МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра
за освітньою програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій» зі спеціальності G4 Енерговиробництво спеціалізації G4.02 Теплоенергетика

Укладачі: Т. В.Шелешей, К.О. Романова, І.С Беднарська

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

УДК 502.3:621.311+621.039(075.8)

Ш42

Укладачі: *Шелешей Тетяна Вікторівна*, канд. техн. наук, доц.
Романова Катерина Олександрівна, канд. техн. наук, доц.
Беднарська Інна Станіславівна, докт. філософії, асист.

Рецензент *Цапко Н.О.,* канд. техн. наук, доцент Науково-дослідної установи «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем» (УКРНДІЕП)

Відповідальний редактор *Притула Н.О.,* канд. техн. наук, доц.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 8 від 04.06.2026 р.)
за поданням Вченої ради Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики
(протокол № 4 від 25.05.2026 р.)

Ш42 Екологічна безпека енергетичних систем. Практичні заняття [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій» спец. G4 Енерговиробництво спеціалізації G4.02 Теплоенергетика / уклад: Т.В. Шелешей, К.О. Романова, І.С. Беднарська. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,0 Мб). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 109 с.

У навчальному посібнику «Екологічна безпека енергетичних систем» викладено теоретичні положення та практичні аспекти оцінки екологічного впливу енергетичних об'єктів і технологій на навколишнє природне середовище. Посібник містить методичні підходи до розрахунків утворення оксидів азоту та сірки під час спалювання палива, визначення викидів діоксиду вуглецю, а також оцінки ефективності роботи золовловлюючих установок. Значну увагу приділено екологічним аспектам і безпеці використання атомної енергетики, альтернативних джерел енергії, аналізу теплового забруднення водних ресурсів та сучасним технологіям зменшення шкідливих викидів.

Практичні задачі, які розглядаються у посібнику, спрямовані на формування у здобувачів вищої освіти навичок виконання екологічних розрахунків, оцінки техногенного впливу енергетичних систем на довкілля та обґрунтування заходів щодо забезпечення екологічної безпеки в енергетичній галузі.

Призначено для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій» зі спеціальності G4 Енерговиробництво спеціалізації G4.02 Теплоенергетика.

УДК 502.3:621.311+621.039(075.8)

Реєстр. № НП 25/ 26 – 399. Обсяг 5,1 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
https://kpi.ua
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© Т.В. Шелешей, К.О. Романова, І.С. Беднарська, 2026
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП 5

1. РОЗРАХУНКИ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ 11

1.1 Теоретичні відомості 11

1.2 Розв'язання задач 14

1.3 Контрольні запитання 18

2. РОЗРАХУНКИ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ СІРКИ 20

2.1 Теоретичні відомості 20

2.2 Розв'язання задач 21

2.3 Контрольні запитання 23

3. РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ CO_2 ПРИ СПАЛЮВАННІ ПАЛИВА ... 24

3.1 Теоретичні відомості 24

3.2 Розв'язання задач 25

3.3 Контрольні запитання 28

4. РОЗРАХУНОК ЗОЛОВЛОВЛЮЮЧИХ УСТАНОВОК 29

4.1 Теоретичні відомості 29

4.2 Розв'язання задач 32

4.3 Контрольні запитання 34

5. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА БЕЗПЕКА ВИКОРИСТАННЯ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ 36

5.1 Теоретичні відомості 36

5.2 Розв'язання задач 37

5.3 Контрольні запитання 52

6. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА БЕЗПЕКА ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ 54

6.1 Теоретичні відомості 54

6.2 Розв'язання задач 55

6.3 Контрольні запитання 61

7. АНАЛІЗ ТЕПЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ 63

7.1 Теоретичні відомості 63

7.2 Розв’язання задач....65
7.3 Контрольні запитання....71
8. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМЕНШЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ....73
8.1 Теоретичні відомості....73
8.2 Розв’язання задач....75
8.3 Контрольні запитання....80
9. ЕКОЛОГІЧНА ЕКСПЕРТИЗА ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ 82
9.1 Теоретичні відомості....82
9.2 Розв’язання задач....93
9.3 Контрольні запитання....104
ВИСНОВКИ....106
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ....108
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ....111

ВСТУП

Енергетичні системи є основою функціонування сучасного суспільства, оскільки забезпечують виробництво, передачу, розподіл і споживання електричної та теплової енергії для потреб промисловості, транспорту, комунального господарства й населення. Надійність роботи енергетичного сектору безпосередньо впливає на економічну стабільність держави, рівень життя громадян та національну безпеку. Водночас енергетика належить до галузей господарства, діяльність яких супроводжується значним техногенним навантаженням на довкілля. Саме тому питання екологічної безпеки енергетичних систем є одним із пріоритетних напрямів сучасної науки, освіти та державної політики [1–3].

Під екологічною безпекою енергетичних систем розуміють такий стан функціонування об’єктів енергетики, за якого забезпечується мінімізація негативного впливу на навколишнє природне середовище, життя і здоров’я населення, а також попередження аварій, техногенних катастроф і довгострокових екологічних наслідків.

Екологічна безпека енергетичних систем — це комплексна науково-технічна дисципліна, що вивчає основи створення ресурсозберігаючих технологій, екологічно безпечних промислових виробництв, а також реалізації інженерно-екологічних рішень з раціонального природокористування та охорони навколишнього середовища. До основних джерел екологічної небезпеки в енергетиці належать теплові електростанції, атомні електростанції, гідроенергетичні комплекси, мережеві об’єкти, системи теплопостачання, підприємства з видобутку та транспортування паливно-енергетичних ресурсів, а також об’єкти відновлюваної енергетики, які також мають певний екологічний слід [4, 5].

Розвиток світового суспільного виробництва відбувається все швидшими темпами, і масштаби шкоди, завданої навколишньому середовищу, збільшуються настільки, що їх уже неможливо, як раніше,

подолати природним шляхом, без використання ретельно продуманого комплексу законодавчих і технологічних заходів, які охоплюють усі сфери виробничої діяльності людини.

Найбільш масштабний вплив на довкілля традиційно пов'язаний із функціонуванням теплової енергетики. Спалювання вугілля, мазуту та природного газу супроводжується викидами оксидів сірки, оксидів азоту, твердих частинок, чадного газу, важких металів та діоксиду вуглецю. Такі викиди спричиняють погіршення якості атмосферного повітря, утворення кислотних дощів, посилення парникового ефекту та негативно впливають на здоров'я населення. Крім того, теплова генерація пов'язана з утворенням значних обсягів золошлакових відходів і використанням великих обсягів води для охолодження обладнання [6].

Важливою складовою екологічної безпеки є безпечне функціонування атомної енергетики. Для України це питання має особливе значення з огляду на значну частку атомної генерації у виробництві електроенергії. Перевагою атомних електростанцій є низькі прямі викиди парникових газів у процесі виробництва електроенергії, однак потенційні ризики аварій, проблеми поводження з відпрацьованим ядерним паливом і радіоактивними відходами потребують особливо жорстких вимог до систем безпеки. Чорнобильська катастрофа 1986 року стала найбільшим прикладом глобальних наслідків порушення вимог екологічної та техногенної безпеки в енергетиці [7].

Суттєві екологічні виклики пов'язані також із гідроенергетикою. Будівництво водосховищ змінює природний гідрологічний режим річок, впливає на біорізноманіття, спричиняє затоплення територій та трансформацію природних ландшафтів. Разом із тим гідроелектростанції забезпечують виробництво відносно чистої електроенергії та відіграють важливу роль у балансуванні енергосистеми. Тому сучасний підхід до екологічної безпеки передбачає комплексну оцінку як переваг, так і ризиків кожного виду генерації [5].

У XXI столітті особливого розвитку набувають відновлювані джерела енергії — сонячна, вітрова, біоенергетика, геотермальна енергетика. Їх впровадження сприяє скороченню викидів забруднювальних речовин і декарбонізації економіки. Проте навіть такі технології мають певні екологічні аспекти: зайняття земельних площ, вплив на ландшафти, шумове навантаження, утилізацію відпрацьованих сонячних панелей, акумуляторів чи лопатей вітротурбін. Отже, екологічна безпека енергетичних систем потребує врахування повного життєвого циклу енергетичних технологій [8].

Для України питання екологічної безпеки енергетичних систем набули нового значення в умовах воєнних викликів та післявоєнного відновлення держави. Пошкодження енергетичної інфраструктури, ризики аварій, руйнування об’єктів генерації та мереж, забруднення територій внаслідок бойових дій створюють додаткові загрози для довкілля та населення. Відбудова енергетичного сектору повинна здійснюватися на засадах енергоефективності, екологічності, децентралізації, стійкості та інтеграції сучасних технологій [2, 3].

Розвиток цивілізації та сучасний науково-технічний прогрес безпосередньо пов’язані з природокористуванням, тобто з глобальним використанням природних ресурсів. Складовою частиною природокористування є переробка та відновлення природних ресурсів, їх охорона та захист навколишнього середовища в цілому, яка здійснюється на основі інженерної екології — науки про взаємодію технічних і природних систем.

Законодавчою основою забезпечення екологічної безпеки в Україні є Конституція України, згідно з якою забезпечення екологічної безпеки та підтримання екологічної рівноваги є обов’язком держави. Важливу роль відіграють Закони України «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про охорону атмосферного повітря», «Про оцінку впливу на довкілля», «Про управління відходами», а також Енергетична стратегія України до 2050 року. У цих документах визначено напрями модернізації

енергетики, зменшення викидів, розвитку чистих технологій та гармонізації із законодавством Європейського Союзу [1–3].

Предмет, мета та завдання навчальної дисципліни

Дисципліна «Екологічна безпека енергетичних систем» спрямована на формування у студентів системного бачення взаємодії енергетики й довкілля, а також здатності приймати технічно обґрунтовані та екологічно відповідальні рішення. Під час її вивчення здобувачі освіти опановують методи оцінювання впливу енергетичних об’єктів на атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти та екосистеми; вивчають принципи екологічного моніторингу; знайомляться з технологіями очищення викидів, очищення стічних вод, поводження з відходами та зниження вуглецевого сліду енергетичних процесів.

Ця дисципліна охоплює теоретичні та практичні аспекти впливу енергетичних об'єктів на навколишнє середовище, аналізує екологічні ризики, пов'язані з різними видами енергетики, та розглядає шляхи мінімізації їхнього впливу на природу. Студенти вивчають основні підходи до оцінки екологічної безпеки, аналізують роль відновлюваних джерел енергії та знайомляться з міжнародними екологічними стандартами, які регулюють енергетичну галузь.

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів здатностей (компетентностей): знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності; вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми; здатність управляти робочими процесами та приймати ефективні рішення у сфері теплоенергетики, беручи до уваги соціальні, економічні, комерційні, правові, та екологічні аспекти; здатність здійснювати інноваційну діяльність в теплоенергетиці; здатність до визначення потреби виробництва в паливно-енергетичних ресурсах, обґрунтуванню заходів по економії енергоресурсів, розробленні норм їх витрат, розрахунку потреб виробництва в енергоресурсах.

Особливе значення мають практичні заняття, під час яких студенти закріплюють теоретичні знання та набувають професійних навичок. Практична підготовка передбачає виконання розрахунків викидів забруднювальних речовин, визначення екологічної ефективності різних джерел енергії, аналіз ризиків аварійних ситуацій, оцінювання впливу енергетичних об’єктів на довкілля, порівняння технологій за екологічними критеріями, а також розроблення заходів щодо підвищення екологічної безпеки енергосистем.

Щодо основних **завдань навчальної дисципліни**, то згідно з вимогами освітньої програми студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі програмні результати навчання: аналізувати, застосовувати та створювати складні інженерні технології, процеси, системи і обладнання відповідно до обраного напряму теплоенергетики; аналізувати і обирати ефективні аналітичні, розрахункові та експериментальні методи розв’язання складних задач теплоенергетики; розробляти і реалізовувати проекти у сфері теплоенергетики з урахуванням цілей, прогнозів, обмежень та ризиків і беручи до уваги технологічні, законодавчі, соціальні, економічні, екологічні та інші аспекти; відшуковувати необхідну інформацію з різних джерел, оцінювати, обробляти та аналізувати цю інформацію; приймати ефективні рішення, використовуючи сучасні методи та інструменти порівняння альтернатив, оцінювання ризиків та прогнозування; знати, розуміти і застосовувати у практичній діяльності ключові концепції, сучасні знання та кращі практики в теплоенергетичній галузі, технології виробництва, передачі, розподілу і використання енергії; розуміти стратегію і цілі підприємства (установи) з урахуванням забезпечення позитивного внеску до розвитку суспільства і держави, створення і впровадження інноваційних технологій, розвитку персоналу; доносити зрозуміло і недвозначно власні висновки з проблем теплоенергетики, а також знання та пояснення, що їх обґрунтовують, до фахівців і нефахівців; знати основні положення вітчизняного і міжнародного законодавства і практик

міжнародної діяльності у сфері теплоенергетики; аналізувати і оцінювати проблеми теплоенергетики, пов’язані із розвитком нових технологій, науки, суспільства та економіки; розраховувати шкідливі викиди в навколишнє середовище, розробляти методи та обирати обладнання для боротьби з забрудненням навколишнього середовища об’єктами енергетики та промисловості.

Цей навчальний посібник містить методики розрахунку утворення шкідливих викидів у процесах виробництва енергії, визначення ефективності золовловлюючих установок, а також оцінки екологічних аспектів роботи енергетичних установок різного типу. Наведені теоретичні відомості та приклади розв’язання задач сприятимуть формуванню практичних навичок виконання екологічних і теплотехнічних розрахунків та застосуванню отриманих знань під час проєктування, експлуатації й оцінювання безпеки енергетичного обладнання. Посібник сприятиме формуванню у студентів компетентностей, необхідних для роботи в галузях енергетики, екології, теплоенергетики, електроенергетики, атомної енергетики та управління природоохоронною діяльністю.

Отже, забезпечення екологічної безпеки енергетичних систем є невід’ємною умовою сталого розвитку держави, збереження природного середовища та підвищення якості життя населення. Саме тому підготовка фахівців, здатних ефективно вирішувати екологічні проблеми енергетики, є важливим завданням сучасної вищої технічної освіти.

1. РОЗРАХУНКИ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ

1.1 Теоретичні відомості

Найбільш токсичні викиди промислових підприємств — це оксиди азоту та сірки. Оксиди азоту присутні у продуктах згоряння всіх видів палива.

Оксиди азоту (NO_x) — це група газоподібних сполук азоту з киснем, які утворюються переважно під час високотемпературних процесів горіння палива. До основних представників належать: оксид азоту (NO); діоксид азоту (NO_2); закис азоту (N_2O); триоксид азоту (N_2O_3); пентаоксид азоту (N_2O_5) [5].

У теплотехнічних та енергетичних установках найбільше значення мають оксид азоту NO та діоксид азоту NO_2, які об'єднують під загальною назвою NO_x.Переважна частина оксидів азоту, що викидаються в атмосферу, утворюється у формі NO. Після потрапляння в атмосферне повітря оксид азоту поступово окиснюється до NO_2 [4].

Основними антропогенними джерелами утворення NO_x є: теплові електростанції; котельні установки; двигуни внутрішнього згоряння; металургійні печі; цементні та хімічні виробництва; установки спалювання відходів.

У процесах спалювання палива оксиди азоту утворюються внаслідок взаємодії азоту та кисню за високих температур.

При згорянні палива оксиди азоту утворюються трьома можливими шляхами [9]:

Термічний (тепловий) оксид азоту утворюється під час окислення азоту повітря в зоні високих температур (понад 1800 К).

Інтенсивність утворення термічних оксидів азоту залежить від температури полум'я, концентрації кисню, часу перебування газів у зоні високих температур, коефіцієнта надлишку повітря.

При підвищенні температури швидкість утворення NO_x різко зростає.

Паливний оксид азоту — утворюється при окисленні азотовмісних речовин, що входять до складу палива.

Найбільше паливного азоту містять: вугілля, мазут, сланці, біомаса, деякі промислові відходи.

У процесі горіння азотовмісні компоненти палива перетворюються на проміжні сполуки (HCN, NH_3), які далі окиснюються до NO.

Частка паливних NO_x може досягати при 20–50 % для рідкого палива і, відповідно, 50–80 % для твердого палива.

Швидкі оксиди азоту утворюються внаслідок взаємодії азоту повітря з вуглеводневими частинками (радикалами), що присутні в зоні полум'я. Цей метод утворення проходить із дуже високою швидкістю (звідси й назва «швидкі»).

Основні реакції відбуваються за участю: CH, CH_2, C_2, CN-радикалів.

Даний механізм найбільш характерний для газового палива, пальників із багатою паливною сумішшю та зон неповного згоряння.

Частка «швидких» NO_x зазвичай невелика, проте при низькотемпературному горінні їх внесок може бути суттєвим.

На утворення оксидів азоту під час спалювання різних видів палива впливають такі фактори, як температура полум'я, концентрація кисню в зоні горіння, час перебування продуктів згоряння в зоні високих температур, вміст азоту в паливі. Ці фактори, у свою чергу, залежать від коефіцієнта надлишку повітря, конструкції пальникових пристроїв, аеродинамічних характеристик процесу горіння, розмірів і теплового навантаження топки, а також умов теплообміну між газовими потоками та нагрівальними поверхнями [10].

Оксиди азоту є небезпечними атмосферними забруднювачами. Вони беруть участь в утворенні фотохімічного смогу, спричиняють кислотні дощі, погіршують якість атмосферного повітря, сприяють утворенню тропосферного озону, негативно впливають на дихальну систему людини.

Діоксид азоту NO_2 є токсичним газом, який подразнює слизові оболонки та може викликати захворювання органів дихання.

Для зниження утворення NO_x під час розробки технологічних рішень необхідно знижувати максимальні температури в топці; зменшувати концентрацію кисню в зоні реакції; скорочувати час перебування газів у зоні високих температур.

Методи очищення газів від NO_x поділяються на [4]:

Методи зниження утворення оксидів азоту (шляхом спеціальної організації процесу горіння);

Хімічні методи очищення газів від NO_x.

З економічних міркувань у котельних установках спершу впроваджують технологічні методи зниження NO_x (використання низькотоксичних пальників, ступінчасте введення повітря або палива тощо) і лише за недостатньої ефективності "первинних" методів переходять до впровадження "вторинних" заходів — хімічних методів очищення, які зазвичай є більш дорогими [10].

Первинні методи спрямовані на запобігання утворенню NO_x у процесі горіння: ступеневе спалювання, рециркуляція димових газів, зниження температури полум’я, низькоемісійні пальники, оптимізація коефіцієнта надлишку повітря.

Вторинні методи передбачають очищення димових газів: селективне некаталітичне відновлення (SNCR), селективне каталітичне відновлення (SCR), абсорбційні методи очищення.

Утворення оксидів азоту є складним фізико-хімічним процесом, який залежить від температури горіння, складу палива та умов організації процесу спалювання. Основними механізмами формування NO_x є термічний, паливний та «швидкий» механізми. Зменшення викидів оксидів азоту є важливим завданням сучасної енергетики та промисловості, оскільки ці сполуки мають значний негативний вплив на довкілля та здоров’я людини.

1.2 Розв’язання задач

Задача. Для котла Е-160-9,8-560ГМ (БКЗ-160-100ГМ) при спалюванні мазуту необхідно визначити вихід оксидів азоту за умов заміни вихрових пальників на прямоточні з тангенціальним спрямуванням струменів у січенні топки. Розрахунок проводиться без урахування рециркуляції газів у топці; швидкість повітря на виході з пальників становить 45 м/с.

Для зручності розрахунку всі вихідні дані наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Вихідні дані

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Теплота згоряння мазуту	МДж/кг	39,08
Температура гарячого повітря	°С	325
Надлишок повітря на виході з топки	-	1,03
Присоси в топці	-	0,05
Температура газів на виході з топки	°С	1150
Січення топкової камери	м²	7,1×4,4
Периметр топкової камери	м	23
Теплове напруження січення	МВт/м²	3,36
Теплове напруження об'єму топки	кВт/м³	250

Розв'язання. За вихідними даними визначаємо об'єми продуктів згоряння та повітря, м³/кг:

$$V^0 = V_{RO} + V_{CO2} + V_{H2O}, \quad V^0 = 10{,}98 \text{ м}^3/\text{кг}, \qquad (1.1)$$

$$V^B = 10{,}28 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теплота, що вноситься гарячим повітрям у топку:

$$Q_{\text{г.б}} = (\alpha_t - \Delta\alpha_t) \cdot H_{\text{г.б}}, \qquad (1.2)$$

де $H_{\text{г.б}}$ — ентальпія теоретично необхідного об'єму повітря, кДж/кг, визначається за таблицею 1.2 для заданого палива при температурі гарячого повітря.

$$Q_{\text{г.б}} = (1{,}03 - 0{,}05) \cdot 4473{,}25 = 4383{,}79 \text{ кДж/кг}.$$

Тепловиділення в зоні горіння:

$$Q'_T = Q_p \cdot 10^3 + Q_{\text{г.б}}, \tag{1.3}$$

$$Q'_T = 39{,}08 \cdot 10^3 + 4383{,}79 = 43463{,}79 \text{ кДж/кг}.$$

Надлишок повітря в зоні горіння за наявності присосів повітря в топку:

$$\alpha_{\text{гор}} = \alpha_t - 0{,}5 \cdot \Delta\alpha_t, \tag{1.4}$$

$$\alpha_{\text{гор}} = 1{,}03 - 0{,}5 \cdot 0{,}05 = 1{,}005.$$

Середня теплоємність продуктів згоряння визначається за формулами:

для мазуту:

$$c_p = 1{,}58 + 0{,}122 \cdot k_t, \tag{1.5}$$

де k_t – температурний коефіцієнт:

$$k_t = \frac{t_a - 1200}{1000} \ . \tag{1.6}$$

t_a – адіабатична температура для мазуту, К;

$$t_a = \frac{43463{,}79}{10{,}98 \cdot 1{,}707 + 1{,}016 \cdot (1{,}005 - 1) \cdot 10{,}28 \cdot 1{,}556} = 2566 \text{ К}.$$

Температурний коефіцієнт:

$$k_t = \frac{2566 - 1200}{1000} = 1{,}366.$$

Теплоємність:

$$c_p = 1{,}58 + 0{,}122 \cdot 1{,}366 = 1{,}747 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Розрахункова адіабатна температура в зоні горіння:

$$T_a = \frac{Q'_T}{V^0 \cdot c_p + 1{,}016 \cdot (\alpha_{\text{гор}} - 1) \cdot V^B \cdot c_v} + 273, \tag{1.7}$$

$$T_a = \frac{43463{,}79}{10{,}98 \cdot 1{,}747 + 1{,}016 \cdot (1{,}005 - 1) \cdot 10{,}28 \cdot 1{,}556} + 273 = 2566 \text{ К}.$$

Перевіряємо розбіжність між температурами:

$$(T_a - 273) - t_a = 2566 - 273 - 2566 = 49 \text{ K}.$$

Оскільки розбіжність не перевищує 50 К, результати коректні.

