

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра екології

С. С. Душкін

КУРС ЛЕКЦІЙ

«ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ»

Харків
ХНАДУ
2025

УДК 504.05:628.4:620.9

ББК

Душкін, С. С. Технології захисту довкілля : курс лекцій / Станіслав Сергійович Душкін ; Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків : ХНАДУ, 2025. – 85 с.

Курс лекцій розроблено відповідно вимог освітньо-наукової програми «Екологічна безпека» третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 101 Екологія під навчальне аудиторне навантаження 16 годин (8 лекцій).

Зміст лекцій відповідає робочій програмі навчальної дисципліни ОК 2.4 «Технології захисту довкілля» 2024 р.

Мова навчання – державна

Душкін С.С., 2025
ХНАДУ, 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	4
ТЕМА 1. НАУКОВІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ	
Лк1. Основи екологічної безпеки та сучасні підходи до технологій природоохоронної діяльності.....	6
Лк2. Методи оцінювання ефективності природоохоронних технологій (екологічні, енергетичні, економічні критерії).....	18
ТЕМА 2. СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМКИ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ	
Лк3. Технології очищення викидів та стічних вод.....	29
Лк4. Біотехнологічні та цифрові рішення у сфері захисту довкілля.....	40
ТЕМА 3. НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ	
Лк5. Теоретичні основи енергозбереження та зменшення вуглецевого сліду.....	41
Лк6. Використання альтернативних джерел енергії: біогаз, синтетичні палива (e-fuels), вторинна енергія.....	51
ТЕМА 4. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ МАЛОВІДХОДНОГО ВИРОБНИЦТВА	
Лк7. Концепція циркулярної економіки та замкнених циклів виробництва.....	70
Лк8. Методи мінімізації, перероблення та утилізації відходів.....	78

ВСТУП

Сучасний стан довкілля характеризується зростанням антропогенного навантаження, виснаженням природних ресурсів, погіршенням якості повітря, води, ґрунтів і збільшенням кількості відходів промислового та побутового походження. Ці тенденції вимагають від науковців і практиків розроблення інноваційних підходів до управління природоохоронними процесами, упровадження екологічно безпечних технологій і формування системи сталого розвитку на всіх рівнях виробництва.

Дисципліна «Технології захисту довкілля» має на меті формування у здобувачів третього рівня вищої освіти (докторів філософії) глибоких знань про наукові основи, методи та інструменти екотехнологічного захисту природного середовища, а також розвиток здатності до наукових досліджень у сфері підвищення екологічної ефективності промислових і енергетичних процесів.

Особливість навчальної дисципліни полягає у поєднанні науково-теоретичної підготовки з аналізом практичних технологічних рішень, що застосовуються у промисловості, енергетиці, транспорті, аграрному секторі. Значна увага приділяється оцінюванню екологічних параметрів технологічних процесів, використанню альтернативних джерел енергії, енергозбереженню, утилізації та рециклінгу відходів.

Курс структуровано за чотирма основними тематичними блоками:

Тема 1. Наукові та технологічні основи захисту довкілля.

Розглядаються принципи екологічної безпеки, закономірності формування техногенного навантаження, методи оцінки ефективності природоохоронних технологій, сучасні тенденції екологічного моніторингу.

Тема 2. Стратегічні напрямки технологій захисту довкілля.

Висвітлюються інноваційні напрями розвитку екотехнологій, системи очищення викидів і стічних вод, біотехнологічні та цифрові рішення у сфері охорони довкілля, а також впровадження принципів «зеленої» економіки та циркулярного виробництва.

Тема 3. Наукові основи створення енергозберігаючих технологій.

Розглядаються теоретичні основи енергозбереження, методи зменшення вуглецевого сліду, використання альтернативних джерел енергії (біогаз, e-fuels, вторинні ресурси), а також енергоефективність промислових технологій.

Тема 4. Основні принципи організації маловідходного виробництва.

Висвітлюються підходи до проектування екологічно безпечних і замкнених технологічних циклів, методи мінімізації та перероблення відходів, екологічно-економічне обґрунтування маловідходних виробництв.

