України в 2015 р. [38]

| Загальне постачання первинних енергоресурсів | Світ         |       | ОЕСР         |       | ЄС           |       | Україна      |       |
|----------------------------------------------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
|                                              | тис. т н. е. | %     | тис. т н. е. | %     | тис. т н. е. | %     | тис. т н. е. | %     |
| Вугілля                                      | 3918491      | 28,6% | 1012463      | 19,2% | 268433       | 17,2% | 35576        | 33,7% |
| Нафта                                        | 4349857      | 31,8% | 2061714      | 39,1% | 591918       | 37,8% | 3043         | 2,9%  |
| Нафтопродукти*                               | -64557       | -0,5% | -180603      | -3,4% | -82930       | -5,3% | 7645         | 7,2%  |
| Газ                                          | 2900579      | 21,2% | 1343845      | 25,5% | 342846       | 21,9% | 33412        | 31,6% |
| Ядерна енергія                               | 661353       | 4,8%  | 516273       | 9,8%  | 228456       | 14,6% | 23191        | 21,9% |
| Гідроенергія                                 | 334945       | 2,4%  | 120471       | 2,3%  | 32248        | 2,1%  | 729          | 0,7%  |
| Геотермальна, сонячна та ін.                 | 181072       | 1,3%  | 98024        | 1,9%  | 40069        | 2,6%  | 134          | 0,1%  |
| Біопаливо і відходи                          | 1412908      | 10,3% | 299787       | 5,7%  | 141641       | 9,1%  | 1934         | 1,8%  |
| Електроенергія*                              | 2383         | 0,0%  | 395          | 0,0%  | 1333         | 0,1%  | -725         | -0,7% |
| Теплова енергія                              | 2096         | 0,0%  | 899          | 0,0%  | 962          | 0,1%  | 745          | 0,7%  |
| РАЗОМ                                        | 13699127     | 100%  | 5273268      | 100%  | 1564975      | 100%  | 105684       | 100%  |

\* Від'ємні значення означають, що експорт перевищує суму імпорту і внутрішнього виробництва. Джерело: підготовлено авторами за даними Міжнародного енергетичного агентства.

Аналіз демонструє, що частка вугілля в енергобалансі України суттєво перевищує середньосвітовий рівень і показники розвинених країн. Водночас споживання нафти та нафтопродуктів в Україні є значно нижчим порівняно зі світовими та, особливо, з показниками країн ОЕСР. Це зумовлено тим, що нафтопродукти в Україні майже не використовуються для виробництва електроенергії та тепла, а зосереджені переважно у транспортному секторі, де їх споживання також поступається середнім рівням ОЕСР.

Серед основних джерел пікових генеруючих потужностей в Україні переважають теплові електричні станції, теплоелектроцентралі, гідроелектростанції та гідроакумуючі електростанції. Аналіз отриманих даних (рис. 1.2) свідчить про домінування теплових електростанцій у структурі пікового енергозабезпечення.

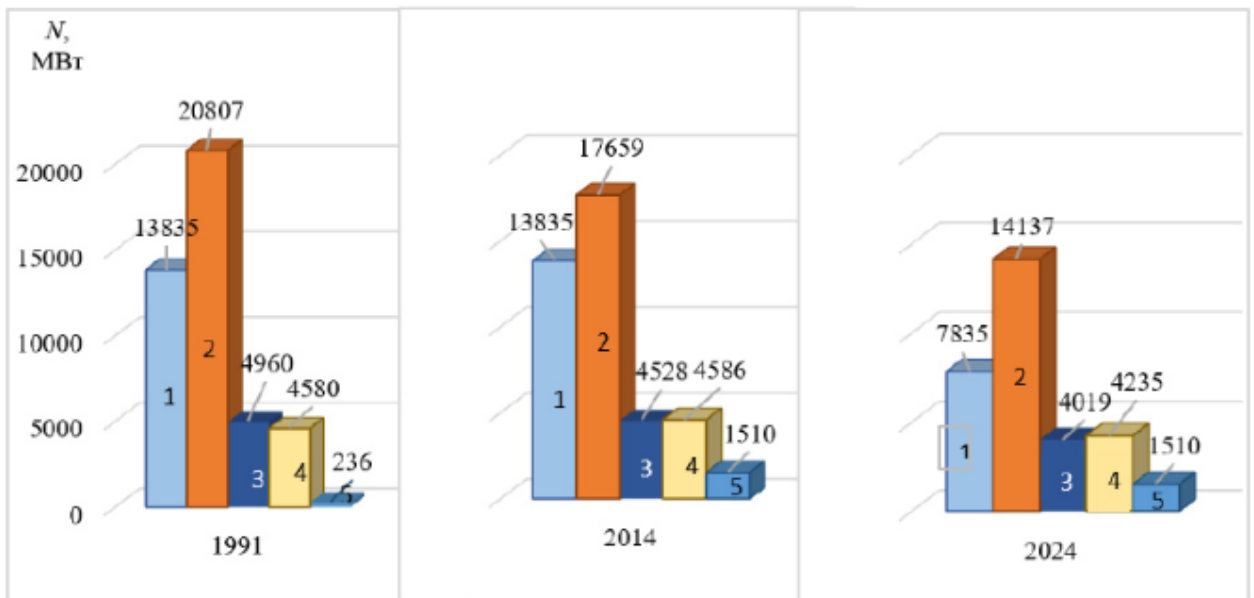


Рисунок 1.2 – Динаміка встановленої потужності атомних (1), теплових (2), теплоелектроцентралей (3), гідроелектростанцій (4) та гідроакумуючих (5) станцій в Україні у 1991, 2014 та 2024 роках (за даними Міненерго) [28]

Переваги теплової генерації у покритті пікових навантажень зумовлені порівняно незначним часом запуску, високою гнучкістю регулювання навантаження, а також можливістю централізованого оперативного управління. Водночас використання ТЕС та ТЕЦ супроводжується низкою техніко-екологічних обмежень, серед яких підвищені питомі витрати палива, значні обсяги викидів CO<sub>2</sub>, а також залежність від імпортованих енергоносіїв, зокрема природного газу [26].

Глобальне виробництво електроенергії зростає експоненціально. Збільшившись на 50% між 2010 і 2022 роками, очікується, що воно зросте на 100%, тобто вдвічі перевищить початковий показник, між 2022 і 2040

роками. Далі прогнозується ще зростання близько 25% між 2040 і 2050 роками. Така «глобальна електрифікація» зумовлена розвитком електромобілів, електричного опалення, побутових та електронних пристроїв, автоматизацією заводів і, звичайно ж, зростанням населення світу.

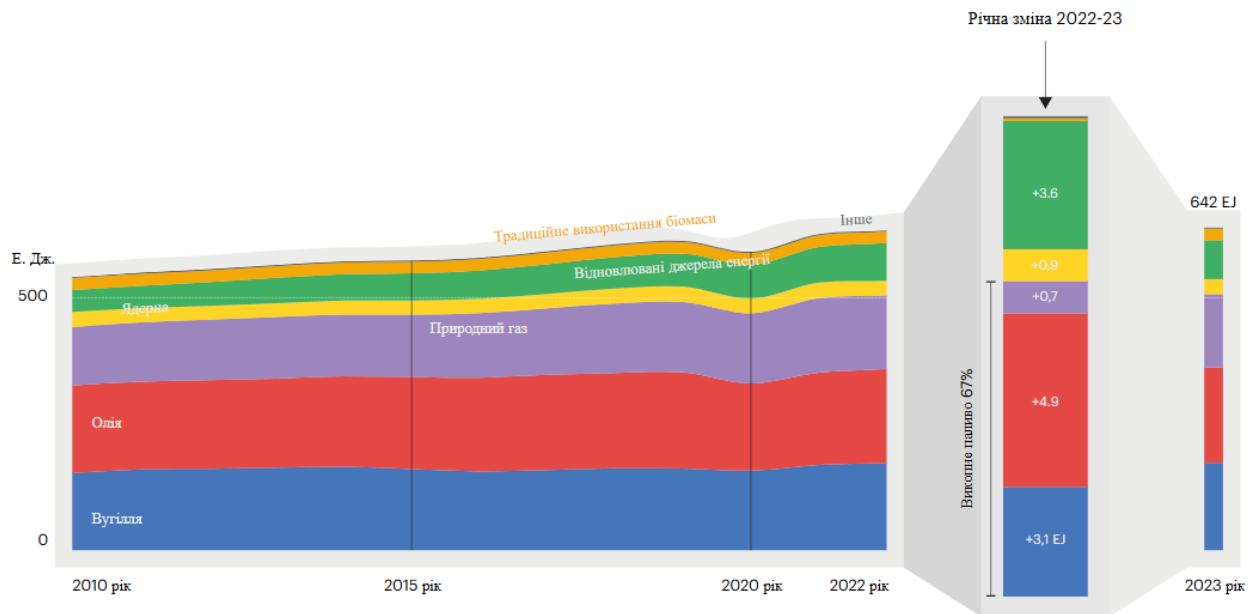


Рисунок 1.3 – Глобальний попит на енергію

Це вражаюче зростання відбуватиметься пліч-о-пліч зі стрімким переходом у джерелах виробництва – від викопного палива до відновлюваних джерел енергії, зокрема вітру та сонця. Сценарій запропонований Міжнародним енергетичним агентством передбачає, що сектор електроенергії має досягти «чистих нульових викидів» до 2050 року.

Таблиця 1.2 – Частка джерел енергії у світовому виробництві електроенергії (сценарій Міжнародного енергетичного агентства) [1, 17]

| Джерела енергії | 2022 рік | 2050 рік |
|-----------------|----------|----------|
| Вугілля         | 36 %     | 1 – 5 %  |
| Природний газ   | 22 %     | 0 %      |
| Олія (паливо)   | 2 %      | 0 %      |
| Ядерна          | 9 %      | 8 %      |
| Гідро           | 15 %     | 11 %     |
| Вітер           | 7 %      | 31 %     |
| Фотоелектричні  | 4 %      | 41 %     |

За сценаріями переходу до чистої енергетики, зокрема в сценарії «чистих нульових викидів», частка викопного палива в виробництві електроенергії має значно знизитися: з ~ 60 % у 2023 році до дуже низьких

рівнів (в деяких прогнозах – до 1–5 %) у 2050 році, газ – приблизно на 55 %, нафта – на ~ 75 % у порівнянні з 2020 роком. Водночас частка відновлюваних джерел енергії (сонця, вітру, гідро, біоенергетики, геотермальної та морської енергії) прогнозується в діапазоні 73 % – 88 % у 2050 році – у деяких варіантах – «майже 90 %» електроенергії буде вироблятися з відновлюваних джерел» (зокрема 70 % з вітру та сонця).

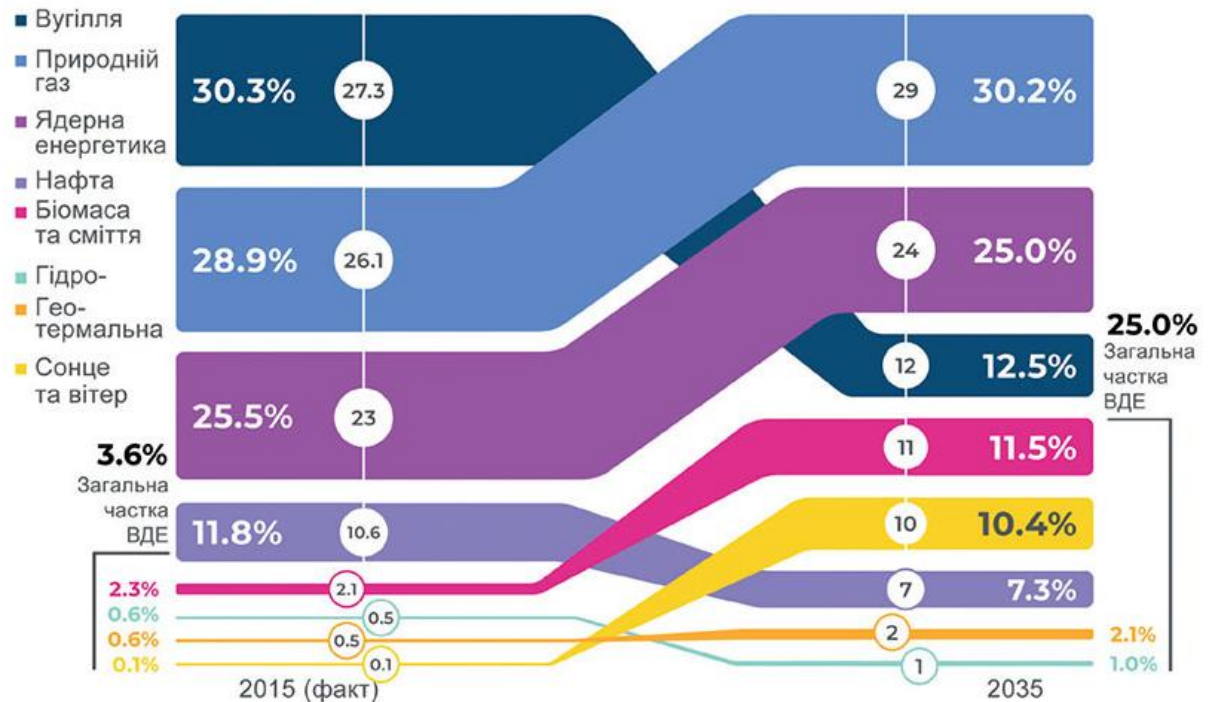


Рисунок 1.4 – Динаміка змін у структурі первинного енергопостачання України відповідно до положень Енергетичної стратегії до 2035 року, млрд т у.п. (%), за період 2015–2035рр. Джерело: Аналітичне дослідження «Енергетична галузь в Україні в інфографіці», ТОП ЛІД, 2018 [29]

У 2023 році у світі було введено в експлуатацію рекордні обсяги потужностей з виробництва чистої енергії, проте приблизно дві третини зростання загального попиту на енергію все ще покривалося за рахунок викопного палива.

За даними аналітичних оглядів, незважаючи на швидке зростання відновлюваних джерел, у 2024 р. вугілля забезпечувало близько третини світового виробництва електроенергії, а сумарна частка викопних джерел у загальному енергоміксі залишалася істотною. Це зумовлює збереження значного тиску на атмосферу та екосистеми в коротко- й середньостроковій перспективі.

Енергетична стратегія України визначає амбітний курс трансформації національного енергетичного сектору з метою забезпечення енергетичної незалежності, підвищення екологічної безпеки та сталості.

## 1.2 Емісійні джерела теплової генерації та їх екологічні наслідки

Сучасна теплоенергетика (електро- і теплогенерація на базі викопного палива) лишається фундаментальною складовою енергетичної інфраструктури. Технологічний цикл ґрунтується на трансформації первинних енергоресурсів – органічного палива (вугілля, природний газ, мазут), води та атмосферного повітря – у корисну енергію [2, 23]. Водночас, інтенсивне використання цих ресурсів та сам процес термодинамічного перетворення неминуче супроводжується генеруванням значних обсягів матеріальних та енергетичних відходів, які формують як локальні, так і регіональні екологічні ризики [24]. За оцінками Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP, 2023), енергетичний сектор формує 42,3% глобальних антропогенних викидів парникових газів, причому на частку теплових електростанцій припадає понад 65% від цього показника [2].

Кількісний аналіз валових викидів демонструє критичні обсяги забруднення. Наприклад, вугільною електростанцією потужністю лише 100 МВт щорічно в атмосферу викидається близько 5 тис. тонн діоксиду сірки та 10 тис. тонн оксидів азоту. Така диспропорція, за якої викиди  $\text{NO}_x$  удвічі перевищують  $\text{SO}_2$ , підкреслює необхідність приділяти рівнозначну увагу технологіям деазотування поряд із системами сіркоочищення.

Окрім газових викидів, значної уваги потребують тверді відходи виробництва. Під час роботи тієї ж 100-мегаватної установки утворюється близько 400 тис. тонн золи, що накопичується на поверхні ґрунтового покриву в зоні її діяльності. Вкрай небезпечним є той факт, що ця зола містить значний обсяг важких металів – миш'яку (As), свинцю (Pb), кадмію (Cd) та ванадію (V), – загальна маса яких може сягати 80 тонн на рік. Накопичення цих відходів та їх потенційне вивітрювання створюють джерело вторинного забруднення ґрунту, поверхневих і ґрунтових вод, а також аерозольного забруднення атмосфери, що суттєво посилює загальний екологічний слід [16, 34, 36, 38, 42, 44].

Екологічний вплив ТЕС детермінується структурою та кількістю продуктованих відходів, які доцільно класифікувати за способом їх надходження в довкілля:

- 1) організовані (стаціонарні) викиди, які надходять у навколишнє середовище через спеціально обладнані канали – димовими трубами, пульпопроводами, відвідними каналами, системами охолодження тощо. Їхній обсяг і концентрація прямо корелюють із технологічним режимом роботи ТЕС (навантаження, якість палива, ефективність систем очищення) [4]. До цієї категорії належать, зокрема, викиди оксидів сірки, оксидів азоту, твердих

частинок, а також скиди теплої води та хімічно змінених стічних вод;

2) неорганізовані (дифузні) відходи – це емісії та розсіювання забруднюючих речовин, які не мають чітко визначених джерел викиду і значною мірою залежать від метеорологічних та кліматичних умов (швидкість вітру, кількість опадів, температура повітря), а також від сезонних коливань, аніж від операційних режимів обладнання, зокрема пилове забруднення від золошлаковідвалів, випаровування з поверхонь сховищ палива та відходів, а також вторинне забруднення, спричинене вітровою ерозією та інфільтрацією забруднюючих речовин у едафотоп та ґрунтові води [36].

На рис. 1.5 відображено схему екологічної взаємодії теплової електростанції з компонентами довкілля, а також подано структуру матеріальних і фізичних відходів, що спричиняють забруднення атмосферного повітря, поверхневих та підземних вод, а також ґрунтового покриву.

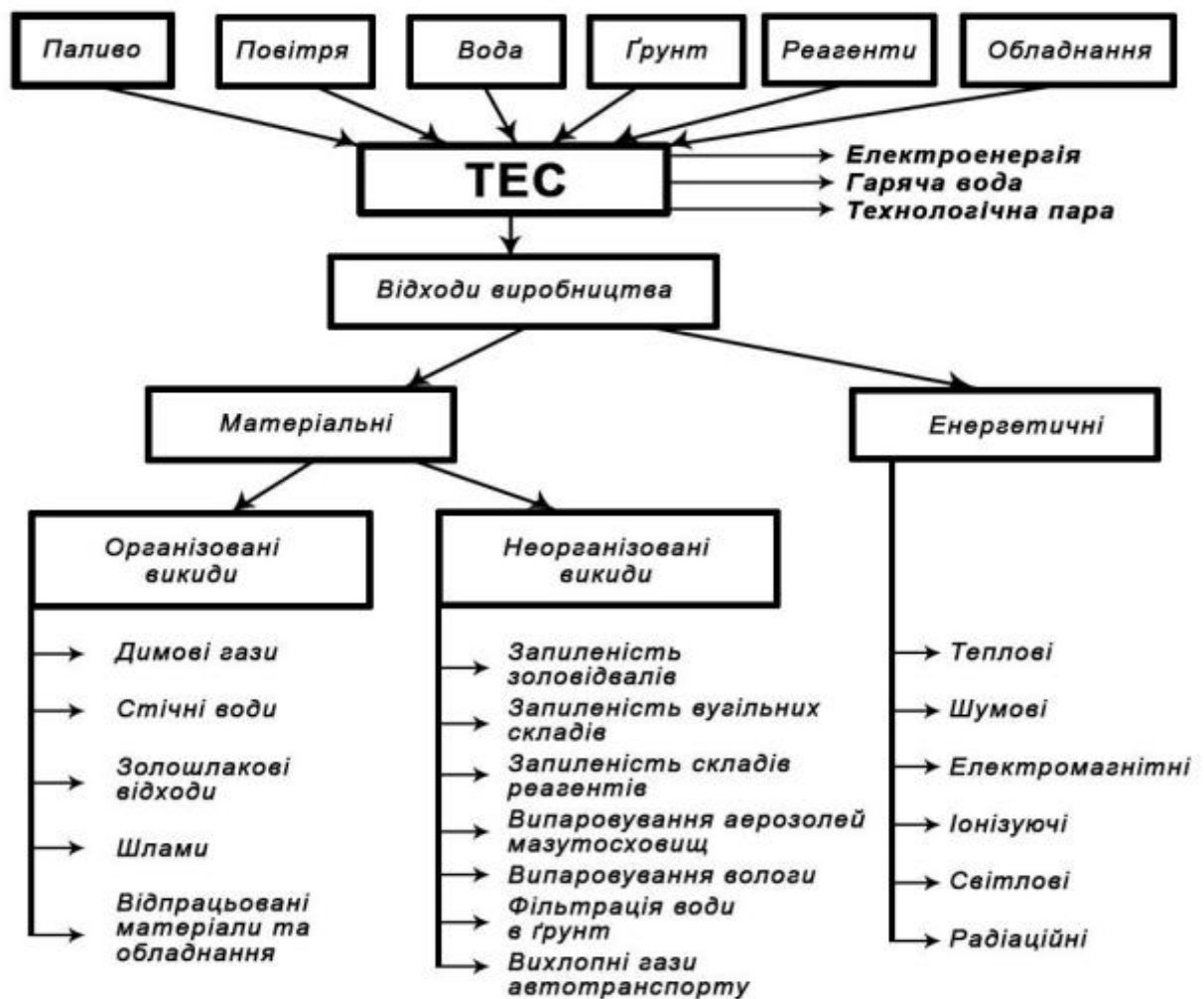


Рисунок 1.5 – Схематичне представлення взаємозв'язку між ресурсоспоживанням і утворенням відходів ТЕС у контексті їхнього впливу на природне середовище

Функціонування теплоенергетичних об'єктів створює комплексний екологічний ризик, оскільки забруднюючі речовини та фізичні впливи поширюються на всі основні компоненти біосфери [17]. Найбільш відчутним є вплив на атмосферне повітря, головним вектором якого є емісія парникових газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) та аерозолів-забруднювачів ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ). Ці сполуки спричиняють утворення кислотних дощів, смогових явищ і погіршення якості повітря, що має безпосередній негативний вплив на громадське здоров'я [8, 9]. Дані моніторингу програми *Copernicus* підтверджують регіональне та транскордонне перенесення цих забруднювачів.

Вплив на гідросферу реалізується через термальне забруднення водою внаслідок скидання охолоджувальної води, а також через хімічне забруднення стічними водами та фільтратом із золошлакових відвалів, які містять важкі метали, радіонукліди та солі, порушуючи гідрохімічний режим водних екосистем [10].

Значні площі відводяться під золошлаковідвали, які є джерелом техногенного ландшафтного порушення та вторинного забруднення ґрунтів важкими металами та токсичними елементами. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН наголошує на зростанні ризиків для продовольчої безпеки, пов'язаних із деградацією та забрудненням ґрунтів [11].

Важливим аспектом, який потребує наукового осмислення, є радіоактивне забруднення від спалювання вугілля. Дослідження Міжнародного агентства з атомної енергії підтверджують, що вугільні пласти містять природні радіонукліди уранорадієвого та торієвого рядів [3]. Під час термічної переробки відбувається їхня концентрація в летючій золі, що призводить до формування додаткового радіаційного навантаження. За оцінками **UNECE**, рівні радіоактивного забруднення в зонах впливу вугільних ТЕС можуть перевищувати аналогічні показники для атомних електростанцій у режимі нормальної експлуатації [24].

Актуальність моніторингу підкреслюється також тим, що саме на енергетичний сектор припадає лівова частка емісій парникових газів, передусім діоксиду вуглецю, що є ключовим фактором зміни клімату [8].

Таким чином, особлива увага в контексті екологічної безпеки приділяється компонентам, що мають виражену токсичність та біологічний ефект. Згідно з рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я [26], вплив дрібнодисперсних частинок ( $\text{PM}_{2.5}$ ) та  $\text{NO}_2$  є однією з найбільших екологічних загроз, асоціюючись із підвищеною смертністю від кардіоваскулярних та респіраторних захворювань. При спалюванні палива, особливо вугілля, в атмосферу надходять важкі метали (ртуть, кадмій, арсен)

та високотоксичні органічні сполуки, зокрема поліциклічні ароматичні вуглеводні. Серед останніх індикаторним показником є **бенз/а/пірен**, який Міжнародне агентство з вивчення раку класифікує як безумовний канцероген для людини [29, 46]. Наявність цих сполук у викидах ТЕС формує підвищений онкологічний ризик для населення, що проживає в зоні їхнього впливу.

Таким чином, комплексна наукова оцінка стану атмосферного повітря навколо ТЕС вимагає застосування інтегрованих систем моніторингу, що поєднують як контроль емісії на джерелі, так і дистанційні методи спостереження (Copernicus Sentinel). Це є необхідною передумовою для обґрунтування ефективних природоохоронних заходів, спрямованих на досягнення європейських екологічних стандартів та мінімізацію екологічних і соціальних ризиків.

### **1.3 Нормативні вимоги щодо моніторингу якості атмосферного повітря для стаціонарних джерел забруднення в зоні ТЕС**

Ключовим імперативом для України є євроінтеграційний вектор. З моменту набуття членства в Енергетичному Співтоваристві у 2011 році країна взяла на себе зобов'язання гармонізувати національне екологічне законодавство з Директивами Європейського Союзу, зокрема Директивою 2010/75/EU про промислові викиди. На національному рівні це знайшло відображення у затвердженні Національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок (НПСВ) Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 796-р у 2017 році, який набув чинності у 2021 році [1].