Теплова ефективність стін зони горіння:

На рівні 1,5 м вище верхнього ряду пальників:

$$\psi_{з.г} = \frac{\gamma_{ст} \cdot F_{ст} + \psi_{верх} \cdot F_{верх} + \psi_{ниж} \cdot F_{ниж}}{F_{ст} + F_{верх} + F_{ниж}} \ , \qquad (1.8)$$

де: $F_{ст}$,$F_{верх}$,$F_{ниж}$ — площі поверхонь екранів стін, верхньої та нижньої меж зони активного горіння, м²;

$\gamma_{ст}$ — коефіцієнт теплової ефективності стін;

$\psi_{верх}$ та $\psi_{ниж}$ — коефіцієнти теплової ефективності верхньої та нижньої меж топки.

$$\psi_{з.г} = \frac{271{,}4 \cdot 0{,}55 + 31{,}24 \cdot (0{,}1 + 0{,}55)}{271{,}4 + 2 \cdot 31{,}24} = 0{,}517.$$

Максимальна температура горіння:

$$T_м = \rho_{ст} \cdot T_a \cdot (1 - \psi_{з.г})^{0{,}25} \cdot (1 - r + n_r) \cdot m_r, \qquad (1.9)$$

де: $\rho_{сг}$ — частка згорілого палива на ділянці від виходу з пальника до завершення високотемпературного горіння (для мазуту $\rho_{сг}$=0,98);

r — частка рециркуляції газів у зоні горіння (у задачі r=0);

n_r — коефіцієнт способу введення рециркуляційних газів у топку;

m_r — коефіцієнт, що враховує тип пальників (для вихрових настінних пальників m_r=1;

для прямоточних

$$m_r = 0{,}95 \cdot (25/w_B)^{0{,}2} \ . \qquad (1.10)$$

Розрахунок для вихрових настінних пальників:

$$T_м = 0{,}98 \cdot 2566 \cdot (1 - 0{,}517)^{0{,}25} \cdot (1 - 0) \cdot 1 = 2107 \text{ K}.$$

Для прямоточних настінних пальників:

$$m_r = 0{,}95 \cdot (25/45)^{0{,}2} = 0{,}84,$$

$$T_{\text{м}} = 0{,}98 \cdot 2566 \cdot (1 - 0{,}517)^{0{,}25} \cdot (1 - 0) \cdot 0{,}84 = 1770 \text{ K}.$$

Температурний інтервал активної реакції утворення оксидів азоту:

$$\Delta T_r = \frac{T_m^2 \cdot 10^5}{0{,}614 + T_m \cdot 10^{-5}} \ . \qquad (1.11)$$

Розрахунок для вихрових настінних пальників:

$$\Delta T_r = \frac{2107^2 \cdot 10^5}{0{,}614 + 2107 \cdot 10^{-5}} = 69{,}9 \text{ K}\,.$$

Для прямоточних настінних пальників:

$$\Delta T_r = \frac{1770^2 \cdot 10^5}{0{,}614 + 1770 \cdot 10^{-5}} = 49{,}6 \text{ K}\,.$$

Розрахункова концентрація оксидів азоту:

Для термічних оксидів азоту (у перерахунку на діоксид азоту), г/м³:

$$NO_2^{\text{терм}} = 7{,}03 \cdot 10^3 \cdot C_O^{0{,}5} \cdot \exp\left(-\frac{10860}{T_m}\right) \cdot \frac{\Delta T_r}{t_0}. \qquad (1.12)$$

Для вихрових настінних пальників:

$$t_0 = 0{,}024 \cdot \exp\left(\frac{54290}{T_m} - 23\right), \qquad (1.13)$$

$$t_0 = 0{,}024 \cdot \exp\left(\frac{54290}{2107} - 23\right) = 0{,}38 \text{ с}.$$

$$NO_2^{\text{терм}} = 7{,}03 \cdot 10^3 \cdot 0{,}0014^{0{,}5} \cdot \exp\left(-\frac{10860}{2107}\right) \cdot \frac{69{,}9}{0{,}38} = 0{,}197 \text{ г/м}^3.$$

Для прямоточних пальників:

$$t_0 = 0{,}024 \cdot \exp\left(\frac{54290}{1770} - 23\right) = 0{,}55 \text{ с},$$

$$NO_2^{\text{терм}} = 7{,}03 \cdot 10^3 \cdot 0{,}0014^{0{,}5} \cdot \exp\left(-\frac{10860}{1770}\right) \cdot \frac{49{,}6}{0{,}55} = 0{,}1387 \text{ г/м}^3.$$

Для вихрових настінних пальників:

$$\text{NO}_2^o = \text{NO}_2^{\text{ТР}} + \text{NO}_2^{\text{ТЛ}} = 0{,}197 + 0{,}043 = 0{,}24 \text{ г/м}^3.$$

Для прямоточних пальників:

$$NO_2^o = NO_2^{TP} + NO_2^{TЛ} = 0{,}00038 + 0{,}1387 = 0{,}139 \text{ г/м}^3.$$

Відповідь:

Максимальна сумарна концентрація оксидів азоту:

Для вихрових пальників: NO_x=0,24 г/м^3;

Для прямоточних пальників: NO_x=0,139 г/м^3.

Замінюючи вихрові пальники на прямоточні, вихід оксидів азоту зменшується на 0,101 г/м^3.

1.3 Контрольні запитання

1. Що таке оксиди азоту (NO_x) та які сполуки належать до цієї групи?
2. Які основні джерела утворення оксидів азоту під час спалювання палива?
3. Які існують механізми утворення оксидів азоту?
4. У чому полягає механізм утворення термічних NO_x?
5. Що таке паливні та «швидкі» оксиди азоту?
6. Які фактори впливають на інтенсивність утворення NO_x?
7. Як температура полум’я та коефіцієнт надлишку повітря впливають на утворення оксидів азоту?
8. Які екологічні наслідки спричиняють викиди оксидів азоту?
9. Який вплив оксиди азоту мають на здоров’я людини?
10. Які основні методи зниження утворення NO_x застосовують у котельних установках?
11. У чому полягає різниця між первинними та вторинними методами очищення газів від NO_x?
12. Які вихідні дані необхідні для розрахунку утворення оксидів азоту?
13. Для чого визначають адіабатичну температуру в зоні горіння?
14. Як тип пальників впливає на утворення оксидів азоту?

15. Який висновок можна зробити щодо ефективності заміни вихрових пальників на прямоточні?

2. РОЗРАХУНКИ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ СІРКИ

2.1 Теоретичні відомості

Оксиди сірки у формі діоксиду SO_2 та триоксиду SO_3 утворюються у зоні горіння мазуту й твердих палив, які містять зв'язану сірку (S_p).

Оксиди сірки (SO_x) — це газоподібні сполуки сірки з киснем, які утворюються переважно під час процесів спалювання сірковмісного палива та в ряді промислових процесів.

Найбільше практичне значення має діоксид сірки SO_2, який є основним компонентом викидів SO_x у тепловій енергетиці та промисловості. Триоксид сірки SO_3 утворюється у значно менших кількостях, однак відіграє важливу роль у процесах корозії та утворення кислотних опадів [10].

Основними джерелами утворення оксидів сірки є теплові електростанції, котельні установки, металургійні виробництва, нафтопереробні підприємства, хімічна промисловість, установки спалювання відходів. Оксиди сірки утворюються під час спалювання кам'яного та бурого вугілля, мазуту, дизельного палива, сланців, деяких видів біомаси.

У природному газі вміст сірки, як правило, незначний, тому при його спалюванні утворення SO_x є мінімальним.

Чим більший вміст сірки в паливі, тим більше оксидів сірки утворюється при його згорянні. При спалюванні природного газу утворення оксидів сірки можливе в незначних кількостях за наявності в паливі сірководню (H_2S).

Оксиди сірки є небезпечними атмосферними забруднювачами та негативно впливають на навколишнє середовище. Вони можуть призвести до утворення кислотних дощів, закислення ґрунтів та водойм, корозії металів і будівельних конструкцій, пошкодження рослинності, погіршення якості атмосферного повітря [10].

Діоксид сірки SO_2 подразнює органи дихання та може викликати бронхіти, загострення астми та захворювання легень.

2.2 Розв’язання задач

Задача. Визначити значення SO_3 і tp при спалюванні високосірчистого мазуту (S_p=2,9%) в газощільному котлі ПП-1000-25-545ГМ (ТГМП-324) із тепловим напруженням q_f=6,8 МВт/м² при надлишку повітря αt=1,01, і порівняти ці значення з результатами для котла ПП-25-545ГМ (ТГМП-114), що працює із тепловим напруженням q_f=5,58 МВт/м² при α_t=1,05. Обидва котли працюють у пароблоках із турбінами N0=300 МВт.

Розв'язання: Об’єм продуктів згоряння розраховується за формулою:

$$V_r = V^0 + (\alpha_t - 1) \cdot V^B \ . \tag{2.1}$$

Для котла ТГМП-324:

$$V_r = 10{,}99 + (1{,}01 - 1) \cdot 10{,}2 = 11{,}092 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для котла ТГМП-114:

$$V_r = 10{,}99 + (1{,}05 - 1) \cdot 10{,}2 = 11{,}5 \text{ м}^3/\text{кг}\ .$$

Об’ємна частка діоксиду сірки (**SO_2**) в продуктах згоряння**:**

$$p_{SO_2} = \frac{2 \cdot S_p}{100 \cdot P_{SO_2} \cdot V_r}, \tag{2.2}$$

де:

S_p — вміст сірки у паливі, %;

p_{SO_2}— питома густина діоксиду сірки (P_{SO2}=2,86 кг/м³);

V_r — об'єм продуктів згоряння (м³/кг).

Для ТГМП-324:

$$p_{SO_2} = \frac{2 \cdot 2{,}9}{100 \cdot 2{,}86 \cdot 11{,}092} = 0{,}00183.$$

Для ТГМП-114:

$$p_{SO_2} = \frac{2 \cdot 2{,}9}{100 \cdot 2{,}86 \cdot 11{,}5} = 0{,}00177.$$

Склад залишкового (надлишкового) кисню у продуктах згоряння:

$$O_2 = \frac{21 \cdot (\alpha_t - 1) \cdot V^B}{V_r}. \tag{2.3}$$

Для ТГМП-324:

$$O_2 = \frac{21 \cdot (1{,}01 - 1) \cdot 10{,}2}{11{,}092} = 0{,}19.$$

Для ТГМП-114:

$$O_2 = \frac{21 \cdot (1{,}05 - 1) \cdot 10{,}2}{11{,}5} = 0{,}93.$$

Обчислення концентрації триоксиду сірки у продуктах згоряння:

$$SO_3 = 0{,}424 \cdot p_{SO_2} \cdot O_2^{0,5} \cdot q_f \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)^2, \qquad (2.4)$$

де: q_f — теплове напруження січення;

N/N_0 — відносне навантаження котла (N/N_0=1).

Для ТГМП-324:

$$SO_3 = 0{,}424 \cdot 0{,}00183 \cdot 0{,}19^{0,5} \cdot 6{,}8 \cdot 1 = 2{,}29 \cdot 10^{-3}\%.$$

Для ТГМП-114:

$$SO_3 = 0{,}424 \cdot 0{,}00177 \cdot 0{,}93^{0,5} \cdot 5{,}58 \cdot 1 = 4{,}03 \cdot 10^{-3}\%.$$

Температура точки роси газів (**t_p**):

Для визначення температури точки роси використовуються формули:

Якщо SO_3<$2 \cdot 10^{-3}$%:

$$t_p = 50 + 11 \cdot A^{0,5}. \qquad (2.5)$$

Якщо SO_3>$2 \cdot 10^{-3}$%:

$$t_p = 50 + 50 \cdot A^{0,2}, \qquad (2.6)$$

де A=$SO_3 \cdot 10^4$.

Для ТГМП-324:

$$A = 2{,}29, \quad t_p = 50 + 50 \cdot 2{,}29^{0,2} = 143{,}52\ ℃.$$

Для ТГМП-114:

$$A = 4{,}03, \quad t_p = 50 + 50 \cdot 4{,}03^{0,2} = 154{,}72\ ℃.$$

Відповідь:

Для котла ТГМП-324: SO_3=$2{,}29 \cdot 10^{-3}$ %, t_p=143,52 °С.

Для котла ТГМП-114: SO_3=$4{,}03 \cdot 10^{-3}$ %.

2.3 Контрольні запитання

1. Що таке оксиди сірки SO_x та які основні сполуки до них належать?
2. Під час спалювання яких видів палива найчастіше утворюються SO_2 і SO_3?
3. Чому діоксид сірки SO_2 має найбільше практичне значення у викидах теплової енергетики?
4. Яку роль відіграє триоксид сірки SO_3 у процесах корозії та утворення кислотних опадів?
5. Які основні промислові джерела утворення оксидів сірки?
6. Як вміст сірки в паливі впливає на кількість утворених оксидів сірки?
7. Чому при спалюванні природного газу утворення SO_x зазвичай є мінімальним?
8. Який вплив оксиди сірки мають на довкілля та здоров’я людини?
9. Які вихідні дані необхідні для розрахунку концентрації SO_3 у продуктах згоряння?
10. Що таке температура точки роси газів і чому її важливо визначати під час спалювання високосірчистого мазуту?

3. РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ CO_2 ПРИ СПАЛЮВАННІ ПАЛИВА

3.1 Теоретичні відомості

В сучасних умовах глобального потепління та зміни клімату розрахунок викидів вуглекислого газу - діоксиду вуглецю (CO_2) при спалюванні палива набуває особливої актуальності.

Діоксид вуглецю (CO_2) — це безбарвний газ без запаху, який утворюється в результаті повного окиснення вуглецю під час процесів горіння органічного палива.

Вуглекислий газ є одним із основних парникових газів, що сприяє утриманню тепла в атмосфері та викликає зміни клімату на планеті. Основним джерелом викидів CO_2 є спалювання викопного палива, такого як вугілля, нафта, природний газ, а також біопалива, у процесі виробництва енергії, транспорту чи промислової діяльності [11].

CO_2 є природним компонентом атмосфери, однак значне збільшення його концентрації внаслідок антропогенної діяльності є однією з основних причин посилення парникового ефекту та глобальних кліматичних змін.

Кількість утвореного CO_2 залежить від хімічного складу палива, вмісту вуглецю, теплоти згоряння, ефективності процесу горіння.

Розрахунок викидів CO_2 є важливим етапом для моніторингу впливу діяльності людини на довкілля та впровадження заходів із декарбонізації економіки. Знання точних обсягів викидів дозволяє оцінити ефективність використання палива, оптимізувати технологічні процеси та розробити стратегії зменшення негативного впливу на навколишнє середовище [10].

Цей розрахунок базується на кількості спаленого палива, його теплотворній здатності та коефіцієнтах викидів CO_2, які є специфічними для кожного виду палива. У цьому документі представлено методику розрахунку викидів вуглекислого газу, що допоможе провести оцінку впливу спалювання палива на довкілля та підвищити обізнаність про важливість екологічної стійкості [11].

3.2 Розв’язання задач

Задача 1. Розрахувати викиди шкідливих речовин в атмосферу від опалювальної котельні, що споживає за рік 360 т кам'яного вугілля (підземний спосіб видобутку).

Теплотехнічні характеристики вугілля:

нижча теплота згоряння вугілля $Q^{н}$=27,42 МДж/кг (6550 ккал/кг);

зольність вугілля (на робочу масу) A=14,1%;

вміст сірки (на робочу масу) S=0,6%

Тривалість опалювального періоду: 234 дні (5616 годин).

Витрата вугілля у найхолодніший місяць року (січень): 62 т.

Паропродуктивність котлоагрегата: 0,6 т/год.

Тип топки: з нерухомою решіткою та ручним завантаженням.

Розв’язання: Витрата палива у січні (г/с):

$$m' = \frac{62 \cdot 10^6}{31 \cdot 24 \cdot 3600} = 23{,}15 \text{ г/с.}$$

Розрахунок викидів оксидів вуглецю:

Втрати теплоти через механічну та хімічну неповноту згоряння палива дорівнюють q_4=7%, q_3=2%, R=1 — для твердого палива.

$$C_{CO} = q_3 \cdot R \cdot Q_n = 2 \cdot 1 \cdot 27{,}42 = 54{,}82 \text{ кг/т.}$$

$$M_{CO} = 0{,}001 \cdot 54{,}82 \cdot 360 \cdot (1 - 0{,}07) = 18{,}36 \text{ т/рік.}$$

$$G_{CO} = 0{,}001 \cdot 54{,}82 \cdot 23{,}15 \cdot (1 - 0{,}07) = 1{,}18 \text{ г/с.}$$

Задача 2. Розрахувати викиди шкідливих речовин в атмосферу**,** що видаляються з димовими газами від опалювальної котельні, яка споживає 420 т/рік мазуту з такими характеристиками:

Нижча теплота згоряння Qн=40,30 МДж/кг (9641 ккал/кг)

Вміст сірки S=0,5%

Зольність A=0,1

Витрати палива: 420 т/рік

Тривалість опалювального періоду: 234 дні (5616 годин)

Витрати мазуту у найхолодніший місяць року (січень): 73 т

Паропродуктивність котлоагрегата: 0,5 т/год

Тип топки: камерна

Розв'язання: Витрата палива у січні (г/с):

$$m` = \frac{73 \cdot 10^6}{73 \cdot 24 \cdot 3600} = 26{,}2 \frac{\text{г}}{\text{с}}.$$

Розрахунок викидів оксидів вуглецю

$$M_{CO} = C_{CO} \cdot m \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \cdot 10^{-3}. \quad (3.1)$$

Втрати теплоти через механічну та хімічну неповноту згоряння: q_4=0%, q_3=0,5%, R=0,65 – для мазуту.

$$C_{CO} = q_3 \cdot R \cdot Q_H = 0{,}5 \cdot 0{,}65 \cdot 40{,}30 = 13{,}1 \frac{\text{кг}}{\text{т}}.$$

$$M_{CO} = 0{,}001 \cdot 13{,}1 \cdot 420 \cdot (1 - 0) = 5{,}5 \text{ т/рік}.$$

$$G_{CO} = 0{,}001 \cdot 13{,}1 \cdot 26{,}2 \cdot (1 - 0) = 0{,}34 \frac{\text{г}}{\text{с}}.$$

Задача 3. Розрахувати викиди шкідливих речовин в атмосферу від автотранспорту, який споживає 310 т/рік бензину з такими характеристиками:

Питома витрата палива на 100 км: G=10 л/100 км.

Густина бензину: ρ=0,75 т/м^3.

Вміст вуглецю в паливі: C=85%.

Коефіцієнт перетворення вуглецю у CO_2: K_{CO2}=3,15.

Частка неповного згоряння: q=0,5%.

Загальні вихідні дані**:**

Річний пробіг автомобіля: L=15000 км.

Кількість автомобілів: N=50 од.

Робота транспорту протягом року: W=N·L=50·15000=750000 км/рік.

Розв'язання: Розрахунок загальної витрати палива.

Питома витрата палива на весь пробіг:

$$Q = \frac{G \cdot W}{100}\ , \tag{3.2}$$

де G=10 л/100 км, W=750000 км/рік.

$$Q = \frac{10 \cdot 750000}{100} = 75000 \text{ л/рік.}$$

Загальна маса палива:

$$M_{\text{паливо}} = Q \cdot \rho, \tag{3.3}$$

де ρ=0,75 т/м^3.

$$M_{\text{паливо}} = 75000 \cdot 0{,}75 \cdot 10^{-3} = 56{,}25 \frac{\text{т}}{\text{рік}}.$$

Розрахунок викидів **CO_2** (вуглекислий газ)

Кількість вуглецю в паливі:

$$M_C = M_{\text{паливо}} \cdot C\ , \tag{3.4}$$

де C=85%=0,85.

$$M_C = 56{,}25 \cdot 0{,}85 = 47{,}81 \frac{\text{т}}{\text{рік}}.$$

Маса CO_2, що утворюється:

$$M_{CO_2} = M_C \cdot K_{CO_2}, \tag{3.5}$$

де K_{CO2}=3,15.

$$M_{CO_2} = 47{,}81 \cdot 3{,}15 = 150{,}62 \frac{\text{т}}{\text{рік}}.$$

Розрахунок викидів **CO** (оксид вуглецю)

Кількість палива, що не згоріло повністю:

$$M_{\text{нп}} = M_{\text{паливо}} \cdot q, \tag{3.6}$$

де q=0,5%=0,005.

$$M_{\text{нп}} = 56{,}25 \cdot 0{,}005 = 0{,}281 \text{ т/рік.}$$

Кількість CO, що утворюється:

$$M_{CO} = M_{\text{нп}} \cdot \frac{28}{12}, \tag{3.7}$$

де 28/12 — коефіцієнт перерахунку для CO

$$M_{CO} = 0{,}281 \cdot \frac{28}{12} = 0{,}655 \frac{\text{т}}{\text{рік}}.$$

3.3 Контрольні запитання

1. Що таке діоксид вуглецю (CO_2) та за яких умов він утворюється?
2. Чому CO_2 вважається одним із основних парникових газів?
3. Які основні джерела антропогенних викидів CO_2?
4. Від яких факторів залежить кількість утвореного CO_2 при спалюванні палива?
5. Які види палива є основними джерелами викидів вуглекислого газу?
6. Для чого проводять розрахунок викидів CO_2?
7. Які вихідні дані необхідні для розрахунку викидів CO_2?
8. Що характеризує нижча теплота згоряння палива?
9. Як неповнота згоряння палива впливає на утворення шкідливих речовин?
10. Які особливості розрахунку викидів CO_2 для твердого, рідкого палива та автотранспорту?
11. Яким чином визначають кількість CO_2, що утворюється під час спалювання бензину?
12. Яке значення мають розрахунки викидів CO_2 для забезпечення екологічної безпеки та декарбонізації економіки?

4. РОЗРАХУНОК ЗОЛОВЛОВЛЮЮЧИХ УСТАНОВОК

4.1 Теоретичні відомості

У сучасних умовах підвищеної уваги до екологічних аспектів промислової діяльності особливе значення має зменшення викидів твердих частинок, зокрема золи, у атмосферу. Це пов'язано зі зростаючим негативним впливом промислових викидів на довкілля та здоров'я людей. Одним із найефективніших способів боротьби з цим явищем є застосування золовловлюючих установок, які дозволяють значно скоротити вміст твердих частинок у димових газах.

Золовловлюючі установки використовуються в енергетиці, металургії, хімічній промисловості та інших галузях, де у процесі виробництва утворюються значні об’єми газів, насичених дрібнодисперсними частинками. Їх застосування сприяє дотриманню встановлених норм гранично допустимих викидів, покращенню якості атмосферного повітря та зменшенню витрат на утилізацію відходів [12].

Метою даного розрахунку є оцінка ефективності роботи золовловлюючої установки за визначених параметрів димових газів. Результати розрахунку дозволяють оцінити рівень зменшення концентрації золи у викидах, що є важливим індикатором екологічної ефективності установки та її відповідності екологічним стандартам.

Принцип роботи золовловлюючих установок

Золовловлюючі установки призначені для уловлювання твердих частинок золи, які утворюються під час згоряння палива в котельнях або інших установках. Основні типи золовловлюючих установок мають свої унікальні принципи роботи [12], які дозволяють ефективно очищувати димові гази від золи (рис.4.1).

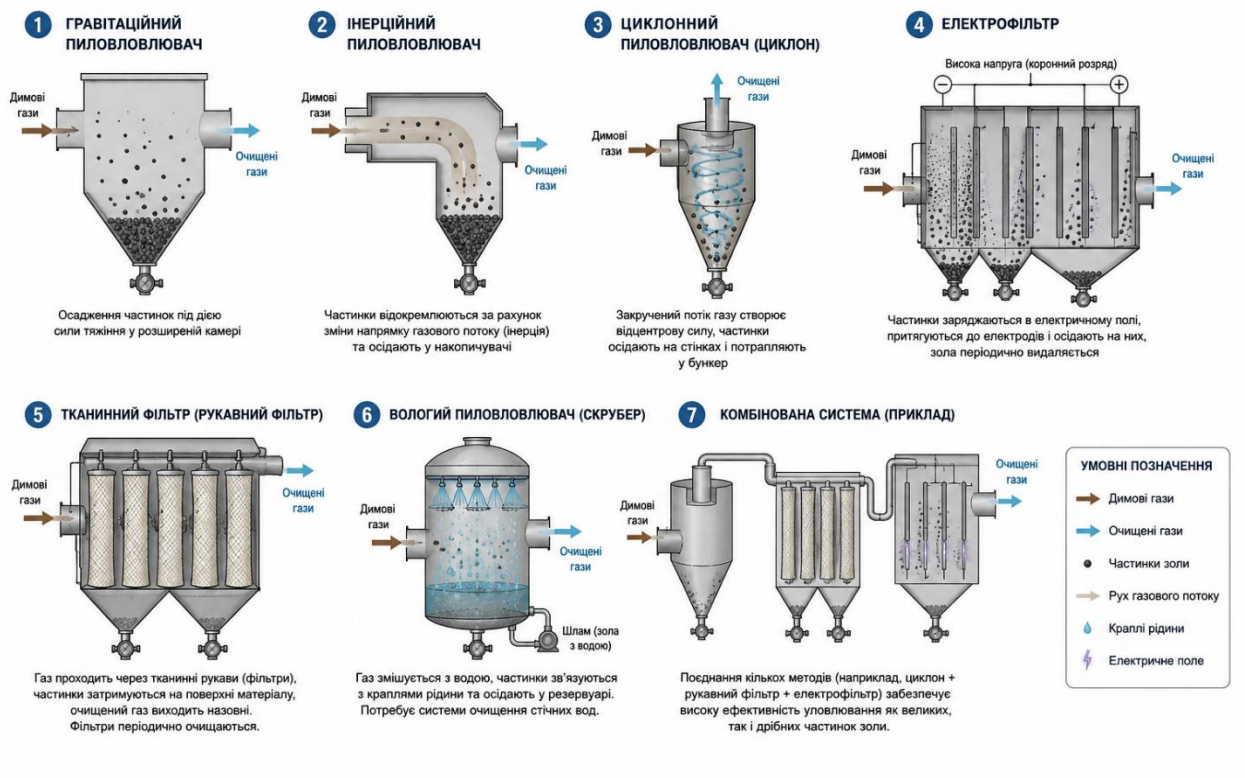


Рисунок 4.1. Різні типи золовловлюючих установок

Гравітаційні пиловловлювачі. Гравітаційні камери працюють за принципом осадження частинок під дією сили тяжіння. Газовий потік, що містить тверді частинки, проходить через розширену камеру, в якій швидкість руху газу знижується. Через уповільнення частинки осідають на дно камери. Гравітаційні пиловловлювачі зазвичай використовують для уловлювання великих частинок золи, однак вони менш ефективні для дрібнодисперсного пилу.