Вивчення дисципліни забезпечує здобувачам здатність:

- критично аналізувати сучасні технології захисту довкілля та їх екологічну ефективність;
- розробляти та оптимізувати власні технологічні рішення з урахуванням вимог сталого розвитку;
- виконувати наукові дослідження, спрямовані на вдосконалення систем захисту довкілля, енергозбереження та управління відходами.

Таким чином, курс «Технології захисту довкілля» формує цілісне уявлення про наукові, методологічні та прикладні засади створення і впровадження сучасних технологій, спрямованих на збереження природного середовища та гармонізацію взаємодії суспільства з природою.

ТЕМА 1. НАУКОВІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

ЛЕКЦІЯ 1. Основи екологічної безпеки та сучасні підходи до технологій природоохоронної діяльності

План лекції

1. Поняття та сутність екологічної безпеки.
 - 1.1 Екологічна безпека як складова національної та техногенної безпеки.
 - 1.2 Види екологічних загроз і фактори їх формування.
 - 1.3 Основні принципи забезпечення екологічної безпеки на глобальному, національному та локальному рівнях.
2. Нормативно-правові засади екологічної безпеки.
 - 2.1 Міжнародні угоди та документи (Орхуська конвенція, Директиви ЄС, Паризька кліматична угода).
 - 2.2 Законодавство України у сфері охорони довкілля та екологічної безпеки.
 - 2.3 Екологічне управління та стандарти ISO 14000.
3. Науково-технологічні основи природоохоронної діяльності.
 - 3.1 Поняття екотехнології та її класифікація.
 - 3.2 Принципи побудови технологічних систем, орієнтованих на мінімізацію впливу на довкілля.
 - 3.3 Концепція найкращих доступних технологій (Best Available Techniques – BAT).
4. Сучасні підходи до оцінювання екологічної ефективності технологій.
 - 4.1 Система показників екологічної ефективності (викиди, ресурсоемність, енергоефективність).
 - 4.2 Методи екологічного аудиту та життєвого циклу (LCA-аналіз).
 - 4.3 Використання цифрових інструментів і моделей у природоохоронній діяльності.
5. Інноваційні тенденції у сфері технологій захисту довкілля.
 - 5.1 Біотехнології, нанотехнології та відновлювані джерела енергії в системах очищення.
 - 5.2 Циркулярна економіка як стратегічна модель управління ресурсами.
 - 5.3 Приклади впровадження сучасних технологій в Україні та ЄС.

1. Поняття та сутність екологічної безпеки.

Екологічна безпека є ключовим елементом системи національної безпеки та невід'ємною умовою сталого розвитку суспільства. У сучасних умовах техногенного навантаження, зміни клімату та зростання антропогенного впливу на природні системи, забезпечення екологічної безпеки стає стратегічним завданням держави, науки та виробництва.

Розвиток технологій захисту довкілля – це не лише технічний аспект, а й науково-організаційна система, спрямована на запобігання забрудненню, раціональне використання ресурсів і підтримання екологічної рівноваги.

1.1. Екологічна безпека як складова національної та техногенної безпеки

Екологічна безпека – це стан захищеності навколишнього природного середовища, людини та господарських систем від негативного впливу антропогенних і природних факторів, що забезпечує збереження екологічної рівноваги та сталий розвиток суспільства.

У структурі національної безпеки вона виступає одним із ключових елементів, оскільки деградація природного середовища безпосередньо впливає на економічну стабільність, енергетичну незалежність, продовольчу безпеку та здоров'я населення.

З точки зору системного підходу, екологічна безпека охоплює три взаємопов'язані компоненти:

- природну складову, що характеризує стан екосистем і природних ресурсів;
- соціальну складову, яка визначає вплив довкілля на здоров'я та якість життя населення;
- техногенну складову, пов'язану з ризиками аварій, промислових викидів, транспортуванням небезпечних речовин тощо.

Порушення екологічної безпеки в одній із цих сфер неминуче призводить до дисбалансу в інших, що підтверджує її інтегративний характер.