Проте, незважаючи на наявність регуляторної бази, спостерігається критичне технологічне відставання. Аналіз показує, що установки очищення димових газів від оксидів сірки на більшості ТЕС взагалі відсутні, що є прямим порушенням вимог Директиви 2001/80/ЄС, яка передувала 2010/75/EU. Це технологічне відставання призвело до того, що фактичні рівні викидів SO<sub>2</sub> на українських ТЕС перевищують гранично допустимі значення, встановлені наказом Мінприроди № 62 від 16.02.2018, (200 мг/нм<sup>3</sup> для існуючих енергоблоків, а для нових установок – 150 мг/нм<sup>3</sup>), у 6–18 разів. Такий високий рівень забруднення потребує не просто часткової модернізації, а радикального впровадження найкращих доступних технологій [1, 4, 46].

Сучасне моделювання демонструє, що виконання НПСВ, яке вимагає інвестицій у розмірі EUR 4,1–4,3 млрд до кінця 2033 року, є економічно менш доцільним, ніж стратегія повного заміщення вугільної генерації. При

цьому найбільші обсяги вкладень (EUR 544 млн та EUR 636 млн) необхідні саме у критичні 2024–2025 роки. Це створює так званий "легальний глухий кут": з одного боку, існує юридична вимога модернізації, а з іншого – ця модернізація є кліматично недостатньою (залишаючи високі викиди CO<sub>2</sub>) і фінансово надмірно витратною, особливо в умовах воєнних ризиків та невизначеності джерел фінансування. Відповідно, необхідний терміновий перегляд НПСВ із акцентом на стратегічну декомісію як більш економічно та екологічно виправданий захід.

Одним із ключових елементів інтеграції України в європейську екологічну систему є створення прозорого механізму звітності про викиди. Це завдання вирішується шляхом впровадження Національного реєстру викидів та перенесення забруднювачів (РВПЗ/PRTR), що базується на принципах Орхуської конвенції та Протоколу про РВПЗ, ратифікованого у 2016 році.

Закон про РВПЗ був прийнятий у 2022 році, а Порядок його ведення затверджений Урядом у 2023 році. Цей Реєстр передбачає створення єдиної уніфікованої електронної системи доступу до інформації про викиди великих операторів, зокрема ТЕС. Його дія поширюється на підприємства, що провадять діяльність, визначену Додатком 1 до Закону, і перевищують порогові обсяги викидів забруднюючих речовин [11, 12, 13].

Запровадження РВПЗ створює основу для підвищення відповідальності операторів та незалежної верифікації даних. Прозорість даних, зокрема щодо SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та пилу, дозволяє громадським організаціям та аналітикам незалежно оцінювати заявлені підприємствами показники скорочення викидів. Планується інтеграція національного РВПЗ до Європейського Реєстру PRTR, що забезпечить міжнародну порівнянність даних. Це є критично важливим для залучення міжнародних фінансових інституцій, оскільки високий рівень прозорості та об'єктивності моніторингу є необхідною умовою для інвестицій у екологічні проекти.

Сучасна система моніторингу якості атмосферного повітря для стаціонарних джерел забруднення, зокрема теплових електростанцій (ТЕС), регулюється низкою європейських директив. Директива про промислові викиди (IED 2010/75/EU) встановлює обов'язковий безперервний моніторинг викидів SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та пилу для ТЕС потужністю понад 50 МВт [11]. Граничні значення викидів складають: для SO<sub>2</sub> – 200 мг/м<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> – 150 мг/м<sup>3</sup>, пилу – 20 мг/м<sup>3</sup>, із щоквартальною звітністю. Додатково, Директива про національні рівні викидів (NECD 2016/2284/EU) визначає національні цілі зменшення викидів до 2030 року: SO<sub>2</sub> на 59%, NO<sub>x</sub> на 42% та PM<sub>2.5</sub> на 49% від рівня 2005 року [12].

Ключовим фактором, що визначає захищеність атмосфери, є ефективність та обов'язковість виконання норм Національного плану

скорочення викидів (НПСВ), схваленого у 2017 році. Цей план є програмним документом, спрямованим на поступову модернізацію великих спалювальних установок та забезпечення відповідності Директиві 2010/75/ЄС [1, 12, 14].

Проте, незважаючи на законодавчо закріплені зобов'язання, існує значний ризик, що Україна значно відстане від виконання НПСВ, особливо у частині досягнення граничних обсягів викидів до 2033 року. В країні розпочалась дискусія щодо можливого перегляду плану, включно з пом'якшенням вимог та продовженням термінів, які вже були пролонговані.

Особливе значення має вплив військового стану. Руйнівні наслідки військових дій на енергетичну інфраструктуру потребують перегляду певних умов НПСВ, а саме для стратегічної оптимізації інвестиційних проєктів. Рекомендується синхронізувати часові рамки встановлення сіркоочисного обладнання з процесами установки азотоочисних установок. Така синхронізація дозволить мінімізувати загальний час виведення енергоблоку з експлуатації на реконструкцію, підвищуючи загальну ефективність витрат та прискорюючи досягнення цільових показників ВАТ. Таким чином, замість пом'якшення вимог, нові реалії мають бути каталізатором для більш раціонального та швидкого планування модернізації тих блоків, які залишаються в роботі.

Будь-яка стратегія енергетичної модернізації повинна проходити процедуру Стратегічної екологічної оцінки (відповідно до законодавства України) та є інструментом, який гарантує, що екологічні вимоги та питання безпеки життєдіяльності та охорони здоров'я населення інтегровані в документи державного планування ще на стадії розробки.

Сучасна система моніторингу якості атмосферного повітря для ТЕС ґрунтується на комплексному підході, що поєднує європейські директиви з жорсткими вимогами до точності вимірювань та національне законодавство. Сучасні технології дозволяють забезпечити високий рівень контролю, однак українське законодавство потребує подальшої гармонізації з вимогами ЄС.

## 2 ОБ'ЄКТ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Енергетичні та природно-кліматичні детермінанти формування якості атмосферного повітря в Україні

Стан атмосферного повітря в Україні залишається однією з найгостріших екологічних проблем, що безпосередньо впливає на здоров'я населення, стійкість екосистем та кліматичну безпеку держави. За даними Державної екологічної інспекції України, близько 30–35 % усіх викидів забруднюючих речовин в атмосферу припадає на енергетичний сектор, зокрема на теплові електростанції. Домінуючими поллютантами є оксиди сірки ( $\text{SO}_2$ ), азоту ( $\text{NO}_x$ ), вуглецю ( $\text{CO}$ ), тверді частинки ( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ) та важкі метали.

Результати Smith et al. у праці "*Global assessment of coal-fired power plant emissions*" на основі даних супутника Sentinel-5P свідчать, що, близько 43 % глобальних викидів  $\text{SO}_2$  пов'язані саме з роботою ТЕС [32]. Дані Copernicus Climate Change Service дають можливість відстежувати динаміку забруднення в режимі реального часу, зокрема максимальні концентрації  $\text{NO}_2$  над промисловими районами Азії досягають  $12,8 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ , що вчетверо перевищує безпечний рівень [36]. Водночас Wang et al., вказують, що ТЕС Китаю та Індії формують близько 65 % глобальних викидів ртуті від енергетичного сектору [41].

Об'єднана енергетична система (ОЕС) України є фундаментальною інфраструктурною основою національної економіки, що забезпечує реалізацію стратегічних завдань у сфері енергетичної безпеки, економічного розвитку та соціальної стабільності [18]. Її функціонування корелюється з цілями сталого розвитку ООН, зокрема Цілі 7 («Доступна та чиста енергія»), Цілі 9 («Промисловість, інновації та інфраструктура») та Цілі 13 («Боротьба зі зміною клімату») [2, Звіт ООН]. Централізована архітектура ОЕС дозволяє здійснювати регулювання міжрегіональних потоків електроенергії, забезпечувати енергопостачання бюджетного сектору та населення, а також підтримувати експортно-імпортні операції, що набуло особливого значення після синхронізації з європейською мережею ENTSO-E [43].

Проте з екологічної точки зору критичним фактором є стан генеруючих потужностей. В Об'єднаній енергетичній системі України функціонують 14 теплових електростанцій і 98 теплоелектроцентралей, більшість із яких збудовано у 1960–1980-х роках. Вони оснащені 99 конденсаційними енергоблоками потужністю 175–800 МВт із параметрами гострої пари

14–24 МПа, 540/540 °С. Понад половина блоків відпрацювала більш як 200 тис. годин, що свідчить про значний фізичний та моральний знос і потребу модернізації енергетичного обладнання.

Додаткову екологічну небезпеку створює застарілість систем очищення димових газів на більшості ТЕС (Бурштинська, Запорізька, Криворізька тощо), які не відповідають вимогам Директиви ЄС 2010/75/EU; унаслідок цього в зонах їхнього впливу фіксуються перевищення ГДК у 2–5 разів, особливо за пиловими частинками та діоксидом сірки [44, 47].

ОЕС інтегрує енергогенерувальні потужності та регіональні розподільчі мережі, які з'єднані між собою системоутворюючими повітряними лініями електропередачі напругою 220–750 кВ і електричними підстанціями. Згідно з актуальними даними, загальна довжина повітряних ліній 220–750 кВ становить приблизно 22,3 тис. км, а кількість магістральних електричних підстанцій – 133 одиниці [22]. Ці магістралі, включно з міждержавними лініями, що використовуються для експорту та імпорту, розподілені між вісьмома регіональними електроенергетичними системами.

Розподільча мережа ОЕС України, що забезпечує безпосередню доставку енергії кінцевому споживачеві, є надзвичайно розгалуженою, що включає приблизно 1 млн км повітряних та кабельних ліній електропередачі напругою від 0,4 до 150 кВ. Налічується приблизно 200 тис. трансформаторних підстанцій напругою 6–110 кВ, із сумарною встановленою потужністю трансформаторів, що перевищує 200 тис. МВА [15].

Оперативно-технологічне управління режимами роботи ОЕС, а також передачею електроенергії від генеруючих об'єктів до енергопостачальних компаній через магістральні електромережі, здійснюється на централізованому рівні державним підприємством Національна енергетична компанія «Укренерго». До її складу входять вісім регіональних електроенергетичних систем – Північна, Центральна, Дніпровська, Донбаська, Кримська, Південна, Південно-Західна та Західна, – кожна з яких відповідає за технічну експлуатацію, розвиток магістральних мереж та оперативно-диспетчерське управління у своїй зоні відповідальності.

На рис. 2.1 представлено картографічне відображення просторового розміщення основних енергогенерувальних підприємств України, включно з тепловими електростанціями, як один із ключових сегментів національної енергетичної системи.

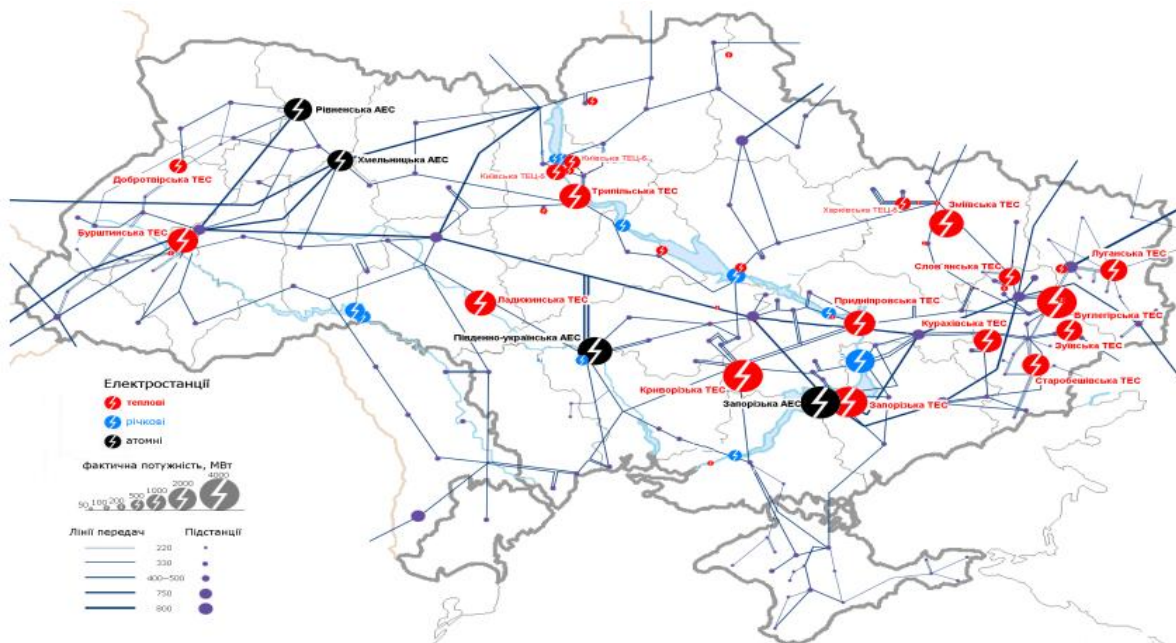


Рисунок 2.1 – Геопросторова локалізація провідних енергогенерувальних об'єктів України [28]

У табл. 2.1 наведено узагальнені показники якості палива, його споживання та обсяги викидів на вугільних ТЕС України за 2020 рік.

Таблиця 2.1 – Інформація про якість та витрати палива, результати розрахунків питомих і валових викидів сухих димових газів та діоксиду сірки на вугільних ТЕС України у 2020 році

| ТЕС                     | Марка палива | Тип ПШВ* | $q_4, \%$ | Для вугілля             |           |           |                              |                                   |                                   |                                    |                                   | Для мазуту              |           |                             |                                   | $E_{SO_2}^{мазут}, \text{ тис. т}$ | Для газу                 |                             | $V_{ДУГ}, \text{ млрд. м}^3$ | Загальний викид $E_{SO_2}, \text{ тис. т}$ |
|-------------------------|--------------|----------|-----------|-------------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|
|                         |              |          |           | $Q_i^r, \text{ МДж/кг}$ | $A^d, \%$ | $S^d, \%$ | $V_{вугілля}, \text{ млн т}$ | $V_{сух.}^{сух.}, \text{ МДж/кг}$ | $C_{SO_2}^{сух.}, \text{ мг/МДж}$ | $V_{ДУГ}^{вуг.}, \text{ млрд м}^3$ | $E_{SO_2}^{вуг.}, \text{ тис. т}$ | $Q_i^r, \text{ МДж/кг}$ | $S^r, \%$ | $V^{мазут}, \text{ тис. т}$ | $k_{SO_2}^{мазут}, \text{ г/ГДж}$ |                                    | $Q_i^r, \text{ МДж/м}^3$ | $B^{газ}, \text{ тис. м}^3$ |                              |                                            |
| 1                       | 2            | 3        | 4         | 5                       | 6         | 7         | 8                            | 9                                 | 10                                | 11                                 | 12                                | 13                      | 14        | 15                          | 16                                | 17                                 | 18                       | 19                          | 20                           | 21                                         |
| ПАТ «Донбасенерго»      |              |          |           |                         |           |           |                              |                                   |                                   |                                    |                                   |                         |           |                             |                                   |                                    |                          |                             |                              |                                            |
| Старобешівська          | А, П         | РШВ      | 3,7       | 23,3                    | 24,2      | 1,8       | 2,5                          | 8,3                               | 3983                              | 20,2                               | 80,5                              | —                       | —         | 0                           | —                                 | 0                                  | 33,3                     | 4,5                         | 20,3                         | 80,5                                       |
| Слов'янська             | А            | РШВ      | 2,7       | 23,3                    | 23,5      | 1,7       | 1,6                          | 8,4                               | 3731                              | 13,0                               | 48,6                              | —                       | —         | 0                           | —                                 | 0                                  | 34,4                     | 11,6                        | 13,2                         | 48,3                                       |
| ПАТ «Центренерго»       |              |          |           |                         |           |           |                              |                                   |                                   |                                    |                                   |                         |           |                             |                                   |                                    |                          |                             |                              |                                            |
| Вуглегірська            | Г, ДГ        | РШВ      | 0,2       | 22,4                    | 23,7      | 3,2       | 2,5                          | 8,0                               | 7143                              | 20,1                               | 143,4                             | 38,6                    | 2,1       | 1,4                         | 1033                              | 0,05                               | 33,8                     | 15,6                        | 20,3                         | 143,5                                      |
| Трипільська             | А, П         | РШВ      | 6,2       | 21,9                    | 25,9      | 1,5       | 1,4                          | 7,6                               | 3358                              | 10,9                               | 36,5                              | 40,0                    | 2,3       | 26,5                        | 1297                              | 1,13                               | 34,3                     | 0,9                         | 11,2                         | 37,6                                       |
| Зміївська               | А, П         | РШВ      | 7,5       | 23,2                    | 22,4      | 1,9       | 1,1                          | 7,9                               | 4187                              | 8,6                                | 36,0                              | 33,2                    | 2,2       | 14,4                        | 1260                              | 0,61                               | 34,1                     | 1,5                         | 8,8                          | 36,6                                       |
| ПАТ «ДТЕК Дніпроенерго» |              |          |           |                         |           |           |                              |                                   |                                   |                                    |                                   |                         |           |                             |                                   |                                    |                          |                             |                              |                                            |
| Криворізька             | П            | РШВ      | 5,7       | 24,0                    | 23,6      | 2,8       | 2,3                          | 8,3                               | 6214                              | 19,3                               | 119,7                             | 39,9                    | 2,5       | 1,4                         | 1187                              | 0,07                               | 34,4                     | 27,9                        | 19,6                         | 119,8                                      |
| Придніпровська          | А, П         | РШВ      | 7,4       | 23,5                    | 22,3      | 2,0       | 1,4                          | 8,0                               | 4337                              | 10,8                               | 47,0                              | 36,9                    | 2,0       | 0,9                         | 1008                              | 0,03                               | 34,1                     | 30,8                        | 11,2                         | 47,0                                       |
| Запорізька              | Г, ДГ        | РШВ      | 0,4       | 21,0                    | 26,5      | 1,6       | 2,4                          | 7,5                               | 3722                              | 17,7                               | 65,8                              | —                       | —         | 0                           | —                                 | 0                                  | 37,5                     | 19,0                        | 17,9                         | 65,8                                       |
| ПАТ «ДТЕК Західенерго»  |              |          |           |                         |           |           |                              |                                   |                                   |                                    |                                   |                         |           |                             |                                   |                                    |                          |                             |                              |                                            |
| Буриштинська            | Г, ДГ        | РШВ      | 1,3       | 20,7                    | 25,6      | 1,8       | 4,2                          | 7,3                               | 4011                              | 31,0                               | 124,1                             | —                       | —         | 0                           | —                                 | 0                                  | 33,6                     | 57,0                        | 31,6                         | 124,2                                      |
| Доброутвірська          | Г, ДГ        | ТШВ      | 1,5       | 21,0                    | 27,8      | 1,9       | 1,2                          | 7,4                               | 4265                              | 8,6                                | 36,71                             | —                       | —         | 0                           | —                                 | 0                                  | 34,4                     | 4,3                         | 8,7                          | 36,7                                       |

|                               |                           |     |     |      |      |     |      |     |      |       |       |      |     |      |      |      |       |       |       |      |
|-------------------------------|---------------------------|-----|-----|------|------|-----|------|-----|------|-------|-------|------|-----|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| Ладжи-<br>нська               | Г, ДГ                     | РШВ | 0,4 | 20,9 | 24,4 | 1,5 | 2,2  | 7,4 | 3296 | 16,2  | 53,49 | —    | —   | 0    | —    | 0    | 33,1  | 19,3  | 16,5  | 53,5 |
| <b>ПАТ «ДТЕК Західенерго»</b> |                           |     |     |      |      |     |      |     |      |       |       |      |     |      |      |      |       |       |       |      |
| Зуївська                      | Г, ДГ                     | РШВ | 0,3 | 19,9 | 27,1 | 1,6 | 1,8  | 7,1 | 3680 | 12,6  | 37,6  | 37,6 | 1,8 | 1,9  | 930  | 0,07 | —     | —     | —     | 46,3 |
| Курахів-<br>ська              | пром.<br>продукт<br>Г, ДГ | ТШВ | 2,2 | 17,4 | 37,8 | 1,4 | 2,9  | 6,  | 3708 | 17,6  | 38,0  | 38,0 | 2,4 | 22,6 | 1119 | 0,96 | 34,5  | 9,0   | 17,9  | 66,1 |
| Луган-<br>ська                | А, П                      | РШВ | 5,7 | 23,5 | 21,6 | 2,0 | 1,9  | 8,2 | 4220 | 15,5  | 34,4  | 34,4 | 1,3 | 2,0  | 723  | 0,05 | 40,8  | 14,6  | 15,7  | 65,5 |
| <b>Всього</b>                 |                           |     |     |      |      | 1,9 | 29,2 |     |      | 222,0 | 968,7 |      |     | 71,1 |      | 2,97 | 216,2 | 225,3 | 976,6 |      |

\*РШВ — рідке шлаковидалення, ТШВ — тверде шлаковидалення.

Аналіз даних за 2019 рік виявив, що 40% об'єктів теплової генерації (8 із 20) не відповідали чинним екологічним нормативам, демонструючи значний рівень понаднормових викидів (табл. 2.2 та 2.3) [39].

Таблиця 2.2 – Рейтинг ключових теплогенеруючих об'єктів України за сумарним рівнем викидів пріоритетних забруднюючих речовин у 2019 році, тонн

| Назва станції      | Забруднювач, т/рік |                 |                 |
|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
|                    | SO <sub>2</sub>    | NO <sub>x</sub> | PM (TSP)        |
| Бурштинська ТЕС    | 190,371            | 16,757          | 47,495          |
| Курахівська ТЕС    | 96,160             | 12,449          | 39,113          |
| Запорізька ТЕС     | 68,825             | 21,830          | 4,193           |
| Вуглегірська ТЕС   | 62,229             | 7,768           | 6,961           |
| Слов'янська ТЕС    | 44,805             | 7,611           | 6,741           |
| Ладжинська ТЕС     | 39,905             | 5,409           | 4,903           |
| Зміївська ТЕС      | 37,659             | 3,575           | 15,389          |
| Придніпровська ТЕС | 32,617             | 6,481           | 3,696           |
| Трипільська ТЕС    | 32,483             | 5,422           | 17,758          |
| Добротвірська ТЕС  | 23,701             | 3,665           | 3,742           |
| Луганська ТЕС      | 21,702             | 5,985           | 16,764          |
| Криворізька ТЕС    | 20,840             | 5,572           | 4,342           |
| Калуська ТЕЦ       | 10,599             | 3,612           | 2,354           |
| Чернігівська ТЕЦ   | 5,782              | 1,305           | 1,869           |
| Дарницька ТЕС      | 4,572              | 2,131           | 2,665           |
| Черкаська ТЕЦ      | 4,488              | 7,804           | 3,626           |
| Харківська ТЕЦ-2   | 3,241              | 1,258           | 2,817           |
| Миронівська ТЕЦ    | 2,753              | 454             | 219             |
| Краматорська ТЕЦ   | 1,966              | 685             | 1,891           |
| Сумська ТЕЦ        | 598                | 345             | 829             |
| <b>РАЗОМ</b>       | <b>1257,893</b>    | <b>2207,447</b> | <b>1229,416</b> |

Таблиця 2.3 – Перелік вугільних теплових електростанцій України, які зафіксували понаднормові обсяги емісії забруднюючих речовин у 2019 році, тонн

| Назва станції      | Забруднювач, т/рік |                 |          |
|--------------------|--------------------|-----------------|----------|
|                    | SO <sub>2</sub>    | NO <sub>x</sub> | PM (TSP) |
| Бурштинська ТЕС    | 131,564            | 10,804          | 41,452   |
| Вуглегірська ТЕС   | 62,099             | 0               | 562      |
| Курахівська ТЕС    | 47,992             | 8,028           | 20,244   |
| Слов'янська ТЕС    | 12,967             | 2,792           | 6,471    |
| Калуська ТЕЦ       | 9,337              | 344             | 2,101    |
| Придніпровська ТЕС | 8,022              | 0               | 0        |
| Добротвірська ТЕС  | 4,264              | 1,110           | 552      |
| Харківська ТЕЦ-2   | 3,241              | 1,258           | 2,817    |
| РАЗОМ              | 279,49             | 367,99          | 1187,09  |

Глобальні енергетично зумовлені викиди CO<sub>2</sub> залишаються у діапазоні ~37–38 GtCO<sub>2</sub>/рік, за даними ІЕА (2023-2024 рр.), причому сектор електро- та теплопродукції формує понад 25 % загальних викидів [39].

За даними UNEP (2024), глобальні сумарні парникові викиди людства досягли рекордних ~57,1 GtCO<sub>2</sub>e у 2023 році; у складі цього балансу секція «Power (electricity production)» складала приблизно 15,1 GtCO<sub>2</sub>e (~26% загальної суми). Такі оцінки підкреслюють, що скорочення викидів в енергетиці є центральною умовою для досягнення кліматичних цілей [43].

До повномасштабного вторгнення (період 2019–2021 рр.) супутниковий моніторинг, зокрема за допомогою приладу TROPOMI (Sentinel-5P), послідовно ідентифікував найбільші ТЕС України (Зміївську, Трипільську та Бурштинську) як ключові джерела забруднення, що формували відносно стійкі забруднені «плями» над значними територіями, що впливало на якість повітря в регіональному масштабі, переважаючи навіть зростаючі викиди від автомобільного транспорту [42].

Другою групою факторів, що визначають рівень забруднення, є природно-кліматичні умови. Під час вибору ТЕС як об'єкта дослідження необхідно враховувати кліматичні особливості регіону, оскільки вони детермінують процеси розсіювання, трансформації та осадження забруднюючих речовин.

Природно-кліматичні умови – включно з рельєфом, погодою, режимом вентилування атмосфери, температурно-вологісним режимом, пересуванням повітряних мас – визначають, як поширюються, затримуються або розсіюються забруднювачі, що виділяються. Наприклад, у районах із нижчими швидкостями

вітру або зі стійкою температурною інверсією, накопичення шкідливих компонентів в атмосфері може бути значним, що підсилює локальний екологічний та гігієнічний вплив. Кліматичні зміни модифікують умови перенесення й осадження домішок, а також швидкість їхніх фотохімічних перетворень (наприклад, утворення вторинних частинок за участю  $\text{NO}_x$  та  $\text{O}_3$ ).