Інерційні пиловловлювачі. В інерційних установках частинки золи відокремлюються за рахунок зміни напрямку руху газового потоку. При проходженні через конструкцію з різкими поворотами частинки, які мають більшу масу, рухаються прямолінійно за інерцією і осідають на поверхні або збираються в спеціальні накопичувачі.

Циклонні пиловловлювачі. У циклонах димовий газ закручується в потік, що обертається, завдяки спеціальній геометрії апарата. Частинки золи відокремлюються під дією відцентрової сили та осідають на стінках циклону,

звідки вони направляються в збірники. Циклонні установки добре працюють для видалення середніх і великих частинок, але їх ефективність зменшується для дрібного пилу.

Електрофільтри. Електрофільтри використовують принцип електростатичного осадження. Частинки пилу в газовому потоці заряджаються у сильному електричному полі за допомогою коронного розряду. Заряджені частинки притягуються до електродів з протилежним зарядом і осідають на них. Цей тип золовловлювачів є надзвичайно ефективним для видалення дрібнодисперсних частинок. Після осадження зола періодично видаляється зі стінок електродів.

Тканинні фільтри. Тканинні фільтри працюють за принципом механічного фільтрування газового потоку через спеціальний матеріал із дрібними порами. Тверді частинки затримуються на поверхні фільтрувального матеріалу, тоді як очищений газ виходить назовні. Цей метод особливо ефективний для видалення найдрібніших частинок, однак фільтри потребують регулярного очищення або заміни.

Вологі пиловловлювачі (скрубери). У вологих установках газовий потік змішується з водою або іншою рідиною. Частинки золи зв'язуються з краплями рідини та осідають разом із нею в спеціальному резервуарі. Скрубери можуть використовуватися для видалення дрібних частинок, але вони вимагають додаткової системи для очищення стічних вод.

Комбіновані системи. У багатьох випадках для досягнення максимальної ефективності очищення застосовуються комбіновані установки, які поєднують декілька описаних методів. Наприклад, циклони можуть використовуватися разом із електрофільтрами або тканинними фільтрами, що дозволяє ефективно видаляти як великі, так і дрібні частинки золи [12].

Вибір типу золовловлюючої установки залежить від багатьох факторів, таких як [13]:

Характеристики димових газів (температура, вологість, швидкість).

Розмір та концентрація твердих частинок.

Вимоги до ступеня очищення газів.

Економічна доцільність експлуатації.

Золовловлюючі установки відіграють ключову роль у зменшенні забруднення атмосфери, що сприяє збереженню довкілля та покращенню якості життя людей.

4.2 Розв’язання задач

Задача 1. Розрахувати викиди твердих часток в атмосферу від опалювальної котельні, що споживає за рік 360 т кам'яного вугілля (підземний спосіб видобутку).

Теплотехнічні характеристики вугілля:

нижча теплота згоряння вугілля $Q^н$=27,42 МДж/кг (6550 ккал/кг);

зольність вугілля (на робочу масу) A=14,1%;

вміст сірки (на робочу масу) S=0,6%

Тривалість опалювального періоду: 234 дні (5616 годин).

Витрата вугілля у найхолодніший місяць року (січень): 62 т.

Паропродуктивність котлоагрегата: 0,6 т/год.

Тип топки: з нерухомою решіткою та ручним завантаженням.

Розв’язання: Витрата палива у січні (г/с):

$$m' = \frac{62 \cdot 10^6}{31 \cdot 24 \cdot 3600} = 23{,}15 \text{ г/с}.$$

Розрахунок викидів твердих частинок у димових газах:

$$M_t = m \cdot A \cdot \chi \cdot (1 - \eta_t)/100\ \chi\ . \qquad (4.1)$$

Коефіцієнт χ для топки з нерухомою решіткою та ручним завантаженням дорівнює 0,0023; за відсутності золовловлювача η_t=0.

$$M_t = 360 \cdot 14{,}1 \cdot 0{,}0023 \cdot (1 - 0) = 11{,}67 \text{ т/рік}$$

$$G_t = 23{,}15 \cdot 14{,}1 \cdot 0{,}0023 \cdot (1 - 0) = 0{,}75 \text{ г/с}$$

Задача 2. Розрахунок ефективності золоулавлюючих установок проводиться для оцінки здатності обладнання зменшувати викиди золи (твердих частинок) в атмосферу.

Вихідні дані:

Параметри димових газів**:**

Об’єм димових газів, $V_г$: 30000 м^3/год.

Температура димових газів, $t_г$: 160 С.

Вміст золи у газах перед очищенням, $С_{до}$: 250 мг/м^3.

Параметри установки**:**

Ефективність уловлювання золи, η: 95%.

Об’єм газів після очищення, $V_г^{оч}$: вважається рівним $V_{г.}$

Вміст золи після очищення, $С_{після}$: визначається розрахунком.

Розв’язання:

1. Маса золи до очищення**:**

$$M_{\text{золи}}^{\text{до}} = V_{\text{г}} \cdot C_{\text{до}} \cdot 10^{-6}, \quad (4.2)$$

де: $V_г$ — об'єм газів до очищення, м^3/год;

$C_{до}$ — концентрація золи до очищення, мг/м^3.

2. Маса золи після очищення**:**

$$M_{\text{золи}}^{\text{після}} = M_{\text{золи}}^{\text{до}} \cdot (1 - \eta), \quad (4.3)$$

де η — ефективність установки в частках

3. Концентрація золи після очищення**:**

$$C_{\text{після}} = \frac{M_{\text{золи}}^{\text{після}}}{V_{\text{г}}} \cdot 10^{6}\ . \quad (4.4)$$

Підставляємо значення:

1. Розрахунок маси золи до очищення**:**

$$M_{\text{золи}}^{\text{до}} = 30000 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 7{,}5 \text{ кг/год.}$$

2. Розрахунок маси золи після очищення**:**

$$M_{\text{золи}}^{\text{після}} = 7{,}5 \cdot (1 - 0{,}95) = 7{,}5 \cdot 0{,}05 = 0{,}375 \text{ кг/год.}$$

3. Розрахунок концентрації золи після очищення**:**

$$C_{\text{після}} = \frac{0{,}375}{30000} \cdot 10^6 = 12{,}5 \text{ мг/м}^3.$$

Результати для зручності занесені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Результати визначення параметрів

Параметр	Одиниці виміру	Значення
Об’єм газів	м^3/год	30000
Температура газів	℃	160
Концентрація золи до очищення	мг/м^3	250
Концентрація золи після очищення	мг/м^3	12,5
Ефективність установки	%	95
Маса золи до очищення	кг/год	7,5
Маса золи після очищення	кг/год	0,375

Висновок

В результаті роботи золоулавлюючої установки, концентрація золи в димових газах зменшилась з 250 мг/м³ до 12,5 мг/м³**.** Це відповідає ефективності очищення 95%. Зола, яка залишається після очищення, становить лише 0,375 кг/год.

4.3 Контрольні запитання

1. Що таке золоулавлюючі установки та для чого вони застосовуються?
2. Які основні джерела утворення твердих частинок у димових газах?
3. Які основні типи золоулавлюючих установок використовуються в промисловості?
4. У чому полягає принцип роботи гравітаційних пиловловлювачів?
5. Як працюють циклонні пиловловлювачі та за рахунок яких сил відбувається осадження частинок?

6. Який принцип роботи електрофільтрів та чому вони ефективні для дрібнодисперсного пилу?
7. Які переваги та недоліки тканинних фільтрів і вологих пиловловлювачів?
8. Від яких факторів залежить вибір типу золоулавлюючої установки?
9. Який вплив тверді частинки та зола мають на довкілля і здоров’я людини?
10. Для чого визначають ефективність золоулавлюючої установки?
11. Які вихідні дані необхідні для розрахунку ефективності очищення димових газів?
12. Як визначається концентрація золи після очищення димових газів?
13. Яке значення мають золоулавлюючі установки для зменшення забруднення атмосферного повітря?

5. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА БЕЗПЕКА ВИКОРИСТАННЯ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

5.1 Теоретичні відомості

Атомна енергетика є однією з найбільш ефективних і потужних галузей енергетики, що забезпечує значну частку світового виробництва електроенергії. Її головною перевагою є здатність генерувати великі обсяги енергії без значних викидів парникових газів, що робить її привабливою з точки зору боротьби зі змінами клімату. На відміну від теплових електростанцій, атомні електростанції практично не утворюють викидів діоксиду вуглецю (CO_2), оксидів сірки (SO_x), оксидів азоту (NO_x) та твердих частинок у процесі виробництва електроенергії. Завдяки цьому атомна енергетика розглядається як один із інструментів зменшення антропогенного впливу на клімат та забезпечення низьковуглецевого розвитку енергетичного сектору [14-15].

Проте використання атомної енергії супроводжується низкою екологічних та безпекових викликів, таких як утилізація радіоактивних відходів, ризик радіаційного забруднення та потенційна небезпека аварій. Основною особливістю атомної енергетики є утворення радіоактивних відходів, які потребують спеціальних умов зберігання, транспортування та захоронення. Відпрацьоване ядерне паливо та інші радіоактивні матеріали можуть зберігати небезпечні властивості протягом тривалого часу, тому питання поводження з ними є одним із найважливіших завдань забезпечення екологічної безпеки атомної галузі. Події, такі як аварії на Чорнобильській АЕС та Фукусімі, підкреслюють важливість дотримання високих стандартів безпеки та мінімізації екологічних ризиків [16].

Особливу увагу приділяють безпеці експлуатації атомних електростанцій. Сучасні АЕС оснащуються багаторівневими системами захисту, які включають фізичні бар’єри, автоматичні системи контролю та аварійного охолодження реактора. Основним принципом забезпечення

ядерної безпеки є концепція «глибокоешелонованого захисту», що передбачає наявність декількох незалежних рівнів захисту для запобігання аваріям та мінімізації їх можливих наслідків.

Важливим екологічним аспектом роботи атомних електростанцій є також тепловий вплив на водні об'єкти, оскільки для охолодження енергоблоків використовуються значні обсяги води. Підвищення температури води у водоймах-охолоджувачах може впливати на стан водних екосистем, тому контроль теплового забруднення є обов'язковою складовою екологічного моніторингу АЕС [16].

Таким чином, атомна енергетика має як суттєві екологічні переваги, пов'язані зі зниженням викидів парникових газів, так і специфічні ризики, що потребують суворого дотримання вимог ядерної та радіаційної безпеки. Ефективне управління радіоактивними відходами, впровадження сучасних технологій захисту та постійний екологічний контроль є необхідними умовами безпечного використання атомної енергії та забезпечення сталого розвитку енергетики [17].

У цьому контексті важливо оцінити екологічні аспекти використання атомної енергетики, її вплив на довкілля та здоров'я людини, а також заходи, спрямовані на підвищення безпеки у цій галузі.

5.2 Розв'язання задач

Задача 1. Розрахунок виробленої енергії ядерною електростанцією (АЕС)

Умова: Ядерний реактор потужністю 1000 МВт працює 8000 годин на рік. Визначити кількість електроенергії, яку виробляє АЕС за рік.

Розв'язання:

Загальна вироблена енергія:

$E = P \cdot t = 1000\ \text{МВт} \cdot 8000\ \text{год} = 8{,}000{,}000\ \text{МВт} \cdot \text{год}$.

Відповідь: АЕС виробляє 8 млн МВт·год енергії за рік.

Задача 2. Порівняння викидів CO_2 від АЕС і ТЕС.

Умова: Викиди CO_2 від ТЕС становлять 800 кг на кожну вироблену МВт·год енергії. АЕС не має прямих викидів CO_2. Визначити, скільки викидів CO_2 можна уникнути за рік, якщо АЕС виробляє 8 млн МВт·год.

Розв'язання:

Викиди від ТЕС:

$W = E \times w_{TEC} = 8{,}000{,}000 \times 800 = 6{,}400{,}000{,}000$ кг $= 6{,}400{,}000$ т.

Відповідь: Використання АЕС дозволяє уникнути 6,4 млн тонн CO_2 на рік.

Задача 3. Розрахунок зменшення радіоактивних відходів при використанні реакторів замкнутого циклу.

Умова: Стандартний реактор виробляє 20 тонн радіоактивних відходів на рік. Реактор замкнутого циклу дозволяє переробити 90% відходів. Скільки тонн відходів залишиться для захоронення?

Розв'язання:

Залишкові відходи:

$W_{зал} = W_{заг} \cdot (1 - r) = 20 \text{ т} \cdot (1 - 0{,}9) = 2$ т.

Відповідь: Для захоронення залишиться 2 тонни відходів.

Задача 4. Розрахунок обсягу радіоактивного захоронення.

Умова: Для захоронення 1 тонни радіоактивних відходів потрібна площа 2 м². АЕС генерує 25 тонн відходів на рік. Визначити площу, необхідну для захоронення відходів за 10 років.

Розв'язання:

Загальна площа:

$S = W \cdot t \cdot s_{на\ т} = 25$ т/рік $\cdot 10$ років $\cdot 2$ м²/т $= 500$ м².

Відповідь: Для захоронення потрібно 500 м² за 10 років.

Задача 5. Час напіврозпаду відходів.

Умова: Час напіврозпаду радіоактивного ізотопу становить 30 років. Початкова маса ізотопу — 100 кг. Визначити масу ізотопу через 90 років.

Розв'язання:

Кількість напіврозпадів:

$$N = \frac{t}{T} = \frac{90}{30} = 3.$$

Залишкова маса:

$$M = M_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^N = 100 \text{ кг} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 = 12{,}5 \text{ кг}.$$

Відповідь: Через 90 років залишиться 12,5 кг ізотопу.

Задача 6. Оцінка економії води на АЕС порівняно з ТЕС.

Умова: ТЕС використовує 2,5 м³ води на кожен МВт·год. АЕС такої ж потужності споживає 1,2 м³ води на МВт·год. Визначити річну економію води, якщо обидві станції виробляють 10 млн МВт·год енергії.

Розв'язання:

Витрати води ТЕС:

$V_{ТЕС}$=10,000,000 МВт·год·2,5 м³/МВт·год=25,000,000 м³.

Витрати води АЕС:

$V_{АЕС}$=10,000,000 МВт·год·1,2 м³/МВт·год=12,000,000 м³.

Економія води:

$\Delta V = V_{ТЕС} - V_{АЕС}$=25,000,000−12,000,000=13,000,000 м³.

Відповідь: Річна економія води становить 13 млн м³.

Задача 7. Оцінка радіаційного фону після аварії.

Умова: Після аварії на АЕС радіаційний фон становить 400 мкЗв/год. Визначити, через скільки часу рівень фону зменшиться до 25 мкЗв/год, якщо період напіврозпаду радіоактивних ізотопів — 10 днів.

Розв'язання:

Кількість напіврозпадів:

$$N = \log_2\left(\frac{I_0}{I}\right) = \log_2\left(\frac{400}{25}\right) = \log_2(16) = 4.$$

Час: t=N·T=4·10=40 днів.

Відповідь: Радіаційний фон зменшиться до 25 мкЗв/год через 40 днів.

Задача 8. Визначення екологічної вигоди від заміни вугільних станцій на АЕС.

Умова: Вугільна електростанція викидає 3000 тонн золи на рік. Визначити кількість золи, якої можна уникнути, якщо замінити 5 таких станцій на одну АЕС.

Розв'язання:

Загальні викиди золи:

W=3000 т·5=15,000 т.

Відповідь: Заміну дозволяє уникнути 15 000 тонн золи.

Задача 9. Визначення дозиметричного впливу радіації.

Умова: Людина працює поблизу джерела радіації, де рівень випромінювання становить 0,2 мЗв/год. Вона працює 8 годин на добу протягом 250 днів на рік. Визначити, яку дозу отримує людина за рік.

Розв'язання:

Доза на день:

$D_{день}$=0,2 мЗв/год·8 год=1,6 мЗв.

Річна доза:

$D_{рік}$=1,6 мЗв/день·365 днів=584мЗв.

Відповідь**:** Людина отримує 584 мЗв радіації на рік.

Задача 10. Оцінка впливу викидів на здоров’я при використанні ядерних технологій.

Умова**:** Ядерний реактор на АЕС виробляє 500 МВт енергії, при цьому викиди радіоактивних часток складають 5 г/МВт·год. Визначити, скільки грамів радіоактивних часток викидає АЕС за рік, якщо вона працює 8000 годин.

Розв’язання:

Загальна кількість викидів:

$W=500\ МВт·год·5\ г/МВт·год=2500\ г/год.$

Річна кількість викидів:

$W_{рік}=2500\ г/год·8000\ год=20{,}000{,}000\ г=20{,}000\ кг.$

Відповідь: АЕС викидає 20 000 кг радіоактивних часток за рік.

Задача 11. Розрахунок екологічної шкоди від аварії на АЕС.

Умова**:** Після аварії на АЕС рівень радіації в зоні відчуження становить 10 мЗв/год. Зона відчуження охоплює територію площею 30 км². Визначити, скільки людина може отримати радіаційної дози, перебуваючи на цій території протягом 2 годин.

Розв’язання:

Доза для людини:

$D=10\ мЗв/год·2\ год=20\ мЗв.$

Відповідь**:** Людина може отримати 20 мЗв радіації за 2 години.

Задача 12. Розрахунок потреби в охолодженні для АЕС.

Умова**:** АЕС потужністю 1000 МВт використовує воду для охолодження, споживаючи 2 м³ води на кожен МВт·год. Визначити обсяг води, необхідний для охолодження АЕС за рік, якщо вона працює 8000 годин.

Розв’язання:

Загальний обсяг води:

$V=1000\ МВт \cdot 8000\ год \cdot 2\ м^3/МВт \cdot год=16{,}000{,}000\ м^3$.

Відповідь**:** АЕС використовує 16 млн $м^3$ води за рік.

Задача 13. Оцінка радіаційного забруднення при аварії.

Умова**:** Після аварії на АЕС рівень радіації у зоні відчуження становить 5 мЗв/год. Визначити, скільки дози радіації отримає людина, перебуваючи в зоні протягом 8 годин.

Розв’язання:

Загальна доза радіації:

$D=5\ мЗв/год \cdot 8\ год=40\ мЗв$.

Відповідь**:** Людина отримає 40 мЗв радіації.

Задача 14. Зниження потужності реактора через екологічні обмеження.

Умова**:** Для забезпечення екологічної безпеки ядерний реактор обмежується в роботі на 15% від номінальної потужності. Визначити, скільки МВт електроенергії зможе виробити реактор, якщо його номінальна потужність становить 1200 МВт.

Розв’язання:

Потужність після обмеження:

$P=1200\ МВт \cdot (1-0{,}15)=1020\ МВт$.

Відповідь**:** Реактор буде виробляти 1020 МВт електроенергії.

Задача 15. Оцінка зменшення ризику радіаційного забруднення за допомогою нових технологій.

Умова**:** Встановлено, що нові технології охолодження знижують рівень радіаційного забруднення на 30%. Якщо без цих технологій рівень радіації становить 0,1 мЗв/год, визначити новий рівень радіації.

Розв’язання:

Новий рівень радіації:

$R_{нов}$=0,1 мЗв/год· (1−0,3)=0,07 мЗв/год.

Відповідь**:** Новий рівень радіації складе 0,07 мЗв/год.

Задача 16. Оцінка витрат води на охолодження АЕС.

Умова: Ядерна електростанція має потужність 1200 МВт. Вона використовує 2 м³ води на кожен МВт·год для охолодження. Визначити, скільки води буде споживатися цією АЕС за рік, якщо вона працює 8000 годин на рік.

Розв’язання:

Витрати води на годину:

$V_{година}$=P·2 м³/МВт·год=1200 МВт×2 м³/МВт·год=2400 м³/год.

Витрати води за рік:

$V_{рік}$=2400 м³/год·8000 год=19,200,000 м³.

Відповідь: Ядерна електростанція використовує 19 200 000 м³ води за рік.

Задача 17. Розрахунок ефективності радіаційного захисту.

Умова: Для забезпечення радіаційного захисту на АЕС використовується матеріал, який знижує рівень радіації на 80%. Початковий рівень радіації становить 50 мЗв/год. Визначити новий рівень радіації після використання захисного матеріалу.

Розв’язання:

Зниження рівня радіації:

$R_{нов}=R_{поч}$· (1−k)=50 мЗв/год· (1−0,8)=50 мЗв/год·0,2=10 мЗв/год.

Відповідь: Новий рівень радіації після захисту становить 10 мЗв/год.

Задача 18. Оцінка радіаційної дози для персоналу АЕС.

Умова: Рівень радіації на робочому місці на АЕС становить 2 мЗв/год. Персонал працює по 8 годин на день, 5 днів на тиждень, 50 тижнів на рік. Визначити річну дозу радіації для персоналу.

Розв'язання:

Доза радіації на день:

Dдень=2 мЗв/год·8 год=16 мЗв/день.

Річна доза:

Dрік=16 мЗв/день·5 днів/тиждень·50 тижнів/рік=4000 мЗв.

Відповідь: Річна доза радіації для персоналу становить 4000 мЗв.

Задача 19. Розрахунок кількості резервуарів для зберігання ядерних відходів.

Умова: Для зберігання відходів атомної електростанції потрібно 0,5 м³ простору на кожну тонну відходів. Ядерна електростанція виробляє 1000 тонн відходів на рік. Визначити, скільки резервуарів потрібно, якщо кожен резервуар має об'єм 50 м³.

Розв'язання:

Загальний обсяг відходів:

$V_{заг}$=1000 т·0,5 м³/т=500 м³.

Кількість резервуарів:

$$N = \frac{V_{заг}}{V_{рез}} = \frac{500\ м^3}{50\ м^3} = 10\ резервуарів.$$

Відповідь: Для зберігання ядерних відходів потрібно 10 резервуарів.

Задача 20. Оцінка викидів радіоактивних часток при аварії на АЕС.

Умова: Під час аварії на АЕС викидається 0,2% радіоактивних часток від загальної кількості зібраних відходів, що становлять 500 тонн. Визначити кількість викинутих радіоактивних часток.

Розв'язання:

Викинуті частки:

$W_{викид}$=500 т·0,002=1 т.

Відповідь: Під час аварії викидається 1 тонна радіоактивних часток.

Задача 21. Розрахунок тривалості роботи реактора при аварії.

Умова: Після аварії на АЕС реактор повинен бути зупинений через 30 хвилин, щоб обмежити рівень радіаційного забруднення. Якщо швидкість накопичення радіації в зоні аварії складає 0,1 мЗв/хв, визначити загальну кількість дози, яку отримає людина за цей час.

Розв'язання:

Загальна доза:

Dзаг=0,1 мЗв/хв·30 хв=3 мЗв.

Відповідь: Загальна доза, яку отримає людина, становить 3 мЗв.

Задача 22. Оцінка радіаційної обстановки.

Під час оцінки радіаційної обстановки потрібно розрахувати ряд величин.