1.2. Види екологічних загроз і фактори їх формування

Екологічні загрози – це сукупність процесів і явищ, які можуть спричинити деградацію природного середовища, зниження якості життя або виникнення екологічних катастроф. Вони поділяються за природою походження на природні, техногенні та соціально-економічні.

Природні загрози:

- стихійні лиха (повені, посухи, буревії, землетруси);
- зміни клімату, підвищення середньої температури, опустелювання;
- природні пожежі, зсуви, ерозія ґрунтів.

Техногенні загрози:

- аварії на промислових об'єктах (енергетика, хімічна, гірничодобувна промисловість);
- забруднення атмосфери, води та ґрунтів шкідливими речовинами;
- накопичення промислових і побутових відходів;
- нераціональне використання природних ресурсів, деградація земель.

Соціально-економічні фактори:

- низький рівень екологічної культури та освіти;
- недосконалість законодавчої бази і контролю;
- домінування короткострокових економічних інтересів над екологічними;
- недостатня інтеграція екологічних вимог у державну політику.

Фактори формування загроз мають як глобальний (трансграничне забруднення, кліматичні зміни), так і регіональний вимір (наприклад, промислові зони, транспортні вузли, міські агломерації).

1.3. Основні принципи забезпечення екологічної безпеки на глобальному, національному та локальному рівнях

Глобальний рівень.

Забезпечення екологічної безпеки на світовому рівні здійснюється через міжнародні угоди, конвенції та програми ООН, ЮНЕП, ЮНЕСКО, ЄС. Основними принципами є:

- сталий розвиток (sustainable development);
- глобальне партнерство у вирішенні екологічних проблем;
- спільна, але диференційована відповідальність держав;
- інтеграція екологічної політики у всі сфери економічної діяльності.

Національний рівень.

В Україні основні принципи закріплені у Законах «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про екологічну безпеку», «Про відходи» та низці підзаконних актів. Серед ключових положень:

- превентивний підхід (запобігання шкоді краще, ніж її усунення);
- принцип «забруднювач платить»;
- державне управління та контроль у сфері охорони довкілля;
- гармонізація національного законодавства з європейськими екологічними стандартами.

Локальний рівень.

На рівні підприємств і територіальних громад екологічна безпека реалізується через:

- впровадження систем екологічного менеджменту (ISO 14001);
- екологічний аудит і моніторинг;
- використання найкращих доступних технологій (BAT);
- екологічну паспортизацію підприємств;
- підготовку персоналу в галузі екологічної безпеки.

Таким чином, екологічна безпека є багаторівневою системою, що інтегрує міжнародні, державні та локальні механізми захисту довкілля, базується на принципах превентивності, відповідальності, наукової обґрунтованості та міжсекторальної взаємодії.

2. Нормативно-правові засади екологічної безпеки.

Забезпечення екологічної безпеки неможливе без належного правового регулювання, яке визначає межі, вимоги та механізми діяльності у сфері охорони довкілля. Нормативно-правові акти створюють правову основу для реалізації державної екологічної політики, встановлюють відповідальність за порушення природоохоронного законодавства та забезпечують гармонізацію національних стандартів із міжнародними екологічними нормами.

Система екологічного права охоплює міжнародний, національний та локальний рівні регулювання, кожен із яких відіграє важливу роль у досягненні балансу між економічним розвитком і збереженням природного середовища. На міжнародному рівні – це конвенції, угоди та директиви, що формують глобальні стандарти; на національному – закони та державні

програми, які визначають правові механізми охорони довкілля; на локальному – системи екологічного управління та стандарти, що застосовуються безпосередньо на підприємствах і в регіонах.

2.1. Міжнародно-правові документи у сфері екологічної безпеки

Система міжнародного екологічного права сформувалася як результат багаторічної співпраці держав і міжнародних організацій з метою запобігання глобальним екологічним загрозам.