За матеріалами *Ukrainian Hydrometeorological Journal* очікується подальше зростання середньорічної температури в Україні до 2050 р. (за регіональними оцінками) [36].

На підставі аналізу довготермінових метеорологічних рядів, проведеного Віктором Вишневським, встановлено, що від початку інструментальних спостережень наприкінці XIX ст. і до середини 2020-х років середня річна температура в Україні підвищилася більше ніж на 3 °C (за регіональними даними та синтезом спостережень), що відповідає помітній зміні кліматичних зон, спричиняючи збільшення частоти антициклонів та інверсій [3]. Для моніторингу ТЕС це означає необхідність поряд із сумарними місячними і річними показниками враховувати частотні та інтенсивні характеристики (кількість днів з опадами, інтенсивність максимальних 1–24-годинних випадків), адже вони визначають процеси змиву та адсорбції забруднювачів.

У своїй публікації Вишневський В. І. [3] відзначає, що зміни напрямків вітру є менш радикальними, ніж зменшення їхньої швидкості; одночасно спостерігається помітне зростання частоти північно-західних вітрів та зменшення частки південно-східних. Такі трансформації впливають на патерни перенесення емісій із конкретних джерел (зокрема ТЕС) і вимагають оновлення карт розсіювання та зон впливу з урахуванням сучасних статистичних розподілів напрямків. У поєднанні з підвищенням температури й зниженням середньої швидкості вітру частішають періоди слабкої турбулентності й температурних інверсій – умови, що суттєво підвищують концентрації забруднювальних речовин у приземному шарі. Для мереж моніторингу навколо ТЕС це означає необхідність коригування інтерпретації епізодів підвищених концентрацій та впровадження систем раннього попередження про інверсійні умови.

Таблиця 2.4 – Обсяги викидів забруднюючих речовин від Трипільської ТЕС у 2016 році

| Найменування забруднюючої речовини                                      | Обсяг викидів, т/рік | Частка викидів ТЕС у загальному обсязі викидів по області, % |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------|
| Загальний обсяг викидів                                                 | 74 713,338           | 71,0                                                         |
| Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (загальні РМ)         | 2 776,595            | 3,7                                                          |
| Суспендовані частинки діаметром >2,5 мкм та <10 мкм (PM <sub>10</sub> ) | 141,722              | 0,2                                                          |
| Суспендовані частинки діаметром ≤2,5 мкм (PM <sub>2.5</sub> )           | 27 622,784           | 36,9                                                         |
| Сполуки азоту (NO <sub>x</sub> )                                        | 7 512,926            | 10,1                                                         |
| Діоксиди та інші сполуки сірки (SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> )     | 38 996,559           | 52,2                                                         |
| Оксид вуглецю (CO)                                                      | 372,465              | 0,5                                                          |
| Інші забруднюючі речовини (важкі метали, леткі органічні сполуки тощо)  | ~290,287             | 3,1                                                          |

Як видно з табл. 2.4, у структурі викидів домінують діоксиди сірки (≈52 %) та дрібнодисперсні частинки PM<sub>2.5</sub> (≈37 %), що свідчить про значну участь ТЕС у формуванні кислотних опадів і вторинних аерозолів, які впливають на респіраторне здоров'я населення. Такий склад характерний для енергетичних підприємств, що працюють на кам'яному вугіллі, без установок десульфуризації та селективного каталітичного відновлення (IPCC, 2023; WHO, 2024). Те, що один об'єкт формує 71% викидів усіх стаціонарних джерел області, беззаперечно підтверджує критичну важливість саме цього джерела для екологічного стану регіону та обґрунтовує необхідність детальної оцінки його впливу. З огляду на масштаб і просторове охоплення викидів, зона потенційного впливу Трипільської ТЕС оцінюється в межах 30–50 км за переважаючими напрямками вітрів, що потребує постійного моніторингу концентрацій SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та PM<sub>2.5</sub> у приземному шарі атмосфери за допомогою автоматизованих постів спостереження (Copernicus AQ, 2025).

За результатами розрахунків, наведених у звіті Greenpeace і процитованих у публікації AirClim (у 2016 році), зазначено, що викиди від Трипільської теплової електростанції суттєво підвищували рівні токсичних частинок, SO<sub>2</sub> та NO<sub>2</sub> над центральною Україною – зокрема у напрямку Києва – значною мірою через переважаючі схеми вітру, які сприяють перенесенню емісій у ці райони [21]. Це ілюструє, що згідно з даними [21, 22]

в Україні спостерігається збільшення тривалості періодів слабого вітру ( $< 2$  м/с) у літні місяці через підвищену повторюваність антициклональних режимів погоди. Таке явище особливо небезпечне для територій із великими ТЕС, оскільки погіршує вентиляцію приземного шару.

Температурна інверсія створює так звану «метеорологічну кришку», яка блокує вертикальні рухи повітря й утримує забруднювачі в приземному шарі.

Опади виступають природним механізмом очищення атмосфери (*wet deposition*), змиваючи великі частинки  $PM_{10}$  та розчинні гази ( $SO_2$ ). Згідно зі Шостим звітом IPCC [31], для України характерна зростаюча нерівномірність розподілу опадів – збільшення посушливих періодів і водночас посилення інтенсивності злив. Під час тривалих посух концентрації  $PM_{2.5}$  зростають, тоді як після зливових опадів повітря швидко очищується. Однак значні опади можуть призводити до вторинного забруднення водних об'єктів шляхом змиву золошлакових матеріалів із промислових площадок ТЕС [4, 34].

Атмосферна турбулентність забезпечує інтенсивне вертикальне перемішування повітряних мас, що сприяє розбавленню забруднювачів. Улітку, за високих температур, турбулентність посилюється, частково компенсуючи ефект слабого вітру, тоді як узимку, під час інверсій, вона мінімальна. Моделювання за допомогою AERMOD (US EPA, 2024) показує, що за умов високої турбулентності максимумами приземних концентрацій забруднювачів зміщуються далі від джерела, ніж за стабільних умов атмосфери [36].

Екологічний стан території розташування ТЕС визначається:

- фоновим забрудненням,
- чутливістю екосистем,
- щільністю населення,
- наявністю інших джерел емісій, а також
- зрілістю моніторингової інфраструктури та
- нормативної бази.

Якщо зона вже має високий фон забруднення (від промисловості, транспорту, побутової топки) – додатковий вплив ТЕС “накладається” на існуючий тиск, що може призводити до синергетичних ефектів, посилюючи деградаційні процеси в атмосфері, ґрунтах і водах. Це підкреслює необхідність комплексного моніторингу та модернізації енергетичних потужностей як ключової умови досягнення кліматичної нейтральності України.

## 2.2 Характеристика репрезентативних кейсів у системі теплової енергетики України як джерел забруднення атмосферного повітря

Для забезпечення репрезентативності результатів дослідження об'єкти було обрано за комплексом критеріїв – масштабу впливу, типу паливної бази, рівня технічної модернізації та екологічної ефективності газоочисного обладнання. Такий підхід дав змогу виокремити два стратегічно показових кейсах – Бурштинській ТЕС та Трипільській ТЕС, що репрезентують контрастні моделі функціонування теплової енергетики України.

Основними критеріями слугували географічне розташування, технологічні особливості та рівень екологічного ризику. Географічний чинник визначає особливості кліматичних і метеорологічних умов, які впливають на розсіювання забруднювальних речовин; технологічний – відображає тип палива, ефективність очисних споруд і рівень модернізації обладнання; екологічний – масштаби викидів  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  та твердих частинок ( $\text{PM}_{2.5}$  і  $\text{PM}_{10}$ ), що формують основне антропогенне навантаження у межах урбанізованих зон.

Бурштинська тепла електростанція є одним із найбільших джерел промислового забруднення атмосфери в Україні, багато років фігуруючи у звітах Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів. Об'єкт є репрезентативним прикладом застарілої вугільної генерації та характеризується високими обсягами емісії діоксиду сірки та твердих частинок. В умовах Передкарпаття, де часто спостерігаються температурні інверсії, забруднювальні речовини накопичуються у приземному шарі, спричиняючи зимові піки концентрацій. Ця ТЕС уособлює «критичний сценарій» впливу вугільної енергетики, що дає змогу дослідити залежність атмосферного забруднення від поєднання технологічних параметрів та місцевої метеорології.

Трипільська тепла електростанція розташована у густонаселеній зоні Київської області, що підвищує соціально-екологічну значущість об'єкта. Станція перебувала на етапі модернізації та переходу з вугілля на природний газ, що сприяє зниженню емісій  $\text{SO}_2$  і пилу, але можливого відносного збільшення оксидів азоту. За даними досліджень [41], при переході на вугілля з Південно-Африканської Республіки котел ТПП-210А забезпечив стабільну роботу без підсвічування високоактивним паливом і зберіг номінальні параметри перегрітої пари, що підтвердило ефективність технологічної адаптації станції [46].

Порівняння цих двох контрастних моделей – критичного навантаження та технологічного переходу – забезпечує наукове підґрунтя для валідації систем моніторингу та формування універсальних, обґрунтованих

рекомендацій щодо підвищення екологічної безпеки теплоенергетичних підприємств різного технологічного профілю.

### **2.2.1 Характеристика Бурштинської ТЕС як моделі критичного навантаження**

Бурштинська теплова електростанція ПАТ «ДТЕК Західенерго» є однією з найбільших теплових електростанцій західної частини України. Станція введена в експлуатацію в 1969 р. після будівництва, яке здійснювалося в 1962–1969 рр., маючи встановлену електричну потужність 2366 МВт, розподілену між 12 енергоблоками, кожен з яких номінально мав 200 МВт, теплову – 200 Гкал/год. За час експлуатації ТЕС виробила понад 604 млрд кВт/год електроенергії.

Бурштинська ТЕС розташовна приблизно за 6 км на південний схід від міста Бурштин на землях села Бовшів (Івано-Франківська область), на лівому березі річки Гнила Липа (рис. 2.2). Територія промислового комплексу займає площу близько 2921,5 га, з яких безпосередньо виробнича зона становить приблизно 2525 га. Підприємство має значний вплив на економіку регіону – на частку Бурштинської ТЕС припадає понад чверть ( $\approx 24\%$ ) загального промислового виробництва області.



Рисунок 2.2 – Бурштинська ТЕС

Станція функціонує з використанням штучного водоймища-охолоджувача, об'єм якого сягає близько 50 млн м<sup>3</sup> води, а площа дзеркала становить орієнтовно 1260 га. Середня глибина водойми – 3,0–3,5 м, максимальна – до 8 м. Водойма виконує ключову роль у системі технічного водопостачання підприємства, забезпечуючи охолодження циркуляційної води та стабілізацію теплового режиму.

Крім того, на промисловому майданчику облаштовано артезіанські свердловини, з яких здійснюється забір води для господарсько-побутових потреб. Тепломережа електростанції функціонує на основі хімічно очищеної води, що подається з озера-охолоджувача, що забезпечує надійність теплотехнічного циклу та зниження ризику корозійних процесів у системах циркуляції.

Відповідно до класифікації екологічної безпеки, запропонованої Апостолюком С.О. та співавторами [1], Бурштинська ТЕС віднесена до другої категорії потенційної екологічної небезпеки, для якої встановлено нормативну ширину санітарно-захисної зони у межах 500 метрів [48].

Таблиця 2.5 – Основні проєктно-технічні характеристики Бурштинської ТЕС (до 2025 р.)

| Показник                        | Опис                                                                                                                                 |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Проектна встановлена потужність | 2366 МВт (12 енергоблоків по $\approx 195$ МВт кожен)                                                                                |
| Рік введення першого блоку      | 1969 р.                                                                                                                              |
| Основний вид палива             | вугілля (кам'яне, високозольне); резервне – природний газ, мазут                                                                     |
| Кількість генеруючих блоків     | 12 генеруючих блоків (із них 10 у роботі станом на 2023 р.)                                                                          |
| Висота труб                     | 2 труби по 250 м,<br>1 труба – 180 м                                                                                                 |
| Трансформатори                  | тип ТДЦ-400000/330;<br>загальна потужність трансформаторного господарства – $\approx 4,8$ ГВА                                        |
| Стратегічна функція             | забезпечення маневрової потужності та електропостачання Західного енерговузла; робота в режимі «Бурштинського енергоострова» ENTSO-E |

До повної синхронізації Об'єднаної енергетичної системи України з ENTSO-E, Бурштинська ТЕС відігравала унікальну геостратегічну роль у складі так званої «Бурштинської енергоостровної» системи, – функціонуючи

паралельно з європейською мережею (UCTE), забезпечуючи ключовий перетин ліній електропередач, що з'єднували Україну з енергосистемами Угорщини, Румунії та Словаччини. Ця критична функція підтримувала високу стратегічну цінність об'єкта, незважаючи на його технологічне та екологічне застарівання.

Енергетична безпека базувалася на використанні кам'яного вугілля, переважно з Львівсько-Волинського басейну. Ця паливна стратегія забезпечувала стабільну роботу станції та підтримувала національну вугільну промисловість.

До структурної організації Бурштинська ТЕС входить низка технологічно взаємопов'язаних виробничих та інженерних об'єктів, серед яких представлені:

- основним промисловим майданчиком електростанції;
- шлаковідвалом;
- гідровідвалом;
- золовідвалом №3;
- золовідвали №1 та №2.

Діючий шлаковідвал одnoseкційного типу, загальною площею 12,35 га, розташований приблизно за 1,5 км на південь від головного промислового майданчика Бурштинської ТЕС, на землях села Бовшіва, що адміністративно належить до Бурштинської міської ОТГ. Цей техногенний елемент інфраструктури виконує функцію акумуляції твердих відходів паливоспалювання, зокрема шлаків, та є важливою складовою загальної системи поводження з відходами енергетичного виробництва на підприємстві.

Ділянка золовідвалу №3 розміщена приблизно за 5 км на південь від основного промислового майданчика Бурштинської ТЕС, на території Галицької міської ОТГ Івано-Франківської області. Загальна площа цього техногенного об'єкта становить 87,5 га.

Гідровідвал, що виконує функцію накопичення водонасичених відходів спалювання, розташований у межах м. Бурштин (Бурштинська міська ОТГ, Івано-Франківська область). Його площа становить 118,03 га, структура якого представлена трьома секціями:

- секція №1 – 30,33 га;
- секція №2 – 31,2 га;
- секція №3 – 56,5 га.

Зазначені техногенні об'єкти є невід'ємними елементами системи управління відходами Бурштинської ТЕС і відіграють важливу роль у забезпеченні безперервного функціонування підприємства, водночас формуючи потенційні джерела екологічного ризику для довкілля регіону.

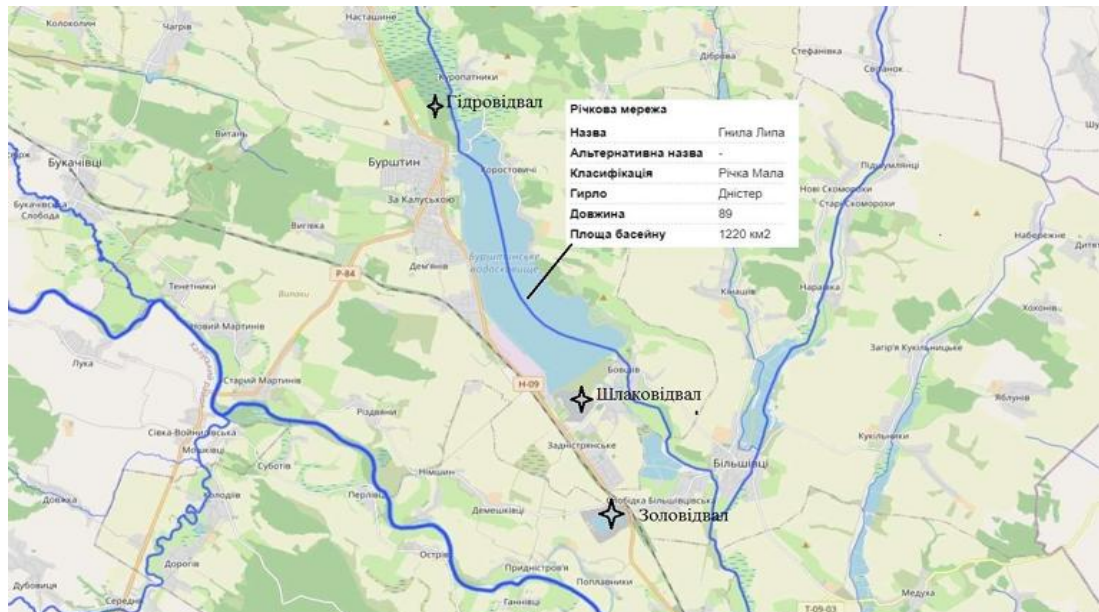


Рисунок 2.3 – Узагальнена карта-схема розташування об'єктів планової діяльності Бурштинської ТЕС

Після приватизації компанія ДТЕК «Західенерго» у 2015 році інвестувала понад 175 млн доларів США у реконструкцію та модернізацію ТЕС. Ці заходи були спрямовані на підвищення техніко-економічних показників і збільшення потужності. В результаті реконструкції окремих енергоблоків, таких як Блок №10, вдалося підвищити встановлену потужність з 195 МВт до 210 МВт.

Ключовим досягненням модернізації стало зниження питомих витрат умовного палива, зокрема для Блоку №5 цей показник знизився з 405 г/кВт\*год до 373 г/кВт\*год. Таке підвищення коефіцієнту корисної дії дозволяло виробляти додатково 200 млн кВт/год електроенергії на рік. Хоча покращення ефективності знижувало питомі викиди на одиницю виробленої енергії, воно також стимулювало спалювання більшої абсолютної кількості вугілля (на 100 тис. т на рік більше), оскільки модернізація дозволила станції працювати на вищій потужності.



Рисунок 2.4 – Динаміка експлуатованих енергоблоків Бурштинської ТЕС

Це підкреслює, що пріоритетом модернізації було максимізація виробництва та продовження терміну експлуатації обладнання на 15 років, а не радикальне зменшення загального екологічного навантаження.

Як високопотужна вугільна ТЕС, Бурштинська станція генерує значні обсяги золошлакових відходів, які створюють суттєве техногенне навантаження. З метою зниження цього впливу та використання техногенної сировини замість природних ресурсів, компанія реалізувала проєкти з утилізації відходів.

Ці проєкти відповідали концепції циркулярної економіки. Наприклад, золошлакові матеріали використовувались у дорожньому будівництві. Для створення шляху довжиною 900 метрів було задіяно 300 тонн золи. Більш масштабні плани включали використання близько 350 тис. м<sup>3</sup> золи та шлакових матеріалів як заміника піску для будівництва дорожніх ділянок загальною довжиною 25,7 км [14]. Утилізація золошлакового відходу є важливим елементом управління відходами, який частково компенсує первинний екологічний збиток, пов'язаний зі спалюванням вугілля, зменшуючи потребу у видобутку природних матеріалів.

У 2000-х роках були проведені модернізаційні роботи з установки електрофільтрів на окремих блоках та впровадження пиловловлюючого обладнання з вітчизняним виробництвом.

З початком повномасштабного вторгнення, Бурштинська ТЕС була ідентифікована агресором як стратегічна ціль через її ключову роль у підтримці регіональної енергосистеми та зв'язку з ENTSO-E. Станція зазнала багаторазових, цілеспрямованих масованих ударів, кількість яких перевищила 12 разів.

Хронологія руйнувань демонструє систематичне виведення потужностей з ладу. У жовтні 2022 року Бурштинська ТЕС зазнала влучання 4 ракет, що пошкодили відкриті розподільчі пристрої. Найбільш критичні удари були завдані у березні 2024 року, внаслідок яких було «серйозно пошкоджено енергоблоки». Наслідком цих атак стало виведення з ладу до 90% теплової генерації компанії ДТЕК, а місцева влада констатувала, що станція «повністю знищена і не підлягає відновленню». Воєнні дії повністю нівелювали всі попередні багатомільйонні інвестиції, спрямовані на продовження життєвого циклу ТЕС, підкреслюючи надзвичайну вразливість централізованих вугільних об'єктів.

Саме тому, майбутня стратегія відбудови має суворо дотримуватися принципів "Build Back Better" (UNEP), зосереджуючись на підвищенні стійкості та зниженні вуглецевого сліду.

## 2.2.2 Характеристика Трипільської ТЕС як моделі паливно-енергетичної трансформації

Дослідження критичної енергетичної інфраструктури України демонструє, що Трипільська теплова електростанція, яка до квітня 2024 року була найбільшим генеруючим об'єктом у Київській області, відіграла вирішальну роль у забезпеченні маневрової потужності для центрального регіону країни.

Трипільська ТЕС розташована на правому березі Дніпра, за 45 км на південь від Києва, поблизу села Трипілья (рис. 2.5). Після зупинення Чорнобильської АЕС вона стала найбільшим енергогенерувальним об'єктом Київської області з установленою потужністю 1800 МВт. У регіоні також функціонують Київські ТЕЦ-5 (700 МВт), ТЕЦ-6 (500 МВт) та Дарницька ТЕЦ (160 МВт).



Рисунок 2.5 – Трипільська ТЕС

Електростанцію споруджено у дві черги. Перша – чотири дубль-блоки потужністю по 300 МВт із двокорпусними прямотоковими паровими котлами ТПП-210А, паровими турбінами К-300-240, генераторами ТГВ-300 і трансформаторами ТДЦ-400000/330. Друга черга складалася з двох моноблоків по 300 МВт з однокорпусними котлами ТГМП-314 та аналогічним турбінно-генераторним обладнанням. Головний корпус ТЕС збудований за типовим проєктом пилувугільної станції з енергоблоками по 300 МВт.

Основним паливом залишався донецький антрацитовий штиб, резервними – природний газ і мазут. До складу газового господарства входять два газорозподільних пункти продуктивністю по 320 тис. м<sup>3</sup>/год та система магістральних газопроводів. Водопостачання здійснюється за прямотоковою схемою з використанням води Канівського водосховища, до складу системи

входять дві насосні станції. Водопідготовчий комплекс забезпечує отримання до 250 т/год знесоленої води іонообмінним методом для живлення прямотоків котлів.

За період експлуатації Трипільською теплоелектростанцією вироблено понад 350 млрд кВт\*год електроенергії та понад 5,5 млн Гкал теплової енергії. Незважаючи на складні техніко-економічні умови, станція залишалася одним із найбільш надійних енергогенерувальних об'єктів України, стабільно забезпечуючи повне електричне навантаження і роблячи вагомий внесок у енергетичну безпеку держави до 11 квітня 2024 року.

У 2000 році проведено модернізацію паливоспалювального обладнання, що дозволило ефективно використовувати низькосортне вугілля з нижчою теплою згоряння ( $Q_{\text{нр}} = 3000$  ккал/кг). Цей крок суттєво розширив паливну гнучкість станції та зменшив залежність від дефіцитного антрацитового вугілля.

З 11 грудня 2006 року Трипільська тепла електростанція функціонує як філія ПАТ «Центренерго», що інтегрувало підприємство у централізовану систему енергетичного управління енергогенерацією України.

Територія підприємства охоплює площу 281,3 га; станція розташована в межах Обухівського району Київської області, на правому березі Канівського водосховища, що забезпечує її водно-енергетичні потреби та відіграє важливу роль у формуванні локальних мікрокліматичних умов.

Таблиця 2.5 – Основні проєктно-технічні характеристики Трипільської ТЕС (до 2024 р.)

| Показник                        | Опис                                                                                        |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Проектна встановлена потужність | Шість турбін та генераторів загальною номінальною потужністю 1800 МВт.                      |
| Рік введення першого блоку      | 1969 р.                                                                                     |
| Основний вид палива             | Донецький антрацитовий штиб (вугілля) до 2022 р.,<br>природний газ, мазут                   |
| Кількість генеруючих блоків     | 6 (4 пилувугільних, 2 газомазутних блоків потужністю по 300 МВт кожний)                     |
| Висота труб                     | 2 труби по 180 м                                                                            |
| Трансформатори                  | типу – ТДЦ-400000/330                                                                       |
| Стратегічна функція             | Манєврова генерація, ключовий постачальник для Київської, Черкаської, Житомирської областей |

Сукупна встановлена потужність енергетичних об'єктів регіону становить близько 3200 МВт, із яких Трипільська ТЕС забезпечувала приблизно 57 % від

загальної генеруючої потужності Київської області. Станція виконувала стратегічну функцію, будучи основним постачальником електроенергії для критичних споживачів Київської, Черкаської та Житомирської областей.

Паливна логістика Трипільської ТЕС була історично пов'язана із поставками донецького антрациту, який транспортувався залізничним та річковим шляхами. Залежність від антрациту, видобуток якого став неможливим на окупованих територіях після 2014 року, створила значну геополітичну та логістичну вразливість. Ця залежність вимагала від оператора, ПАТ "Центренерго", постійного балансування між необхідністю дорогого імпорту та технологічними викликами переведення блоків на інші, менш ефективні марки вугілля або збільшення використання газу. Така ситуація безпосередньо впливала на економічні показники станції та її здатність підтримувати стабільну роботу до початку повномасштабного вторгнення.

Паливно-енергетичний комплекс Трипільської ТЕС включає відкритий склад вугілля загальною місткістю близько 280 тис. тонн, оснащений двома порталними кранами та обслуговуваний бульдозерною технікою для забезпечення ефективного переміщення та подачі палива. Основним енергетичним ресурсом станції є донецький антрацитовий штиб, який транспортується як залізничним транспортом, так і річковим шляхом – безпосередньо до причалу електростанції. Крім того, підприємство під'єднане до газотранспортної системи України, що забезпечує можливість альтернативного використання природного газу у виробничих процесах. У структурі паливного господарства також передбачено резервні сховища мазуту, які можуть застосовуватися як допоміжне паливо для стабілізації роботи енергоблоків у періоди пікових навантажень або обмеження постачання основного палива.