Розв'язання:

1. Визначити рівень радіації на 1 годину після аварії, перерахувавши виміряний рівень радіації за допомогою коефіцієнта

$$P_1 = P_1 \cdot K_{t\text{вим}}, \quad (5.1)$$

де $P_{вим}$ – виміряний рівень радіації, Р/год; $K_{tвим}$ – коефіцієнт перерахунку рівня радіації на час вимірювання.

2. Визначити дозу випромінювання під час роботи в зонах зараження.

$$Д = \frac{P_{ср} \cdot t_p}{K_{осл}}, \text{де} \quad (5.2)$$

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{п}} + P_{\text{к}}}{2}. \quad (5.3)$$

де $P_{\text{п}}$ - рівень радіації на час початку роботи; $P_{\text{к}}$ - рівень радіації на час закінчення роботи; $t_{\text{р}}$ - тривалість роботи; $K_{\text{осл}}$ - коефіцієнт ослаблення радіації.

$$P_{\text{п}} = \frac{P1}{K_{t\text{п}}}, \quad (5.4)$$

$$P_{\text{к}} = \frac{P1}{K_{t\text{к}}}, \quad (5.5)$$

де $K_{t\text{п}}$ та $K_{t\text{к}}$- коефіцієнти перерахунку.

3. Визначення допустимого часу роботи по встановленій дозі опромінення. Розраховується відносна величина *«а»:*

$$a = \frac{P1}{Д_{\text{доп}} \cdot K_{\text{осл}}} \quad , \quad (5.6)$$

де P_1 - рівень радіації на 1 годину після аварії, Р/год;

$Д_{\text{доп}}$-допустима доза опромінення, Р;

$K_{\text{осл}}$-коефіцієнт ослаблення радіації.

По величині *«а»* та часу початку роботи, $t_{\text{поч}}$ визначаємо допустимий час роботи в зоні РЗ, графік, рис 5.1, 5.2.

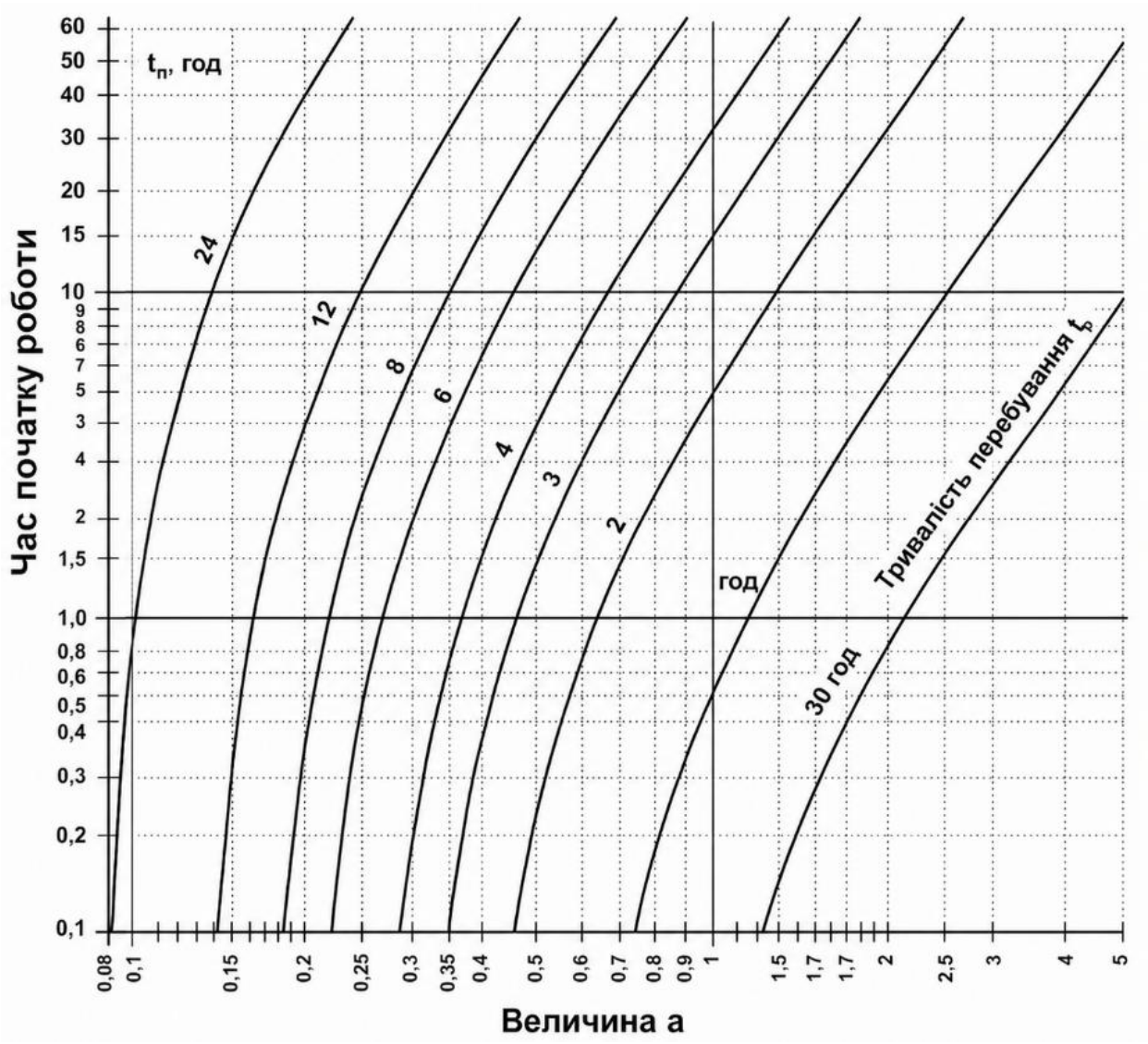


Рисунок 5.1. Графік визначення тривалості перебування в зоні радіоактивного зараження при аварії на АЕС з реактором ВВЕР-1000

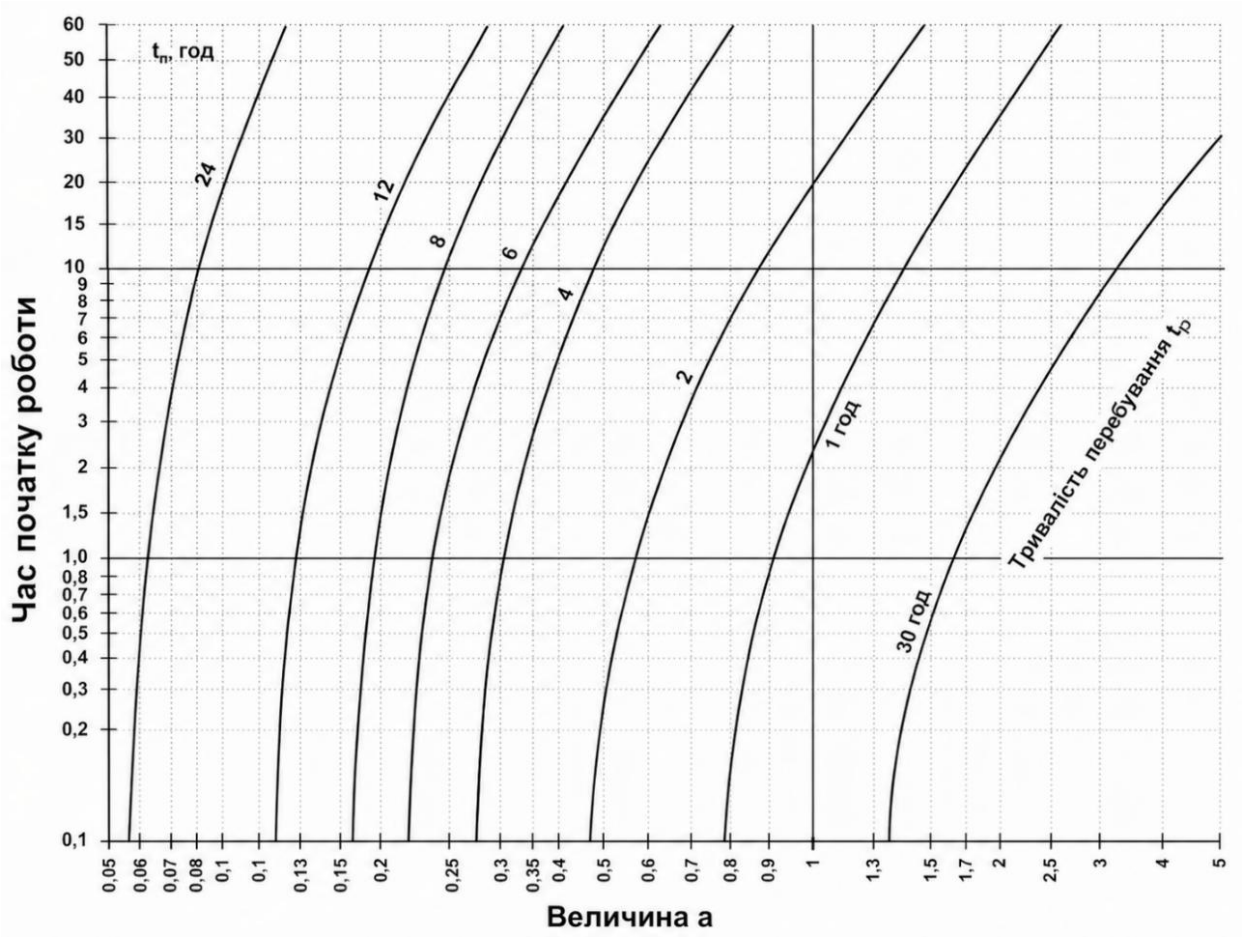


Рисунок 5.2. Графік визначення тривалості перебування в зоні радіоактивного зараження при аварії на АЕС з реактором РБМК-1000

Задача 23. О 3:00 на Північній АЕС відбулася аварія, що спричинило викид радіоактивних речовин. О 3:30 були виміряні рівні радіації в місцях радіоактивного забруднення.

Оцінити радіаційну обстановку для груп ліквідації наслідків за варіантами, табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Варіанти завдань для визначення радіаційної обстановки

Варіанти	Реактор	Рвим, Р/год	Час початку роботи астрон., Тпоч	Тривалість роботи, год	Допуст. доза опромін., Р	Коеф. ослаблення
1	РБМК	25	4	2,5	25	1
2	РБМК	30	4.30	3	15	2
3	РБМК	40	5.00	3,5	20	2
4	РБМК	50	5.30	4	20	3
5	РБМК	25	4.00	2,5	20	1
6	РБМК	35	4.30	3	20	2
7	РБМК	45	5.00	3,5	20	3
8	РБМК	55	5.30	4	20	3
9	РБМК	30	4.00	2,5	20	2
10	РБМК	40	4.30	3	20	3
11	РБМК	50	5.00	3,5	20	3
12	РБМК	60	5.30	4	20	4
13	ВВЕР	25	4.00	2,5	20	1
14	ВВЕР	30	4.30	3	20	1
15	ВВЕР	40	5.00	3,5	20	2
16	ВВЕР	50	5.30	4	20	3
17	ВВЕР	25	4.00	2,5	20	1
18	ВВЕР	35	4.30	3	20	2
19	ВВЕР	45	5.00	3,5	20	3
20	ВВЕР	55	5.30	4	20	3
21	ВВЕР	30	4.00	2,5	20	2
22	ВВЕР	40	4.30	3	20	3
23	ВВЕР	50	5.00	3,5	20	3
24	ВВЕР	60	5.30	4	20	2

При оцінці радіаційної обстановки потрібно вирішити задачі та визначити:

1. Рівень радіації на 1 годину після аварії, P_1= [Р/ год].

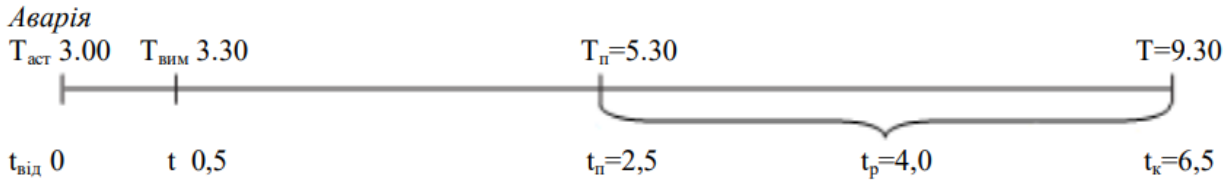
2. Дозу опромінення, яку отримано після під час роботи, Д=[Р].

3. Допустимий час роботи при допустимій (встановленій) дозі опромінення, $t_{доп}$=[год]

4. За результатами розрахунків робимо висновки про можливість виконання роботи та пропозиції із забезпечення безпеки роботи ліквідаторів до початку роботи, під час роботи та після її завершення.

Розв'язання: Приклад розв'язку задач з оцінки радіаційного стану за вихідними даними варіанту №24.

1. Оцінка радіаційного стану здійснюється у відносному часі, тому переводимо астрономічний час у відносний.



$t_п$ – час початку роботи, год;

$t_к$ – час завершення роботи, год;

$t_р$ – тривалість роботи, год.

2. Визначаємо рівень радіації на 1 годину після аварії. Згідно з вихідними даними: $Р_{вим}$ = 60 р/год; $t_{вим}$ = 0,5 год; $К_{t\ вим}$ = 0,7 для реактора ВВЕР, табл.5.2.

$$P_п = P_{вим} \cdot K_{t\ вим} = 60 \cdot 0{,}7 = 42\ Р/год.$$

Таблиця 5.2. Коефіцієнти для перерахунку рівнів радіації на 1 год. після аварії на АЕС (Kt)

t, год	K_1	t, год	K_1	t, год	K_1	t, год	K_1
З реакторами ВВЕР ($K_1 = t^{0,4}$)							
0,5	0,7	4	1,74	7,5	2,24	11	2,61
1	1	4,5	1,83	8	2,3	11,5	2,66
1,5	1,8	5	1,9	8,5	2,35	12	2,7
2	1,32	5,5	1,98	9	2,41	16	3,03
2,5	1,44	6	2,05	9,5	2,46	20	3,31
3	1,55	6,5	2,11	10	2,51	1 доба	3,57
3,5	1,65	7	2,18	10,5	2,56	2 доби	4,70
						14 діб	10,23
З реакторами РВПК ($K_1 = t^{0,3}$)							
t, год	K_1	t, год	K_1	t, год	K_1	t, год	K_1
0,5	0,81	4	1,5	7,5	1,82	11	2,05
1	1	4,5	1,56	8	1,86	11,5	2,08
1,5	1,13	5	1,62	8,5	1,89	12	2,11
2	1,23	5,5	1,66	9	1,93	16	2,29
2,5	1,3	6	1,71	9,5	1,96	20	2,45
3	1,39	6,5	1,75	10	1,99	1 доба	2,59
3,5	1,45	7	1,79	10,5	2,02	2 доби	3,19
						14 діб	5,71

3. Визначаємо дозу випромінення, отриману при роботі в зоні зараження $K_{t\,п} = 1,44$; $K_{t\,к} = 2,11$, табл. 5.2;

$$P_{ср} = \frac{P_п + P_к}{2} = \frac{29,2 + 19,9}{2} = 24,9\ \text{Р/год};$$

$$P_п = \frac{P_1}{K_{tп}} = \frac{42}{1,44} = 29,21\frac{\text{Р}}{\text{год}};$$

$$P_к = \frac{P_1}{K_{tк}} = \frac{42}{2,11} = 19,9\ \text{Р/год};$$

$$Д = \frac{P_{ср} \cdot t_p}{K_{осл}} = \frac{24,6 \cdot 4}{2} = 49,1\ \text{Р/год}.$$

4. Визначаємо допустимий час роботи при допустимій (встановленій) дозі опромінення

$$a = \frac{P_1}{Д_{доп} \cdot K_{осл}} = \frac{42}{20 \cdot 2} = 1{,}05,$$

$$Д_{доп} = 20\ Р, \quad P_1 = 42\,\frac{Р}{год}, \quad K_{осл} = 2.$$

$Д_{доп}$ = 20 Р, $Р_1$ = 42 Р/год, $К_{осл}$ = 2.

За величиною *«a»* = 1,05 і за часом початку роботи, $t_п$ = 2,5 год, допустимий час роботи ≈1,5 год.

5.3 Контрольні запитання

1. Які основні переваги атомної енергетики порівняно з тепловою енергетикою?
2. Чому атомна енергетика вважається низьковуглецевим джерелом енергії?
3. Які основні екологічні ризики пов’язані з використанням атомної енергії?
4. Що таке радіоактивні відходи та чому вони становлять екологічну небезпеку?
5. Які вимоги висуваються до зберігання та захоронення радіоактивних відходів?
6. Які події підтвердили важливість дотримання високих стандартів ядерної безпеки?
7. У чому полягає принцип «глибокоешелонованого захисту» на АЕС?
8. Які системи безпеки використовуються на сучасних атомних електростанціях?
9. Як робота АЕС впливає на водні ресурси та водні екосистеми?
10. Що таке теплове забруднення водойм-охолоджувачів?
11. Які фактори впливають на рівень радіаційного опромінення людини?
12. Що таке період напіврозпаду радіоактивного ізотопу?

13. Для чого проводять оцінку радіаційної обстановки після аварії на АЕС?
14. Які основні задачі вирішуються під час оцінки радіаційної обстановки?
15. Як визначають рівень радіації на 1 годину після аварії?
16. Які параметри необхідні для визначення дози опромінення людини?
17. Що таке допустима доза опромінення та як визначають допустимий час роботи в зоні зараження?
18. Яке значення має коефіцієнт ослаблення радіації?
19. Які заходи безпеки необхідно виконувати під час ліквідації наслідків аварій на АЕС?
20. Яке значення має екологічний контроль та радіаційний моніторинг для безпечної експлуатації АЕС?

6. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА БЕЗПЕКА ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

6.1 Теоретичні відомості

Альтернативні джерела енергії, такі як сонячна, вітрова, геотермальна енергетика, гідроенергетика та біоенергетика, відіграють дедалі важливішу роль у забезпеченні сталого розвитку енергетики в умовах глобальних кліматичних змін та поступового виснаження традиційних паливно-енергетичних ресурсів. Їх використання сприяє зменшенню залежності від викопного палива, скороченню викидів парникових газів та зниженню рівня забруднення атмосферного повітря. На відміну від традиційної енергетики, більшість відновлюваних джерел енергії характеризуються значно меншими обсягами викидів діоксиду вуглецю (CO_2), оксидів сірки (SO_x), оксидів азоту (NO_x) та твердих частинок у процесі виробництва електроенергії [17].

Разом із тим альтернативна енергетика не є повністю безпечною для довкілля та потребує комплексного врахування екологічних аспектів на всіх етапах життєвого циклу енергетичних установок — від виробництва обладнання до його утилізації. Зокрема, будівництво великих вітрових електростанцій може впливати на природні ландшафти та створювати ризики для птахів і кажанів, а гідроелектростанції здатні змінювати гідрологічний режим річок та стан водних екосистем. Виробництво сонячних панелей, акумуляторів і електротехнічного обладнання потребує використання металів, рідкоземельних елементів та хімічних компонентів, що обумовлює необхідність організації ефективної системи переробки та поводження з відходами [3].

Важливим напрямом є забезпечення безпеки експлуатації об’єктів альтернативної енергетики. Для сонячних і вітрових електростанцій особливого значення набувають питання електробезпеки, пожежної безпеки та стабільності роботи енергосистеми. Оскільки виробництво енергії з відновлюваних джерел часто залежить від погодних умов, необхідним є

впровадження систем накопичення енергії, резервних потужностей та сучасних технологій управління енергетичними мережами. Також важливим аспектом є безпечне виведення енергетичних установок з експлуатації після завершення терміну їх роботи [18,19].

Сучасний розвиток альтернативної енергетики базується на принципах екологічної відповідальності, ресурсоефективності та сталого розвитку. Раціональне використання природних ресурсів, впровадження інноваційних технологій, екологічний моніторинг і дотримання міжнародних стандартів безпеки дозволяють мінімізувати негативний вплив на довкілля та забезпечити ефективне функціонування відновлюваної енергетики. Таким чином, альтернативні джерела енергії є важливим складником переходу до більш екологічно безпечної та низьковуглецевої енергетичної системи [20,21].

6.2 Розв’язання задач

Задача 1. Розрахунок зменшення викидів CO_2 при використанні сонячної енергії.

Умова: Традиційна вугільна електростанція потужністю 1 МВт виробляє 8000 МВт·год електроенергії на рік і викидає 1 кг CO_2 на кожен вироблений кВт·год. Сонячна електростанція такої ж потужності не має прямих викидів CO_2. Визначити, на скільки зменшаться викиди CO_2, якщо енергія буде вироблятися на сонячній електростанції.

Розв’язання:

Загальна кількість виробленої енергії на рік:

$E=8000$ МВт·год$=8,000,000$ кВт·год.

Викиди CO_2 традиційної електростанції:

$W=E\cdot 1$ кг/кВт·год$=8,000,000$ кг$=8,000$ т.

Викиди CO_2 сонячної електростанції:

$W_{сон}=0$ кг/кВт·год.

Різниця викидів:

$\Delta W = W - W_{сон} = 8{,}000\ т - 0 = 8{,}000\ т.$

Відповідь: Використання сонячної електростанції дозволяє зменшити викиди CO_2 на 8000 тонн на рік.

Задача 2. Оцінка площі землі для вітрової електростанції.

Умова: Вітрова електростанція має виробляти 100 МВт потужності. Один вітрогенератор потужністю 2 МВт займає площу 0,5 га. Визначити площу землі, необхідну для розміщення всієї електростанції, якщо генератори розташовані з урахуванням інтервалів, що збільшують площу в 4 рази.

Розв’язання:

Кількість вітрогенераторів:

$$N = \frac{100\ \text{МВт}}{2\ \text{МВт}} = 50\ \text{шт.}$$

Площа для одного генератора з урахуванням інтервалів:

$S_1 = 0{,}5\ га \cdot 4 = 2\ га.$

Загальна площа для розміщення:

$S_{заг} = S_1 \cdot N = 2\ га \cdot 50 = 100\ га.$

Відповідь: Для розміщення вітрової електростанції потужністю 100 МВт потрібна площа 100 га.

Задача 3. Оцінка зменшення водоспоживання при переході на сонячну енергетику.

Умова: Теплова електростанція для охолодження використовує 1,5 м³ води на виробництво 1 МВт·год електроенергії. Сонячна електростанція такого ж типу не потребує води для охолодження. Визначити, скільки води буде зекономлено, якщо щорічно сонячна електростанція замінить теплову електростанцію потужністю 50 МВт (з коефіцієнтом використання потужності 0,8).

Розв’язання:

Розрахуємо щорічну вироблену енергію тепловою електростанцією:

$E = P \cdot 8760 \text{ год} \cdot K = 50 \text{ МВт} \cdot 8760 \text{ год} \cdot 0{,}8 = 350{,}400 \text{ МВт} \cdot \text{год}$.

Об’єм води, необхідний для охолодження:

$V = E \cdot 1{,}5 \text{ м}^3/\text{МВт} \cdot \text{год} = 350{,}400 \text{ МВт} \cdot \text{год} \cdot 1{,}5 \text{ м}^3/\text{МВт} \cdot \text{год} = 525{,}600 \text{ м}^3$

Відповідь: Перехід на сонячну електростанцію дозволить зекономити 525 600 м³ води на рік.

Задача 4. Порівняння забруднення від біомаси та природного газу.

Умова: Біоенергетична установка спалює 100 тонн біомаси на добу, виробляючи 50 МВт·год енергії. Установка на природному газі з такою ж потужністю викидає 200 кг CO_2 на кожен МВт·год. Визначити різницю в загальних викидах CO_2, якщо викиди біоустановки становлять 50 кг CO_2 на кожен МВт·год через неповне згорання.

Розв’язання:

Розрахуємо викиди біоенергетичної установки:

$W_{біо} = 50 \text{ МВт} \cdot \text{год} \cdot 50 \text{ кг/МВт} \cdot \text{год} = 2500 \text{ кг/день}$.

Розрахуємо викиди газової установки:

$W_{газ} = 50 \text{ МВт} \cdot \text{год} \cdot 200 \text{ кг/МВт} \cdot \text{год} = 10{,}000 \text{ кг/день}$.

Різниця викидів: $\Delta W = W_{газ} - W_{біо} = 10{,}000 \text{ кг} - 2500 \text{ кг} = 7500 \text{ кг}$.