Основними міжнародними документами, що визначають підходи до екологічної безпеки, є:

- Орхуська конвенція (1998 р.) – гарантує право громадян на доступ до екологічної інформації, участь у прийнятті екологічно значущих рішень та доступ до правосуддя в екологічних справах;
- Базельська конвенція (1989 р.) – регламентує транскордонне перевезення небезпечних відходів та їх утилізацію.
- Кіотський протокол (1997 р.) і Паризька угода (2015 р.) – визначають міжнародні зобов'язання держав щодо скорочення викидів парникових газів і протидії зміні клімату.
- Стокгольмська конвенція (2001 р.) – регулює обіг і знищення стійких органічних забруднювачів.

Директиви ЄС у сфері довкілля, зокрема:

- Директива 2008/1/ЄС про комплексне попередження і контроль забруднення (ІРПС);
- Директива 2000/60/ЄС – Рамкова директива про водну політику;
- Директива 2008/50/ЄС – про якість атмосферного повітря.

Ці документи формують єдину систему стандартів і принципів, спрямованих на зменшення антропогенного впливу, регулювання використання природних ресурсів та інтеграцію екологічних критеріїв у всі галузі економіки.

2.2. Національне законодавство України у сфері екологічної безпеки

В Україні правові засади забезпечення екологічної безпеки визначено низкою базових законів і підзаконних актів, які регулюють відносини у сфері охорони довкілля, раціонального використання природних ресурсів і запобігання техногенним загрозам.

До ключових нормативно-правових актів належать:

- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» (1991 р.) – основний документ, що визначає загальні принципи екологічної політики держави;
- Закон України «Про екологічну безпеку» – встановлює правові основи діяльності щодо запобігання екологічним загрозам і ліквідації їх наслідків;
- Закон України «Про відходи» – регламентує порядок поводження з відходами, включно з їх збиранням, транспортуванням, утилізацією та знешкодженням;
- Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» (ОВД) – запроваджує процедуру екологічної експертизи проєктів, що можуть впливати на стан

довкілля;

- Кодекс України про надра, Водний кодекс України, Земельний кодекс України, Лісовий кодекс України — регламентують використання окремих природних ресурсів.

Державна політика у сфері екологічної безпеки реалізується через:

- Стратегію екологічної політики України до 2030 року,
- Національний план управління відходами,
- Концепцію сталого розвитку населених пунктів України,
- Державну програму моніторингу довкілля.

Важливим напрямом є гармонізація національного законодавства з екологічним правом Європейського Союзу в межах Угоди про асоціацію між Україною та ЄС (2014 р.).

2.3. Екологічне управління та міжнародні стандарти

Ефективне забезпечення екологічної безпеки неможливе без розбудови систем екологічного управління, що базуються на міжнародних стандартах і механізмах самоконтролю підприємств.

Міжнародні стандарти серії ISO 14000 визначають вимоги до системи управління довкіллям на підприємствах і організаціях.

Зокрема:

- ISO 14001 – встановлює структуру системи екологічного менеджменту (Environmental Management System, EMS);
- ISO 14004 – описує методичні рекомендації щодо розроблення й удосконалення EMS;
- ISO 14064 – визначає вимоги до обліку та звітності викидів парникових газів;
- ISO 14040/14044 – регламентують проведення аналізу життєвого циклу продукції (LCA).

Упровадження систем екологічного менеджменту дає змогу:

- зменшити вплив виробництва на навколишнє середовище;
- підвищити ефективність використання ресурсів;
- удосконалити процеси внутрішнього контролю та аудиту;
- поліпшити імідж підприємства на міжнародному ринку.

Додатково для країн Європейського Союзу діє Система екологічного менеджменту та аудиту (EMAS — Eco-Management and Audit Scheme), що є добровільним інструментом інтеграції екологічних критеріїв у виробничу політику.

Таким чином, нормативно-правові та управлінські засади екологічної безпеки формують правову й організаційну основу для розроблення сучасних технологій захисту довкілля, їх адаптації до міжнародних стандартів та впровадження у виробничу практику.

3. Науково-технологічні основи природоохоронної діяльності.

Ефективне забезпечення екологічної безпеки базується не лише на законодавчих та управлінських механізмах, а й на розвитку наукових підходів і технологічних рішень, які мінімізують негативний вплив виробництва на

довкілля.