У 2010 році, в період з 17 червня по 29 жовтня, на Трипільській ТЕС було проведено капітальний ремонт другого енергоблоку, який супроводжувався його технічним переоснащенням. У результаті модернізації потужність енергоблоку зросла з 300 МВт до 325 МВт, а строк експлуатації було продовжено на 15–20 років.

Функціональне значення Трипільської ТЕС визначалося її здатністю забезпечувати маневрову генерацію, що є критичною функцією в енергосистемі, оскільки теплові електростанції, на відміну від атомних (які є базовою генерацією), можуть оперативно змінювати рівень виробництва електроенергії. Головний імператив маневрової потужності полягає у балансуванні системи під час різких змін споживання, зокрема під час ранкових та вечірніх піків, коли попит на електроенергію стрімко зростає. Без маневрової потужності диспетчери не можуть підтримувати фундаментальну

умову безпечної роботи системи: рівність між виробництвом та споживанням, що неминуче веде до необхідності аварійних відключень.

Енергоблок №4 потужністю 300 МВт на Трипільській ТЕС, пройшов повну реконструкцію. Цей комплекс будівельно-монтажних робіт, завершений 19 лютого 2018 року, був спрямований на технологічне переведення котлоагрегатів на спалювання газового вугілля марок «Г» і «ДГ») замість проєктного палива [21]. Подальша модернізація станції продовжилася у 2019 році, коли енергоблок №3 також було переобладнано для використання вугілля зазначених марок замість антрацитного штибу. У результаті такої глибокої модернізації Трипільська ТЕС набула статусу першого в Україні гібридного енергогенеруючого підприємства, яке володіє технічною можливістю паралельного спалювання різних видів вугілля. Така паливна диверсифікація має критичне значення для підвищення рівня енергетичної незалежності та безпеки держави, знижуючи залежність від імпортного антрациту.

Трипільська ТЕС оперує шістьма енергоблоками, кожен з яких має потужність 300 МВт, які працюють на різних видах палива:

- блоки №1 і №2 залишаються на вугіллі марки АШ (антрацитний штиб);
- блоки №3 і №4 використовують газових марок «Г» і «ДГ» (газова група);
- блоки №5 і №6 працюють на природному газі та мазуті.

Завдяки цьому станція мала універсальну паливну структуру, що дозволило забезпечити гнучке функціонування енергетичних котлів у межах паливно-енергетичного балансу України.

У 2020-х роках компанією **ССК ТМ** реалізовано проєкт модернізації систем загальнообмінної вентиляції, що включав впровадження сучасних повітрорегулюючих пристроїв та автоматизованих систем контролю температури й вологості. Це дозволило зменшити ризики перегріву обладнання, запобігти накопиченню шкідливих домішок у повітрі та підтримувати стійкий технологічний режим навіть за умов енергетичної напруги та воєнного стану.

Аналіз демонструє, що навіть до початку військового конфлікту, гнучкість Трипільської ТЕС була недостатньою для сучасних потреб ОЕС України. Станом на кінець 2021 року, більша частина потужностей залишалася технологічно застарілою, і лише один енергоблок потужністю 300 МВт пройшов необхідну реконструкцію. Відсутність чітко визначених механізмів фінансування для сталої модернізації була обумовлена високими інвестиційними ризиками, низьким коефіцієнтом використання встановленої потужності та загальною економічною невизначеністю.

Така ситуація свідчить про глибоку структурну проблему. Відкладення модернізації та збереження централізованої, але технологічно застарілої

структури зробило об'єкт легкою і високопріоритетною ціллю для ворога. Втрата Трипільської ТЕС унаслідок воєнних дій у квітні 2024 року стала втратою не просто обсягу енергії, а саме ключового інструменту оперативного диспетчерського балансування в критичному регіоні, що унеможливорює швидке та гнучке реагування системи на коливання попиту без залучення значних обсягів імпорту та аварійної допомоги.

### 2.3 Методи інтегрованого моделювання та моніторингу поширення атмосферних забруднень у зоні впливу енергетичних об'єктів

Оцінювання процесів розповсюдження шкідливих компонентів базується на положеннях теорії атмосферної дифузії, що ґрунтується на математичному моделюванні за допомогою рівнянь турбулентної дифузії. Такий підхід дозволяє відтворювати динаміку переміщення забруднювальних речовин від джерел різної природи та потужності, а також враховувати їхні екологічні параметри й вплив на якість повітряного середовища.

Узагальнено, що моніторинг стану повітряного басейну передбачає систематичне спостереження за його якісними та кількісними характеристиками з метою своєчасного виявлення та попередження критичних ситуацій, які становлять та потенційно можуть становити загрозу для здоров'я людини й функціонування біоти.

Процеси екологічного контролю на об'єктах енергетичної інфраструктури (зокрема теплових електростанцій і котелень) доцільно відобразити у вигляді структурної схеми [16], поданої на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Схематична модель процесу екологічного моніторингу об'єктів енергетичної інфраструктури [запропонована Запорожцем А. О.]

Провідні країни світу розробили високоорганізовану мережу автоматизованих систем моніторингу забруднення атмосфери (АСКЗП) [41], що функціонують як комплекс інтегрованих контрольно-вимірювальних станцій, оснащених високочутливими сенсорами, телеметричними каналами та аналітичним програмним забезпеченням. Основна мета таких систем полягає у здійсненні безперервного моніторингу концентрацій забруднюючих речовин у повітряному басейні, їх аналізі, прогнозуванні змін та формуванні рекомендацій для оперативного екологічного реагування.

Автоматизовані системи моніторингу забруднення атмосфери забезпечують автоматичну фіксацію концентрацій атмосферних домішок, що характеризують рівень техногенного навантаження. Вимірювання здійснюються за допомогою різнотипних сенсорів – електрохімічних, фотометричних, напівпровідникових, п'єзокварцових, біосенсорних та волоконно-оптичних детекторів. Одночасно реєструються метеорологічні параметри (температура, вологість, атмосферний тиск, швидкість і напрям вітру), які є необхідними для моделювання процесів розсіювання домішок у повітрі.

Інформація з локальних станцій надходить до центрального інформаційно-аналітичного центру, де відбувається узагальнення, математична обробка та інтерпретація результатів моніторингу. На основі цих даних формуються карти просторового розподілу індексу якості повітря (*Air Quality Index*), що відображають актуальний стан атмосферного середовища у режимі реального часу (наприклад, за даними платформи [www.aqicn.org](http://www.aqicn.org)).

Система AQI, згідно зі стандартами Агентства з охорони довкілля США (EPA), розраховується за концентраціями таких ключових інгредієнтів, як SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> та PM<sub>10</sub>. Вона дозволяє стандартизовано інтерпретувати ступінь забруднення та інформувати населення, а також відповідальні служби про екологічні ризики. Таким чином, автоматизовані системи контролю є базовою складовою державних програм екологічного моніторингу, забезпечуючи високу оперативність, достовірність і просторову деталізацію даних про стан атмосферного повітря.

Табл. 2.6 ілюструє узгоджені діапазони концентрацій атмосферних забруднювачів із відповідними інтервалами індексу якості повітря (AQI), що характеризують рівень антропогенного навантаження на повітряне середовище.

Таблиця 2.6 – Інтервали зміни індексу AQI та відповідні концентрації поліютантів у повітрі

| AQI                 | NO <sub>2</sub><br>(ppb) | SO <sub>2</sub><br>(ppb) | CO<br>(ppm)         | PM <sub>10</sub><br>(мкг/м <sup>3</sup> ) | PM <sub>2,5</sub><br>(мкг/м <sup>3</sup> ) | O <sub>3</sub><br>(ppb) |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| $I_{\min}-I_{\max}$ | $C_{\min}-C_{\max}$      | $C_{\min}-C_{\max}$      | $C_{\min}-C_{\max}$ | $C_{\min}-C_{\max}$                       | $C_{\min}-C_{\max}$                        | $C_{\min}-C_{\max}$     |
| 0–50                | 0–53*                    | 0–35*                    | 0–4,4**             | 0–54***                                   | 0–12***                                    | 0–54**                  |
| 51–100              | 54–100*                  | 36–75*                   | 4,5–9,4**           | 55–154***                                 | 12,1–35,4***                               | 55–70**                 |
| 101–150             | 101–360*                 | 76–185*                  | 9,5–12,4**          | 155–254***                                | 35,5–55,4***                               | 71–85**<br>125–164*     |
| 151–200             | 361–649*                 | 186–304*                 | 12,5–15,4**         | 255–354***                                | 55,5–150,4***                              | 86–105**<br>165–204*    |
| 201–300             | 650–1249*                | 305–604***               | 15,5–30,4**         | 355–424***                                | 105,5–250,4***                             | 106–200**<br>205–404*   |
| 301–400             | 1250–1649*               | 605–804***               | 30,5–40,4**         | 425–504***                                | 250,5–350,4***                             | 405–504*                |
| 401–500             | 1650–1049*               | 805–1004***              | 40,5–50,4**         | 505–604***                                | 350,5–500,4***                             | 505–604*                |

Примітка: \* — усереднене значення концентрації забрудника за 1 год; \*\* — усереднене значення концентрації забрудника за 8 год; \*\*\* — усереднене значення концентрації забрудника за 24 год.

Табл. 2.7 відображає характеристику ступенів небезпеки, що відповідають окремим інтервалам індексу AQI.

Таблиця 2.7 – Оцінка ризиків та застереження відповідно до значень індексу якості повітря (AQI) []

| AQI     | Позначення               | Застереження                                                                                                                               |
|---------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0–50    | Добре                    | Якість повітря вважається задовільною, забруднення повітря є незначним (у межах норми)                                                     |
| 51–100  | Задовільно               | Якість повітря є прийнятною, але деякі забруднювачі можуть становити небезпеку для людей, які є особливо чутливими до забрудненого повітря |
| 101–150 | Погано для чутливих груп | Може спостерігатися ефект на особливо чутливу групу осіб. Без видимого впливу на звичайного мешканця                                       |
| 151–200 | Погано                   | Кожен може відчувати наслідки для свого здоров'я. Особливо чутлива група може відчувати більш серйозні наслідки                            |
| 201–300 | Дуже погано              | Небезпека для здоров'я від надзвичайних ситуацій. Імовірно, <u>спостерігатиметься</u> вплив на все населення                               |
| 300+    | Небезпечно               | Небезпека для здоров'я, кожна людина може відчувати серйозні наслідки для свого здоров'я                                                   |

Аналіз основних забруднювальних речовин та методів їх моніторингу свідчить, що контроль якості атмосферного повітря в зоні впливу теплових

електростанцій має бути багаторівневим і поєднувати стаціонарні, дистанційні та моделювальні підходи. Наземні стаціонарні пости розташовуються у санітарно-захисній зоні ТЕС та у найближчих населених пунктах, де проводяться безперервні вимірювання концентрацій основних забруднювачів –  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  та  $\text{O}_3$ . Отримані дані в режимі реального часу передаються до державних систем спостереження, зокрема до Єдиної державної системи екологічного моніторингу України (Міндовкілля, 2024).

Дистанційні методи моніторингу включають супутникові спостереження та лідарні технології. Програма ЄС *Copernicus* забезпечує глобальні супутникові дані щодо концентрацій  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  та аерозольних частинок, що дозволяє оцінювати вплив промислових об'єктів на якість повітря. Інструмент TROPOMI на супутнику *Sentinel-5P* забезпечує високу просторову роздільність (до  $3,5 \times 7$  км) і дозволяє відстежувати потоки забруднення від окремих ТЕС.

Ісаєнко В. М., Запорожець А. О. та співавтори [ ] здійснили комплексний огляд наявних методів моніторингу забруднення повітря в Україні з акцентом на об'єкти теплової генерації. Ними була запропонована архітектура моніторингового комплексу на базі безпілотних літальних апаратів (UAS) (рис. 2.7), здатного оперативно формувати тривимірні (3D) карти концентрацій забруднювачів у радіусі до 20 км та на висотах 50–1000 м.

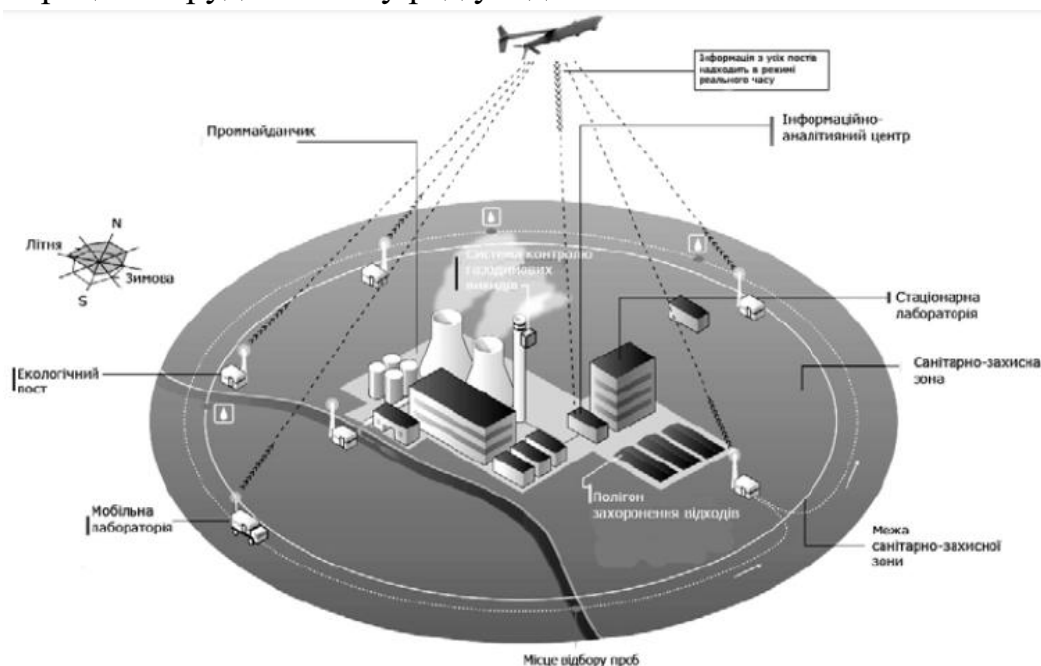


Рисунок 2.7 – Концептуальна модель роботи системи повітряного моніторингу із застосуванням безпілотних авіаційних комплексів (БАК) [43]

Дослідниками детально описано вимоги до сенсорів, профілі польотів і можливості комплексу – швидке картування, контроль санітарно-захисних зон та верифікацію результатів модельних розрахунків розсіювання.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

З огляду на глобальні тенденції декарбонізації та перехід до «чистої» енергетики (відповідно до Цілі сталого розвитку ООН №13 «Боротьба зі зміною клімату»), питання моніторингу впливу ТЕС та розроблення ефективних природоохоронних заходів набуває особливої актуальності для України, яка взяла курс на досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року згідно з Європейським зеленим курсом.

#### 3.1 Екологічні наслідки діяльності теплових електростанцій України в умовах енергетичної кризи та військового конфлікту

Важливо зазначити, що повномасштабне вторгнення значно змінило картину забруднення повітря. Згідно з попередніми оцінками міжурядової програми ЮНЕП, понад 40% потужностей з виробництва електроенергії на вугіллі в Україні було тимчасово або постійно виведено з ладу внаслідок бойових дій та окупації.



Рисунок 3.1 – Структура теплової генерації України за регіонами та оцінка запасів вугілля на складах ТЕС (станом на 21.02.2022).

Стан атмосферного повітря в зонах впливу українських теплових електростанцій залишається критичним за показниками якості. Згідно з даними Європейського агентства з навколишнього середовища за 2024 рік, Україна посідає 7 місце серед європейських країн за обсягами викидів діоксиду сірки з показником 1,28 млн тонн на рік, причому 48,3% цих викидів генеруються об'єктами теплоенергетики [27].

Згідно з даними, наведеними у науковій статті, опублікованій у журналі «Energies» (MDPI, 2023 р.), повний життєвий цикл вугільних електростанцій супроводжується викидами парникових газів на рівні приблизно 750–1050 г CO<sub>2</sub>-екв./кВт·год, тоді як для електростанцій комбінованого циклу, що працюють на природному газі, цей показник становить близько 400–500 г CO<sub>2</sub>-екв./кВт·год.

Вугільні ТЕС України викидають настільки багато забрудників, що країна лідирує в Європі за обсягами цих викидів: на Україну припадає 72% усіх викидів зольного пилу, 27% викидів діоксиду сірки та 16% оксидів азоту серед європейських країн (за даними аналітичного центру Ember). Наприклад, у дослідженні EMBER/Екодія зазначено, що Бурштинська ТЕС потужністю 2366 МВт очолює рейтинг найбільших джерел викидів сірчистого ангідриду (190,371 тонн SO<sub>2</sub>) серед європейських електростанцій (рис. 3.2). Слід зазначити, що багато українських ТЕС були збудовані ще в середині ХХ століття і досі експлуатуються без належних систем очищення димових газів. Більшість з них не обладнана установками десульфуризації (видалення SO<sub>2</sub>) чи денітрифікації (зниження NO<sub>x</sub>), а пилові фільтри часто неефективні або відсутні. До того ж значна частина таких станцій розташована поблизу густонаселених районів, що підсилює негативний вплив на здоров'я населення.



Рисунок 3.2 – Ключові характеристики та позиція Бурштинської ТЕС (Україна) у рейтингу європейських вугільних електростанцій із найвищими викидами діоксиду сірки [21]

У роботі [26] встановлено, що для вугільних марок G і LFG середній коефіцієнт емісії CO<sub>2</sub> становить близько 94128 г/ГДж, тоді як для марок А і L – понад 104987 г/ГДж. Відповідно, у 2021 році середні питомі викиди CO<sub>2</sub> від українських ТЕС становили приблизно 1084 г/кВт·год, що майже удвічі перевищує середньоєвропейський рівень для об'єктів із сучасними

системами очищення.

Варто підкреслити, що діяльність теплогенерувальних підприємств є одним із ключових джерел формування високих концентрацій дрібнодисперсного пилю ( $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$ ), діоксиду сірки, оксидів азоту та інших шкідливих домішок у приземному шарі атмосфери. Сукупна дія цих компонентів зумовлює погіршення якості повітря на значних територіях, спричиняючи негативний вплив на стан здоров'я населення та екологічну стабільність урбанізованих зон. Згідно з результатами міжнародних досліджень (CREA, 2021; WHO, 2023), викиди українських вугільних електростанцій у 2019 році асоціювалися приблизно з 5000 випадками передчасної смертності, з яких понад 2700 – безпосередньо в межах України. Ці дані свідчать про значний антропогенний тиск на атмосферу з боку енергетичного сектору [32].

В Україні 8 електростанцій увійшли до антирейтингу «Топ-10 електростанції за рівнем пилових викидів», які представлені Курахівською, Бурштинською, Трипільською, Луганською, Зміївською, Вуглегірською, Слов'янською та Ладизинською ТЕС (рис. 3.3).

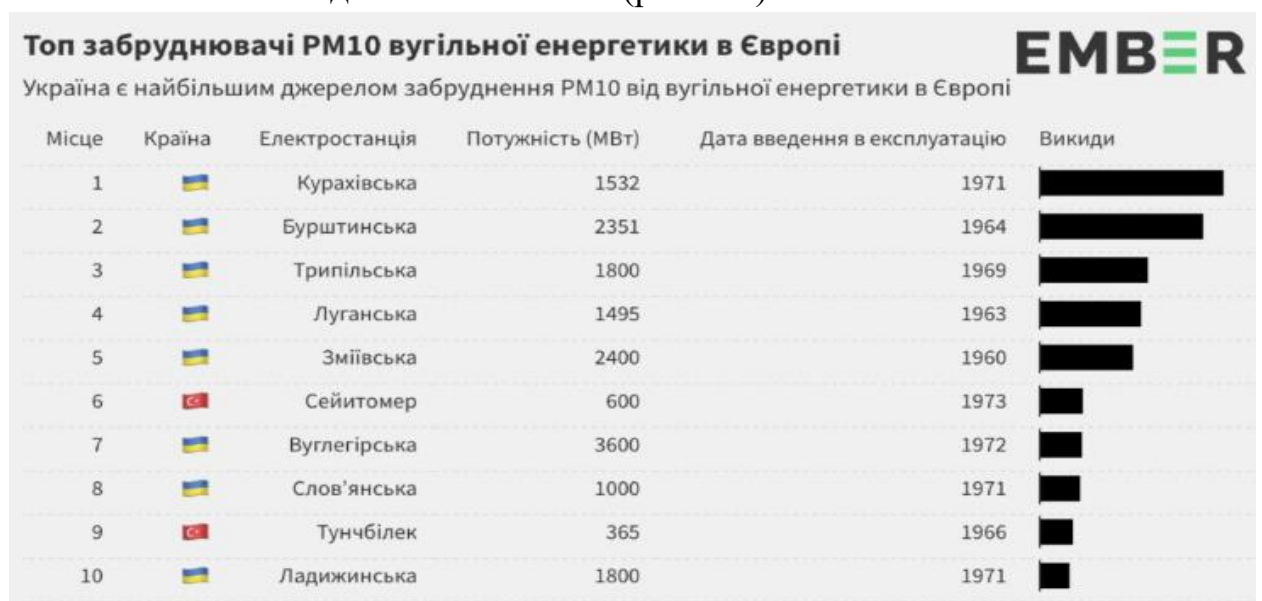


Рисунок 3.3 – Десятка ТЕС з найвищими пиловими викидами []

Що ж до викидів оксидів азоту, Запорізька ТЕС посідає друге місце серед найбільших забруднювачів [27]. Інші українські ТЕС поступаються лише провідним електростанціям Європи, зокрема з Німеччини, Польщі та Сербії. Водночас у рейтингу топ-30 забруднювачів України представлені 9-ма електростанціями.

Здатність атмосферних викидів від енергогенеруючих підприємств до дальнього транспортування є критично важливою для оцінки впливу на навколишнє середовище та природоохоронні території. Наукові дослідження

підтверджують, що за швидкостей вітру понад 7 м/с повітряні маси, насичені забруднювачами, можуть переміщуватися на відстань понад 100 км від промислових джерел, досягаючи навіть відносно чисті природоохоронні зони [28]. Зокрема, викиди  $\text{NO}_2$  від Бурштинської ТЕС здатні транспортуватися у південно-західному напрямку та досягати гірських районів Українських Карпат (зокрема смт Воловець), що створює ризики вторинного забруднення високогірних екосистем.

Ключовим науковим висновком є підтвердження регіонального перенесення оксидів азоту, що засвідчує екологічну взаємозалежність між промисловими центрами та віддаленими природними регіонами. Супутникові спостереження [38] зафіксували сезонне підвищення концентрацій  $\text{NO}_2$  у гірських системах Карпат, особливо взимку, коли місцеві джерела не можуть пояснити наявність таких рівнів забруднення. Це явище інтерпретується як результат транспортування забруднюючих речовин із великих промислових вузлів, розташованих на сході та в центрі країни.

Такий перенос зумовлений сприятливими метеорологічними умовами зимового періоду: сильнішими вітрами, стабільною стратифікацією атмосфери та частими температурними інверсіями, які сприяє горизонтальній адвекції шлейфів забруднення на великі відстані, обмежуючи їхнє вертикальне розсіювання. Коли повітряні маси, насичені  $\text{NO}_2$ , досягають гірського масиву Карпати виникає ефект «видування», що спричиняє локальне осадження домішок і збільшення приземних концентрацій. Таким чином, просторово-часовий розподіл оксидів азоту підтверджує, що вплив теплоелектростанцій центральної частини України поширюється далеко за межі промислових регіонів, охоплюючи навіть екологічно вразливі території західного регіону України.

Енергетична криза в Україні, спричинена масштабними ураженнями енергетичної інфраструктури, додає ще один шар ризику: нерівномірність генерації та пікові навантаження ТЕС змінюють часову структуру викидів, підсилюючи чутливість якості повітря до поточних метеоумов. Репортажі та офіційні повідомлення фіксують знищення або тяжкі пошкодження ключових вугільних теплоенергетичних станцій: Трипільська ТЕС (Київщина) була повністю зруйнована масованим ракетним ударом 11 квітня 2024 р., що істотно вплинуло на енергетичний баланс і резервні режими генерації в центральному регіоні [35]. Бурштинська ТЕС (Івано-Франківщина) зазнавала багаторазових ударів із 2022 р.; у 2024 р. обласна адміністрація публічно заявляла про пошкодження, несумісні з відновленням, а міжнародні та національні медіа фіксували «серйозні ушкодження» ще з жовтня 2022 р. Це призвело до довготривалих збоїв у

роботі Бурштинського енергоострова та зміни режимів навантаження інших об'єктів базової теплової генерації, що опосередковано впливало на локальні епізоди забруднення в умовах слабого вітру та інверсій.

Незважаючи на прогрес, який формально демонструється у звітах, технологічний розрив між фактичними обсягами викидів українських ТЕС та європейськими нормами залишається критичним.

Таким чином, вугільні теплові електростанції залишаються домінуючим джерелом атмосферного забруднення, генеруючи близько 80 % національних викидів діоксиду сірки в Україні. Особливо критичною є ситуація з твердими частинками (летючою золою), обсяги викидів яких на українських ТЕС перевищують гранично допустимі рівні, встановлені Директивою ЄС про промислові викиди, у десятки разів – іноді до 40-кратного перевищення. Така невідповідність засвідчує глибоку технологічну застарілість більшості енергоблоків і системну відсутність сучасних очисних споруд, зокрема установок десульфуризації, деазотації та вискоелективних фільтраційних систем.

Згідно з офіційними даними Міністерства енергетики України, у 2024 році оператори ТЕС, ТЕЦ та великих котелень на підконтрольній території здійснили емісію в повітря обсягом: SO<sub>2</sub> – 162,3 тис. т (на 28,4% менше дозволених граничних обсягів попереднього року); NO<sub>x</sub> – 34,1 тис. т (на 48,7% менше порівняно з попереднім роком); пилу – 33,9 тис. т (на 21,1% менше).