Відповідь: Використання біоенергетичної установки дозволяє зменшити викиди CO_2 на 7500 кг на добу порівняно з установкою на природному газі.

Задача 5. Розрахунок економії вуглецевих викидів при використанні геотермальної енергії.

Умова: Геотермальна станція виробляє 1 ГВт·год енергії без викидів CO_2. Вугільна електростанція для такої ж кількості енергії викидає 800 тонн CO_2. Скільки тонн вуглецю буде зекономлено за рік, якщо геотермальна станція виробляє 200 ГВт·год енергії?

Розв’язання:

Викиди CO_2 вугільної станції для 1 ГВт·год:

$W_{вугілля}$=800 т/ГВт·год.

Викиди для 200 ГВт·год:

$W_{вугілля}$=800 т/ГВт·год·200 ГВт·год=160,000 т.

Геотермальна станція не викидає CO_2.

Відповідь: Використання геотермальної станції дозволяє зекономити 160 000 тонн CO_2 на рік.

Задача 6. Визначення зниження викидів CH_4 при переході на біогаз.

Умова: Сільськогосподарська ферма виробляє 10 тонн органічних відходів на день. При їх розкладанні без утилізації утворюється 200 кг метану (CH_4) на тонну. Установка з виробництва біогазу дозволяє перетворити цей метан на енергію. Визначити кількість метану, утилізованого за рік, якщо вся сировина йде на виробництво біогазу.

Розв'язання:

Викиди CH_4 від 1 тонни:

$W_{CH_4/день}$=10 т·200 кг/т=2000 кг/день.

Утилізований метан за рік:

$W_{CH_4/рік}$=2000 кг/день·365=730,000 кг=730 т.

Відповідь: За рік установка утилізує 730 тонн метану.

Задача 7. Розрахунок енергоефективності біоенергетичної установки.

Умова: Біоенергетична установка споживає 15 тонн біомаси на добу та виробляє 300 ГДж енергії. Визначити енергетичну ефективність, якщо нижча теплота згоряння біомаси становить 15 МДж/кг.

Розв'язання:

Теплова енергія біомаси:

$Q_{вх}$=15 т·1000 кг/т·15 МДж/кг=225,000 МДж.

Ефективність:

$$\eta = \frac{Q_{вих}}{Q_{вх}} \cdot 100 = \frac{300}{225} \cdot 100 = 80\%.$$

Відповідь: Енергетична ефективність установки становить 80%.

Задача 8. Розрахунок площі для сонячної ферми.

Умова: Сонячна ферма має виробляти 20 МВт·год енергії на добу. Один сонячний модуль потужністю 300 Вт займає площу 2 м² та працює 5 годин на добу. Визначити необхідну площу для розміщення модулів.

Розв'язання:

Потужність одного модуля за добу:

$E_{модуль}$=0,3 кВт·5 год=1,5 кВт·год.

Кількість модулів:

$$N = \frac{20{,}000}{1{,}5} = 13{,}333 \text{ шт.}$$

Загальна площа:

S=13,333·2 м²=26,666 м²=2,67 га.

Відповідь: Необхідна площа для сонячної ферми становить 2,67 га.

Задача 9. Зменшення викидів при використанні вітрової енергії.

Умова: Теплова електростанція викидає 0,8 кг CO_2 на кожен кВт·год енергії. Вітрова електростанція виробляє 500 МВт·год на добу. Визначити річне зменшення викидів CO_2.

Розв'язання:

Викиди CO_2 від теплової електростанції за добу:

$W_{доб}$=500 МВт·год·0,8 кг/кВт·год=400 т.

Річне зменшення:

$W_{рік}$=400 т/день·365=146,000 т.

Відповідь: Річне зменшення викидів CO_2 становить 146 000 тонн.

Задача 10. Оцінка економії води при переході на вітрову енергію.

Умова: Теплова електростанція використовує 1,2 м³ води для виробництва 1 МВт·год енергії. Вітрова електростанція з потужністю 50 МВт працює 300 днів на рік. Визначити обсяг води, що зекономиться.

Розв’язання:

Річна вироблена енергія:

$E=50\ МВт·24\ год·300=360{,}000\ МВт·год.$

Економія води:

$V=360{,}000\ МВт·год·1{,}2\ м^3/МВт·год=432{,}000\ м^3.$

Відповідь: Економія води становить 432 000 м³.

Задача 11. Порівняння витрат енергії на виробництво біогазу.

Умова: Біогазова установка споживає 10% виробленої енергії на власні потреби. Якщо установка виробляє 500 ГДж енергії на місяць, скільки залишається для зовнішнього використання?

Розв’язання:

Витрати на власні потреби: $E_{власні}=500\ ГДж×0{,}1=50\ ГДж.$

Енергія для зовнішнього використання: $E_{зовн}=500−50=450\ ГДж.$

Відповідь: Для зовнішнього використання залишається 450 ГДж.

Задача 12. Оцінка екологічних вигод геотермальної енергії.

Умова: Геотермальна установка забезпечує 100 ГВт·год на рік, що еквівалентно 10% енергії, яку раніше виробляла теплова електростанція. Викиди CO_2 від теплової електростанції становлять 900 кг/МВт·год. Скільки викидів CO_2 зекономить геотермальна енергія?

Розв’язання:

Викиди теплової електростанції:

$W=100{,}000\ МВт·год·0{,}9\ т/МВт·год=90{,}000\ т.$

Відповідь: Геотермальна енергія зекономить 90 000 тонн CO_2.

Задача 13. Розрахунок окупності вітрової електростанції.

Умова: Будівництво вітрової електростанції коштує $50 млн, а щорічний дохід від зекономленої енергії та продажу "зелених" сертифікатів — $6 млн. Визначити термін окупності.

Розв’язання:

Термін окупності:

$$T = \frac{\text{Вартість}}{\text{Дохід}} = \frac{50}{6} \approx 8{,}33 \text{ років.}$$

Відповідь: Термін окупності становить 8,33 роки.

Задача 14. Розрахунок енергії від біогазу.

Умова: Установка з 1 тонни органічних відходів виробляє 100 м³ біогазу, нижча теплота згоряння якого становить 21 МДж/м³. Скільки енергії виробить установка за рік, якщо вона переробляє 5 тонн відходів щодня?

Розв’язання:

Щоденна кількість біогазу:

$V = 5 \text{ т} \cdot 100 \text{ м}^3/\text{т} = 500 \text{ м}^3$.

Щоденна енергія:

$E_{\text{день}} = 500 \text{ м}^3 \cdot 21 \text{ МДж/м}^3 = 10{,}500 \text{ МДж}$.

Річна енергія:

$E_{\text{рік}} = 10{,}500 \text{ МДж} \cdot 365 = 3{,}832{,}500 \text{ МДж} = 3{,}832{,}5 \text{ ГДж}$.

Відповідь: Установка виробляє 3832,5 ГДж енергії на рік.

6.3 Контрольні запитання

1. Які джерела енергії належать до альтернативних (відновлюваних)?
2. Чому альтернативна енергетика є важливою для сталого розвитку?
3. Які екологічні переваги мають відновлювані джерела енергії порівняно з традиційною енергетикою?
4. Як використання альтернативних джерел енергії впливає на викиди парникових газів?

5. Які екологічні ризики можуть виникати під час експлуатації вітрових електростанцій?
6. Як гідроелектростанції можуть впливати на водні екосистеми?
7. Чому виробництво сонячних панелей та акумуляторів потребує екологічного контролю?
8. Які заходи необхідні для безпечної експлуатації об’єктів альтернативної енергетики?
9. Чому для сонячних і вітрових електростанцій важливими є системи накопичення енергії?
10. Які переваги має використання біогазу та біоенергетичних установок?
11. Як альтернативна енергетика сприяє зменшенню споживання водних ресурсів?
12. Які принципи лежать в основі сучасного розвитку альтернативної енергетики?
13. Яке значення мають альтернативні джерела енергії для зменшення негативного впливу на довкілля та переходу до низьковуглецевої економіки?

7. АНАЛІЗ ТЕПЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

7.1 Теоретичні відомості

Теплове забруднення водних ресурсів є однією з важливих екологічних проблем сучасності, що виникає внаслідок інтенсивної господарської та промислової діяльності людини. Воно проявляється у штучному підвищенні температури води у природних водоймах порівняно з її природним температурним режимом. Найчастіше таке забруднення спостерігається поблизу теплових та атомних електростанцій, металургійних підприємств, хімічних виробництв, нафтопереробних заводів та інших промислових об’єктів, де вода використовується як охолоджувальний агент у технологічних процесах. Після використання нагріта вода повертається у водойми, що призводить до зміни їх теплового балансу та негативного впливу на водні екосистеми [15].

Одним із найбільш небезпечних наслідків теплового забруднення є зниження концентрації розчиненого кисню у воді. З підвищенням температури здатність води утримувати кисень зменшується, що створює несприятливі умови для існування риб, молюсків, планктону та інших водних організмів. Дефіцит кисню може спричиняти масову загибель гідробіонтів, порушення процесів самоочищення водойм та деградацію водних екосистем. Особливо чутливими до змін температури є холодноводні види риб, для яких навіть незначне підвищення температури може бути критичним [22].

Підвищення температури води також впливає на біологічні та фізико-хімічні процеси у водоймах. Зокрема, прискорюється розвиток водоростей і мікроорганізмів, що може викликати евтрофікацію водойм — надмірне «цвітіння» води. Це призводить до погіршення прозорості води, появи неприємного запаху, накопичення токсичних речовин та подальшого зменшення вмісту кисню. Крім того, зміна температурного режиму порушує природні цикли розвитку водних організмів, впливає на процеси нересту риб, міграцію та кормову базу багатьох видів.

Негативний вплив теплового забруднення проявляється також у зміні хімічного складу води. При підвищенні температури активізуються хімічні реакції, збільшується токсичність окремих забруднювачів та швидкість розкладання органічних речовин. У результаті можуть утворюватися шкідливі сполуки, небезпечні як для водних організмів, так і для людини. Погіршення якості води ускладнює її використання для питного водопостачання, рибного господарства, рекреації та інших потреб [8].

Особливої уваги потребує тепловий вплив електростанцій на водойми-охолоджувачі. Теплові та атомні електростанції споживають значні обсяги води для охолодження обладнання, а температура скидних вод може бути суттєво вищою за природну температуру водойми. У таких умовах формується зона теплового впливу, в межах якої змінюються екологічні умови існування живих організмів. Для зменшення негативного впливу застосовуються спеціальні системи охолодження, зокрема градирні, охолоджувальні ставки та замкнуті системи водопостачання.

Аналіз теплового забруднення водних ресурсів включає моніторинг температурного режиму водойм, оцінку концентрації розчиненого кисню, дослідження стану біоти та визначення змін фізико-хімічних показників води. Отримані результати дозволяють оцінити ступінь антропогенного навантаження та розробити заходи щодо мінімізації негативного впливу. До основних природоохоронних заходів належать удосконалення систем охолодження, повторне використання води у виробничих циклах, впровадження енергоефективних технологій та дотримання екологічних нормативів щодо температури скидних вод [6].

Таким чином, теплове забруднення є важливим фактором деградації водних екосистем і потребує постійного екологічного контролю. Раціональне використання водних ресурсів, впровадження сучасних технологій охолодження та ефективний екологічний моніторинг є необхідними умовами

забезпечення екологічної безпеки та збереження природної рівноваги водних об’єктів.

7.2 Розв’язання задач

Задача 1. Обчислення збільшення температури води.

Протягом години на річку скидається 500 куб. м гарячої води з температурою 70°C. Температура води в річці до скидання становить 15°C. Визначте, на скільки підвищиться температура води в річці, якщо її об'єм до скидання становить 5000 куб. м.

Розв'язання:

Скористаємося рівнянням теплового балансу:

$$Q=m\cdot c\cdot \Delta T, \tag{7.1}$$

де:

Q — кількість тепла, що передається воді,

m — маса води,

c — теплоємність води (приблизно 4200 Дж/кг°C),

ΔT — зміна температури.

Знаходимо кількість тепла, яке передається воді:

$$Q=V\cdot \rho \cdot c\cdot \Delta T, \tag{7.2}$$

де:

V — об'єм води, ρ — густина води (1000 кг/м³).

Об'єм скинутого гарячого потоку води — 500 м³, температура води після скидання — 70°C, до скидання температура води в річці — 15°C.

Визначаємо нову температуру води в річці:

$$\Delta T \quad = \frac{500\cdot 70-500\cdot 15}{5000} = 5^{\circ}C$$

Відповідь: Температура води в річці підвищиться на 5°C.

Задача 2. Визначення втрат кисню через теплове забруднення.

Температура води на виході з електростанції становить 45°C, а температура природної води до скидання — 15°C. Якщо в річці через підвищення температури втрачається 20% кисню, то на скільки зменшиться кількість розчиненого кисню в 1 куб. м води?

Розв'язання:

Підвищення температури на 30°C може призвести до зниження рівня розчиненого кисню в воді. При підвищенні температури кисень розчиняється гірше. Зазвичай на кожні 10°C температури кисень зменшується на 5-7%.

Якщо втрачається 20% кисню, то на 1 куб. м води кількість кисню зменшується на 20%.

Відповідь: Кількість розчиненого кисню в 1 куб. м води зменшиться на 20%.

Задача 3. Розрахунок обсягу скиду гарячої води.

Температура води в річці до скидання становить 18°C. В електростанції на годину скидається 800 куб. м води з температурою 60°C. Як вплине це на температуру води в річці об'ємом 5000 куб. м?

Розв'язання:

Використовуємо рівняння теплового балансу:

$$Q_{\text{річка}}=Q_{\text{скид}}, \tag{7.4}$$

де:

$Q_{\text{річка}}=m_{\text{річка}}\cdot c\cdot\Delta T_{\text{річка}}$,

$Q_{\text{скид}}=m_{\text{скид}}\cdot c\cdot\Delta T_{\text{скид}}$.

Обчислюємо зміни температури:

$$\Delta T_{\text{річка}} = \frac{m_{\text{скид}} \cdot (T_{\text{скид}} - T_{\text{річка}})}{m_{\text{річка}}} \tag{7.5}$$

Знаходимо температуру після скидання:

$$\Delta T_{\text{річка}} = \frac{800\cdot(60-18)}{5000} = 6{,}72\ ^0\text{C}.$$

Відповідь: Температура води в річці підвищиться на 6.72°C.

Задача 4. Обчислення ефекту зниження біорізноманіття.

Підвищення температури води на 5°C призводить до скорочення популяції риб на 10%. Якщо в річці проживає 1000 риб, скільки риб загине через теплове забруднення води?

Розв'язання:

Якщо на кожні 5°C температура зменшує популяцію риб на 10%, то 10% від 1000 риб — це 100 риб.

Відповідь: Загине 100 риб.

Задача 5. Порівняння ефективності систем охолодження.

Електростанція має дві охолоджувальні системи. Перша скидає воду з температурою 40°C, а друга — з температурою 50°C. Як це впливає на екологію води, якщо обсяг води на виході однаковий?

Розв'язання: Підвищення температури на 50°C спричинить більші зміни в екосистемі, ніж на 40°C, оскільки вищі температури ведуть до більшого зниження рівня кисню і пошкоджують організми, чутливі до змін температури.

Відповідь: Система з температурою 50°C буде мати більший вплив на екологію води.

Задача 6. Розрахунок теплового навантаження.

На теплову електростанцію скидається 1000 куб. м води з температурою 75°C. Вода має об'єм 10000 куб. м, і температура води до скидання становить 20°C. Як це вплине на температуру води в річці?

Розв'язання:

Використовуємо рівняння теплового балансу:

$Q_{\text{річка}}=Q_{\text{скид}}$

Знаходимо температуру води після скидання:

$$\Delta T = \frac{1000 \cdot (75-20)}{10000} = 5.5^{\circ}C.$$

Відповідь: Температура води в річці підвищиться на 5.5°C.

Задача 7. Визначення зміни температури в озері.

Скидається 200 куб. м гарячої води з температурою 70°C в озеро об'ємом 5000 куб. м, де температура води до скидання становить 10°C. Як зміниться температура води в озері?

Розв'язання:

Застосуємо рівняння теплового балансу:

$$\Delta T = \frac{200 \cdot (70-10)}{5000} = 2.4^{\circ}C.$$

Відповідь: Температура води в озері підвищиться на 2.4°C.

Задача 8. Оцінка впливу на риболовлю.

Внаслідок теплового забруднення води температура річки підвищилась на 3°C, що призвело до зниження популяції риб на 5%. Яку кількість риб втрачено, якщо в річці було 2000 риб?

Розв'язання:

Втрата риб становить 5% від 2000:

Втрата риб=2000·0.05=100риб .

Відповідь: Втрачено 100 риб.

Задача 9. Визначення кількості тепла, що передається воді

Під час скидання води з температурою 80°C на річку, температура якої 10°C, кількість тепла, що передається воді, становить 5000 кДж. Обчисліть обсяг води, що скидається, якщо теплоємність води становить 4.2 кДж/кг°C.

Розв'язання:

Використовуємо рівняння:

Q=m·c·ΔT,

де Q= 5000 кДж, c=4.2 кДж/кг·°C, ΔT=80−10=70°C.

Розв'язуємо для маси m:

5000=m·4.2·70.

$$m = \frac{5000}{4.2 \cdot 70} = 17.86 \text{ кг.}$$

Відповідь: Обсяг скидається води дорівнює 17.86 куб. м.

Задача 10. Визначення впливу на здоров'я через теплове забруднення.

Температура води на виході з підприємства складає 50°C, а на поверхні річки — 20°C. Визначте, на скільки порушиться екологічний баланс, якщо в результаті підвищення температури буде зменшена кількість кисню на 10%.

Розв'язання:

Зменшення кількості кисню на 10% негативно впливає на здоров'я водних організмів, особливо риб.

Відповідь: Екологічний баланс буде порушений через зменшення кисню на 10%.

Задача 11. Визначення розмірів охолоджувальної системи.

Електростанція скидає 3000 куб. м води з температурою 70°C в річку, де температура води становить 15°C. Скільки куб. м води повинно бути у річці, щоб температура не підвищувалася більше ніж на 3°C?

Розв'язання:

Використовуємо рівняння теплового балансу:

$Q_{\text{річка}}=Q_{\text{скид.}}$

$$\Delta T_{\text{річка}} = \frac{3000 \cdot (70 - 15)}{V_{\text{річка}}}.$$

Визначимо об'єм $V_{\text{річка}}$, при якому зміна температури не перевищує 3°C:

$$3 = \frac{3000 \cdot (70 - 15)}{V_{\text{річка}}}.$$

$$V_{\text{річка}} = \frac{3000 \cdot (70 - 15)}{3} = 60000 \text{ м}^3.$$

Відповідь: Обсяг річки має бути не меншим за 60000 куб. м.

Задача 12. Розрахунок теплового навантаження на річку.

В електростанції щогодини скидається 500 куб. м води з температурою 80°C. Температура води в річці до скидання становить 15°C. Як зміниться температура води в річці об'ємом 10000 куб. м?

Розв'язання:

Використовуємо рівняння теплового балансу:

$$\Delta T_{\text{річка}} = \frac{500 \cdot (80 - 15)}{10000} = 3.25^{\circ}C$$

Відповідь: Температура води в річці підвищиться на 3.25°C.

Задача 13. Визначення втрат біорізноманіття через підвищення температури.

Підвищення температури води на 4°C призводить до зменшення чисельності водних організмів на 12%. Яка кількість водних організмів загине, якщо їх початкова чисельність була 5000?

Розв'язання:

Втрати водних організмів становитимуть 12% від 5000:

Втрати=5000·0.12=600

Відповідь: Загине 600 водних організмів.

Задача 14. Обчислення зміни температури води в озері після скиду гарячої води.

В електростанція скидає 1000 куб. м води з температурою 60°C в озеро об'ємом 8000 куб. м. Температура води в озері до скидання становить 15°C. Як зміниться температура води в озері?

Розв'язання:

Використовуємо рівняння теплового балансу:

$$\Delta T = \frac{1000 \cdot (60 - 15)}{8000} = 5.625^{\circ}C.$$

Відповідь: Температура води в озері підвищиться на 5.625°C.

Задача 15. Розрахунок зміни популяції риб через теплове забруднення

Через підвищення температури води на 6°C популяція риб у річці зменшується на 15%. Якщо в річці нараховувалося 3000 риб, на скільки зменшиться популяція?

Розв'язання: Зменшення популяції риб становить 15% від 3000:

Зменшення популяції=3000·0.15=450.

Відповідь: Популяція риб зменшиться на 450 особин.

7.3 Контрольні запитання

1. Що таке теплове забруднення водних ресурсів?
2. Які основні джерела теплового забруднення водойм?
3. Як підвищення температури води впливає на водні екосистеми?
4. Чому при підвищенні температури зменшується концентрація розчиненого кисню у воді?
5. Які водні організми найбільш чутливі до теплового забруднення?
6. Що таке евтрофікація водойм і як вона пов’язана з тепловим забрудненням?
7. Який вплив теплове забруднення має на процеси нересту та міграції риб?
8. Як зміна температури води впливає на хімічний склад водойм?
9. Чому теплові та атомні електростанції можуть спричиняти теплове забруднення?
10. Що таке зона теплового впливу водойми?
11. Які системи застосовують для зменшення теплового впливу електростанцій на водойми?

12. Які показники визначають під час аналізу теплового забруднення водних ресурсів?
13. Для чого використовують рівняння теплового балансу під час розрахунків?
14. Як визначається зміна температури води після скидання гарячих стоків?
15. Який вплив має теплове забруднення на біорізноманіття водойм?
16. Яке значення має екологічний моніторинг для контролю теплового забруднення водних ресурсів?

8. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМЕНШЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ

8.1 Теоретичні відомості

Інноваційні технології зменшення шкідливих викидів є одним із найважливіших напрямів сучасної екологічної політики та технологічного розвитку промисловості, енергетики й транспорту. Їх впровадження спрямоване на скорочення викидів парникових газів, токсичних речовин, пилу та інших забруднювачів, що негативно впливають на довкілля та здоров'я людини. Умови глобальних кліматичних змін, зростання обсягів виробництва та посилення екологічних вимог стимулюють розвиток новітніх технологічних рішень, здатних забезпечити екологічно безпечне та ресурсоефективне функціонування сучасної економіки [3].

Одним із ключових напрямів є впровадження енергоефективних технологій, які дозволяють зменшити споживання палива та, відповідно, обсяги шкідливих викидів. Сучасні енергоефективні котли, турбіни, теплообмінники, системи рекуперації тепла та автоматизовані системи управління виробничими процесами забезпечують більш повне використання енергетичних ресурсів і зменшення втрат енергії. Підвищення енергоефективності є одним із найбільш економічно доцільних способів скорочення викидів діоксиду вуглецю (CO_2), оксидів азоту (NO_x), оксидів сірки (SO_x) та твердих частинок [10].

Важливу роль у зменшенні негативного впливу на атмосферне повітря відіграє перехід до використання відновлюваних джерел енергії. Сонячна, вітрова, геотермальна енергетика, біоенергетика та використання водневої енергетики дозволяють значно скоротити споживання викопного палива та знизити рівень антропогенних викидів. Особливо перспективним напрямом є розвиток водневих технологій, де водень використовується як екологічно чистий енергоносій, а основним продуктом його використання є вода [14-18].

Сучасні технології очищення викидів забезпечують ефективне видалення шкідливих речовин із димових газів та вентиляційних викидів. Для очищення газових потоків широко застосовуються електрофільтри, рукавні фільтри, циклони, скрубери та каталітичні нейтралізатори. Електрофільтри та рукавні фільтри дозволяють уловлювати дрібнодисперсний пил і тверді частинки, а системи десульфуризації та денітрифікації — зменшувати викиди оксидів сірки та оксидів азоту. У транспортному секторі важливе значення мають каталітичні нейтралізатори, які знижують концентрацію токсичних компонентів вихлопних газів автомобілів.

Одним із найбільш перспективних напрямів сучасної екологічної інженерії є технології уловлювання, використання та зберігання вуглецю (CCUS — Carbon Capture, Utilization and Storage). Дані технології передбачають вилучення CO_2 із димових газів промислових підприємств та електростанцій із подальшим його використанням у промисловості або довготривалим зберіганням у геологічних формаціях. Використання таких технологій дозволяє суттєво скоротити викиди парникових газів та сприяє переходу до низьковуглецевої економіки [11].