Сучасна природоохоронна діяльність спирається на інтеграцію екологічних знань із досягненнями хімії, біотехнології, енергетики, матеріалознавства, інформатики та системного аналізу.

Технології захисту довкілля розвиваються в напрямі підвищення ресурсоефективності, створення замкнених виробничих циклів і впровадження принципів сталого розвитку у всі сфери господарської діяльності.

3.1. Поняття екотехнологій та їх класифікація

Екотехнології – це сукупність технічних, біологічних і організаційних засобів, спрямованих на запобігання або зменшення негативного впливу людської діяльності на природне середовище, а також на відновлення порушених екосистем.

Вони поєднують у собі як профілактичний, так і реабілітаційний підхід: перший полягає у запобіганні забрудненню, другий – у ліквідації наслідків.

За функціональним призначенням екотехнології поділяють на кілька основних груп:

Технології очищення – процеси видалення шкідливих речовин із повітря, води, ґрунтів (фільтрація, абсорбція, біоочищення, каталітичне окиснення).

Технології замкненого циклу (рециклінгу) – повернення вторинних ресурсів у виробництво, повторне використання матеріалів, перероблення відходів.

Енергозберігаючі технології – скорочення споживання енергії шляхом підвищення ККД процесів, рекуперації тепла, використання альтернативних джерел енергії.

Біотехнології природоохоронного спрямування – застосування мікроорганізмів і ферментів для очищення середовища (біоремедіація, біофільтри, фіторемедіація).

Інформаційно-аналітичні технології – системи екологічного моніторингу, моделювання, цифрового аналізу даних (GIS, дистанційне зондування, цифрові платформи спостережень).

У сучасній науці екотехнології розглядають як складову інженерної екології, де технічні рішення розробляються з урахуванням природних закономірностей функціонування екосистем.

3.2. Принципи екологізації виробництва

Екологізація виробництва – це процес переходу від традиційних технологій, орієнтованих лише на економічний результат, до екологічно збалансованих технологічних систем, які враховують вплив на довкілля на всіх етапах життєвого циклу продукції.

Основними принципами екологізації виробництва є:

- превентивність – зниження негативного впливу на стадії проектування процесів, а не після виникнення забруднення;
- замкнутість циклу – повернення відходів і побічних продуктів у

технологічний процес як вторинної сировини;

- енерго- та ресурсоощадність – мінімізація споживання енергії, води, матеріалів;
- безвідходність – створення таких технологій, де утворення відходів зведене до мінімуму або усунуто повністю;
- використання відновлюваних ресурсів – заміна невідновних джерел енергії на біомасу, сонячну, вітрову чи геотермальну енергію;
- екологічний менеджмент – управління підприємством із урахуванням екологічних критеріїв ефективності.

Екологізація виробництва передбачає не лише модернізацію обладнання, а й зміну філософії управління – перехід від «усунення наслідків» до упередження впливів. Це відповідає концепції сталого розвитку, затвердженій ООН у 2015 році в рамках Цілей сталого розвитку (SDGs).

3.3. Концепція найкращих доступних технологій (Best Available Techniques – BAT)

Поняття BAT (Best Available Techniques) – одне з ключових у сучасній екологічній політиці ЄС і європейському екологічному менеджменті.

BAT – це сукупність технологічних рішень, методів і процесів, які забезпечують найвищий рівень захисту довкілля при економічно прийнятних витратах.

Основні риси BAT:

- технології мають бути перевірені на практиці й доведені як ефективні;
- вони мають бути доступними для впровадження на існуючих підприємствах;
- повинні мінімізувати викиди і споживання ресурсів;
- оцінюються не лише за екологічними, а й за економічними показниками.

Європейська Комісія систематизує інформацію про BAT у спеціальних довідниках – BREF (BAT Reference Documents), які охоплюють різні галузі промисловості (енергетику, хімію, металургію, агропереробку тощо).

Застосування принципів BAT дає можливість підприємствам гармонізувати свою діяльність із екологічним законодавством ЄС, зменшити екологічні ризики та підвищити конкурентоспроможність.