Таблиця 3.1 – Порівняння викидів ТЕС України (2024 рік) з граничними обсягами НПСВ та нормативами ЄС [31]

| Забруднююча речовина | Фактичний обсяг, 2024 р. (тис. т) | Зниження відносно дозволеного ліміту, (%) | Кратність перевищення ІЕД нормативів | Основний екологічний наслідок                                |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Діоксид сірки        | 162,3                             | 28,4                                      | До 20-кратного                       | Кислотні опади, респіраторні хвороби                         |
| Оксиди азоту         | 34,1                              | 48,7                                      | Середня/Висока                       | Фотохімічний смог, утворення тропосферного озону             |
| Пил (ТЧ, РМ)         | 33,9                              | 21,1                                      | Критична (до 40-кратного)            | Кардіореспіраторна токсичність, перевищення гігієнічних норм |

Попри формальне виконання Національного плану скорочення викидів [17], ці показники потребують критичного наукового переосмислення. Зниження емісій досягнуто не шляхом структурної модернізації галузі, а

внаслідок зменшення обсягів виробництва електроенергії, часткового виведення потужностей із експлуатації та зниження паливного навантаження через воєнні дії. Відтак, зменшення викидів є тимчасовим статистичним ефектом, що маскує реальну відсутність системного переходу до технологій найкращих доступних методів.

Таким чином, попри позитивну тенденцію у річних звітних даних 2024 р., структурне технологічне відставання теплової енергетики України залишається критичним викликом. Без масштабної реконструкції очисних систем і впровадження екологічно орієнтованої модернізації ТЕС неможливо досягти відповідності вимогам ЄС щодо контролю промислових викидів та декарбонізації енергетичного сектору.

Проаналізовані дані свідчать про значну екологічну навантаженість на атмосферне повітря у зонах розташування ТЕС і підтверджують необхідність системного моніторингу з акцентом на виявлення гарячих точок емісій.

### 3.2 Вплив типу палива на структуру викидів та просторові паттерни забруднення від ТЕС

Тип енергетичного палива, що використовується на теплових електростанціях, виступає фундаментальним детермінантом, який визначає як якісний та кількісний склад викидів, так і специфіку їхньої подальшої трансформації й просторового розподілу в атмосферному повітрі. Порівняльний аналіз діяльності Бурштинської та Трипільської ТЕС демонструє чітку залежність між паливною базою та формуванням специфічних «екологічних профілів» забруднення.

Важливо підкреслити, що під час згоряння різного виду палива в повітряний басейн викидаються різні обсяги забруднювальних речовин. Відповідно, ступінь негативного впливу на довкілля визначається видом палива, яке використовується для спалювання. У табл. 3.2 представлено основні фізико-хімічні параметри вугільного палива, тоді як у табл. 3.3 подано усереднені показники обсягів забруднюючих речовин, що утворюються в процесі його згоряння.

Таблиця 3.2 – Енергетико-теплотехнічні показники основних видів вугільного палива [4]

| Тип вугілля     | Температура займання | Температура початкового викиду |
|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| Буре вугілля    | 250–450              | 130–170                        |
| Бітумне вугілля | 400–500              | 200–300                        |
| Антрацит        | 700–800              | 380–400                        |

Таблиця 3.3 – Орієнтовні питомі обсяги викидів шкідливих газів під час згоряння антрациту та вугілля бурого [41]

| Забруднювач     | Антрацит | Буре вугілля |
|-----------------|----------|--------------|
| CO <sub>2</sub> | 94,600   | 101,000      |
| SO <sub>2</sub> | 765      | 1,361        |
| NO <sub>x</sub> | 292      | 183          |
| CO              | 89,1     | 89,1         |
| Тверді частинки | 1,203    | 3,254        |

Для екологічного аналізу палива з позицій його потенційного забруднювального впливу доцільно застосовувати питомий екологічний індекс забруднення (табл. 3.4), який відображає співвідношення між кількістю утворених шкідливих викидів, зумовлених хімічним складом палива, та обсягом теплоти, що вивільняється під час його згоряння. Такий підхід дає змогу об'єктивно порівнювати різні види палива за рівнем екологічної небезпечності та енергоефективності їх використання.

Таблиця 3.4 – Порівняльний індекс забруднення для низькосортних енергетичних палива [4]

| Паливо                             | Вологість,<br>$W^r$ , % | Зольність,<br>$A^d$ , % | Сірчистість,<br>$S^d$ , % | Вихід летких<br>речовин,<br>$V^{daf}$ , % | Теплота<br>згоряння<br>$Q_i^r$ ,<br>МДж/кг | Індекс забруднення<br>навколишнього<br>середовища |              |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------|
|                                    |                         |                         |                           |                                           |                                            | $U_3^A$                                           | $U_3^{SO_2}$ |
| Буре вугілля                       | 14–60                   | 4–45                    | 0,5...7,5                 | 40–63                                     | 5,0...16,0                                 | 2,5–9,0                                           | 0,5–3,0      |
| Кам'яне вугілля<br>( $A^d > 40$ %) | 7–15                    | 40–55                   | 0,5–1,0                   | 24–33                                     | 12,0–19,0                                  | 2,0–4,9                                           | 0,2–0,8      |
| Відходи збагачення вугілля         |                         |                         |                           |                                           |                                            |                                                   |              |
| Шлам                               | 3–33                    | 20–45                   | 0,2–0,3                   | 5–33                                      | 16,7–21,5                                  | 9,3–27                                            | 0,1–1,8      |
| Відсів                             | 5,5–31                  | 15–40                   | 0,4–4,0                   | 36–45                                     | 14,7–24,0                                  | 6,3–2,7                                           | 0,2–2,7      |
| Промпродукт                        | 6,6–15                  | 26...46                 | 0,3–9,0                   | 20–44                                     | 14,9–22,0                                  | 12–3,1                                            | 0,2–6,0      |
| Антрацитовий штиб                  |                         |                         |                           |                                           |                                            |                                                   |              |
| Донбасу                            | 4–14                    | 15–32                   | 0,4–3,6                   | 2,4–7,0                                   | 20,0–27,7                                  | 5,4–16                                            | 1,15–1,8     |
| Кузбасу                            | 6–10                    | 13–22,5                 | 0,3–0,4                   | 4–5,5                                     | 23,0–27,7                                  | 4,7–9,8                                           | 0,2–1,1      |
| Торф                               | 45–50                   | 9–15                    | 0,2–0,5                   | 67–72                                     | 8,0–9,3                                    | 9,7–1,7                                           | 0,21–0,6     |
| Горючі<br>сланці                   | 5–32                    | 49–75                   | 1,0–3,0                   | 50–90                                     | 6,0–12,0                                   | 3,8–12                                            | –            |
| Рослинне (деревина)<br>паливо      | 20–60                   | 0,2–7,0                 | 0,2–1,0                   | 80                                        | 7,1–8,2                                    | –                                                 | 0,83–5,0     |

Особливо виразно деградаційні зміни якості твердого палива проявилися протягом останніх десятиліть у Донецькому та Львівсько-Волинському вугільних басейнах (рис. 3.5). Проведений аналіз свідчить, що за останні 30 років якість вугілля, яке постачалося на теплоелектростанції, істотно погіршилась. Так, теплота згоряння вугілля, що надходила на ТЕС у

1975 році, становила 19–21 МДж/кг, тоді як у 2000 році – лише 14–17 МДж/кг (рис. 3.5, а). Погіршення енергетичних характеристик відбулося переважно через зростання зольності палива з 24–30 % до 36–44 % та підвищення його вологості з 7–9 % до 10–11 % (рис. 3.5, в).

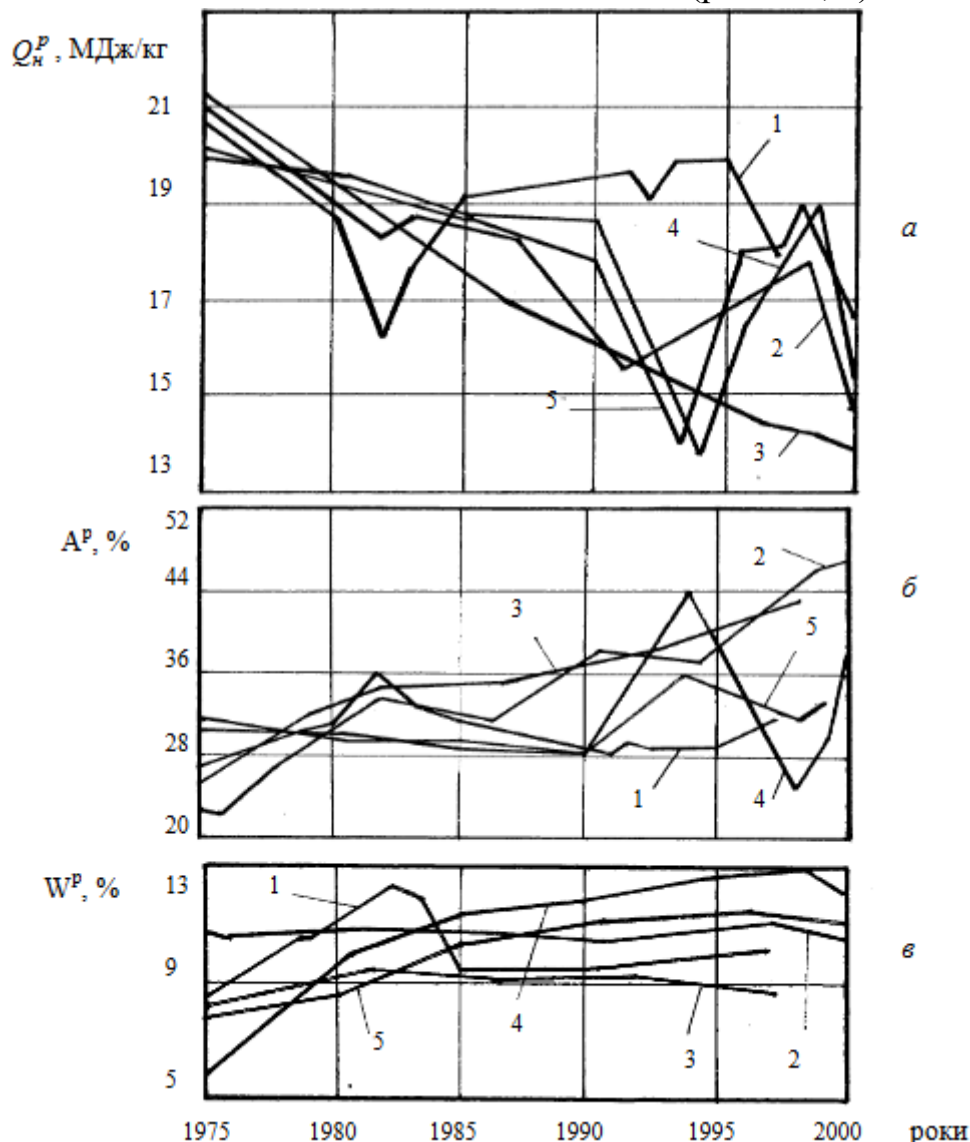


Рисунок 3.5 – Якість вугілля, що спалюється на ТЕС України (розроблено Й.С. Мисак): а – нижча теплота згоряння  $Q_n^P$ , МДж/кг; б – зольність  $A^P$ , %; в – вологість  $W^P$ , %; 1 – Трипільська ТЕС (Донецький АШ); 2 – Ладизинська ТЕС (Донецьке Г, ГСШ); 3 – Запорізька ТЕС (Донецьке ГСШ); 4 – Бурштинська ТЕС (Львів.-Вол. Г, Донецький АШ); 5 – Добротвірська ТЕС (Львів.-Вол. Г)

Важливо зазначити, що на сучасному етапі більшість ТЕС працюють на сумішах різних видів твердого палива, що зумовлює суттєві коливання якісних показників навіть у межах однієї робочої зміни. Такі відмінності пояснюються постачанням вугілля з різних шахт й збагачувальних фабрик, при цьому вологість може варіювати в межах 9–12,5 %, зольність – 28–40 %, а теплота згоряння – 15–20 МДж/кг [2].

Погіршення гірничо-геологічних характеристик родовищ вугілля вказує на високу ймовірність постачання на електростанції палива ще нижчої якості, з теплотою згоряння до 14 МДж/кг і менше. Отже, під час проєктування нових котлів виробники мають враховувати не лише нормативні, а й знижені показники якості вугілля.

Зменшення калорійності вугілля призводить до необхідності залучення допоміжних високореакційних палив (природний газ чи мазут), без яких спалювання стає технічно ускладненим. Зниження енергетичної цінності палива обумовлює підвищену витрату ресурсу на вироблення одиниці енергії, збільшення теплових і електричних затрат на його підготовку, погіршення процесів горіння, зміну умови теплообміну у котлі, перевантаження систем паливоподачі та пилоприготування, інтенсифікацію зношування механізмів та підвищення рівня техногенного забруднення довкілля.

Зростання зольності спричинює збільшення питомої витрати палива, впливає на температурний режим топки, сприяє шлакуванню та зменшенню ефективності теплообміну, тоді як підвищена вологість зумовлює додаткові втрати тепла на сушіння палива, зниження температури факела, зростання об'єму димових газів і збільшення витрат електроенергії на власні потреби.

Таким чином, систематичне зниження якості вугілля українських басейнів – з підвищенням зольності з 24–30 % до 36–44 % та вологості з 7–9 % до 10–11 % за період 1975–2000 рр. – є однією з ключових причин зниження енергоефективності ТЕС і зростання їх негативного впливу на довкілля [11].

Бурштинська ТЕС історично орієнтована на спалювання високозольного кам'яного вугілля Львівсько-Волинського басейну. Високий вміст сірки ( $S > 2,5\text{--}3,5\%$ ) та мінеральних домішок у такому паливі призводить до домінування у викидах  $\text{SO}_2$  та твердих частинок (золи, пилу).

Трипільська ТЕС, яка в різні періоди (зокрема у 2022–2024 рр.) використовувала як вугілля (антрацитовий штиб, пісне вугілля), так і природний газ або мазут для маневрування, демонструє зміщений профіль емісій. При спалюванні природного газу, який практично не містить сірки та золи, основним забруднювачем стають оксиди азоту. Високотемпературний режим горіння газу в камерах згоряння сприяє інтенсивному окисленню атмосферного азоту, формуючи значні обсяги термічних  $\text{NO}_x$ . Тоді як перехід на газове паливо дозволяє майже повністю елімінувати викиди діоксиду сірки та твердих частинок, що радикально змінює характер впливу на респіраторну систему населення, зміщуючи акцент з ризиків, пов'язаних із пилом, на ризики фотохімічного смогу.

На національному рівні великі джерела спалювання вугілля були відповідальні за сотні тисяч тонн  $\text{SO}_2$  та десятки тисяч тонн пилу щорічно (наприклад, дані за 2018 рік:  $\approx 475$  тис. т  $\text{SO}_2$  і  $\approx 148$  тис. т пилу). Галузеві розрахунки для України також вказують на високі фактори емісії: у 2019 р. середній коефіцієнт викидів  $\text{SO}_2$  для ТЕС сягав  $\approx 1180$  г/ГДж, пилу –  $\approx 288$  г/ГДж, що підкреслює чутливість загальних масових викидів до будь-якого погіршення паливної ефективності [25].

За результатами досліджень, Волчином І. та співавт., встановлено, що річні викиди діоксиду сірки на ТЕС України сягають близько 600 тис. тонн на рік. У 2019 році їхні середні концентрації склали  $3506 \text{ мг/нм}^3$ , зокрема  $2674 \text{ мг/нм}^3$  при спалюванні вугілля марок А та П, та  $3667 \text{ мг/нм}^3$  – для марок Г та ДГ. Середнє питоме значення викидів  $\text{SO}_2$  становило  $14,4 \text{ г/кВт}\cdot\text{год}$  виробленої електроенергії, тоді як цей показник для сучасних вугільних електростанцій ЄС дорівнює лише  $1,2 \text{ г/кВт}\cdot\text{год}$  [3].

Упродовж останніх років на ТЕС України було викинуто близько 140 тис. тонн пилу. Середня концентрація пилу в димових газах у 2019 році становила  $759 \text{ мг/нм}^3$ . При цьому для котлів із мокрим шлаковидаленням та електрофільтрами з довжиною електродів менше 12 м вона становила  $964 \text{ мг/нм}^3$ , для таких же котлів із електродами понад 12 м –  $495 \text{ мг/нм}^3$ , а для котлів із сухим шлаковидаленням –  $1092 \text{ мг/нм}^3$ . Середнє питоме значення викидів пилу складало  $3,4 \text{ г/кВт}\cdot\text{год}$  відпущеної електроенергії, порівняно з  $0,2 \text{ г/кВт}\cdot\text{год}$  – рівнем, що є характерними для поточного рівня вугільних ТЕС країн Європейського Союзу [17].

Національним планом скорочення викидів передбачено зниження валових викидів  $\text{SO}_2$  до 51,0 тис. тонн, а пилу – до 5,2 тис. тонн у 2028 році. Крім того, починаючи з 1 січня 2029 року Україна зобов'язана забезпечити відповідність концентрації  $\text{SO}_2$  у димових газах теплових електростанцій, яка не має перевищувати  $200 \text{ мг/нм}^3$ , а для пилу –  $20 \text{ мг/нм}^3$ , як того вимагає Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди [6].

Для досягнення таких європейських екологічних показників необхідно кардинально підвищити ефективність наявних систем газоочистки та встановити нові сучасні установки з ефективністю очищення не менше ніж 96 %.

Реалізація цього плану спрямована на зменшення техногенного навантаження ТЕС, зниження обсягів викидів  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  та пилу, а також гармонізацію екологічних стандартів України з європейськими (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Нормативні показники гранично допустимих викидів для енергетичних установок із номінальною тепловою потужністю понад 500 МВт (за даними [2, 3, 4])

| Установки | Гранично допустимі викиди відповідно до наказу Міністерства екології та природних ресурсів № 62 від 16.02.2018, мг/м <sup>3</sup> |                           |                           | Гранично допустимі викиди відповідно директиви 2001/80/EC (LCPD), мг/м <sup>3</sup> |                           |                           | Гранично допустимі викиди відповідно директиви 2010/75/EC, мг/м <sup>3</sup> |                           |                           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
|           | Суспендовані тверді частинки, 2018 р.                                                                                             | NO <sub>x</sub> , 2018 р. | SO <sub>2</sub> , 2018 р. | Суспендовані тверді частинки, 2023 р.                                               | NO <sub>x</sub> , 2023 р. | SO <sub>2</sub> , 2023 р. | Суспендовані тверді частинки, 2027 р.                                        | NO <sub>x</sub> , 2027 р. | SO <sub>2</sub> , 2027 р. |
| Існуючі   | 50                                                                                                                                | 200                       | 5100                      | 50                                                                                  | 200                       | 400                       | 20                                                                           | 200                       | 200                       |
| Нові      | 10                                                                                                                                | 150                       | 400                       | 30                                                                                  | 200                       | 200                       | 10                                                                           | 150                       | 150                       |

Водночас відсутність або недостатність систем очищення димових газів – зокрема для оксидів сірки та азоту – суттєво обмежує можливості контролю цих викидів. Так, у науковій публікації Volchyn I. та співавт. (2021) зазначають, що середні питомі викиди SO<sub>2</sub> в Україні сягають ~14,4 г/(кВт·год), тоді як типове значення для сучасних теплових електричних станцій ЄС становить ~1,2 г/(кВт·год) [3]. Отже, технологічний профіль сектору створює високі базові емісії, що ускладнює завдання моніторингу якості повітря – зокрема через підвищену навантаженість мереж спостереження, циклів контролю і верифікації.

До основних забруднювальних речовин, що містяться у димових газах котлів ТЕС належать дрібнодисперсні тверді частинки, діоксид і триоксид сірки (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>), монооксид вуглецю (CO), оксиди азоту (NO, NO<sub>2</sub>), оксиди важких металів (ртуть, свинець, кадмій тощо), а також сполуки ванадію, переважно у формі пентаоксиду ванадію (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Окрім газоподібних складників, значну небезпеку становить і зола, яка містить токсичні метали та мікроелементи.

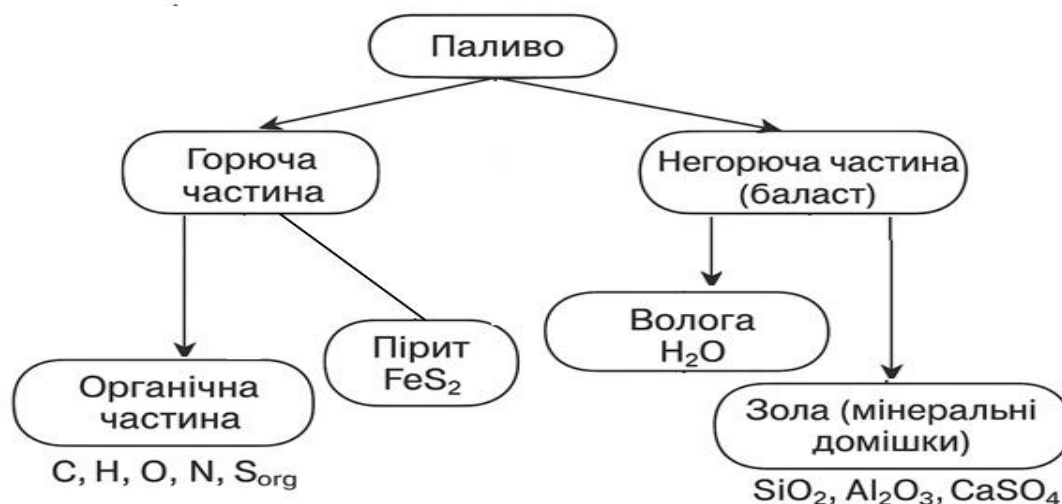


Рисунок 3.5 – Композиційний аналіз твердого палива

Таким чином, вид та склад палива визначають потенціал викиду: чим «брудніше» паливо (вища зольність, сірка, леткі метали), тим вища екологічна небезпека.

Методи прогнозування рівня забруднення повітряного басейну спираються на результати досліджень, як теоретичного, так і експериментального, що описують закономірності просторово-часового розсіювання домішок, які формуються внаслідок діяльності джерел антропогенного походження [14–15].

Розсіювання викидів у повітряному середовищі залежить від комплексу факторів:

- стану атмосферної стратифікації;
- густини, температури та хімічного складу димових газів;
- висоти та діаметра джерела викиду;
- рельєфу місцевостей та характеру забудови;
- сумарної потужності джерел.

Димові труби об'єктів теплових генерацій належать до складних і відповідальних інженерних споруд, адже їхній технічний стан безпосередньо впливає на ефективність і надійність роботи теплоенергетичних систем, а також визначає економічну доцільність виробництва електроенергії [18]. Під час проектування, будівництва або модернізації енергетичних об'єктів до конструкцій димових труб висувається комплекс вимог, які охоплюють не лише механічну стійкість, довговічність та безпеку експлуатації, а й дотримання екологічних нормативів для запобігання негативному впливу на навколишнє середовище.

Міжнародний досвід експлуатування теплових електростанцій, що використовують різні типи палив, засвідчує, що вихід з ладу навіть одного елемента системи газовідведення може суттєво знизити загальну ефективність генерації енергії. Пошкодження або деградація димових труб часто призводить до розширення зони розповсюдження продуктів згоряння, що збільшує рівень забруднення атмосферного повітря та ризики для довкілля [11].

Для діючих енергетичних підприємств одним із головних екологічних ризиків є невідповідності конструктивних параметрів димових труб фактичним режимам роботи станції. У випадку нових об'єктів або реконструкції існуючих особливу увагу приділяють не лише технічним аспектам (ефективності роботи газоочисних систем, тягодутного обладнань), але й природно-географічним характеристикам території – рельєфу місцевості, мікрокліматичним умовам, а також фізико-хімічним властивостям палива, що використовується.

Оптимізація висоти та конструкції димових труб, з урахуванням параметрів атмосфери та типу палива, дає змогу зменшити масштаби поширення продуктів згоряння і, відповідно, знизити рівень техногенного навантаження на довкілля. Такі рішення сприяють не лише підвищенню екологічної безпеки функціонування ТЕС, а й формують позитивне суспільне сприйняття енергетичних об'єктів, що особливо важливо в умовах переходу України до стратегії низьковуглецевого розвитку та модернізації старих потужностей.

Димова труба одночасно виконує функцію інженерної споруди та технологічного елемента теплової електростанції, який забезпечує відведення нагрітих, а часто й хімічно агресивних димових газів, що утворюються в процесі спалювання палива.

Схематична модель просторового розподілу концентрацій забруднювальних речовин під димовим факелом високого точкового джерела (рис. 3.6) демонструє, що у зоні перенесення виникають локальні максимуми концентрацій, пов'язані з неорганізованими викидами. Довжина зони димового факела, залежно від метеорологічних умов, може досягати 10–50 висот димової труби.