Інноваційні підходи також активно впроваджуються у сфері поводження з відходами та циркулярної економіки. Переробка відходів, повторне використання матеріалів, впровадження маловідходних і безвідходних технологій дозволяють не лише зменшити навантаження на довкілля, але й скоротити обсяги викидів, пов’язаних із видобутком і переробкою первинної сировини. Значну роль у цьому процесі відіграють сучасні цифрові технології, автоматизація виробництва та системи екологічного моніторингу, що забезпечують оперативний контроль за рівнем забруднення та ефективністю природоохоронних заходів.

Окрему увагу приділяють розвитку екологічно чистого транспорту. Використання електромобілів, гібридних транспортних засобів, біопалива та водневих паливних елементів сприяє зниженню викидів шкідливих речовин у

містах та покращенню якості атмосферного повітря. Розвиток транспортної інфраструктури для альтернативних видів транспорту є важливою складовою сучасної екологічної політики.

Ефективне впровадження інноваційних технологій зменшення шкідливих викидів потребує комплексного підходу, що включає державну підтримку, екологічне законодавство, міжнародне співробітництво та інвестиції у наукові дослідження. Важливими умовами є також підвищення екологічної свідомості суспільства, розвиток «зеленої» економіки та стимулювання підприємств до впровадження екологічно безпечних технологій [22,23].

Таким чином, інноваційні технології зменшення шкідливих викидів є важливим інструментом забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку. Їх застосування дозволяє мінімізувати негативний вплив господарської діяльності на довкілля, зберегти природні ресурси та підвищити якість життя населення. Розвиток і масштабне впровадження таких технологій є необхідною умовою формування сучасної низьковуглецевої та ресурсоефективної економіки.

8.2 Розв’язання задач

Задача 1. Очищення викидів CO_2 за допомогою захоплення вуглецю.

Промислове підприємство викидає 500 тонн CO_2 на рік. Впроваджена технологія захоплення вуглецю зменшує ці викиди на 40%. Скільки CO_2 буде викидати підприємство після впровадження технології?

Розв'язання:

Викиди після впровадження технології:

Викиди після$=500-500\cdot0{,}4=300$ тонн CO_2.

Відповідь: Підприємство буде викидати 300 тонн CO_2 на рік.

Задача 2. Перехід на відновлювальні джерела енергії.

Підприємство споживає 1000 МВт-год енергії на рік від традиційних джерел (вугілля, газ). Перехід на сонячну енергію зменшить викиди CO_2 на 80%. Скільки вуглекислого газу буде зекономлено, якщо при споживанні 1 МВт-год викидається 0,5 тонн CO_2?

Розв'язання: Загальні викиди CO_2 до переходу:

Викиди CO_2=1000·0,5=500 тонн CO_2.

Зменшення викидів на 80%:

Зекономлений CO_2=500·0,8=400 тонн CO_2 .

Відповідь: Зекономлено 400 тонн CO_2.

Задача 3. Встановлення фільтрів для очищення повітря.

Промислове підприємство встановлює фільтри для очищення повітря, що зменшує викиди шкідливих речовин на 60%. Початковий рівень викидів становить 200 тонн шкідливих газів на рік. Скільки шкідливих газів буде викидатися після встановлення фільтрів?

Розв'язання:

Зменшення викидів:

Викиди після фільтру=200· (1−0,6)=80 тонн.

Відповідь: Після встановлення фільтрів підприємство буде викидати 80 тонн шкідливих газів на рік.

Задача 4. Використання біоенергетичних технологій.

Підприємство зменшує свої викиди CO_2 на 50% завдяки використанню біомаси замість вугілля. Якщо викиди від використання вугілля становлять 600 тонн CO_2, скільки CO_2 буде зекономлено завдяки переходу на біомасу?

Розв'язання:

Зекономлені викиди:

Зекономлений CO_2=600·0,5=300 тонн CO_2.

Відповідь: Зекономлено 300 тонн CO_2.

Задача 5. Впровадження системи енергозбереження.

Підприємство зменшує своє споживання енергії на 30% завдяки впровадженню систем енергозбереження. Якщо підприємство споживає 2000 МВт-год енергії на рік, скільки енергії буде зекономлено?

Розв'язання: Зекономлена енергія:

Зекономлена енергія=2000·0,3=600 МВт·год.

Відповідь: Зекономлено 600 МВт-год енергії.

Задача 6. Впровадження електричних транспортних засобів.

Електричний транспорт зменшує викиди CO_2 на 80% порівняно з автомобілями, що працюють на бензині. Якщо автомобіль на бензині викидає 200 г CO_2 на км, скільки CO_2 зекономить електричний автомобіль, який проїде 15000 км?

Розв'язання:

Викиди від бензинового автомобіля:

Викиди CO_2=200·15000=3000000 г=3000 кг CO_2.

Зекономлені викиди: Зекономлений CO_2=3000·0,8=2400 кг CO_2.

Відповідь: Електричний автомобіль зекономить 2400 кг CO_2.

Задача 7. Впровадження технології очистки води.

Впровадження технології очищення води зменшує викиди шкідливих речовин у воду на 90%. Якщо підприємство скидає 1000 куб. м забрудненої води на день, скільки забрудненої води буде скидатись після впровадження технології?

Розв'язання:

Зменшення викидів:

Залишкова забруднена вода=1000· (1−0.9)=100 $м^3$ на день.

Відповідь: Після впровадження технології скидатиметься 100 куб. м забрудненої води на день.

Задача 8. Використання сонячних панелей.

Сонячні панелі зменшують викиди CO_2 на 75% порівняно з використанням традиційних джерел енергії. Якщо підприємство викидає 800 тонн CO_2 на рік, скільки CO_2 буде зекономлено після переходу на сонячні панелі?

Розв'язання:

Зекономлені викиди:

Зекономлений $CO_2 = 800 \cdot 0{,}75 = 600$ тонн CO_2.

Відповідь: Зекономлено 600 тонн CO_2.

Задача 9. Впровадження очищення газів у промисловості.

Фільтрація промислових викидів дозволяє зменшити рівень викидів сірчистого газу на 70%. Якщо підприємство викидає 500 тонн сірчистого газу на рік, скільки газу буде викидатися після впровадження фільтрації?

Розв'язання:

Зменшення викидів:

Викиди після фільтру $= 500 \cdot (1 - 0{,}7) = 150$ тонн.

Відповідь: Після фільтрації буде викидатися 150 тонн сірчистого газу.

Задача 10. Впровадження технології переробки відходів.

Технологія переробки відходів дозволяє знизити кількість сміття на 50%. Якщо на підприємстві утворюється 2000 тонн відходів на рік, скільки відходів буде зменшено завдяки впровадженню технології переробки?

Розв'язання:

Зменшення відходів:

Зменшені відходи $= 2000 \cdot 0{,}5 = 1000$ тонн.

Відповідь: В результаті переробки буде зменшено 1000 тонн відходів.

Задача 11. Використання водню як джерела енергії.

Використання водню як джерела енергії дозволяє знизити викиди CO_2 на 90%. Якщо підприємство викидає 1000 тонн CO_2 на рік, скільки CO_2 буде зекономлено при використанні водню?

Розв'язання:

Зекономлені викиди:

Зекономлений CO_2=1000·0,9=900 тонн CO_2.

Відповідь: Зекономлено 900 тонн CO_2.

Задача 12. Впровадження технології у виробництві.

Технологія енергозбереження в промисловості дозволяє знизити споживання енергії на 25%. Якщо підприємство споживає 8000 МВт-год енергії на рік, скільки енергії буде зекономлено?

Розв'язання:

Зекономлена енергія:

Зекономлена енергія=8000·0,25=2000 МВт-год.

Відповідь: Зекономлено 2000 МВт-год енергії.

Задача 13. Використання системи очищення для автотранспорту.

Впровадження системи очищення в автомобілях знижує рівень викидів NO_x на 60%. Якщо автомобіль викидає 400 г NO_x на км, скільки NO_x буде зекономлено при проїзді 10000 км?

Розв'язання: Викиди NO_x до очищення:

Викиди NO_x=400·10000=4000000 г=4000 кг.

Зекономлені викиди:

Зекономлений NO_x=4000·0,6=2400 кг NO_x.

Відповідь: Зекономлено 2400 кг NO_x.

Задача 14. Впровадження зеленої технології в сільському господарстві.

Зелені технології знижують споживання пестицидів на 40%. Якщо фермер використовує 500 кг пестицидів на рік, скільки пестицидів буде використано після впровадження технології?

Розв'язання:

Використання пестицидів після технології:

Використання пестицидів=500· (1−0,4)=300 кг.

Відповідь: Використано 300 кг пестицидів.

Задача 15. Перехід на електричний транспорт у місті.

Перехід на електричний транспорт зменшує викиди CO_2 на 90% порівняно з бензиновими автомобілями. Якщо в місті викидається 10000 тонн CO_2 на рік через використання бензинових автомобілів, скільки CO_2 буде зекономлено після переходу на електричний транспорт?

Розв'язання:

Зекономлені викиди:

Зекономлений CO_2=10000·0,9=9000 тонн CO_2.

Відповідь: Зекономлено 9000 тонн CO_2.

8.3 Контрольні запитання

1. Що таке інноваційні технології зменшення шкідливих викидів?
2. Які основні екологічні проблеми вирішують сучасні технології очищення викидів?
3. Яке значення має підвищення енергоефективності для зменшення шкідливих викидів?
4. Які види відновлюваних джерел енергії сприяють скороченню викидів парникових газів?

5. Чому водневі технології вважаються перспективним напрямом розвитку енергетики?
6. Які основні технології очищення димових газів використовуються в промисловості?
7. Який принцип роботи електрофільтрів та рукавних фільтрів?
8. Для чого застосовують системи десульфуризації та денітрифікації?
9. Яке значення мають технології уловлювання та зберігання CO_2 для декарбонізації економіки?
10. Як циркулярна економіка сприяє зменшенню шкідливих викидів?
11. Яку роль відіграють сучасні цифрові технології та екологічний моніторинг у зменшенні забруднення?
12. Які переваги має використання електромобілів та гібридного транспорту?
13. Чому державна підтримка та екологічне законодавство є важливими для впровадження інноваційних технологій?
14. Яке значення мають інноваційні технології для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку?

9. ЕКОЛОГІЧНА ЕКСПЕРТИЗА ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ

9.1 Теоретичні відомості

Газотурбінні установки (ГТУ) є важливими об’єктами сучасної енергетики та промисловості, які широко використовуються для виробництва електричної та теплової енергії. Завдяки високій ефективності, компактності та можливості швидкого запуску ГТУ активно застосовуються на теплових електростанціях, у когенераційних системах, на промислових підприємствах та в транспортній галузі. Разом із тим робота газотурбінних установок супроводжується впливом на навколишнє середовище, що обумовлює необхідність проведення екологічної експертизи та оцінки екологічної безпеки їх експлуатації.

Екологічна експертиза газотурбінної установки — це комплексна оцінка впливу ГТУ на довкілля, яка здійснюється з метою визначення відповідності установки екологічним вимогам, нормативам і стандартам. Основним завданням екологічної експертизи є попередження негативного впливу на атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, рослинний і тваринний світ, а також забезпечення безпечних умов для населення та персоналу.

Одним із основних факторів впливу газотурбінних установок на довкілля є викиди забруднюючих речовин в атмосферу. Під час спалювання палива в камері згоряння утворюються діоксид вуглецю (CO_2), оксиди азоту (NO_x), оксид вуглецю (CO) та незначна кількість оксидів сірки (SO_x). Найбільшу екологічну небезпеку становлять оксиди азоту, які утворюються при високих температурах горіння та можуть спричиняти утворення фотохімічного смогу, кислотних дощів і погіршення якості атмосферного повітря.

Під час проведення екологічної експертизи особлива увага приділяється аналізу складу та обсягів викидів забруднюючих речовин. Для цього виконуються розрахунки концентрацій шкідливих речовин у димових газах, визначаються питомі та валові викиди, а також оцінюється відповідність

показників гранично допустимим нормам. Важливим етапом є моделювання розсіювання забруднюючих речовин у атмосферному повітрі з урахуванням метеорологічних умов, висоти димових труб та характеристик місцевості.

Значний вплив ГТУ може здійснювати і на водні ресурси. У процесі роботи установки використовуються системи охолодження, мастильні матеріали та технологічні рідини, що потребує контролю за можливими витоками, тепловим забрудненням та якістю стічних вод. Особливу увагу приділяють запобіганню забрудненню водойм нафтопродуктами та хімічними речовинами.

Важливим аспектом екологічної експертизи є оцінка шумового впливу газотурбінної установки. Робота компресорів, турбін та допоміжного обладнання супроводжується значним рівнем шуму і вібрацій, що може негативно впливати на здоров’я людини та стан навколишнього середовища. Для зменшення шумового навантаження застосовуються шумопоглинальні кожухи, глушники та спеціальні конструктивні рішення.

Під час оцінки екологічної безпеки ГТУ також враховують рівень енергоефективності установки. Сучасні газотурбінні установки мають високий коефіцієнт корисної дії та характеризуються меншими питомими викидами забруднюючих речовин порівняно з традиційними вугільними енергетичними установками. Особливо ефективними є парогазові установки, у яких теплота відпрацьованих газів додатково використовується для виробництва пари та електроенергії.

Одним із напрямів підвищення екологічної безпеки газотурбінних установок є впровадження інноваційних технологій зменшення викидів. До них належать:

низькоемісійні камери згоряння;

системи селективного каталітичного очищення;

технології рециркуляції димових газів;

автоматизовані системи контролю процесів горіння;

використання альтернативних та водневих видів палива.

Екологічна експертиза також включає оцінку можливих аварійних ситуацій та їх впливу на довкілля. Аналізуються ризики виникнення пожеж, вибухів, витоків палива та інших небезпечних подій. На основі результатів оцінки розробляються заходи екологічної безпеки, плани локалізації аварійних ситуацій та системи моніторингу стану навколишнього середовища.

Загалом, екологічна експертиза газотурбінних установок є важливим елементом забезпечення екологічної безпеки сучасної енергетики. Вона дозволяє оцінити рівень впливу ГТУ на довкілля, визначити ефективність природоохоронних заходів та забезпечити відповідність роботи установок екологічним нормативам. Використання сучасних технологій очищення викидів, підвищення енергоефективності та впровадження систем екологічного контролю сприяють зменшенню негативного впливу газотурбінних установок на навколишнє середовище та забезпечують сталий розвиток енергетичної галузі.

Оцінка викидів оксидів азоту

Для оцінки викидів оксидів азоту використовують формулу:

$$NO_X = k_0 \cdot \sqrt{\frac{\alpha - 1}{\alpha}} \cdot \sqrt{\frac{(1-\psi)^2}{\psi}} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \cdot \left(\Pi_K^{\eta}\right)^{0,5} \cdot \tau_{пер}{}^{0,5} \cdot e^{-\frac{E_{еф}}{R_\mu \cdot T}}, \qquad (9.1)$$

де NO_X – сумарна концентрація оксидів азоту, приведених до діоксиду азоту (мг/м^3); k_0 – передекспоненційний множник, який для заданого об’єкту рівний $k_0 = 6{,}29 \cdot 10^3$ мг/(м^3·с); α – коефіцієнт надлишку повітря, який вибирається з діапазону 1,6 – 2,0 (рекомендується приймати α = 1,8); Ψ – мольна доля кисню в окиснику, Ψ=0,21; $E_{еф}$ – ефективна енергія активації (для заданого об’єкту вона становить $E_{еф}=2{,}86 \cdot 10^4$ кДж/кмоль); R_μ - універсальна газова стала, R_μ = 8,314 Дж/моль·К; Т – середня температура в зоні горіння, $\tau_{пер}$ – час перебування в зоні реакції, який можна знайти за формулою:

$$\tau_{пер} = 2 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{Q_H}{R \cdot T_2} \right) \cdot \left\{ q_V \cdot \left(\frac{T}{T_2} + 1 \right) \cdot (\alpha \cdot L_0 + 1) \right\}^{-1} ,$$

(9.2)

Щоб знайти середню температуру в зоні горіння потрібно розв'язати квадратне рівняння виду:

$$AT^2 + BT - C = 0, \quad (9.3)$$

де:

$A = (L_0 + 1) \cdot a_{12} + (\alpha - 1) \cdot L_0 \cdot a_{11}$,

$B = (L_0 + 1) \cdot a_{02} + (\alpha - 1) \cdot L_0 \cdot a_{01}$,

$C = Q_H \cdot (1 - q_3) + \alpha \cdot L_0 \cdot (a_{01} + a_{11} \cdot T_2) \cdot T_2 + (a_{03} + a_{13} \cdot T_1) \cdot T_1$.

тут q_3 – величина хімічного недопалу (приймати $q_3 = 0$); $T_П$ – температура палива, можна прийняти рівною $T_П = T_1$, К; коефіцієнти a_{0i} та a_{1i}:

для палива a_{03}, кДж/кг·К, a_{13}, кДж/кг·К^2;

для продуктів згорання a_{02}, кДж/кг·К, a_{12} , кДж/кг·К^2;

для повітря a_{01}, кДж/кг·К, a_{11} кДж/кг·К^2;

при цьому ротрібно знайти коефіцієнти A, B, C.

Підставивши коефіцієнти A, B, C в рівняння (9.3) та розв'язавши його знаходиться температура T, К. Потім підставивши необхідні величини в (9.2) знаходять час перебування в зоні реакції та за (9.1) розраховують концентрацію NO_X.

Приведена до $O_2 = 15$ % концентрація NO_X визначається співвідношенням:

$$NO_{X(O_2=15\%)} = \left(\frac{\alpha}{3{,}5} \right) \cdot NO_X , \text{ мг/м}^3 . \quad (9.4)$$

Масові викиди продуктів згорання:

$$m_{П.ЗГ} = \frac{N_{бл}^{\ e} \cdot Z_{бл}}{l_e \cdot \eta_Г} , \text{ кг/с.} \quad (9.5)$$

Об'ємні викиди продуктів згорання:

$$V_{П.ЗГ} = m_{П.ЗГ} / \rho_{П.ЗГ}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (9.6)$$

де $\rho_{П.ЗГ}$ – густина продуктів згорання, при нормальних умовах $\rho_{П.ЗГ}$ = 1,29 кг/м^3.

Валові викиди оксидів азоту з димовими газами:

$$M_{NOx} = 10^{-3} \cdot NO_X \cdot V_{П.ЗГ}, \text{ г/с.} \quad (9.7)$$

Викиди оксидів азоту з димовими газами протягом року становлять:

$$M^P_{NOx} = 10^{-6} \cdot M_{NOx} \cdot \tau_P \cdot 3600, \text{ т/рік.} \quad (9.8)$$

Питома концентрація NOX в продуктах згорання:

$$b_{Nox} = 10^{-3}(3600/1{,}29) \cdot NO_X / l_e, \text{ г/(кВт·г).} \quad (9.9)$$

Визначення мінімальної висоти, діаметра устя димової труби та небезпечної швидкості вітру

Висота труби, необхідна для розсіювання шкідливих речовин знаходиться за формулою:

$$h = \sqrt{\frac{A \cdot M_{NOx} \cdot m \cdot n}{ГДК_{с.д}} \cdot \sqrt[3]{\frac{Z_{TP}}{V_1 \cdot \Delta T}}}, \text{ м} \quad (9.10)$$

де А – температурний коефіцієнт, який залежить від температурної стратифікації атмосфери, для України А = 160 с$^{2/3}$·мг/К$^{1/3}$; m, n – безрозмірні коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші з джерела; $ГДК_{с.д}$ – середньодобова граничнодопустима концентрація оксидів азоту, приймаю рівним $ГДК_{с.д}$ = 0,04 мг/м^3; V_1 – об’ємна витрата димових газів, знаходиться по формулі (4.11); ΔТ – різниця між температурою димових газів та середньою температурою повітря в полудень найтеплішого місяця літа (приймається рівною 25 °С).

Об’ємна витрата димових газів, знаходиться по формулі:

$$V_1 = (T_4/T_1) \cdot V_{П.ЗГ}, \text{ м}^3\text{/с.} \quad (9.11)$$

$V_1 = (619/288) \cdot 584{,}63 = 1256.75$ м^3/с

Коефіцієнт m визначається із співвідношення:

$$m = 1/(0{,}67 + 0{,}1 \cdot f^{1/2} + 0{,}34 \cdot f^{1/3}), \quad (9.12)$$

де f – параметр, що обчислюється за формулою:

$$f = 10^3 \cdot W_0^2 \cdot D_0/(h^2 \cdot \Delta T), \quad (9.13)$$

де W_0 – швидкість виходу газів з устя труби, яка визначається з рівняння:

$$W_0 = V_1/(0{,}785 \cdot D_0^2), \quad (9.15)$$

де D_0 – діаметр устя, який залежить від висоти труби.

Безрозмірний коефіцієнт n визначається в залежності від параметра V_M: при $V_M > 2$ n = 1;

при $V_M \le 0{,}3$ n = 3; при $0{,}3 \le V_M \le 2$:

$$n = 3 - ((V_M - 0{,}3) \cdot (4{,}36 - V_M))^{1/2}. \quad (9.16)$$

У свою чергу параметр V_M визначається по формулі:

$$V_M = 0{,}65 \cdot (V_1 \cdot \Delta T/h)^{1/3}. \quad (9.17)$$

Для розрахунку висоти димової труби спочатку задаються її висотою, потім проводиться розрахунок всіх параметрів по формулах (9.12) – (9.17), і висота труби уточняється (формула (9.11)). Якщо розбіжність велика, задаються новим значенням висоти труби і проводять розрахунок за тією ж методикою. Задаються висотою труби в першому наближенні та діаметром устя D_0, тоді повторюють розрахунки за формулами (9.15), (9.13), (9.12), (9.17), обирають параметр n і розраховують висоту труби h за формулою (9.10).

Розраховують похибку:

$$\Delta h, \% = ((h_з - h_п)/ h_п) \cdot 100\%, \quad (9.18)$$

де $h_з$ – знайдена висота в останньому наближенні, м; $h_п$ – прийнята висота димової труби для розрахунку.

Якщо $\Delta h > 5\%$, задаються висотою труби в другому наближенні та діаметром устя D_0, тоді повторюють розрахунки за формулами (9.15), (9.13), (9.12), (9.17), обирають параметр n і розраховують висоту труби h за формулою (9.10). Розрахунки повторюють до тих пір, поки $\Delta h < 5\%$. При $\Delta h < 5\%$ можна прийняти висоту труби h, м.

Для $V_M > 2$ значення небезпечної швидкості вітру обчислюється по формулі:

$$U = V_M \cdot (1 + 0{,}12 \cdot f^{1/2}), \text{ м}. \quad (9.19)$$

Результати розрахунку димової труби заносять до табл. 9.1.

Таблиця 9.1. Результати розрахунку димової труби

Висота димової труби, $H_{тр}$, м	Діаметр устя димової труби, D_0 , м	Швидкість виходу газів з димової труби, W_0 , м/с	Небезпечна швидкість вітру, U , м/с	Місце появи максимальної приземної концентрації , X_m , м

Визначення розподілу приземних концентрацій NOx та побудова відповідних епюр

Відстань від джерела забруднень до місця появи максимальної приземної концентрації C_m обчислюється по формулі:

$$X_m = d \cdot h, \text{ м} \quad (9.20)$$

де: d – безрозмірний параметр, який (при $V_M > 2$)обчислюється по формулі:

$$d = 7 \cdot V_M^{1/2} \cdot (1 + 0{,}28 \cdot f^{1/3}). \quad (9.21)$$

Приземна концентрація по осі факела на будь-якій відстані від джерела забруднень визначається по формулі:

$$Cx = S_1 \cdot Cm, \quad (9.22)$$

де S_1 – безрозмірний параметр, який визначається по формулах (9.23) при $(X/Xm) \leq 1$; (4.24) при $1 < (X/Xm) \leq 8$; (4.25) при $(X/Xm) > 8$; Cm – максимальна приземна концентрація NOx.

$$S_1 = 3 \cdot (X/Xm)^4 - 8 \cdot (X/Xm)^3 + 6 \cdot (X/Xm)^{2,} \quad (9.23)$$

$$S_1 = 1{,}13/(0{,}13 \cdot (X/Xm)^2 + 1), \quad (9.24)$$

$$S_1 = 1/(3{,}18\cdot(X/Xm)^2 + 3{,}52\cdot(X/Xm) + 12). \quad (9.25)$$

Перевірка максимальної приземної концентрації:

$$Cm = \frac{A \cdot M_{NOx} \cdot m \cdot n}{h^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}, \text{ мг/м}^3 \quad (9.26)$$

Задаючись відстанню від джерела забруднення проводиться розрахунок приземної концентрації по осі факела, результати розрахунку наводяться в табл. 9.2.