В Україні концепція BAT поступово впроваджується відповідно до Закону України «Про запобігання, зменшення та контроль промислового забруднення» (2022 р.), що передбачає перехід до інтегрованих дозволів на викиди на основі європейських стандартів.

Отже, науково-технологічні основи природоохоронної діяльності забезпечують практичну реалізацію принципів екологічної безпеки, поєднуючи інженерні рішення, наукові підходи та управлінські інструменти в єдину систему сталого розвитку.

4. Сучасні підходи до оцінювання екологічної ефективності технологій

Розвиток сучасних технологій захисту довкілля неможливий без об'єктивної оцінки їх екологічної ефективності. У наукових і виробничих колах дедалі більше поширюється розуміння того, що ефективність технології

визначається не лише економічними показниками, а й ступенем її впливу на природне середовище, використанням ресурсів і рівнем утворення відходів.

Оцінювання екологічної ефективності дає змогу порівняти альтернативні технологічні рішення, визначити «вузькі місця» у процесі, розробити заходи зі зменшення впливу на довкілля та забезпечити досягнення міжнародних екологічних стандартів.

4.1. Система показників екологічної ефективності

Під екологічною ефективністю розуміють співвідношення між досягнутим технологічним результатом і витратами природних ресурсів або рівнем негативного впливу на довкілля.

Для оцінювання цього показника використовують систему кількісних та якісних критеріїв, які поділяються на кілька груп:

1. Показники викидів і забруднення:

- обсяг викидів забруднюючих речовин у повітря (кг/рік або г/м³);
- концентрація домішок у стічних водах (мг/л);
- обсяг твердих відходів, що утворюються в процесі виробництва.

2. Ресурсоємні показники:

- питоме споживання енергії (кВт·год/т продукції);
- витрати води, сировини, допоміжних матеріалів;
- коефіцієнт використання вторинних ресурсів.

3. Енергетичні показники:

- енергоефективність технологічного процесу ($\eta = \text{корисна енергія} / \text{витрачена енергія}$);
- частка відновлюваних джерел енергії у виробництві.

4. Інтегральні показники:

- екологічний індекс технології (Ecological Index);
- екологічна ефективність (Eco-efficiency = Економічна вигода / Екологічний вплив);
- вуглецевий слід (Carbon Footprint).

На практиці для узагальненої оцінки використовують метод «екологічного профілю» – графічного відображення основних параметрів, що дає змогу швидко ідентифікувати найпроблемніші напрямки у виробництві.

4.2. Методи екологічного аудиту та аналізу життєвого циклу (LCA)

Екологічний аудит – це систематичний, документально підтверджений процес перевірки відповідності діяльності підприємства екологічним вимогам, стандартам та внутрішній політиці.

Основна мета аудиту – виявити ризики, визначити реальний рівень впливу на довкілля та сформулювати рекомендації щодо його зменшення.

Типи екологічного аудиту:

- зовнішній аудит – проводиться незалежними експертами чи сертифікаційними органами;
- внутрішній аудит – здійснюється службами підприємства в межах системи екологічного менеджменту;

- спеціалізований аудит – спрямований на окремі аспекти (наприклад, управління відходами, енергоспоживання тощо).

Одним із найефективніших сучасних методів оцінки екологічних наслідків є аналіз життєвого циклу продукції (Life Cycle Assessment, LCA).

LCA охоплює всі етапи життєвого циклу продукту або технології – від видобутку сировини до утилізації – і визначає сукупний екологічний вплив на довкілля.

Основні етапи проведення LCA:

- визначення мети та меж дослідження;
- збір і обробка даних про матеріальні та енергетичні потоки;
- оцінка впливу на довкілля (викиди, споживання ресурсів, відходи);
- інтерпретація результатів і розроблення рекомендацій щодо поліпшення технології.

Метод LCA дозволяє порівняти альтернативні технологічні рішення, обґрунтувати вибір найменш шкідливих матеріалів або процесів, а також підтвердити відповідність продукції екологічним стандартам.