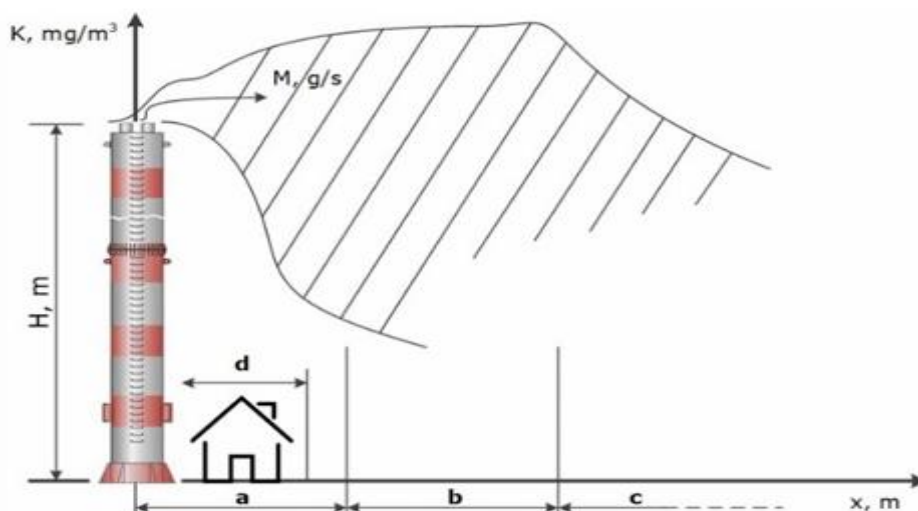


Рисунок 3.6 – Просторова схема дифузії та розсіювання шкідливих домішок у повітряному середовищі поблизу стаціонарного джерела горіння: а – ділянка відхилення факельного потоку; b – зона конденсованого димового шлейфу; c – область поступового розсіювання домішок; d – зона дифузного розсіювання неорганізованих (неконтрольованих) емісій [29]

На рис. 3.6 представлено, що максимальна концентрація шкідливої речовини ( $K$ ) у приземному шарі повітря знаходиться у прямій залежності від масової швидкості її викиду ( $M$ ) та в оберненій залежності від квадрата висоти джерела емісії ( $H^2$ ).

Підвищені концентрації токсичних речовин у повітрі справляють негативний вплив на біосферу, зумовлюючи погіршення стану здоров'я населення, зниження продуктивності сільськогосподарських культур, активацію корозійних процесів у будівельних конструкціях і передчасне зношування будівель та обладнання.

Для оцінки безпечності рівня забруднення атмосферного повітря використовують показники гранично допустимих концентрацій (ГДК), що визначають максимально разовий (ГДК<sub>м.р.</sub>) та середньодобовий (ГДК<sub>с.д.</sub>) рівні шкідливих домішок у приземному шарі атмосфери – на висоті дихання людини.

Показники ГДК для основних речовин, що утворюються на об'єктах теплоенергетичного комплексу, наведено у табл. 3.6, де відображено допустимі межі впливу для підтримання екологічної рівноваги та санітарно-гігієнічної безпеки.

Таблиця 3.6 – Регламентовані межі вмісту шкідливих речовин у повітрі життєвого простору людини

| Речовина                                         | Формула                         | ГДК <sub>м.р.</sub> , мг/м <sup>3</sup> | ГДК <sub>с.д.</sub> , мг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Діоксид азоту                                    | NO <sub>2</sub>                 | 0,085                                   | 0,04                                    |
| Оксид азоту                                      | NO                              | 0,6                                     | 0,06                                    |
| Діоксид сірки                                    | SO <sub>2</sub>                 | 0,5                                     | 0,05                                    |
| Бенз(а)пірен                                     | C <sub>20</sub> H <sub>16</sub> | –                                       | 10 <sup>-6</sup>                        |
| Пентаоксид ванадію                               | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | –                                       | 0,002                                   |
| Чадний газ                                       | CO                              | 5                                       | 3                                       |
| Аміак                                            | NH <sub>3</sub>                 | 0,2                                     | 0,04                                    |
| Сірководень                                      | H <sub>2</sub> S                | 0,008                                   | –                                       |
| Сажа                                             | –                               | 0,15                                    | 0,05                                    |
| Неорганічний пил, що містить діоксид кремнію, %: |                                 |                                         |                                         |
| >70                                              | –                               | 0,15                                    | 0,05                                    |
| 20–70                                            | –                               | 0,3                                     | 0,1                                     |
| <20                                              | –                               | 0,5                                     | 0,15                                    |
| Зола вугілля ТЕС                                 | –                               | 0,05                                    | 0,02                                    |

Додатковим підтвердженням масштабності впливу є моніторинг хімічного складу снігового покриву, який виступає індикатором сумарного техногенного навантаження. Як показано у дослідженні Myllyvirta L. та Gierens R. [37], у зразках снігу, відібраних поблизу ТЕС, фіксується накопичення золи, важких металів (Cd, Pb, Zn, Ni) та мікрочастинок

техногенного походження. Під час весняного танення ці елементи мігрують у поверхневі води та ґрунти, формуючи вторинний канал забруднення, що посилює кумулятивний екологічний ефект.

Для Бурштинської ТЕС, яка працює переважно на кам'яному та частково бурому вугіллі, характерні протяжні шлейфи  $\text{SO}_2$  та  $\text{PM}_{2.5}$  довжиною 20–40 км, що формуються в умовах переважно західних і північно-західних вітрів. У підвітряних районах (Бурштин – Галич – Рогатин) постійно фіксуються локальні піки концентрацій  $\text{SO}_2$  у холодний період року. Для Трипільської ТЕС протяжність шлейфів залежить від роботи мазутних блоків: у періоди мазутного навантаження забруднений шлейф є коротшим, але значно токсичнішим, тоді як при спалюванні кам'яного вугілля утворюється типовий  $\text{NO}_2$ – $\text{SO}_2$  шлейф, який тягнеться у напрямку Обухів – Київ на дистанції 15–35 км.

### **3.3 Оцінка просторово-часової диференціації забруднення повітряного басейну в зоні впливу ТЕС України**

Поля концентрацій атмосферних забруднювачів у районах розміщення теплоенергетичних об'єктів характеризуються вираженою просторовою неоднорідністю, що зумовлено комплексною дією метеорологічних, топографічних та технологічних чинників. Просторове зонування навколо теплових електростанцій свідчить, що радіус підвищених концентрацій дрібнодисперсних частинок ( $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ ) і діоксиду азоту може сягати декількох десятків кілометрів, залежно від висоти димових труб, напрямку вітру, характеру турбулентності атмосфери та режиму навантаження енергоблоків. За результатами досліджень Волчина І. та співавт., вміст діоксиду сірки у димових газах українських ТЕС у 2017–2018 рр. коливався в діапазоні 1520–5900 мг/Нм<sup>3</sup>, що свідчить про значні коливання ефективності горіння та відсутність стабільної системи десульфуризації [23].

На рис. 3.7 подано схему впливу ТЕС з конденсаційними паротурбінними установками (наявні як на Бурштинській, так і Трипільській ТЕС) на навколишнє середовище. Зображення демонструє, що під час експлуатації ТЕС відбувається негативний вплив на всі складові біосфери – атмосферу, гідросферу та літосферу.

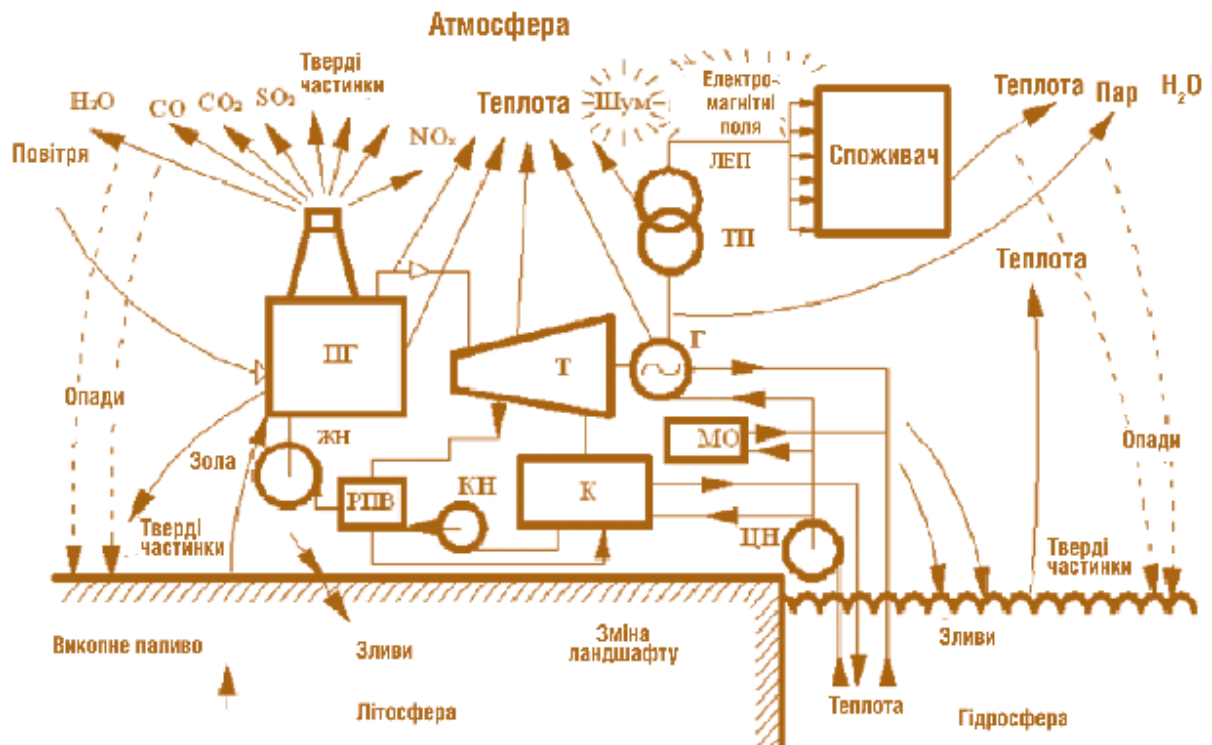


Рисунок 3.7 – Принципова схема взаємодії основних елементів теплових електричних станцій з довкіллям: ПГ – парогенератор; Т – турбіна; К – конденсатор; ЖН, КН, ЦН – живильні, конденсаторні та циркуляційні насоси відповідно; РПВ – регенеративний підігрів живильної води; Г – електрогенератор; МО – масоохолоджувач; ТП – трансформаторна підстанція; ЛЕП – лінії електропередач

Одним із ключових чинників цього впливу є інтенсивне забруднення атмосферного повітря продуктами згоряння (рис. 3.8), зокрема твердими частинками (пилом). ТЕС виступають одними з найбільших емітентів пилу, обсяг викидів якого залежить від складу палива та ефективності систем очищення. Встановлено, що впровадження технологій збагачення вугілля дає змогу зменшити кількість твердих частинок у викидах на 35–40%. Для прикладу, електростанція потужністю 1 ГВт, спалюючи близько 3 млн тонн вугілля, щорічно викидає до 120 тис. тонн діоксиду сірки і 20 тис. тонн оксидів азоту, доповнюючи ці обсяги значною масою пилових частинок.

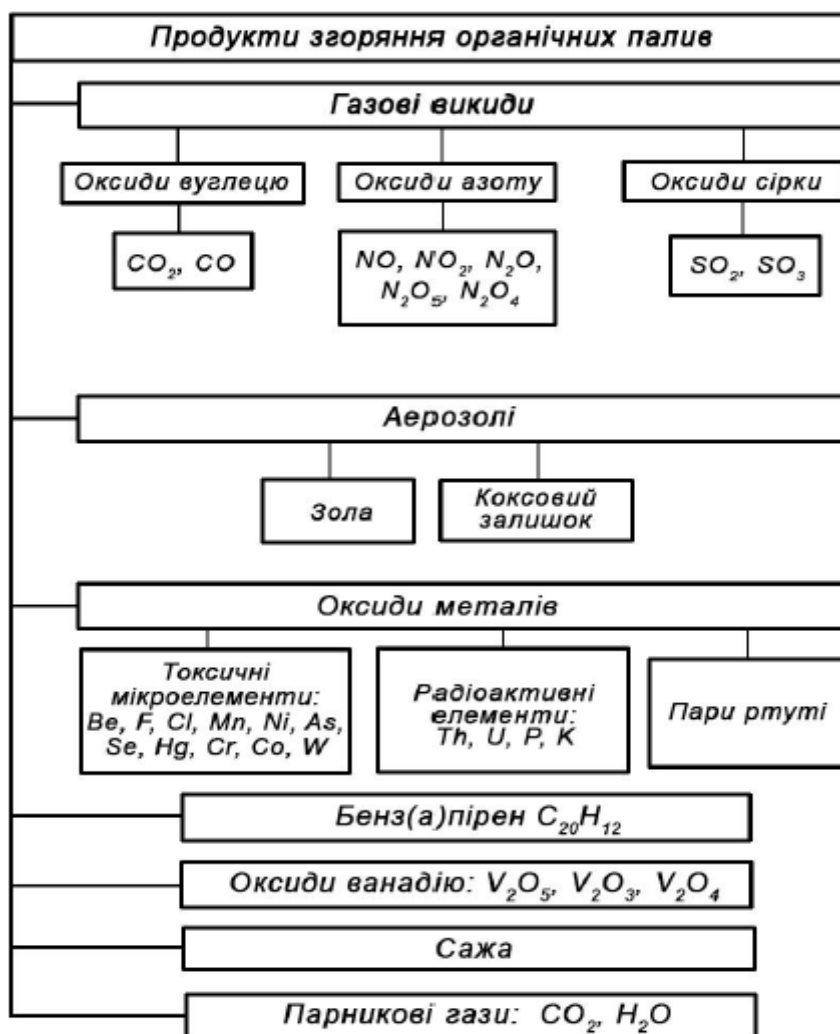


Рисунок 3.8 – Токсичні продукти згорання органічних палив, які становлять загрозу для довкілля та здоров'я людини

За супутниковими спостереженнями Sentinel-5P та CAMS, для Бурштинської ТЕС характерний виражений сірковий шлейф (SO<sub>2</sub>), який при стійкій стратифікації атмосфери поширюється у межах 20–40 км у напрямках Галич—Рогатин. Відсутність помітних природних бар'єрів сприяє «стелінню» шлейфу та рівномірному охопленню значних територій з підвищеними концентраціями SO<sub>2</sub> і PM<sub>2.5</sub>.

На відміну від цього, Трипільська ТЕС формує переважно азотний шлейф (NO<sub>2</sub>), вплив якого визначається формою долини Дніпра, що створює каналізуючий напрям перенесення домішок у бік Обухова, Українки та Києва. Саме ця особливість пояснює утворення витягнутих смуг підвищених концентрацій NO<sub>2</sub> протягом усього року та формування літніх максимумів озону (O<sub>3</sub>).

Токсикологічна небезпека пилу зумовлена не лише його дрібнодисперсністю, що забезпечує глибоке проникнення в дихальні шляхи людини, а й його функцією носія вторинних забруднювачів. Тверді частинки

служать адсорбційною поверхнею для важких металів (Cd, As, Pb, Cr), які належать до найбільш небезпечних токсикантів. Подальше осадження пилу на поверхні ґрунту та рослин через процеси сухого й вологого випадіння є основним механізмом перенесення цих забруднювачів у наземні екосистеми, спричиняючи їх деградацію та втрату екологічної стійкості.

Рис. 3.9 ілюструє помірну стабільність або слабке зростання рівнів  $\text{NO}_2$  над Бурштинською ТЕС за останні 15 років, що відображає тривалу залежність виробництва електроенергії від вугільного палива й обмежені успіхи у скороченні атмосферних викидів оксидів азоту.

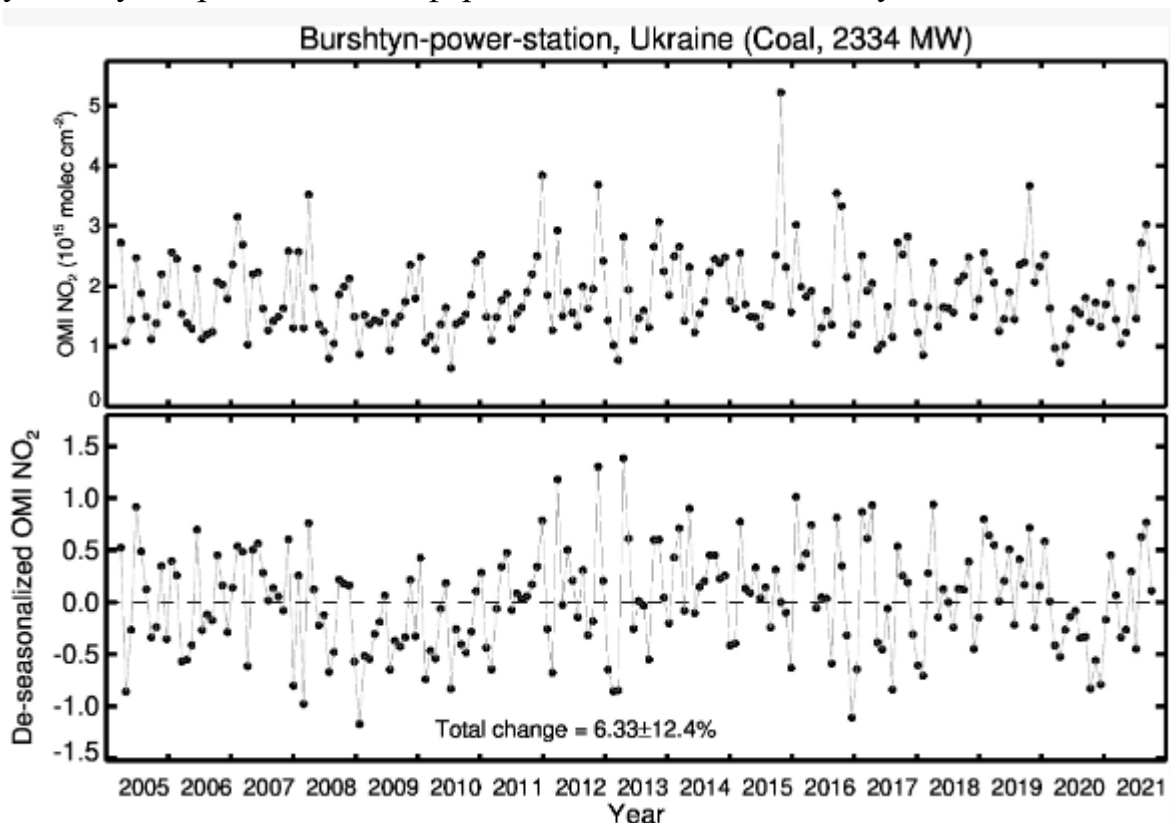


Рисунок 3.9 – Динаміка концентрацій діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ), зафіксованих за допомогою супутникових спостережень ОМІ (Ozone Monitoring Instrument) над Бурштинською тепловою електростанцією (Україна, вугільна потужність 2366 МВт) упродовж 2005–2021 рр.

Верхня панель відображає часовий ряд щомісячних середніх значень колонного вмісту  $\text{NO}_2$  ( $10^{15}$  молекул/ $\text{cm}^2$ ), що характеризуються вираженою сезонною мінливістю із підвищенням у холодний період року та зниженням у літній сезон, зумовленим інтенсивністю спалювання палива та фотохімічними процесами руйнування оксидів азоту. На графіку простежуються окремі пікові значення, зокрема у 2013–2015 рр., які можуть бути пов'язані зі збільшенням виробництва електроенергії або метеорологічними умовами, що обмежують розсіювання викидів. Нижня панель демонструє десеоналізовані значення ОМІ  $\text{NO}_2$ , що дозволяють

оцінити довгострокову тенденцію зміни рівня атмосферного забруднення без впливу сезонних коливань. Спостерігається відносна стабільність показників упродовж досліджуваного періоду, без суттєвого тренду до зростання чи зниження. Загальна зміна концентрацій  $\text{NO}_2$  за 2005–2021 рр. становить  $+6,33 \pm 12,4 \%$ , що свідчить про незначне зростання в межах статистичної похибки.

Можна зробити висновок, що упродовж 2005–2021 рр. рівень викидів  $\text{NO}_2$  від Бурштинської ТЕС залишався відносно стабільним із незначними міжрічними коливаннями. Незначне підвищення після 2015 р. може бути пов'язане з експортом електроенергії до ЄС (через інтеграцію у Бурштинський енергетичний острів).

Отримані результати вказують на відсутність істотного зменшення викидів оксидів азоту від Бурштинської ТЕС, що може бути пов'язано з обмеженою модернізацією технологій спалювання вугілля та недостатньою ефективністю природоохоронних заходів у контексті переходу до низьковуглецевої енергетики.

На відміну від цієї локальної ситуації, середні показники викидів  $\text{NO}_x$  у країнах Європейського Союзу за аналогічний період продемонстрували суттєве скорочення – на понад 45–50 % [17]. Така різниця пояснюється впровадженням у ЄС масштабних політик декарбонізації, переходом на природний газ і відновлювані джерела енергії, а також ужорсточенням екологічних норм для промислових установок. Тоді як у 2020 р. на тлі локдаунів спостерігалися різкі короткочасні падіння (на десятки відсотків у мегаполісах), які згодом частково відновилися.

Отже, стабільність або незначне зростання супутниково визначених концентрацій  $\text{NO}_2$  над Бурштинською ТЕС може розглядатися як індикатор повільного впровадження заходів із підвищення екологічної ефективності вугільної генерації в Україні. Це підкреслює необхідність комплексної модернізації енергетичного сектору із застосуванням технологій зниження оксидів азоту, переходу до низьковуглецевих джерел енергії та гармонізації екологічних стандартів із вимогами ЄС.

Згідно з результатами досліджень, проведених Сердюк А. М., Турос О. І. та співавторами, моніторинг забруднення атмосферного повітря бенз(а)піреном здійснювався у напрямку домінуючого перенесення димового факела Трипільської ТЕС. Для цього було організовано шість пунктів відбору проб, розміщених на різних відстанях від джерела викидів – у межах від семи до тридцяти висот димових труб (орієнтовно від 1 до 8 км).

Отримані дані свідчать про стабільно підвищений рівень забруднення атмосферного повітря в межах приблизно 10 км від джерела емісії. Максимальні концентрації бенз(а)пірену фіксувалися в зоні до 6 км, де

середній показник становив  $(9,8 \pm 1,7)$  нг/м<sup>3</sup>. Після досягнення пікових значень відмічено різке зниження концентрацій – на відстані 7 км вони склали  $(6,1 \pm 0,9)$  нг/м<sup>3</sup>, а на 8 км –  $(4,5 \pm 0,8)$  нг/м<sup>3</sup> (рис. 3.10).

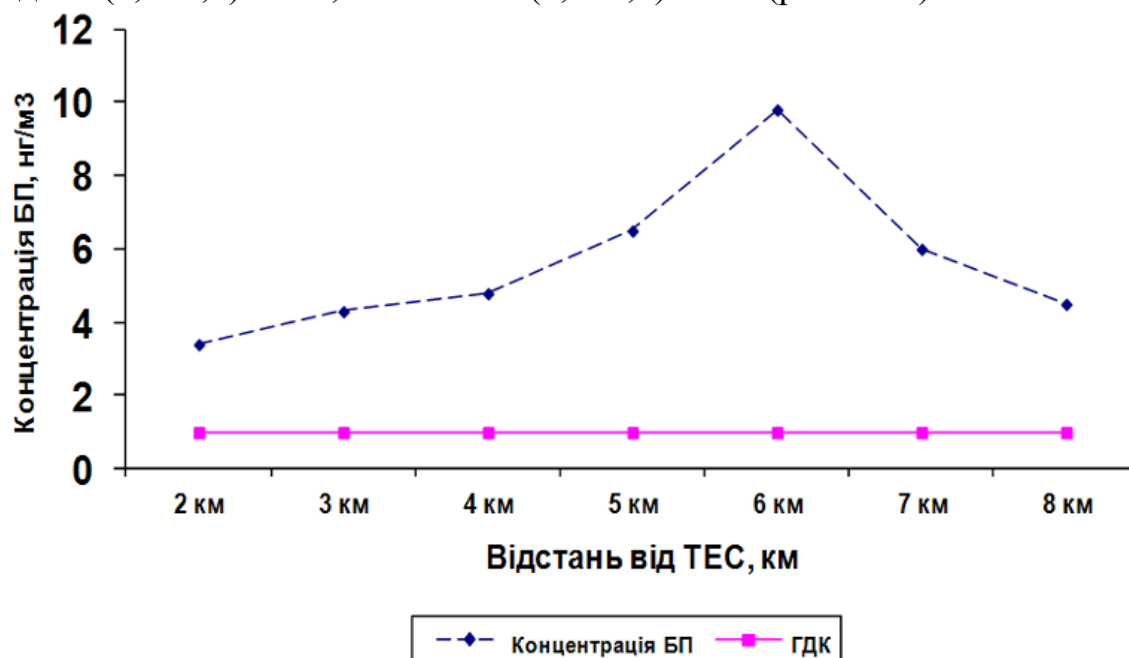


Рисунок 3.10 – Просторовий розподіл концентрації бенз(а)пірену в атмосферному повітрі в зоні впливу викидів димових газів Трипільської ТЕС (розроблено Сердюк А. М. та інші )

Науковцями Сердюк А.М. та Турос О.І. та співавторами, здійснено також аналіз атмосферного повітря, відібраного на відстані близько 8 км від електростанції у напрямку факела викидів. Встановлено наявність наночастинок із середнім діаметром близько 32 нм. При цьому основна частка наночастинок, за кількісним розподілом, мала характерний розмір близько 10 нм. У межах підфакельних проб зафіксовано наночастинок діапазоном від 5 до 160 нм, що свідчить про значну варіабельність дисперсного складу аерозолі. Графічну інтерпретацію розподілу наночастинок у поглинальному розчині наведено на прикладі проби, відібраної в зоні підфакельного впливу (рис. 3.11).