Таблиця 9.2. Величина приземної концентрації та параметра S_1 в залежності від відстані від джерела забруднення

X,м	300	600	1000	1500	4384,224	8000	12000
S_1, сг/м^3							
C_x, сг/м^3							
X/X_m							
	$X/X_m<1$			$1<X/X_m<8$		$8<X/X_m$	

Значення приземних концентрацій в напрямку, нормальному до осі викидів розрахую для значення X = Xm, розрахунок проводиться по формулі

$$Cy = S_2 \cdot Cm, \quad (9.27)$$

де S_2 – величина, яка визначається в залежності від швидкості вітру (U) та відносної координати (y/x) по формулі:

$$S_2 = 1/((1 + 8{,}4\cdot U\cdot(y/x_m)^2)\cdot(1 + 28{,}2\cdot U^2\cdot(y/x_m)^4)). \quad (9.28)$$

Задавшись величиною швидкості вітру U = 15,55 м/с, та рядом значень відстаней Y проводиться розрахунок за формулами (9.27), (9.28), результати розрахунку наводяться в табл. 9.3.

Таблиця 9.3. Величина приземної концентрації в перпендикулярному напрямку до осі викидів та параметра S_2 в залежності від відстані від максимуму концентрацій

у,м	-900	-800	-300	-200	-100	0
S_2, сг/м^3						
C_y, сг/м^3						
у/х						

Приводиться графічне зображення розподілу концентрацій в просторі, як на рис. 9.1 та 9.2, по напрямку поширення димової хмари та в перпендикулярному до нього напрямку відповідно.

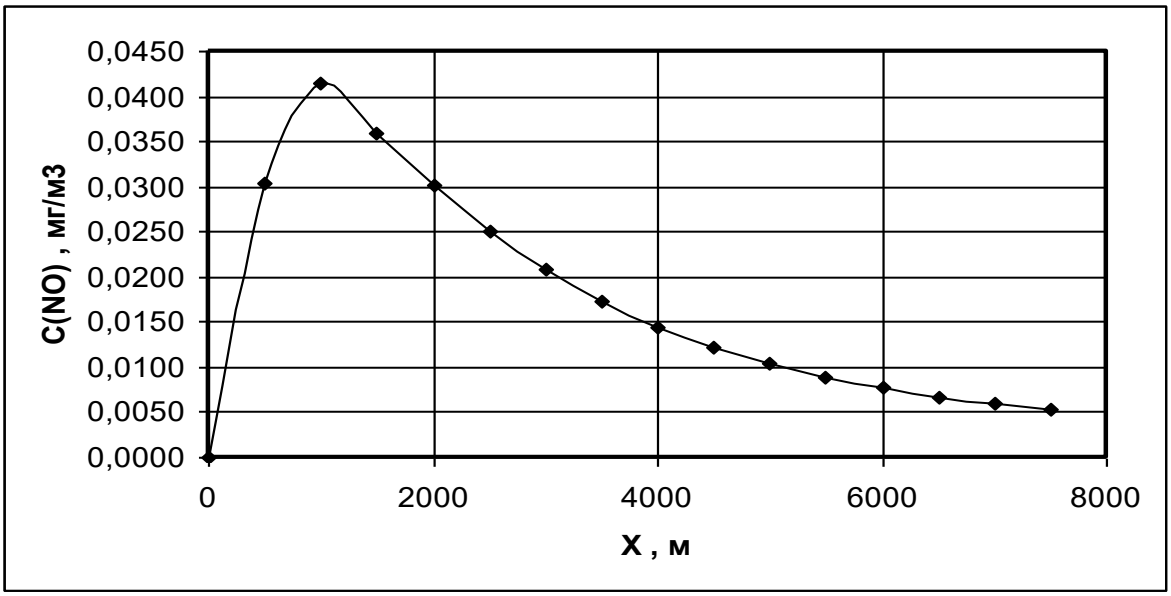


Рисунок 9.1. Значення приземної концентрації по довжині поширення факела в залежності від відстані від джерела забруднення

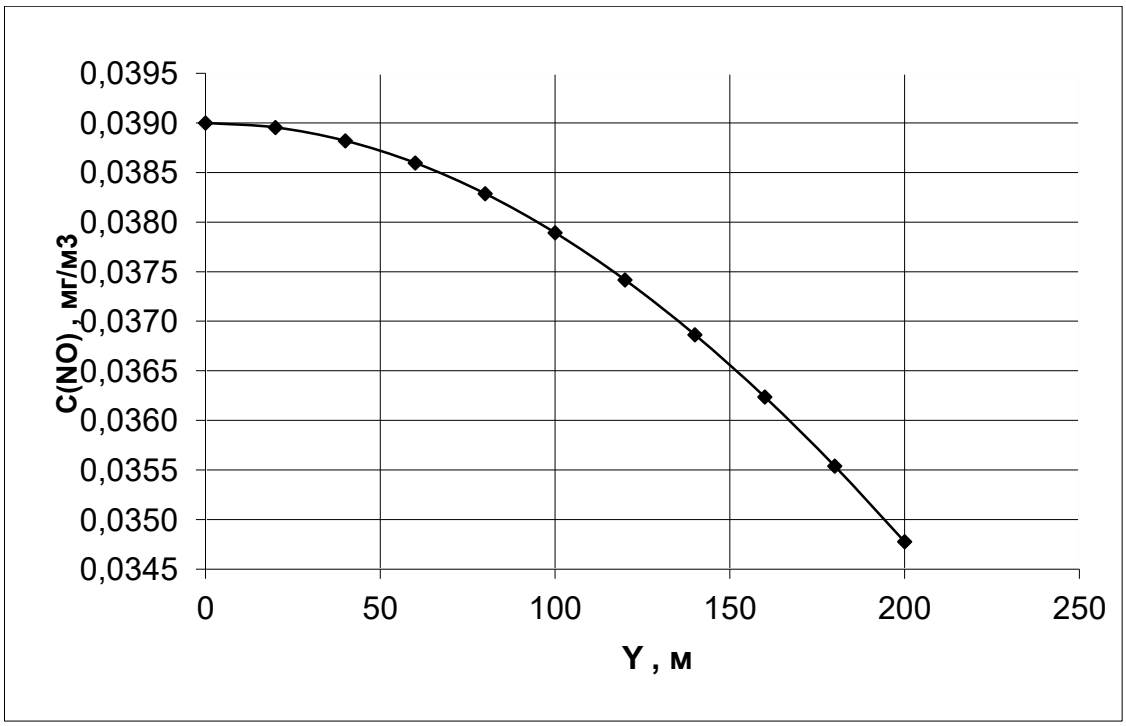


Рисунок 9.2. Значення приземної концентрації в напрямку перпендикулярному до осі поширення факела в залежності від відстані від максимальної приземної концентрації

Паспорт ТЕС на базі ГТУ

Всі розрахунки вносяться до табл. 9.4.

Таблиця 9.4. Техніко- економічні та екологічні показники ТЕС на базі ГТУ

Техніко- економічні показники до всіх блоків			
Показник	Познач.	Розмірність	Величина
Електрична потужністьТЕС	N_e	МВт	
Кількість ГТУ	$Z_{бл}$	Шт.	
Електрична потужність ГТУ	$P_{гту}$	МВт	
Початкова температура	T_1	К	
Оптимальна степінь підвищення тиску в компресорі	$П_К$	-	
Коефіцієнт надлишку повітря	α	-	
Паливо			
Стехіометричний коефіцієнт	L_0	кг/кг	
Температура повітря пясля компресора	T_2	К	
Температура газів перед ГТУ	T_3	К	
ККД компресора	$\eta_К$	-	
ККД газової турбіни	$\eta_Т$	-	
Ступінь регенерації	μ	-	
Число годин використання встановленої	$\tau_Р$	год/рік	

потужності			
Витрата палива	$m_п$	млн.$м^3$/рік тис.$м^3$/год $м^3$/с	
ККД ГТУ	$\eta_в$	-	
Питома витрата палива	в	$м^3$/кВт год	
Питома витрата теплоти	q	кДж/кВт год	
Витрата повітря	$V_{пов.}$	млн.$м^3$/рік тис.$м^3$/год $м^3$/с	
Кількість виробленої електроенергії	E	млн.кВт.год /рік	
Витрата димових газів	$V_{пр.зг.}$	$м^3$/с	
Екологічні показники			
Валові викиди CO_2	M_{CO2}	т/рік кг/год г/с	
Валові викиди H_2O	M_{H2O}	т/рік кг/год г/с	
Валові викиди NO_x	M_{NOx}	т/рік кг/год г/с	
Теплові викиди	Q_2	млн.МДж /рік	
Коефіцієнт надлишку повітря в зоні горіння	α_1	-	
Питомі викиди CO_2		кг/кВт.год	
Питомі викиди H_2O		кг/кВт.год	
Питомі викиди NO_x		кг/кВт.год	
ГДК NO_x		мг/$м^3$	
Концентрація NO_x в димових газах		мг/$м^3$	
Концентрація NO_x при O_2=15%		мг/$м^3$	
Характеристики розсіювання			
Висота труби	h	м	
Небезпечна швидкість вітру	u	м/с	
Координати максимальної концентрації викидів ТЕС	x_m	м	
Діаметр устя димової труби	D_0	м	
Максимальна концентрація	$C_м$	мг/$м^3$	

9.2 Розв'язання задач

Задача. Приклад виконання для одного з варіантів.

Потрібно провести екологічну експертизу ГТУ при наступних технічних умовах:

Кількість блоків $Z_{бл} = 5$;

Потужність одного блоку $N^e_{бл} = 35$ МВт;

Число годин використання встановленої потужності $\tau_р = 2000$ г/рік;

Коефіцієнт регенерації $\mu = 0$;

Температура повітря на вході в компресор $T_1 = 288$ К;

Температура на виході з компресора $T_2 = 782{,}125$ К;

Температура газів перед турбіною $T_3 = 1350$ К;

Кількість димових труб $Z_{тр} = 1$;

Теплове навантаження камери згорання $q_v = 200$ Вт/(м^3·Па);

Коефіцієнт корисної дії турбіни $\eta_Т = 0{,}9$;

Коефіцієнт корисної дії компресора $\eta_К = 0{,}88$;

Паливо ГТУ - природний газ;

Теплота згорання $Q_Н = 48000$ кДж/кг:

Стехіометричний коефіцієнт $L_0 = 17$ кг/кг;

ККД камери згорання $\eta_Z = 0{,}99$;

ККД електрогенератора $\eta_Г = 0{,}98$;

Газова постійна повітря R = 287 кДж/кг·К;

Показник адіабати k = 1,4;

Теплоємність $c_р = 1$ кДж/кг.

Розв'язання:

Визначення екологічних показників ГТУ

Для оцінки викидів оксидів азоту використовують формулу:

$$NO_X = k_0 \cdot \sqrt{\frac{\alpha - 1}{\alpha}} \cdot \sqrt{\frac{(1-\psi)^2}{\psi}} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \cdot \left(\Pi_K^{\eta}\right)^{0,5} \cdot \tau_{пер}^{\,0,5} \cdot e^{-\frac{E_{еф}}{R_\mu \cdot T}},$$

де NO_X – сумарна концентрація оксидів азоту, приведених до діоксиду азоту (мг/м^3); k_0 – передекспоненційний множник, який для заданого об'єкту рівний $k_0 = 6{,}29 \cdot 10^3$ мг/(м^3·с); α – коефіцієнт надлишку повітря, який вибирається з діапазону 1,6 – 2,0, приймаю α = 1,8; Ψ – мольна доля кисню в окиснику, Ψ=0,21; $E_{еф}$ – ефективна енергія активації, для заданого об'єкту вона становить $E_{еф}=2{,}86 \cdot 10^4$ кДж/кмоль; R_μ - універсальна газова стала, R_μ = 8,314 Дж/моль·К; Т – середня температура в зоні горіння, $\tau_{пер}$ – час перебування в зоні реакції, який можна знайти за формулою:

$$\tau_{пер} = 2 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{Q_H}{R \cdot T_2} \right) \cdot \left\{ q_V \cdot \left(\frac{T}{T_2} + 1 \right) \cdot (\alpha \cdot L_0 + 1) \right\}^{-1} .$$

Щоб знайти середню температуру в зоні горіння потрібно розв'язати квадратне рівняння виду:

$$AT^2 + BT - C = 0,$$

де:

$A = (L_0 + 1) \cdot a_{12} + (\alpha - 1) \cdot L_0 \cdot a_{11}$,

$B = (L_0 + 1) \cdot a_{02} + (\alpha - 1) \cdot L_0 \cdot a_{01}$,

$C = Q_H \cdot (1 - q_3) + \alpha \cdot L_0 \cdot (a_{01} + a_{11} \cdot T_2) \cdot T_2 + (a_{03} + a_{13} \cdot T_1) \cdot T_1$.

тут q_3 – величина хімічного недопалу, приймаю $q_3 = 0$; $T_П$ – температура палива, можна прийняти рівною $T_П = T_1 = 288$ К; коефіцієнти a_{0i} та a_{1i} будуть рівними:

для палива $a_{03} = 2{,}1403$ кДж/кг·К, $a_{13} = 1{,}692 \cdot 10^{-4}$ кДж/кг·К^2;

для продуктів згорання $a_{02} = 1{,}1011$ кДж/кг·К, $a_{12} = 1{,}3 \cdot 10^{-4}$ кДж/кг·К^2;

для повітря $a_{01} = 1{,}0015$ кДж/кг·К, $a_{11} = 0{,}85 \cdot 10^{-4}$ кДж/кг·К^2;

при цьому:

$A = (17 + 1) \cdot 1{,}3 \cdot 10^{-4} + (1{,}8 - 1) \cdot 17 \cdot 0{,}85 \cdot 10^{-4} = 0{,}0035$;

$B = (17 + 1) \cdot 1{,}1011 + (1{,}8 - 1) \cdot 17 \cdot 1{,}0015 = 33{,}44$.

$C = 48000 \cdot (1 - 0) + 1{,}8 \cdot 17 \cdot (1{,}0015 + 0{,}85 \cdot 10^{-4} \cdot 782{,}125) \cdot 782{,}125 + (2{,}1403 + 1{,}692 \cdot 10^{-3} \cdot 288) \cdot 288 = -74190{,}44$.

Підставивши коефіцієнти A, B, C в рівняння та розв'язавши його знаходиться температура T, яка становить T = 1857,78 К. Потім підставивши необхідні величини знаходимо час перебування в зоні реакції:

$$\tau_{пер} = 2 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{48000}{287 \cdot 782{,}125} \right) \cdot \left\{ 90 \cdot \left(\frac{1857{,}78}{782{,}125} + 1 \right) \cdot (1.8 \cdot 17 + 1) \right\}^{-1} = 0.02 \text{ с.}$$

$$NO_X = 6290 \cdot \sqrt{\frac{1{,}8-1}{1{,}8}} \cdot \sqrt{\frac{(1-0{,}21)^2}{0{,}21^{-1}}} \cdot \sqrt{\frac{288}{782{,}125}} \cdot (32{,}79)^{0{,}5} \cdot 0{,}02 \cdot e^{-\frac{2.86 \cdot 10^4}{8{,}314 \cdot 1857{,}78}} = 102{,}47 \text{ мг/м}^3.$$

Приведена до O_2 = 15 % концентрація NO_X визначається співвідношенням:

$$NO_{X(O_2=15\%)} = \left(\frac{\alpha}{3{,}5} \right) \cdot NO_X ,$$

$$NO_{X(O_2=15\%)} = \left(\frac{1.8}{3{,}5} \right) \cdot 102{,}47 = 52{,}7 \text{ мг/м}^3.$$

Масові викиди продуктів згорання:

$$m_{П.ЗГ} = \frac{N_{бл}{}^e \cdot Z_{бл}}{l_e \cdot \eta_Г} ,$$

$$m_{П.ЗГ} = \frac{175 \cdot 10^3 \cdot 3}{236{,}78 \cdot 0{,}98} = 754{,}173 \text{ кг/с.}$$

Об'ємні викиди продуктів згорання:

$$V_{П.ЗГ} = m_{П.ЗГ}/\rho_{П.ЗГ},$$

де $\rho_{П.ЗГ}$ – густина продуктів згорання, при нормальних умовах $\rho_{П.ЗГ}$ = 1,29 кг/м^3.

$V_{П.ЗГ}$ = 754,173 /1,29 = 584,63 м^3/с.

Валові викиди оксидів азоту з димовими газами:

$$M_{NOx} = 10^{-3} \cdot NO_X \cdot V_{П.ЗГ},$$

$M_{NOx} = 10^{-3} \cdot 102.47 \cdot 584{,}63 = 59{,}9$ г/с.

Викиди оксидів азоту з димовими газами на протязі року становлять:

$$M^P_{NOx} = 10^{-6} \cdot M_{NOx} \cdot \tau_P \cdot 3600,$$

$M^P_{NOx} = 10^{-6} \cdot 59{,}9 \cdot 2000 \cdot 3600 = 431{,}34$ т/рік .

Питома концентрація NOX в продуктах згорання:

$$b_{Nox} = 10^{-3}(3600/1,29)\cdot NO_X / l_e,$$

$b_{Nox} = 10^{-3}(3600/1,29)\cdot$ 102.47 / 236.78 = 1,208 г/(кВт·г).

Визначення мінімальної висоти, діаметра устя димової труби та небезпечної швидкості вітру

Висота труби, необхідна для розсіювання шкідливих речовин знаходиться за формулою:

$$h = \sqrt{\frac{A \cdot M_{NOx} \cdot m \cdot n}{ГДК_{с.д}} \cdot \sqrt[3]{\frac{Z_{TP}}{V_1 \cdot \Delta T}}},$$

де А – температурний коефіцієнт, який залежить від температурної стратифікації атмосфери, для України А = 160 $с^{2/3}\cdot мг/К^{1/3}$; m, n – безрозмірні коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші з джерела; $ГДК_{с.д}$ – середньодобова граничнодопустима концентрація оксидів азоту, приймаю рівним $ГДК_{с.д}$ = 0,04 $мг/м^3$; V_1 – об'ємна витрата димових газів, знаходиться по формулі (4.11); ΔТ – різниця між температурою димових газів та середньою температурою повітря в полудень найтеплішого місяця літа (приймаємо рівною 25 °С), тоді:

$$\Delta T = 619 – 298 = 321 К ,$$

$$V_1 = (T_4/T_1)\cdot V_{П.ЗГ},$$

$V_1 = (619/288)\cdot$ 584,63 = 1256,75 $м^3/с$.

Коефіцієнт m визначається із співвідношення

$$m = 1/(0,67 + 0,1\cdot f^{1/2} + 0,34\cdot f^{1/3}),$$

де f – параметр, що обчислюється за формулою:

$$f = 10^3\cdot W_0^2\cdot D_0/(h^2\cdot \Delta T),$$

де W_0 – швидкість виходу газів з устя труби, яка визначається з рівняння:

$$W_0 = V_1/(0,785\cdot D_0^2),$$

де D_0 – діаметр устя, який залежить від висоти труби.

Безрозмірний коефіцієнт n визначається в залежності від параметра $V_М$: при $V_М \le 0,3$, n = 3; при $V_М > 2$, n = 1; при $0,3 \le V_М \le 2$:

$$n = 3 – ((V_М – 0,3)\cdot(4,36 - V_М))^{1/2}.$$

У свою чергу параметр V_M визначається по формулі:

$$V_M = 0{,}65\cdot(V_1\cdot\Delta T/h)^{1/3} .$$

Для розрахунку висоти димової труби спочатку задаються її висотою, потім проводиться розрахунок всіх параметрів, і висота труби уточняється. Якщо розбіжність велика, задаються новим значенням висоти труби і проводять розрахунок за тією ж методикою. Задаюсь висотою труби в першому наближенні 120 м та діаметром устя D_0 = 8 м, тоді:

$W_0 = 1256{,}75 / (0{,}785\cdot 8^2) = 32{,}33$ м/с,

$f = 10^3\cdot 32{,}33^{\,2}\cdot 4/ (120^2\cdot 321) = 5{,}77$,

$m = 1/ (0{,}67+ 0{,}1\cdot 5{,}77^{1/2} + 0{,}34\cdot 5{,}77^{1/3}) = 0{,}658$,

$V_M = 0{,}65\cdot (1256{,}75 \cdot 321/120)^{1/3} = 12{,}07$.

Оскільки, $V_M > 2$, то параметр n = 1.

$$h = \sqrt{\frac{160\cdot 59{,}9\cdot 0{,}658\cdot 1}{0{,}04}\cdot \sqrt[3]{\frac{1}{1256.75\ \cdot 321}}} = 120{,}47 м ,$$

$$\Delta h,\ \% = \frac{120{,}47 - 120}{120} * 100 = 0{,}4\% .$$

Отже, можна прийняти висоту труби h= 120 м.

Для $V_M > 2$ значення небезпечної швидкості вітру обчислюється по формулі

$$U = V_M\cdot(1 +0{,}12\cdot f^{1/2}) ,$$

$U = 12.07\cdot(1+0{,}12\cdot 5{,}77^{1/2}) = 15{,}55$ м.

Результати розрахунку димової труби заносяться до табл. 9.5.

Таблиця 9.5. Результати розрахунку димової труби

Висота димової труби, $H_{тр}$, м	Діаметр устя димової труби, D_0 , м	Швидкість виходу газів з димової труби, W_0 , м/с	Небезпечна швидкість вітру, U , м/с	Місце появи максимальної приземної концентрації , X_m , м

120	8	32.33	15.55	4384.22

Визначення розподілу приземних концентрацій NOx та побудова відповідних епюр

Відстань від джерела забруднень до місця появи максимальної приземної концентрації C_m обчислюється по формулі

$$X_m = d \cdot h,$$

де: d – безрозмірний параметр, який (при $V_M > 2$) обчислюється по формулі:

$$d = 7 \cdot V_M^{1/2} \cdot (1 + 0{,}28 \cdot f^{1/3}),$$

$d = 7 \cdot 12{,}07^{1/2} \cdot (1 + 0{,}28 \cdot 5{,}77^{1/3}) = 36{,}535,$

$X_m = 36{,}535 \cdot 120 = 4384{,}22$ м .

Приземна концентрація по осі факела на будь-якій відстані від джерела забруднень визначається по формулі:

$$Cx = S_1 \cdot Cm,$$

де S_1 – безрозмірний параметр, який визначається при $(X/Xm) \leq 1$; (4.24) при $1 < (X/Xm) \leq 8$; (4.25) при $(X/Xm) > 8$; Cm – максимальна приземна концентрація NOx:

$$S_1 = 3 \cdot (X/Xm)^4 - 8 \cdot (X/Xm)^3 + 6 \cdot (X/Xm),$$

$$S_1 = 1{,}13/(0{,}13 \cdot (X/Xm)^2 + 1),$$

$S_1 = 1/(3{,}18 \cdot (X/Xm)^2 + 3{,}52 \cdot (X/Xm) + 12).$

Перевірка максимальної приземної концентрації:

$$Cm = \frac{A \cdot M_{NOx} \cdot m \cdot n}{h^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}},$$

$$Cm = \frac{160 \cdot 59{,}9 \cdot 0{,}658 \cdot 1}{120^2 \cdot \sqrt[3]{1256{,}75 \cdot 321}} = 5{,}93 \text{ мг/м}^3.$$

Задаючись відстанню від джерела забруднення проводжу розрахунок приземної концентрації по осі факела, результати розрахунку наведені в табл. 9.6.