4.3. Використання цифрових інструментів і моделей у природоохоронній діяльності

Сучасна екологічна практика дедалі активніше інтегрує цифрові технології – від автоматизованих систем моніторингу до штучного інтелекту для моделювання екологічних процесів.

Найпоширенішими напрямками цифровізації є:

- GIS-технології (геоінформаційні системи) – використовуються для просторового аналізу стану довкілля, побудови карт зон забруднення, планування територій;
- дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – супутникові спостереження для контролю лісів, водних ресурсів, земельних змін;
- цифрові двійники (Digital Twins) – моделювання екосистем або підприємств для прогнозування впливу технологічних змін;
- Big Data та машинне навчання – аналіз великих обсягів екологічних даних для прогнозування тенденцій забруднення;
- онлайн-платформи моніторингу (наприклад, OOUVR, EEA Data, UNEP Databases) – доступ до оперативних даних про стан довкілля.

Використання цифрових інструментів підвищує точність оцінювання екологічної ефективності, сприяє прийняттю науково обґрунтованих рішень та забезпечує прозорість екологічної інформації.

Таким чином, сучасні підходи до оцінювання екологічної ефективності технологій поєднують економічний, екологічний і технологічний аналіз, базуються на принципах системності, прозорості та цифровізації. Вони забезпечують перехід від декларативного до науково виваженого управління впливом людини на навколишнє середовище.

5. Інноваційні тенденції у сфері технологій захисту довкілля

Сучасна еволюція природоохоронних технологій відбувається під впливом глобальних викликів – зміни клімату, енергетичної кризи, зростання обсягів відходів і виснаження природних ресурсів.

Технології захисту довкілля дедалі частіше інтегрують досягнення різних наукових напрямів – біотехнології, нанотехнології, інформаційних систем, матеріалознавства, що дає змогу створювати нове покоління рішень із високим рівнем екологічної та енергетичної ефективності.

Ключовими векторами розвитку екотехнологій є біологізація, інтелектуалізація та циркулярність виробництва.

5.1. Біотехнологічні інновації у сфері очищення довкілля

Біотехнологічні методи стають дедалі важливішим елементом природоохоронної діяльності, оскільки забезпечують ефективне та економічно виправдане очищення середовища від забруднювачів.

Основні напрями розвитку екобіотехнологій включають:

- біоремедіацію – використання мікроорганізмів для розкладання токсичних речовин у ґрунтах, воді та осадах.
- фіторемедіацію – очищення забруднених територій за допомогою рослин, які здатні акумулювати або розкласти шкідливі речовини.
- біофільтрацію повітря та стічних вод – застосування біореакторів, біофільтрів і біоплівки для утилізації органічних сполук.
- біотехнології перероблення відходів – виробництво біогазу, біоетанолу, біодизелю з органічних решток і промислових відходів.

Такі підходи не лише знижують рівень забруднення, а й сприяють переходу до біоорієнтованої економіки, у якій відходи розглядаються як вторинний ресурс.

5.2. Нанотехнології та нові матеріали в системах екологічного захисту

Розвиток нанотехнологій відкрив принципово нові можливості для створення ефективних систем очищення повітря, води та ґрунтів.

Наноматеріали характеризуються високою питомою поверхнею, сорбційною здатністю та хімічною активністю, що забезпечує унікальні властивості при фільтрації та каталітичних процесах.

Приклади застосування:

- нанофільтраційні мембрани для знесолення та доочищення води;
- нанокаталізатори для окиснення органічних сполук у газових викидах;
- нанокомпозити у системах очищення ґрунтів від важких металів;
- наносенсори для контролю складу атмосферного повітря та стічних вод у режимі реального часу.

Використання нанотехнологій дозволяє зменшити витрати реагентів, підвищити ефективність очищення і знизити енергоспоживання технологічних процесів.

5.3. Циркулярна економіка та цифровізація природоохоронних процесів

Однією з провідних інноваційних тенденцій є впровадження принципів циркулярної економіки (Circular Economy), яка передбачає замкнений цикл ресурсів – мінімізацію відходів і повторне використання матеріалів.

Цей підхід базується на концепції «3R»: *Reduce* – *Reuse* – *Recycle* (скорочення, повторне використання, переробка).