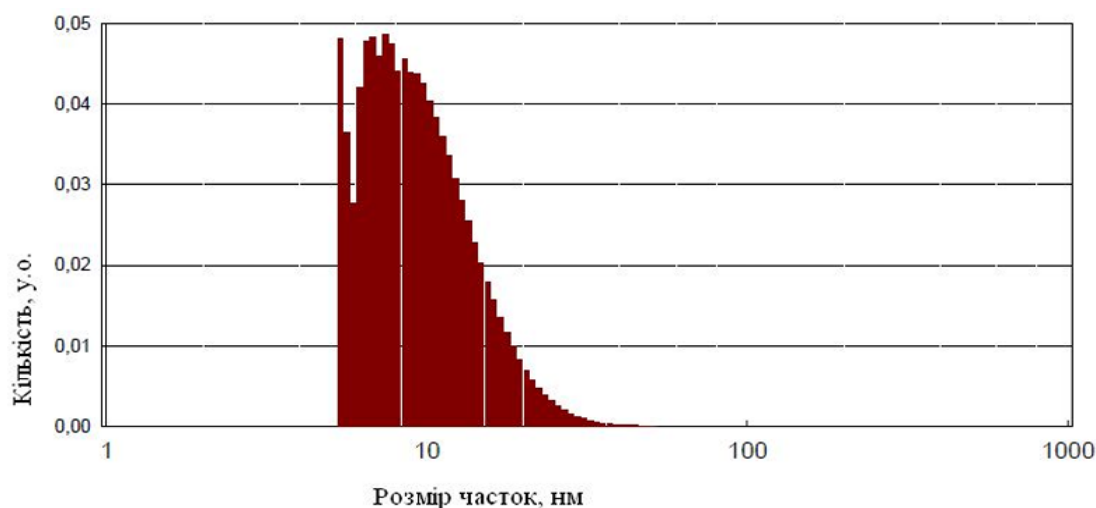


Рисунок 3.11 – Варіація розмірів наночастинок у поглинальному розчині за кількісними показниками (розроблено Сердюк А. М. та інші )

Аналіз емісійних характеристик Трипільської ТЕС, здійснений науковцями Сердюк А. М., Турос О. І. та співробітниками, дозволив ідентифікувати стійке перевищення вмісту бенз(а)пірену в атмосферному повітрі підфакельної зони. Встановлено, що частка сполук, зв'язаних із наночастинами, коливається в межах 19,1–30,0 %, що свідчить про високу здатність бенз(а)пірену до сорбції на аерозольних структурах нанорозмірного рівня. Це обумовлює значний ризик для здоров'я людини, підсилюючи токсикологічний ефект через здатність таких частинок проникати у глибокі шари легеневої тканини та спричиняти канцерогенні зміни.

У ході проведених Сердюк А. М., Турос О. І. та співавторами досліджень щодо впливу золошлаковідвалу Трипільської ТЕС на якість атмосферного повітря здійснено відбір проб у 2-х контрольних пунктах, розташованих на північ від місця складування техногенних відходів. Першу пробу (т. 1) відібрано в межах житлової забудови м. Українка, на відстані близько 460 м від об'єкта, другу (т. 2) – у межах прилеглої лісосмуги, що знаходиться орієнтовно за 240 м від золошлаковідвалу.

Отримані результати засвідчили суттєве перевищення гранично допустимих концентрацій пилу, збагаченого діоксидом кремнію – специфічним компонентом техногенного походження, притаманним золошлаковим відходам ТЕС. Встановлено, що рівень забруднення повітря цим компонентом перевищував нормативи до 9,2 разів. Додатково зафіксовано наднормативний вміст сполук хрому, який сягав 2,1 ГДК, що свідчить про їхній антропогенний характер.

Виявлення підвищених концентрацій пилу та сполук хрому за межами мінімально припустимої санітарно-захисної зони (300 м) підтверджує порушення регламентів щодо контролю та пригнічення пиловиділення на

території золошлаковідвалу, який виступає основним джерелом атмосферного пилу у локальній екосистемі. Забруднення хромовмісними сполуками обумовлено тим, що зола, яка утворюється під час спалювання вугілля на Трипільській ТЕС, містить домішки сполук цього металу.

Паралельно проведений аналіз ґрунтового покриву в зоні впливу об'єкта виявив наявність точкового забруднень сполуками кадмію. Це явище з високим ступенем ймовірності пояснюється аерогенним перенесенням пилових часток із території золошлаковідвалу та їх акумуляцією у верхньому горизонті ґрунту (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Кількісні показники вмісту пріоритетних забруднювачів у золошлакових відходах та реципієнтному ґрунті [14]

| Назва проби       | Вміст важких металів, мг/кг. |       |       |      |       |        |       |      |       |
|-------------------|------------------------------|-------|-------|------|-------|--------|-------|------|-------|
|                   | Pb                           | Ni    | Cr    | Cd   | Zn    | Mn     | As    | Hq   | Cu    |
| Проба відходів №1 | 2,19                         | 16,86 | 55,96 | 0,39 | 14,43 | 41,09  | 0,032 |      | 17,17 |
| Проба ґрунту №2   | 9,30                         | 32,88 | 64,52 | 2,33 | 45,96 | 80,17  | 0,041 |      | 12,26 |
| Проба ґрунту №3   | 9,45                         | 30,09 | 50,94 | 4,48 | 48,89 | 102,54 | 0,39  |      | 22,85 |
| ГДК, мг/кг        | 32,0                         | 85,0  | -     | 1,5  | 100,0 | 1500,0 | 2,0   | 2,1  | 55,0  |
| Кларк, мг/кг*     | 10,0                         | 40,0  | 200,0 | 0,5  | 50,0  | 850,0  | 5,0   | 0,01 | 20,0  |

**Примітка.** \* Кларк (природний світовий фон середнього вмісту хімічних елементів у ґрунті).

У пробі ґрунту, відібраній на відстані приблизно 2 км на південний захід від об'єкта, встановлено перевищення концентрації кадмію у 3 рази відносно ГДК, тоді як вміст кларку перевищує норматив у 9 разів.

Міграція забруднювальних речовин може відбуватися аерогенним шляхом унаслідок підйому часток пилу з поверхні відкладень під впливом вітрової ерозії, що обумовлено недостатньою ефективністю заходів із контролю пиловиділення на території золошлаковідвалу. Частки пилу, забруднені важкими металами, осідають на прилеглих територіях, забруднюючи верхній ґрунтовий шар, з якого токсичні сполуки разом з атмосферними та тало-водами надходять у ґрунтові води.

Слід відмітити, що міграція забруднень може реалізовуватися водними шляхами через фільтрацію промивних вод із золошлаковідвалу, що зумовлено відсутністю або недостатньою ефективністю протифільтраційних систем при будівництві та експлуатації об'єкта.

Радіонукліди, що надходять у повітряний басейн внаслідок викидів теплоелектростанцій, здатні потрапляти в організм людини через вдихання, спричиняючи внутрішнє опромінення. Величина такого опромінення визначається активністю радіонуклідів у приземному повітрі, обсягом вдихуваного повітря та відповідними дозовими коефіцієнтами. Для оцінки об'ємної активності радіонуклідів у зоні впливу Трипільської ТЕС, науковці Сердюк А. М., Турос О. І. та ін., застосовували модель Гауса для переносу газових викидів.

Розрахунки активності радіонуклідів проводили на серії відстаней від джерела викиду: 800 м, 1000 м, 1300 м, 1500 м, 3000 м, 5000 м та 9000 м, з урахуванням напрямку переносу викидів у кутовому секторі  $45^\circ$ . На основі визначеної величини легкої золи, що вивільнюється в атмосферу ( $0,55 \text{ кг/с}$ ), та середньої питомої активності Ra-226 у легкій золі ( $240 \text{ Бк/кг}$ ), потужністю викиду Ra-226 на рівні  $132 \text{ Бк/с}$ ; для Th-232 становила  $38,5 \text{ Бк/с}$  за середньої активності  $70 \text{ Бк/кг}$  у легкій золі.

Результати розрахунків дозволили оцінити активність радіонуклідів Ra-226 та Th-232 у приземному шарі атмосфери на різних відстанях від ТЕС (рис. 3.12).

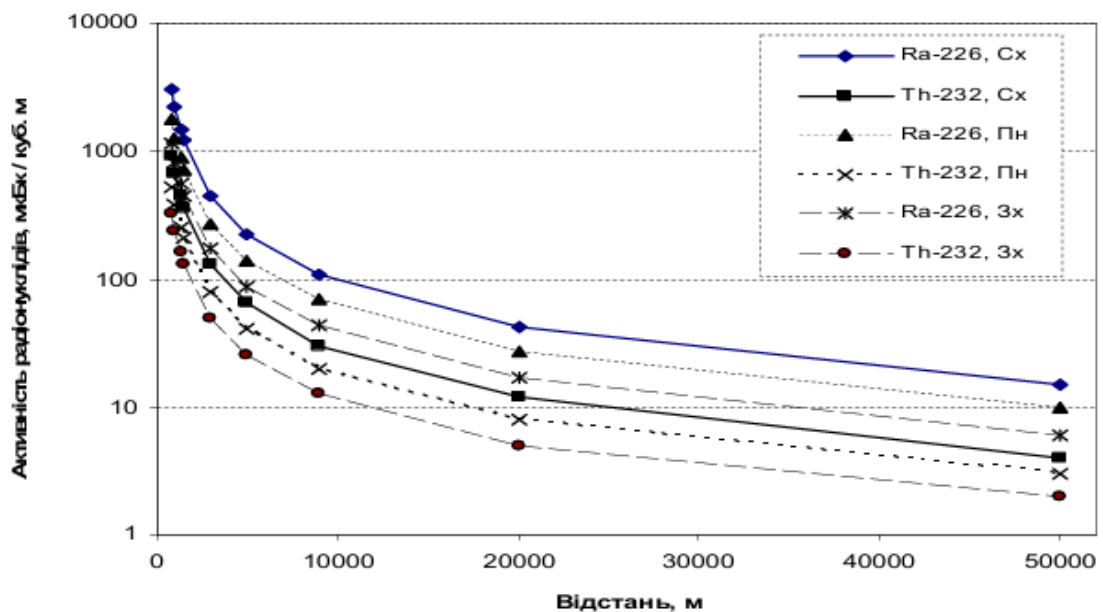


Рисунок 3.12 – Приземна активність радіонуклідів у атмосфері в зоні впливу Трипільської ТЕС [21]

Аналізуючи дані щодо активності радіонуклідів у приземному повітрі на різних відстані від Трипільської ТЕС, зокрема на основі рис. 3.12, дозволяє зробити висновок, що найбільша концентрація радіонуклідів осідає переважно на території в радіусі до 5 км від джерела викиду. Враховуючи, що висота димової труби станції становить 180 м, а максимальне розповсюдження викидів може досягати 50 висот труби, потенційна зона

осідання забруднювачів сягає близько 9 км, а за несприятливих метеорологічних умов – і більшої відстані.

Оцінки накопичених викидів радіонуклідів за 44 роки експлуатації ТЕС (Ra-226 –  $1,8 \times 10^5$  МБк, Th-232 –  $5,4 \times 10^4$  МБк, K-40 –  $4,3 \times 10^5$  МБк) з припущенням, що 90 % від загальної кількості осідає в радіусі 9 км, дозволяють визначити осідання на одиницю площі: Ra-226 – 650 Бк/м<sup>2</sup>, Th-232 – 190 Бк/м<sup>2</sup>, K-40 – 510 Бк/м<sup>2</sup>. При врахуванні подальшої міграції радіонуклідів у ґрунтовий покрив значення зменшуються приблизно на 27 %, становлячи для Ra-226 – 180 Бк/м<sup>2</sup>, Th-232 – 50 Бк/м<sup>2</sup>, K-40 – 410 Бк/м<sup>2</sup>.

Таким чином, отримані результати свідчать про значну концентрацію радіонуклідів у зоні до 9 км від Трипільської ТЕС та про потенційний ризик їх накопичення у ґрунтовому шарі, що підкреслює необхідність постійного моніторингу радіаційного навантаження на прилеглі території та оцінки його екологічних наслідків.

Оскільки разом із вугільною сировиною у топкові камери теплових електростанцій надходить значна частка пустих порід – зокрема сланців, що містить природні радіоактивні елементи (урану-238 та торію-232), – утворювані під час горіння частинки золи набувають підвищеної радіоактивності. Потрапляючи в атмосферу через димові труби, вони формують джерело додаткового іонізуючого випромінювання на прилеглих територіях, що спричинює радіоактивне забруднення атмосферного повітря, ґрунтового покриву та наземних екосистем.

Для генерації електроенергії використовують органічне паливо – переважно кам'яне вугілля, у складі якого, як і в більшості викопних ресурсів, містять природні радіонукліди. Серед них домінують ізотопи калію-40, а також компоненти уранового (<sup>238</sup>U) і торієвого (<sup>232</sup>Th) радіоактивних рядів. У процесі згоряння вугілля мінеральна частина палива зазнає плавлення з утворенням склоподібних шлакових залишків, тоді як летка зола виноситься потоком гарячих газів. Її частина, залежно від ефективності пилогазоочисних систем, виноситься в атмосферу, де стає носієм радіоактивних ізотопів (формуючи вторинне джерело викидів). Таким чином, теплові електростанції можна розглядати як техногенні об'єкти, що здійснюють перерозподіл природних радіоактивних ізотопів у біосфері, посилюючи рівень опромінення населення та навколишнього середовища.

За результатами досліджень [27], проведеного на Бурштинській ТЕС, підтвердили наявність у вугіллі, так і у продуктах його згоряння (зола та шлак) значних концентрацій природних радіонуклідів калію-40, а також ізотопів уранових та торієвих рядів. Встановлено, що питома активність цих радіонуклідів у вугіллі становить  $16 \pm 4$  –  $338 \pm 35$  Бк/кг, у золі –  $31 \pm 7$  – 558

$\pm 53$  Бк/кг, а в шлаку –  $35 \pm 7 - 625 \pm 55$  Бк/кг. Простежено тенденцію зростання питомої активності радіонуклідів у продуктах згоряння: у золі цей показник збільшується в середньому у  $1,6 \pm 0,3$  рази, а у шлаку – у  $2,1 \pm 0,3$  рази відносно початкового рівня у вугіллі. Це свідчить про концентрування природних ізотопів у твердих залишках спалювання.

Таблиця 3.8 – Питома активність природних радіонуклідів у вугіллі, золі та шлакових відходах Бурштинської теплової електростанції

| Радіонуклід | Питома активність радіонуклідів, Бк/кг |              |              |
|-------------|----------------------------------------|--------------|--------------|
|             | у вугіллі                              | у золі       | у шлаці      |
| 40 K        | 338 $\pm$ 35                           | 558 $\pm$ 53 | 625 $\pm$ 55 |
| 214Bi       | 58 $\pm$ 8                             | 103 $\pm$ 13 | 123 $\pm$ 13 |
| 226Ra       | 105 $\pm$ 15                           | 192 $\pm$ 18 | 247 $\pm$ 22 |
| 208Tl       | 16 $\pm$ 4                             | 31 $\pm$ 7   | 35 $\pm$ 7   |
| 232Th       | 49 $\pm$ 7                             | 68 $\pm$ 9   | 97 $\pm$ 10  |
| 212Pb       | 57 $\pm$ 8                             | 100 $\pm$ 11 | 122 $\pm$ 12 |
| 214Pb       | 65 $\pm$ 10                            | 85 $\pm$ 12  | 120 $\pm$ 14 |
| 212Bi       | 45 $\pm$ 7                             | 71 $\pm$ 10  | 116 $\pm$ 13 |
| 228Ac       | 51 $\pm$ 7                             | 66 $\pm$ 10  | 92 $\pm$ 14  |

Радіоактивні частинки, що виходять із димових труб, розсіюються в атмосфері, утворюючи просторове поле концентрації, інтенсивність якого знижується із віддаленням від джерела. Геометрія та щільність цього поля визначаються низкою факторів, зокрема масою викинутих частинок, їх розмірами, швидкістю виходу димових газів, висотою труби, об'ємом повітряного потоку, напрямом і швидкістю вітру, а також вертикальним градієнтом температури повітря. Сукупна дія цих чинників формує просторово-часову структуру радіоактивного навантаження довкілля у зоні впливу ТЕС.

Саме тому, встановлення сучасних систем газоочищення та вискоєфективних електрофільтрів дає змогу знизити рівень радіоактивного забруднення атмосфери у 100–200 разів, що практично відповідає природному фоновому рівню радіації на територіях поблизу теплових електростанцій.

Для вугільних теплових генерацій України найбільш типовими є наявність у складі золи таких потенційно небезпечних мікроелементів, як свинець, мідь, цинк, кадмій, хром і нікель. Як свідчать аналітичні дані (табл. 3.9), у золошлакових відходах, що утворюються в процесі спалювання вугілля на Бурштинській та Трипільській ТЕС, концентрації зазначених токсичних елементів можуть перевищувати нормативні рівні, допустимі для ґрунтового середовища [2, 10, 27].

Таблиця 3.9 – Вміст токсичних мікроелементів у золошлакових відходах, утворених під час спалювання вугілля на теплових електростанціях України

| Хімічний елемент | ГДК у ґрунті, мг/кг | Кларк, мг/кг | Вміст у золошлакових відходах, мг/кг |                 | Вміст у золошлакових відходах, мг/кг                                                                     |
|------------------|---------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |                     |              | Трипільська ТЕС                      | Бурштинська ТЕС |                                                                                                          |
| Цинк (Zn)        | 100,0               | 50           | 229,0                                | 36,6            | I клас. Токсичний важкий метал з високою леткістю                                                        |
| Кадмій (Cd)      | н/д                 | 0,5          | 0,2                                  | 0,9             | I клас. Токсичний важкий метал, уражає дихальну систему та внутрішні органи (печінку, нирки)             |
| Свинець (Pb)     | 32,0                | 10           | 6,7                                  | 23,1            | I клас. Діє на нервову систему                                                                           |
| Мідь (Cu)        | 55,0                | 20           | 28,6                                 | 19,8            | II клас. Викликає захворювання дихальної системи, нервової системи, шлунково-кишкового тракту та печінки |
| Нікель (Ni)      | 85                  | 40           | 5,1                                  | 27,3            | II клас. Уражає органи дихання, має канцерогенні та алергенні властивості                                |
| Хром (Cr)        | н/д                 | 200          | 40,9                                 | н/д             | II клас. Впливає на дихальну систему, серцево-судинну систему та внутрішні органи (печінку, нирки)       |
| Марганець (Mn)   | 1500                | 850          | н/д                                  | 27,3            | III клас                                                                                                 |
| Залізо (Fe)      | н/д                 | 38000        | 1014,65                              | н/д             | III клас                                                                                                 |
| Алюміній (Al)    | н/д                 | 71300        | 1088,61                              | н/д             | III клас                                                                                                 |

Примітка: н/д – немає даних

Окрім основних шкідливих макрокомпонентів золошлакових відходів, у їхньому складі виявляється значна кількість мікроелементів, що належать до I–III класів небезпеки. Концентрації окремих токсичних мікроелементів у золошлакових відкладеннях та прилеглих ґрунтах нерідко суттєво перевищують їхні кларкові значення у земній корі та перевищують гранично допустимі концентрації, встановлені санітарними нормами. Такі домішкові компоненти прийнято відносити до категорії потенційно токсичних елементів. Їхній спектр переважно охоплює важкі метали, серед яких зустрічаються й природні радіоактивні елементи – торій, уран тощо.

Вміст цих небезпечних компонентів безпосередньо визначається маркою та геохімічною характеристикою вугілля, що використовується на станції, адже різні родовища мають відмінний елементний склад. Відповідно, золошлакові залишки від спалювання вугілля різного походження суттєво різняться за вмістом важких і радіоактивних металів, що формує різний рівень екологічної небезпеки техногенного походження.

### **3.4 Верифікація викидів ТЕС за супутниковими реаналізами (CAMS, ERA5) та порівняльний аналіз сезонних патернів забруднення**

Сучасний моніторинг стану атмосферного повітря у зоні впливу теплових електростанцій дедалі частіше ґрунтується на поєднанні супутникової інформації, продуктів глобальних і регіональних реаналізів та наземних вимірювань. Серед найбільш інформативних інструментів — CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) та ERA5 (реаналіз ECMWF), які забезпечують просторово-узгоджену, багаторічну та кліматично вивірену інформацію про концентрації атмосферних забруднювачів та метеорологічні параметри.

Для Бурштинської ТЕС, що історично працювала на високозольному вугіллі, переважають викиди  $\text{SO}_2$  і твердих частинок; за умов частих зимових інверсій Передкарпаття, зумовлених долинним рельєфом, вони акумулюються у приземному шарі, формуючи зимові піки забруднення (CAMS/ERA5, 2015–2024). Критичне розташування Бурштинської ТЕС у заплавної долині річки Гнила Липа посилює ефект акумуляції поллютантів, оскільки стабільність атмосфери та низька висота шару перемішування взимку обмежують вертикальну дисперсію. Це призводить до потенційного розширення зони впливу за межі нормативної санітарно-захисної зони, що підтверджено моделюванням розсіювання.

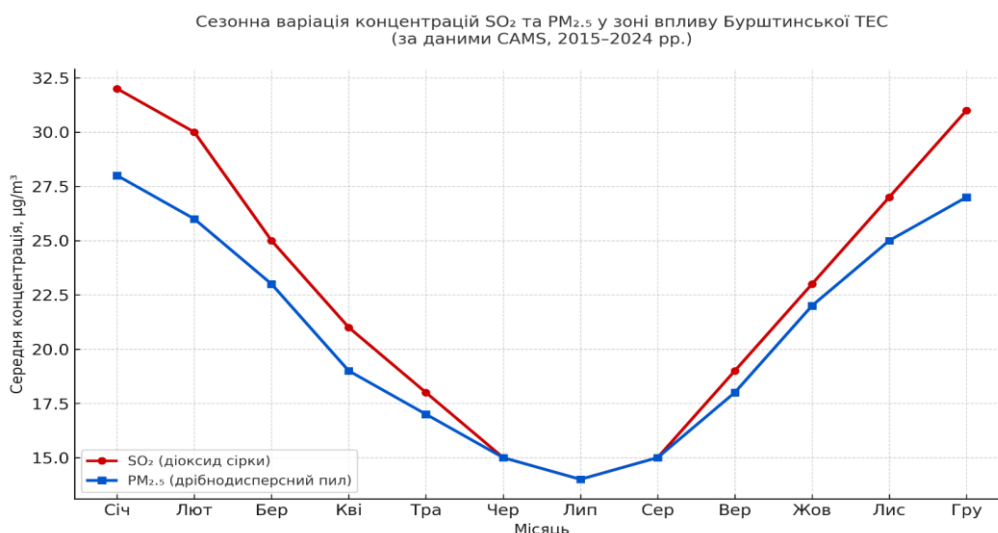


Рисунок 3.13 – Сезонна варіація концентрацій діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>) та дрібнодисперсного пилу (PM<sub>2.5</sub>) у зоні впливу Бурштинської ТЕС за період 2015–2024 рр. (за даними CAMS).

Дані побудовано на основі багаторічних супутниково-модельних реаналізів CAMS Reanalysis та ERA5, із просторовою роздільністю  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  та часовим охопленням 2015–2024 рр. Розраховано середньомісячні концентрації SO<sub>2</sub> та PM<sub>2.5</sub> у приземному шарі атмосфери для району м. Бурштин ( $48.63^\circ \text{ N}$ ,  $24.38^\circ \text{ E}$ ). На графіку (рис. 3.13) відображено чітко виражену сезонність: максимальні значення фіксуються у зимово-весняний період (грудень–березень), коли поширені приземні температурні інверсії, слабкі вітри ( $< 2 \text{ м/с}$ ) і підвищене навантаження на теплову генерацію, тоді як у літні місяці (червень–серпень) спостерігається суттєве зниження концентрацій внаслідок конвекційного перемішування повітря та ефекту «вологого осадження» частинок [25, 31].

Таким чином, сезонна динаміка підтверджує значний вплив метеорологічних факторів на якість атмосферного повітря у зоні діяльності Бурштинської ТЕС. Високі зимові концентрації SO<sub>2</sub> та PM<sub>2.5</sub> вказують на необхідність підвищення ефективності систем очищення викидів і впровадження регіональних програм адаптивного моніторингу, що узгоджується з рекомендаціями IPCC (2023) та UNEP (2024) щодо контролю короткоживучих кліматоактивних речовин [34].

Історично Трипільська ТЕС була домінуючим джерелом атмосферного забруднення у Київській області, відповідаючи за 82,8 % усіх промислових викидів регіону, які у 2014 році сягнули 76918,6 тонн.

Натомість у Трипільській ТЕС, незважаючи на історично високу залежність від вугілля із зольністю до 22,6 % та значні викиди сірки (44000,49 т/рік SO<sub>2</sub> у 2014 році), у перспективі перехід на газ та заплановане

будівництво сіркоочистки зменшують сірчистий компонент, але посилюють роль NO<sub>x</sub> (який історично також був значним – 11588,97 т/рік) і вторинних аерозолів у теплий сезон, а також суспендовані тверді частки (20651,32 т/рік). У теплий сезон, коли підвищена висота шару перемішування, інтенсивна інсоляція та вітрова адвекція прискорюють фотохімічні перетворення, це сприяє формуванню вторинних неорганічних аерозолів та приземного озону (NASA/EEA, 2024). Така контрастність підтверджує, що ефективне управління ризиками потребує узгодженого впровадження газоочистки, а також адаптивного моніторингу, який враховує calm-дні, інверсії й сезонну фотохімію [34].