Таблиця 9.6. Величина приземної концентрації та параметра S_1 в залежності від відстані від джерела забруднення

X,м	300	600	1000	1500	4384,224	8000	12000
S_1, сг/м^3	0,027	0,097	0,228	1,113	1,000	0,0346	0,0220
C_x, сг/м^3	0,16	0,57	1,35	6,60	5,93	0,205	0,130
X/X_m	0,07	0,14	0,23	0,34	1,00	1,82	2,74
	$X/X_m<1$			$1<X/X_m<8$		$8<X/X_m$	

Значення приземних концентрацій в напрямку, нормальному до осі викидів розрахую для значення X = Xm, розрахунок проводиться по формулі:

$$Cy = S_2 \cdot Cm,$$

де S_2 – величина, яка визначається в залежності від швидкості вітру (U) та відносної координати (y/x) по формулі:

$$S_2 = 1/((1 + 8{,}4 \cdot U \cdot (y/x_m)^2) \cdot (1 + 28{,}2 \cdot U^2 \cdot (y/x_m)^4)).$$

Задавшись величиною швидкості вітру U = 15,55 м/с, та рядом значень відстаней Y проводиться розрахунок, результати розрахунку наведені в табл. 9.7.

Графічне зображення розподілу концентрацій в просторі зображене на рис. 9.3 та рис. 9.4, по напрямку поширення димової хмари та в перпендикулярному до нього напрямку відповідно.

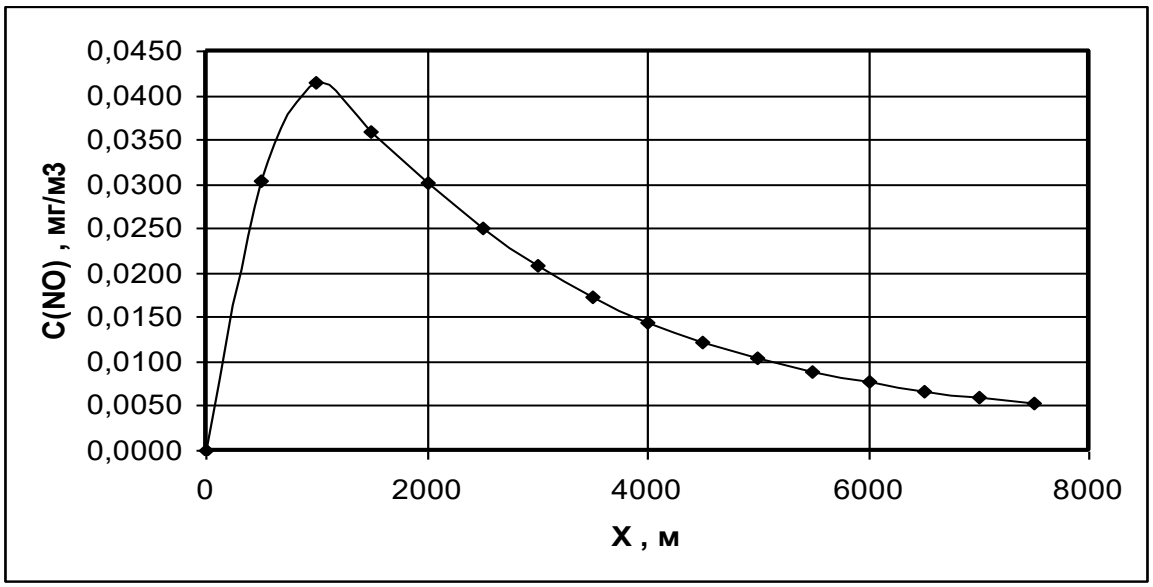


Рисунок 9.3. Значення приземної концентрації по довжині поширення факела в залежності від відстані від джерела забруднення

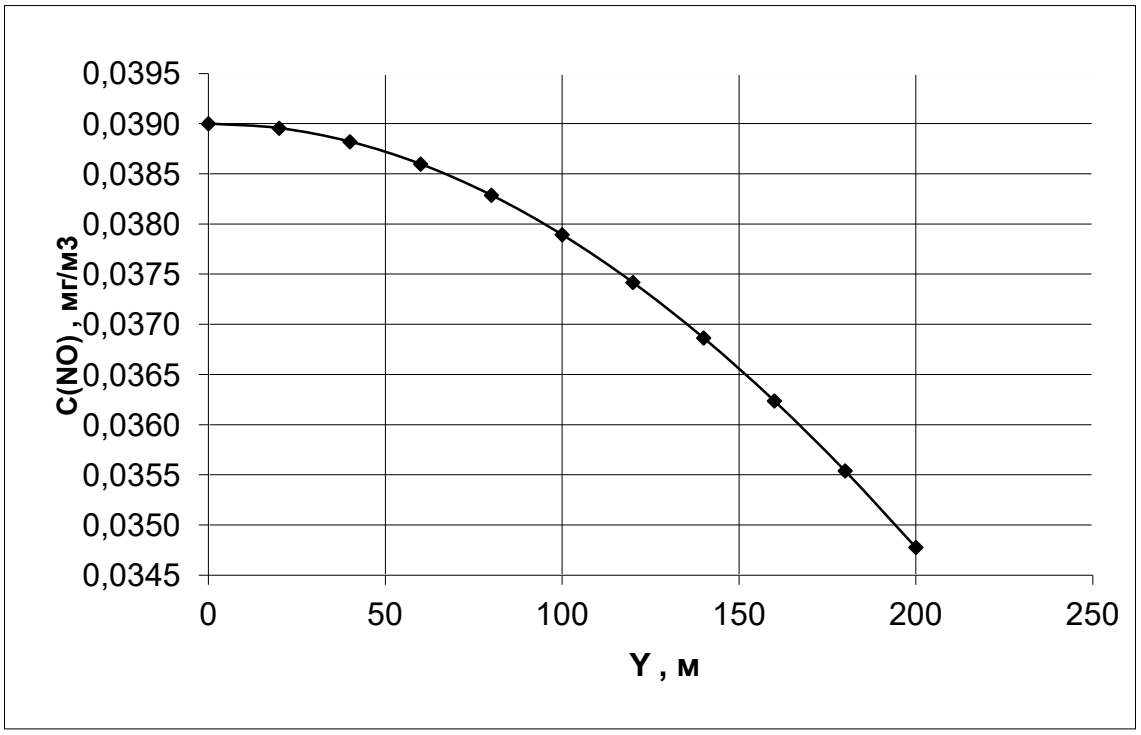


Рисунок 9.4. Значення приземної концентрації в напрямку перпендикулярному до осі поширення факела в залежності від відстані від максимальної приземної концентрації

Таблиця 9.7. Величина приземної концентрації в перпендикулярному напрямку до осі викидів та параметра S_2 в залежності від відстані від максимуму концентрацій

у,м	-900	-800	-300	-200	-100	0
S_2, сг/м^3	7,68E-03	1,45E-02	0,48452	0,72964	0,9241	1,00
C_y, сг/м^3	4,56E-02	8,62E-02	2,8724	4,326	5,48	5,93
у/х	-0,205	-0,182	-0,068	-0,046	-0,023	0,000

Паспорт ТЕС на базі ГТУ

Всі необхідні для паспотризації величини наведені у табл. 9.8.

Таблиця 9.8. Техніко- економічні та екологічні показники ТЕС на базі ГТУ

Техніко- економічні показники до всіх блоків			
Показник	Познач.	Розмірність	Величина
Електрична потужністьТЕС	N_e	МВт	175
Кількість ГТУ	$Z_{бл}$	Шт.	5
Електрична потужність ГТУ	$P_{гту}$	МВт	40
Початкова температура	T_1	К	288
Оптимальна степінь підвищення тиску в компресорі	$П_К$	-	9,93
Коефіцієнт надлишку повітря	α	-	4,096
Паливо	Природний газ		
Стехіометричний коефіцієнт	L_0	кг/кг	17
Температура повітря пясля компресора	T_2	К	527,73
Температура газів перед ГТУ	T_3	К	1350
ККД компресора	$\eta_К$	-	0,87
ККД газової турбіни	$\eta_Т$	-	0,89
Ступінь регенерації	μ	-	0
Число годин використання встановленої потужності	$\tau_Р$	год/рік	2000
Витрата палива	$m_п$	млн.м^3/рік тис.м^3/год м^3/с	80,6 40,3 11,2
ККД ГТУ	$\eta_в$	-	0,407

Питома витрата палива	в	$м^3$/кВт год	0,3358
Питома витрата теплоти	q	кДж/кВт год	20880
Витрата повітря	$V_{пов.}$	млн.$м^3$/рік тис.$м^3$/год $м^3$/с	2666,2 1333,1 370,7
Кількість виробленої електроенергії	E	млн.кВт.год /рік	240
Витрата димових газів	$V_{пр.зг.}$	$м^3$/с	381,9
Екологічні показники			
Валові викиди CO_2	M_{CO2}	т/рік кг/год г/с	287100 143550 39875
Валові викиди H_2O	M_{H2O}	т/рік кг/год г/с	234900 117450 32625
Валові викиди NO_x	M_{NOx}	т/рік кг/год г/с	108,9 54,43 15,12
Теплові викиди	Q_2	млн.МДж /рік	3146
Коефіцієнт надлишку повітря в зоні горіння	α_1	-	1,8
Питомі викиди CO_2		кг/кВт.год	1,196
Питомі викиди H_2O		кг/кВт.год	0,979
Питомі викиди NO_x		кг/кВт.год	$0,454 \cdot 10^{-3}$
ГДК NO_x		$мг/м^3$	0,04
Концентрація NO_x в димових газах		$мг/м^3$	39,6
Концентрація NO_x при O_2=15%		$мг/м^3$	22,63
Характеристики розсіювання			
Висота труби	h	м	120
Небезпечна швидкість вітру	u	м/с	15,55
Координати максимальної концентрації викидів ТЕС	x_m	м	4384,22
Діаметр устя димової труби	D_0	м	8,0
Максимальна концентрація	$C_м$	$мг/м^3$	0,042

В табл. 9.9. наведені варіанти значень для проведення екологічної експертизи ГТУ.

Таблиця 9.9. Значення для проведення екологічної експертизи ГТУ за варіантами

№	Значення	Розмірність	Варіанти						
			1	2	3	4	5	6	7
1	$Z_{бл}$	шт	4	5	4	5	4	5	4
2	$N^e_{бл}$	МВт	200	35	250	34	300	32	300
3	$\tau_р$	г/рік	2000	1700	2200	2100	1700	2200	2100
4	μ	-	0	0,8	0	0,8	0	0,8	0
5	T_1	К	288	282	290	285	288	282	290
6	T_2	К	758	752	760	755	758	752	760
7	T_3	К	1500	1350	1400	1450	1500	1350	1400
8	$Z_{тр}$	шт	1	1	1	1	1	1	1
9	q_v	Вт/($м^3$·	90	120	170	200	100	150	180
10	$\eta_Т$	-	0,9	0,91	0,92	0,9	0,91	0,92	0,89
11	$\eta_К$	-	0,88	0,89	0,9	0,87	0,86	0,88	0,89
12	паливо ГТУ	марка, назва	Природний газ						
13	$Q_Н$	кДж/кг	4800	4700	4600	4750	4800	4700	4650
14	L_0	кг/кг	17	17	17	17	17	17	17
15	η_Z	-	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99
16	$\eta_Г$	-	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
17	R	кДж/кг·	287	287	287	287	287	287	287
18	k	-	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
19	$c_р$	кДж/кг	1	1	1	1	1	1	1

9.3 Контрольні запитання

1. Що таке газотурбінна установка (ГТУ) та де вона застосовується?
2. Які основні переваги газотурбінних установок порівняно з іншими енергетичними установками?
3. Що таке екологічна експертиза ГТУ та яка її основна мета?
4. Які основні види впливу газотурбінних установок на навколишнє середовище?
5. Які забруднюючі речовини утворюються під час роботи ГТУ?
6. Чому оксиди азоту (NO_x) є найбільш небезпечними викидами газотурбінних установок?
7. Які фактори впливають на утворення NO_x у камері згоряння ГТУ?
8. Для чого визначають концентрацію NO_x у димових газах?
9. Які параметри необхідні для розрахунку викидів оксидів азоту?
10. Що таке коефіцієнт надлишку повітря та як він впливає на процес горіння?
11. Для чого визначають середню температуру в зоні горіння?
12. Що характеризує час перебування газів у зоні реакції?
13. Як визначають валові викиди оксидів азоту від ГТУ?
14. Для чого проводять розрахунок висоти димової труби?
15. Які фактори враховуються під час визначення висоти димової труби?
16. Що таке небезпечна швидкість вітру та яке її практичне значення?
17. Для чого визначають максимальну приземну концентрацію забруднюючих речовин?
18. Яким чином здійснюється оцінка розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері?
19. Які сучасні технології застосовують для зменшення викидів ГТУ?
20. Яке значення має екологічна експертиза для забезпечення екологічної безпеки газотурбінних установок?

ВИСНОВКИ

У процесі вивчення дисципліни «Екологічна безпека енергетичних систем» охоплено ключові аспекти, що стосуються взаємодії енергетичних процесів з навколишнім середовищем, а також впливу на екологічну безпеку, здоров'я людини та сталий розвиток. У результаті вивчення матеріалу можна зробити кілька важливих висновків:

Взаємозв'язок енергетики та екології. Енергетичні системи є одними з основних джерел забруднення навколишнього середовища, що включають викиди шкідливих газів, забруднення водних ресурсів і ґрунтів, а також вплив на клімат. Тому важливим завданням є забезпечення екологічної безпеки енергетичних систем, що передбачає мінімізацію негативних наслідків і пошук нових підходів до їх розв'язання.

Роль відновлювальних джерел енергії. Впровадження відновлювальних джерел енергії (сонячних, вітрових, гідроелектричних) є важливим напрямом у забезпеченні сталого розвитку енергетичних систем. Вони дозволяють значно знизити рівень викидів парникових газів, зменшити залежність від викопних видів палива і підтримати баланс природних ресурсів.

Технології зниження забруднення. Інноваційні технології, такі як захоплення та зберігання вуглецю (CCS), очищення викидів, системи енергозбереження, є важливими інструментами для забезпечення екологічної безпеки в енергетичних системах. Вони сприяють значному зниженню викидів шкідливих речовин та парникових газів, що, в свою чергу, допомагає мінімізувати вплив на глобальні кліматичні зміни.

Безпека на різних етапах енергетичних систем. Безпека енергетичних систем включає не тільки екологічні аспекти, але й техногенні та соціальні ризики. Важливо проводити постійний моніторинг і впроваджувати системи управління ризиками, які забезпечують своєчасне реагування на аварійні ситуації та їх мінімізацію.

Сталий розвиток та інновації. У зв'язку зі швидкими змінами в технологічних процесах енергетики, необхідно забезпечити впровадження інновацій, що дозволяють досягти оптимального поєднання екологічних, економічних і соціальних вимог. Сталий розвиток енергетичних систем потребує комплексного підходу, в тому числі використання нових матеріалів, ефективних енергетичних рішень і екологічно чистих технологій.

Законодавство та міжнародне співробітництво. Регулювання екологічної безпеки в енергетичних системах вимагає адаптації національних політик до міжнародних стандартів і зобов'язань у рамках угод щодо зміни клімату. Створення ефективних механізмів на рівні держав та міжнародних організацій дозволяє координувати зусилля в боротьбі з глобальними екологічними загрозами.

Освіта та підвищення обізнаності. Підвищення екологічної обізнаності серед фахівців енергетичної галузі та громадськості є необхідним етапом для формування культури відповідальності за навколишнє середовище. Тому важливо забезпечити постійну освіту та навчання в галузі екологічної безпеки.

Перспективи розвитку. У майбутньому очікується подальший розвиток технологій для забезпечення екологічної безпеки енергетичних систем, таких як «зелені» технології, вдосконалення методів енергозбереження, впровадження систем очищення та зберігання вуглецю. Це дозволить не лише зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, але й сприяти розвитку економіки низьких викидів.

Таким чином, забезпечення екологічної безпеки енергетичних систем є багатогранним процесом, що потребує комплексного підходу, включаючи технологічні інновації, вдосконалення законодавства та активне співробітництво на всіх рівнях управління. Ця дисципліна є важливою складовою частиною освіти, спрямованої на сталий розвиток та збереження природних ресурсів для майбутніх поколінь.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Базєєв Є. Т. Екологічні проблеми теплоенергетики : монографія / Є. Т. Базєєв. – Київ : Основа, 2021. – 312 с.
2. Білецький В. С. Екологія енергетики : навч. посіб. / В. С. Білецький, І. Г. Виродова. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 284 с.
3. Бондаренко В. І. Сучасні технології очищення газових викидів у теплоенергетиці // Екологічна безпека та природокористування. – 2024. – № 2 (50). – С. 55–63.
4. Бурлака В. Г. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник / В. Г. Бурлака. – Київ : ЦУЛ, 2023. – 412 с.
5. Василенко О. М. Аналіз впливу теплових електростанцій на водні екосистеми // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2023. – № 5. – С. 117–123.
6. Гелетуха Г. Г. Перспективи розвитку біоенергетики в Україні : аналітична доповідь / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Желєзна. – Київ : БАУ, 2022. – 68 с.
7. Долін В. В. Радіаційна безпека атомних електростанцій : навч. посіб. / В. В. Долін. – Харків : Факт, 2021. – 276 с.
8. Жовмір М. М. Системи екологічного моніторингу в енергетиці : навч. посіб. / М. М. Жовмір. – Одеса : Екологія, 2022. – 198 с.
9. Клименко М. О. Техноекологія : підручник / М. О. Клименко, І. І. Залеський. – Рівне : НУВГП, 2020. – 298 с.
10. Коваленко С. І. Інноваційні технології скорочення викидів парникових газів в енергетиці // Відновлювана енергетика. – 2025. – № 1. – С. 34–42.
11. Колісник М. П. Газотурбінні установки та їх вплив на довкілля : монографія / М. П. Колісник. – Дніпро : Ліра, 2023. – 240 с.
12. Лір В. Е. Декарбонізація енергетичного сектору України : сучасні виклики та перспективи // Економіка природокористування і сталий розвиток. – 2024. – № 11. – С. 19–28.

13. Маляренко В. А. Енергетика і навколишнє середовище : навч. посіб. / В. А. Маляренко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 326 с.
14. Мироненко В. І. Сучасні методи зниження оксидів азоту при спалюванні палива // Теплоенергетика України. – 2024. – № 3. – С. 41–48.
15. Мхітарян Н. М. Екологічна оцінка енергетичних об’єктів : навч. посіб. / Н. М. Мхітарян. – Київ : Каравела, 2022. – 215 с.
16. Олійник Я. Б. Основи екологічної безпеки : навч. посіб. / Я. Б. Олійник, П. Г. Шищенко. – Київ : Знання, 2021. – 287 с.
17. Павленко А. М. Технології уловлювання пилу та золи у промислових установках // Наукові праці ОНТУ. – 2025. – № 2. – С. 88–96.
18. Ратушняк Г. С. Енергозбереження та екологізація енергетичних систем : навч. посіб. / Г. С. Ратушняк. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 240 с.
19. Sustainable Recovery Tracker 2023 / International Energy Agency. – Paris : IEA, 2023. – 187 p.
20. IPCC Sixth Assessment Report: Climate Change 2023 / Intergovernmental Panel on Climate Change. – Geneva : IPCC, 2023. – 929 p.
21. Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030 / International Energy Agency. – Paris : IEA, 2024. – 312 p.
22. United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2024. – Nairobi : UNEP, 2024. – 104 p.
23. World Nuclear Association. Nuclear Power and the Environment. – London, 2024.
24. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2023. – Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2024. – 156 p.
25. European Environment Agency. Air Pollution Impacts from Energy Production in Europe. – Copenhagen : EEA, 2023. – 98 p.
26. Андрєєв С. О. Екологічні ризики функціонування теплових електростанцій : монографія / С. О. Андрєєв. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2022. – 248 с.

27. Гнатюк І. С. Сучасні методи очищення димових газів у промисловій енергетиці // Енергетика та електрифікація. – 2024. – № 4. – С. 52–60.
28. Карасьов О. П. Альтернативна енергетика та екологічна безпека : навч. посіб. / О. П. Карасьов. – Київ : Каравела, 2021. – 310 с.
29. Левченко Т. В. Теплове забруднення водойм та методи його зменшення // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2023. – № 3 (103). – С. 74–81.
30. Пилипенко М. В. Екологічна оцінка ефективності систем очищення викидів ТЕС // Екологічні науки. – 2025. – № 1 (46). – С. 91–98.
31. Nuclear Energy Agency. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. – Paris : OECD/NEA, 2024. – 143 p.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Конституція України : чинне законодавство станом на 2026 рік. – Київ : Відомості Верховної Ради України, 1996. – 64 с.
2. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII // Відомості Верховної Ради України. – 1991. – № 41. – Ст. 546.
3. Енергетична стратегія України на період до 2050 року : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квіт. 2023 р. № 373-р. – Київ, 2023.
4. Білявський Г. О. Основи екології : підручник / Г. О. Білявський, Р. С. Фурдуй, І. Ю. Костіков. – Київ : Либідь, 2005. – 408 с.
5. Шевчук В. Я. Екологізація енергетики : навч. посіб. / В. Я. Шевчук, Г. О. Білявський. – Київ : Вища школа, 2002. – 111 с.
6. Денисюк С. П. Енергетика і екологія: проблеми та перспективи : навч. посіб. / С. П. Денисюк. – Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2018. – 256 с.
7. Ключников О. О. Ядерна та радіаційна безпека України : монографія / О. О. Ключников. – Київ, 2016. – 320 с.
8. Уваркіна О. В. Екологічна безпека : навч. посіб. / О. В. Уваркіна. – Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2023. – 198 с.
9. Пугачова Т. М. Механізм утворення оксидів азоту при спалюванні органічного палива / Т. М. Пугачова, С. А. Бережной // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я : матеріали XXX міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2022, Харків, 2022. – Харків, 2022. – С. 26.

10. Мельник О. М. Захист навколишнього середовища від шкідливих викидів у енергетиці : навч. посіб. / О. М. Мельник, В. В. Сидоренко. – Харків : ХНУ, 2017. – 180 с.
11. Сєров А. В. Технології захоплення вуглецю в енергетичних системах : монографія / А. В. Сєров. – Одеса : ОНПУ, 2021. – 180 с.
12. Установки для уловлювання та очищення газових викидів у котельних установках : пояснювальна записка до дипломного проєкту / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2024. – 120 с.
13. Дмитрієв Д. О. Сучасні підходи до застосування пиловловлюючих фільтрів у промислових енергетичних установках // Сучасні технології промислового комплексу – 2025 : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. – Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – С. 112–118.
14. Бойко Ю. О. Екологічна безпека енергетичних систем : навч. посіб. / Ю. О. Бойко, І. О. Кошель, С. В. Тарасова. – Київ : Вид-во НТУУ «КПІ», 2018. – 250 с.
15. Курдюмова Т. І. Екологічна безпека в енергетичних системах : навч. посіб. / Т. І. Курдюмова. – Дніпро : Вид-во ДНУ, 2020. – 220 с.
16. Сорокіна А. О. Аналіз екологічних ризиків у енергетичних системах : монографія / А. О. Сорокіна, І. В. Дробязко. – Київ : Академперіодика, 2022. – 260 с.
17. Пояснювальна записка до проєкту Національної стратегії енергетичної безпеки України до 2030 року / Міністерство енергетики України. – Київ, 2021. – 45 с.
18. World Energy Outlook 2022 / International Energy Agency. – Paris : IEA, 2022. – 350 p.
19. Генералова Н. М. Відновлювані джерела енергії та їх екологічний вплив : навч. посіб. / Н. М. Генералова, О. Ю. Петренко. – Київ : УНІАН, 2019. – 150 с.
20. Федорова Л. О. Екологічні технології у сучасній енергетиці : навч. посіб. / Л. О. Федорова. – Львів : ЛНУ, 2021. – 210 с.

21. Зелена енергетика України: стан та перспективи розвитку / Міністерство економіки України. – Київ, 2022. – 110 с.
22. Кузьменко Л. І. Екологічний моніторинг та управління в енергетиці : навч. посіб. / Л. І. Кузьменко, О. І. Дудченко. – Черкаси : ЧНУ, 2016. – 190 с.
23. ISO 14001:2015. Environmental management systems – Requirements with guidance for use. – Geneva : International Organization for Standardization, 2015. – 35 p.