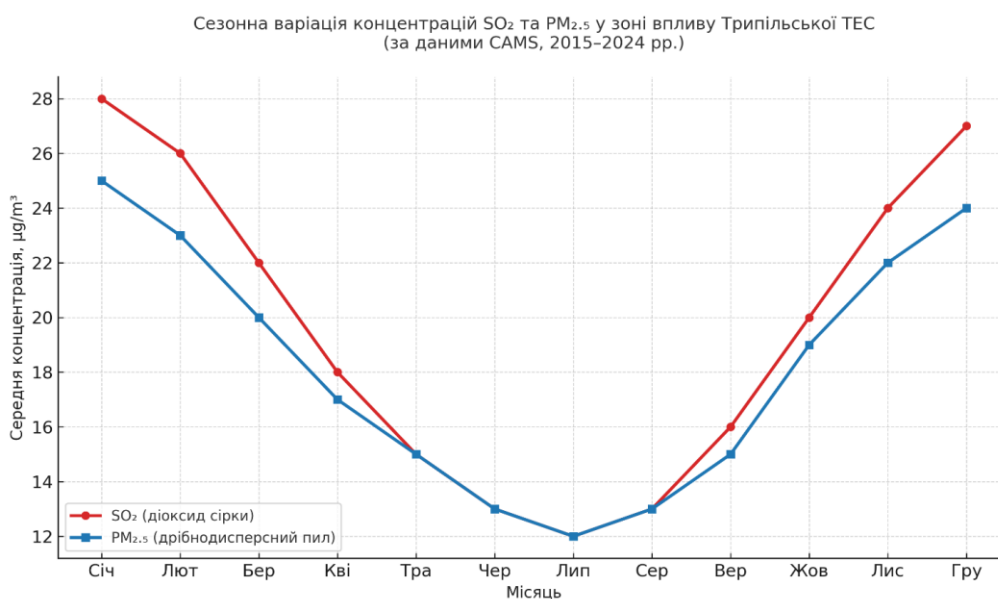


Рисунок 3.14 – Сезонна варіація концентрацій діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>) та дрібнодисперсного пилу (PM<sub>2.5</sub>) у зоні впливу Трипільської ТЕС за період 2015–2024 рр. (за даними CAMS).

Дані побудовано на основі реаналізу CAMS і ERA5, які поєднують супутникові спостереження MODIS, TROPOMI, VIIRS та модельне хімічне моделювання IFS і MOZART. Просторова роздільність даних становить 0,1° × 0,1°, часовий інтервал – 1 місяць. Для дослідження використано середньомісячні приземні концентрації SO<sub>2</sub> та PM<sub>2.5</sub> у межах координат (49.9–50.0° N, 30.8–30.9° E), що відповідають території розташування Трипільської ТЕС та прилеглих населених пунктів Київської області.

Отримані результати демонструють виражену сезонність концентрацій:

- зимово-весняний максимум (грудень – березень) зумовлений підвищеним енергетичним навантаженням станції, слабкою вентиляцією повітря, наявністю приземних інверсій і низькою висотою планетарного шару змішування (PBLH < 400 м), що призводить до акумуляції забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери;

– літнє зниження (червень – серпень) пояснюється посиленням конвекції, збільшенням висоти шару змішування ( $> 1200$  м), активним горизонтальним транспортом домішок та «вологим осадженням»  $PM_{2.5}$  під час опадів;

– осінній підйом (жовтень – листопад) пов'язаний із початком опалювального сезону, зменшенням турбулентності й домінуванням антициклональних погодних режимів.

Сезонна динаміка свідчить, що метеорологічні фактори (температурні інверсії, швидкість вітру, висота шару змішування) є ключовими регуляторами приземних концентрацій  $SO_2$  та  $PM_{2.5}$  у зоні діяльності Трипільської ТЕС, а не лише інтенсивність викидів. Результати узгоджуються з висновками IPCC (2023), EEA (2024), UNEP (2024) та WHO (2023), які підкреслюють критичну роль кліматичних умов у формуванні екологічного стану атмосферного повітря у промислових регіонах [39].

### **3.5 Вплив метеорологічних умов та кліматичних змін на розсіювання забруднюючих речовин у зонах впливу ТЕС**

Метеорологічні умови є визначальним чинником у формуванні просторово-часових патернів забруднення атмосферного повітря в зонах впливу теплових електростанцій. На відміну від сталих технічних параметрів джерел викидів, метеорологічні процеси змінюються сезонно і добово, визначаючи швидкість, напрямок і ефективність розсіювання домішок. У контексті змін клімату, засвідчених Шостим звітом IPCC (2023), ці процеси зазнають суттєвих трансформацій – збільшується частота антициклональних ситуацій, зростає температура повітря, частішають періоди динамічної стагнації, що безпосередньо впливає на концентрації  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  та вторинних аерозолів.

Сучасні тенденції кліматичної зміни, що проявляються у зростанні частоти антициклональних патернів, збільшенні тривалості маловітряної погоди, інтенсивнішому нічному охолодженні та нестабільності режиму опадів, додатково підсилюють проблему «застійних епізодів» у зонах впливу Бурштинської та Трипільської ТЕС.

Температурна інверсія створює своєрідну «метеорологічну кришку», яка блокує вертикальні потоки та фіксує домішки у приземному прошарку повітря. Для регіонів розміщення Бурштинської та Трипільської ТЕС інверсійні явища є характерними в осінньо-зимовий період, коли поверхня землі інтенсивно охолоджується вночі. За оцінками КНУ імені Тараса Шевченка, під дією інверсій приземні концентрації  $PM_{2.5}$  можуть

збільшуватися у 5–10 разів порівняно з умовами активної конвекції, що цілком узгоджується з даними IPCC (2021) та дослідженнями CAMS (2023), які фіксують аналогічні епізоди у промислових регіонах Центральної та Східної Європи [26, 34].

Таблиця 3.10 – Диференціальний вплив метеоумов на забруднювачі (за даними наукових досліджень Інституту метеорології НАН України)

| Параметр              | Бурштинська ТЕС (SO <sub>2</sub> /пил)     | Трипільська ТЕС (NO <sub>2</sub> )                  |
|-----------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Швидкість вітру       | Сильний прямий вплив (r = -0,69 ÷ -0,75)   | Помірний вплив (r = -0,48 ÷ -0,58)                  |
| Температурна інверсія | Критичний фактор (концентрації ↑ 310-380%) | Помірний вплив (концентрації ↑ 140-190%)            |
| Сонячна радіація      | Незначний вплив (r = +0,12)                | Ключовий фактор через фотохімію (r = +0,58 ÷ +0,65) |
| Атмосферні опади      | Сильний "ефект промивання" (62-75%)        | Слабкий вплив (ефективність вимивання 5-12%)        |

У районах зі складним рельєфом (Бурштинська улоговина, передкарпатські схили) інверсійний ефект підсилюється топографічною пасткою, що уповільнює вентиляцію повітря. Для Трипільської ТЕС специфічним є вплив річкової долини Дніпра, де нічні інверсії нерідко формуються локально та зберігаються до 10–12 годин.

Низькі швидкості вітру (<2 м/с) значно збільшують приземну акумуляцію забруднювачів. Найвищі піки SO<sub>2</sub> і РМ спостерігаються під час маловітряної погоди, особливо в нічний час. Домінування слабких вітрів у літні місяці, зафіксоване у супутникових реаналізах CAMS/ERA5, зумовлює формування довготривалих застійних епізодів навколо Бурштинської ТЕС.

Для Трипільської ТЕС переважний північно-західний та північний перенос сприяє перенесенню шлейфу у напрямку Київської агломерації, що підтверджено за результатами Greenpeace (2016), де зазначено значний внесок ТЕС у забруднення повітря на відстанях 30–60 км від джерела [32].

Висота шару перемішування визначає об'єм, у якому можуть розсіюватися викиди. У ранкові й нічні години висота шару перемішування різко зменшується, що сприяє різкому зростанню концентрацій SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> та дрібнодисперсного пилу. Згідно з даними [21], низький ВШП у зимовий період корелює зі збільшенням концентрацій РМ<sub>2.5</sub> у 3–6 разів.

Атмосферна стабільність класів F–G (за класифікацією Пасквілла) характерна для обох регіонів ТЕС уночі та взимку, що надзвичайно обмежує вертикальне перемішування та сприяє різким токсичним епізодам.

Механізми хімічної модифікації шлейфу  $\text{SO}_2$  чутливі до метеоумов. Найбільший обсяг утворення сульфатів спостерігається під час туманів або високої вологості. Цей процес призводить до утворення “білого смогу”, який характеризується суттєвим розсіюванням світла частинками. Ці процеси критично важливі для зон впливу Бурштинської ТЕС – регіону з високою повторюваністю туманів узимку. Трипільська ТЕС додатково підсилює цей ефект через близькість Дніпра, що створює умови водної конденсації та утворення вторинних аерозолів.

Вторинні сульфати та нітрати можуть зберігатися у повітрі годинами та днями, будучи перенесеними на відстані до 100 км і більше, що визначає не лише локальний, а й регіональний екологічний вплив ТЕС.

Зростання повторюваності антициклонів у 2020–2024 рр. в Україні призвело до подвоєння тривалості періодів із низькою швидкістю вітру, що безпосередньо впливає на ризик токсичних епізодів поблизу ТЕС.

Процес фотохімічної трансформації, що є визначальним для зони впливу Трипільської ТЕС, залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, температури та наявності фонових прекурсорів – озону й летких органічних сполук. За цих умов високореактивні сполуки  $\text{NO}_x$  швидко вступають у хімічні перетворення, утворюючи вторинні забруднювачі, зокрема  $\text{NO}_2$  та  $\text{O}_3$ .

Трипільська ТЕС, розташована в безпосередній близькості до Київської агломерації, формує значний потік  $\text{NO}_x$ , який взаємодіє з антропогенними домішками міського середовища. На відміну від  $\text{SO}_2$  та твердих частинок, концентрації  $\text{NO}_2$  визначаються не лише фізичним розсіюванням, а й кінетикою реакції  $\text{NO}$  з озоном, що зумовлює нелінійну поведінку цих забруднювачів.

У теплий період року інтенсивне сонячне випромінювання прискорює фотохімічні процеси, сприяючи збільшенню утворення приземного озону та компонентів фотохімічного смогу (навіть за стабільних або знижених викидів  $\text{NO}_x$ ). Подальше окиснення  $\text{NO}_2$  радикалами  $\text{OH}$  приводить до формування азотної кислоти та вторинних аерозолів (нітратів і органічних частинок), які становлять вагомую частку  $\text{PM}_{2.5}$ . Висока відносна вологість, характерна для регіону Канівського водосховища, додатково модифікує ці процеси, прискорюючи гетерогенне окиснення частинок і змінюючи їх фазовий стан та токсичність.

Супутникові дані свідчать про зростання частоти «stagnation events» над Західною Україною на 12–18%, посилення нічної стабільності атмосфери та збільшення тривалості маловітряних діб у Київській області.

Аналіз інтегрального забруднення атмосфери (табл. 3.11) засвідчує, що м. Українка належить до групи населених пунктів із підвищеним рівнем

забруднення атмосферного повітря ( $I_{\text{ЗА}} = 3,8$ ). З огляду на розміщення міста в зоні впливу Трипільської теплової електростанції, такий показник відображає комплексний вплив стаціонарних джерел викидів, що формують характерний «азотно-металевий» та фотохімічно активний профіль домішок. Підвищене значення  $I_{\text{ЗА}}$  в Україні свідчить про наявність стійкого техногенного навантаження, що обумовлює необхідність подальшого розвитку інтегрованої системи моніторингу та впровадження сучасних технологій очищення викидів на Трипільській ТЕС.

Таблиця 3.11 – Рейтинг міст України за інтегральним індексом забруднення атмосферного повітря в урбанізованих територіях у 2023 році

| № з/п | Місто        | $I_{\text{ЗА}}$ | № з/п | Місто         | $I_{\text{ЗА}}$ | № з/п | Місто            | $I_{\text{ЗА}}$ |
|-------|--------------|-----------------|-------|---------------|-----------------|-------|------------------|-----------------|
| 1.    | Кам'янське   | <b>13,9</b>     | 13.   | Суми          | <b>7,6</b>      | 25.   | Українка         | <b>3,8</b>      |
| 2.    | Дніпро       | <b>12,2</b>     | 14.   | Київ          | <b>7,5</b>      | 26.   | Олександрія      | <b>3,8</b>      |
| 3.    | Краматорськ* | <b>11,3</b>     | 15.   | Ужгород       | <b>6,7</b>      | 27.   | Івано-Франківськ | <b>3,4</b>      |
| 4.    | Кривий Ріг   | <b>11,2</b>     | 16.   | Миколаїв      | <b>6,2</b>      | 28.   | Бровари          | <b>3,3</b>      |
| 5.    | Львів        | <b>8,9</b>      | 17.   | Кременчук     | <b>5,6</b>      | 29.   | Світловодськ     | <b>3,3</b>      |
| 6.    | Луцьк        | <b>8,6</b>      | 18.   | Кропивницький | <b>5,3</b>      | 30.   | Харків           | <b>3,2</b>      |
| 7.    | Одеса        | <b>8,6</b>      | 19.   | Полтава       | <b>5,3</b>      | 31.   | Обухів           | <b>3,2</b>      |
| 8.    | Запоріжжя    | <b>8,4</b>      | 20.   | Житомир       | <b>4,6</b>      | 32.   | Ізмаїл           | <b>3,0</b>      |
| 9.    | Вінниця      | <b>8,4</b>      | 21.   | Рівне         | <b>4,6</b>      | 33.   | Хмельницький     | <b>2,9</b>      |
| 10.   | Херсон       | <b>7,9</b>      | 22.   | Тернопіль     | <b>4,2</b>      | 34.   | Чернівці         | <b>1,9</b>      |
| 11.   | Слов'янськ*  | <b>7,8</b>      | 23.   | Біла Церква   | <b>4,0</b>      | 35.   | Горишні Плавні   | <b>1,8</b>      |
| 12.   | Черкаси      | <b>7,7</b>      | 24.   | Чернігів      | <b>3,8</b>      |       |                  |                 |

Рівень низький при  $I_{\text{ЗА}}$  менше 5,0; підвищений – при  $I_{\text{ЗА}}$  від 5,0 до 7,0;

високий – при  $I_{\text{ЗА}}$  від 7,0 до 14,0; дуже високий – при  $I_{\text{ЗА}}$  від 14,0 та вище

\*- дані за 6 місяців (з січня по червень)

У свою чергу, м. Івано-Франківськ, із показником  $I_{\text{ЗА}} = 3,4$ , характеризується помірним рівнем забруднення, нижчим порівняно з іншими промисловими центрами України. Водночас фіксоване значення пояснюється наявністю техногенних навантажень, зокрема впливом енергетичних та транспортних викидів, а також регіональними потоками повітря, що здатні переносити домішки з територій активної енергогенерації, включаючи Бурштинську ТЕС. Попри відносно нижчий рівень  $I_{\text{ЗА}}$ , Івано-Франківськ залишається у зоні потенційного ризику через складні метеорологічні умови Передкарпаття, що сприяють локальній акумуляції твердих частинок та оксидів сірки в окремі періоди року.

### 3.6 Природоохоронні заходи та можливості підвищення ефективності екологізації теплової енергетики України

Політика зменшення негативного впливу теплової енергетики на довкілля є пріоритетним завданням у контексті переходу України до низьковуглецевої економіки та виконання міжнародних зобов'язань у сфері декарбонізації й охорони довкілля, і має спиратися на інтегрований, багаторівневий підхід, який узгоджується з принципами Європейського зеленого курсу, Цілями сталого розвитку ООН (SDG 7, SDG 9, SDG 13) та рекомендаціями IPCC (AR6, 2023). У системі екологічного управління ТЕС доцільно виокремити три рівні реалізації природоохоронних заходів – локальний, регіональний і глобальний, що забезпечують комплексне зниження викидів та мінімізацію ризиків для екосистем і здоров'я населення.

На локальному рівні ключовими є заходи, спрямовані на обмеження прямих викидів у атмосферне повітря, зниження утворення пилу та мінімізацію негативного впливу золовідвалів. До таких заходів належать:

- впровадження систем селективного каталітичного та некаталітичного відновлення для зменшення викидів  $\text{NO}_x$  до 80 %;
- модернізація електрофільтрів або встановлення рукавних фільтрів із ефективністю затримання пилу до 99 %;
- встановлення систем десульфурзації димових газів для зниження концентрацій  $\text{SO}_2$  до 100 мг/нм<sup>3</sup>, відповідно до вимог Директиви 2010/75/ЄС;
- озеленення санітарно-захисних зон швидкорослими деревними та чагарниковими породами, здатними до фітофільтрації і пилозатримання;
- екологічна стабілізація золовідвалів через гідроізоляцію, покриття полімерними матеріалами, фітомеліорацію та створення природних бар'єрів;
- впровадження автоматизованих систем безперервного контролю викидів з інтеграцією в державні екологічні платформи.

На регіональному рівні заходи спрямовані на узгодження обсягів викидів із міжнародними зобов'язаннями України, зокрема в межах Конвенції про транскордонне забруднення повітря на великі відстані. Основними напрямами виступають:

- формування енергетичних кластерів із поетапним виведенням із експлуатації найбільш зношених і високоемісійних вугільних енергоблоків;
- заміщення високозольного та високосірчастого вугілля низьковуглецевими видами палива – природним газом, біомасою, RDF-паливом;
- оптимізація паливно-енергетичного балансу регіону з урахуванням екологічної місткості атмосферного басейну;
- розвиток спільних проєктів України та ЄС у сфері декарбонізації,

зокрема технологій уловлювання, використання та зберігання вуглекислого газу, які забезпечують уловлювання до 90 % CO<sub>2</sub> із димових газів).

Реалізація таких заходів створює умови для скорочення викидів не лише від окремих ТЕС, але й у масштабах цілих енергетичних регіонів.

На глобальному рівні природоохоронні заходи повинні бути синхронізовані з міжнародними кліматичними угодами – Паризькою угодою та Кіотським протоколом, передбачаючи скорочення викидів парникових газів, розвиток відновлюваних джерел енергії та поступовий перехід до кліматично нейтральної енергетики до 2050 р.

Системний підхід до екологізації ТЕС передбачає реалізацію таких ключових напрямів:

- технологічну модернізацію виробництва – застосування енергоблоків із підвищеним ККД (> 45 %) і низькотемпературним каталітичним спалюванням;
- оптимізацію структури генерувальних потужностей з урахуванням регіональної чутливості довкілля;
- використання композитного палива та технологій циркулюючого киплячого шару, що забезпечують повне згоряння і зменшення утворення золи;
- скорочення обсягів водоспоживання завдяки впровадженню оборотних систем охолодження, повторного використання стічних вод і технологій зневоднення шламів із поверненням води у цикл;
- утилізацію побічних продуктів спалювання (золи, шлаку, гіпсу) у будівництві та виробництві цементу;
- застосування автоматизованих систем управління технологічними процесами для зниження втрат палива та підвищення енергоефективності.

Перспективним напрямом є створення енергоекотехнологічних кластерів, у межах яких ТЕС функціонують у синергії з установками переробки відходів, станціями очищення стічних вод та об'єктами виробництва вторинної сировини. Такі комплекси здатні зменшити сумарне техногенне навантаження на довкілля на 30–50 %, реалізуючи принципи циркулярної економіки та забезпечуючи сталий розвиток регіонів.

Загалом реалізація запропонованих природоохоронних заходів дає змогу зменшити обсяги викидів SO<sub>2</sub> – на 70–95 %, NO<sub>x</sub> – на 60–80 %, твердих частинок – до рівня 5–10 мг/нм<sup>3</sup>, що відповідає рекомендаціям Всесвітньої організації охорони здоров'я. Комплексна модернізація теплової енергетики та інтеграція сучасних технологій очищення димових газів, управління відходами та цифрового моніторингу сприятимуть досягненню вуглецевої нейтральності України у післявоєнний період.

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

### **4.1 Аналіз стану охорони праці на теплових електростанціях**

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. 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 [30], 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 (СУОП), відповідно до стандартів ISO 45001:2018, залишається нерівномірним і потребує подальшого розвитку.

#### **4.2 Заходи щодо покращення гігієни праці, техніки безпеки та пожежної безпеки на теплових електричних станціях**

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**

Теплові електростанції належать до об'єктів підвищеної небезпеки, аварії на яких можуть призвести до масштабних техногенних надзвичайних ситуацій: пожеж, вибухів, викидів токсичних газів, руйнування золівідвалів або порушення систем охолодження.

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

На основі аналізу глобальних і національних тенденцій розвитку теплоенергетики встановлено, що, незважаючи на декарбонізаційні процеси та світовий перехід до відновлюваних джерел енергії, теплові електростанції й надалі залишаються домінуючими стаціонарними джерелами забруднення атмосферного повітря, формуючи суттєві обсяги емісій  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$  та важких металів, а також впливаючи на екосистеми через вторинні аерозолі та кислотні опади. Підкреслено, що, попри формальне досягнення цільових показників Національного плану скорочення викидів у 2024 році, реальне зменшення емісій відбулося переважно внаслідок руйнування енергетичної інфраструктури під час воєнних дій та зниження обсягів генерації, а не через системну модернізацію газоочисного обладнання.

Досліджено залежність структури та обсягів викидів від типу палива й технологічних особливостей генерації на прикладі репрезентативних кейсів – Бурштинської та Трипільської ТЕС. Встановлено, що для Бурштинської ТЕС, яка працює на високозольному кам'яному вугіллі, характерним є «сірково-пиловий» профіль забруднення з домінуванням  $\text{SO}_2$  та  $\text{PM}_{2.5}$ . Для Трипільської ТЕС, що використовувала комбіноване паливо (вугілля, газ, мазут), визначальним є «азотно-металевий» тип техногенного навантаження з переважанням із переважанням оксидів азоту та вторинного озону, що підвищує ризик формування фотохімічного смогу.

Встановлено визначальний вплив метеорологічних умов і кліматичних змін на процеси розсіювання забруднювальних речовин. Доведено, що зростання частоти антициклонів та слабовітряних періодів на 12–18 % сприяє акумулюванню поллютантів у приземному шарі повітря, формуючи токсичні «застійні епізоди». З'ясовано, що для Бурштинської ТЕС критичним чинником є долинний рельєф (з посиленням локальними кліматичними умовами Передкарпаття) та температурні інверсії, які обмежують вертикальну дифузію викидів. Для Трипільської ТЕС визначальним є вплив сонячної радіації, яка активізує процеси фотохімічного утворення вторинних аерозолів і озону в теплий період року.

Виявлено, що значна частина енергоблоків експлуатується понад проєктні строки, а технічний стан очисних систем не відповідає вимогам Директиви ЄС 2010/75/EU щодо промислових викидів. Недостатня ефективність газоочисних технологій спричиняє регулярні перевищення нормативів за SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та пиловими частинками, що підтверджується як офіційною статистикою, так і даними супутникового моніторингу.

Виявлено просторову асиметрію та масштаби поширення забруднення за даними супутникового моніторингу Sentinel-5P та реаналізів CAMS. Зафіксовано, що зона впливу Бурштинської ТЕС має локально-кумулятивний характер, що виходить за межі нормативної санітарно-захисної зони, створюючи підвищені ризики для прилеглих населених пунктів. Водночас вплив Трипільської ТЕС характеризується регіонально-адвективним перенесенням із формуванням протяжних шлейфів NO<sub>2</sub> у напрямку Київської агломерації на відстань 30–60 км. Додатково виявлено радіонуклідний компонент забруднення атмосферного повітря, пов'язаний зі спалюванням вугільної сировини.

З'ясовано, що традиційна система наземного моніторингу не забезпечує повної оцінки екологічних ризиків у сучасних умовах воєнного стану та кліматичних змін, оскільки не враховує транскордонне перенесення забруднювачів та вторинні фотохімічні процеси.

Науково обґрунтовано пріоритетність упровадження сучасних технологій газоочищення, переходу на менш токсичні види палива, а також поступового виведення з експлуатації застарілих енергоблоків у відповідності до Національного плану скорочення викидів. Обґрунтовано, що стратегічним напрямом екологічної модернізації теплоенергетичного сектору є форсована декарбонізація, розвиток відновлюваної генерації та інтеграція екологічних вимог у всі рівні планування енергетичної політики. Запропоновано стратегію післявоєнної реконструкції енергетичної галузі за принципом *Build Back Better*, яка передбачає не повернення до застарілих технологічних рішень, а створення екологічно безпечної, стійкої та технологічно модернізованої енергосистеми.

## 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., Боголюбов В. М., Мальований М. С. Техноекологія: навч. посіб. Херсон: Олді-плюс, 2011. 314 с.
3. Бузинний М., Михайлова Л. Оцінка депонування природних радіонуклідів на поверхню ґрунту в околицях Трипільської ТЕС. *Навколишнє середовище і здоров'я*. №3. 2017. С. 60-63.
4. 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
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. Звіт з оцінки впливу на довкілля планової діяльності АТ «ДТЕК Західенерго» ВП Бурштинська теплова електростанція. Бурштин. ТОВ «НЦ «Екологія». 2024. 581 с.

16. Звіт про стратегічну екологічну оцінку: Державної цільової економічної програми енергетичної модернізації підприємств водопостачання та водовідведення, що перебувають у державній або комунальній власності на період до 2030 року. Міністерство розвитку громад, територій України. Київ. 2024. <https://mindev.gov.ua/>

17. 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>

18. Кодекс України «Про надра» 132/94-ВР від 27.07.1994 р.

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

20. Міністерство енергетики України. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. 2024. URL: <https://mev.gov.ua/>

21. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Екологічні паспорти за 2020-2024 рр. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichni-pasporty/>

22. 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/>

23. 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.

24. 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>

25. Трипільська ТЕС. [https://uk.wikipedia.org/wiki/Трипільська\\_ТЕС](https://uk.wikipedia.org/wiki/Трипільська_ТЕС)

26. 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>

27. 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)

28. 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.

29. 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.

30. Чичул Х.-М.М., Семчук Я.М., Лялюк-Вітер Г.Д., Кривенко Г.М. Дослідження вугільного палива підприємства Бурштинська ТЕС ПАТ «ДТЕК Західенерго» та його вплив на довкілля. Науково-практичний журнал: Екологічні науки. № 2 (59). 2025. С. 38-42. URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2025/59/7.pdf>

31. 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.

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

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

34. 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)

35. 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/>

36. 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/>

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

38. 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>

39. International Energy Agency (2024), CO2 Emissions in 2023, <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>

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

41. International Energy Agency (2024), Emissions Factors 2024, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/emissions-factors-2024>

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

43. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. *International Energy Agency: special report*. 2021. (Interactive: [iea.li/nzeroroadmap](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)

44. 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

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

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

47. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. *World Health Organization*. 2021. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

48. 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>