У межах циркулярної економіки активно розвиваються:

- технології вторинної переробки матеріалів (пластиків, металів, скла, гуми);
- енергія з відходів (Waste-to-Energy) – термічне або біологічне перетворення відходів у енергоресурси;
- індустріальна симбіозія, коли відходи одного підприємства стають ресурсом для іншого;
- цифрові платформи для обліку матеріальних потоків і моніторингу утилізації.

Велике значення має інтелектуалізація природоохоронних технологій: застосування штучного інтелекту (AI) для аналізу екологічних ризиків, оптимізації енергоспоживання та управління промисловими процесами в режимі реального часу.

Європейські ініціативи, такі як NetZeroCities або Green Deal Data Space, уже впроваджують такі рішення на рівні міст і промислових кластерів.

Висновки до лекції 1

Екологічна безпека є фундаментом сталого розвитку суспільства, а сучасні технології захисту довкілля – його практичним інструментом.

Знання нормативно-правових основ, наукових принципів і методів оцінювання ефективності дають змогу майбутнім фахівцям розробляти власні екологічно орієнтовані технологічні рішення.

Інноваційні тенденції – біо-, нано-, цифрові технології та циркулярна економіка – формують нову парадигму природоохоронної діяльності, де технологічний прогрес поєднується з екологічною відповідальністю.

Контрольні запитання

1. Що таке екологічна безпека та яку роль вона відіграє у системі національної безпеки держави?
2. У чому полягає взаємозв'язок між техногенною та екологічною безпекою?
3. Які основні види екологічних загроз виокремлюють за походженням і які фактори сприяють їх формуванню?
4. Назвіть головні принципи забезпечення екологічної безпеки на глобальному, національному та локальному рівнях.
5. Які міжнародно-правові документи визначають загальні засади екологічної безпеки у світі?
6. Які основні нормативно-правові акти України регулюють питання охорони довкілля та екологічної безпеки?

7. У чому полягає призначення стандартів серії ISO 14000 та системи екологічного менеджменту EMAS?
8. Дайте визначення поняття «екотехнологія» та наведіть приклади її основних видів.
9. Які принципи екологізації виробництва лежать в основі сталого розвитку?
10. Що означає концепція найкращих доступних технологій (BAT) і як вона реалізується в Україні?
11. Які показники використовуються для оцінювання екологічної ефективності технологічних процесів?
12. У чому полягає сутність методу аналізу життєвого циклу продукції (LCA) та які його етапи?
13. Які цифрові технології сьогодні застосовуються для моніторингу та управління станом довкілля?
14. У чому полягає роль біотехнологій у системі очищення та відновлення навколишнього середовища?
15. Які основні принципи циркулярної економіки та як вони реалізуються через сучасні екологічні технології?

ЛЕКЦІЯ 2. Методи оцінювання ефективності природоохоронних технологій (екологічні, енергетичні, економічні критерії).

План лекції

1. Загальні підходи до оцінювання ефективності природоохоронних технологій.
 - 1.1 Поняття ефективності природоохоронних технологій.
 - 1.2 Система цілей і критеріїв оцінювання.
 - 1.3 Класифікація методів оцінки (екологічні, енергетичні, економічні, інтегральні).
2. Екологічні критерії оцінювання.
 - 2.1 Кількісні показники впливу технологій на довкілля.
 - 2.2 Методика розрахунку індексів забруднення та екологічного ризику.
 - 2.3 Комплексні екологічні показники (LCA, екологічна ефективність, вуглецевий слід).
3. Енергетичні критерії оцінювання.
 - 3.1 Поняття енергоефективності та енергоємності технологічних процесів.
 - 3.2 Показники енергетичної ефективності систем очищення.
 - 3.3 Визначення енергетичного балансу та коефіцієнта корисної дії екотехнологій.
4. Економічні критерії оцінювання.
 - 4.1 Собівартість природоохоронних заходів і термін окупності інвестицій.
 - 4.2 Методика оцінки економічної ефективності (NPV, IRR, PI, Payback).
 - 4.3 Вартісна оцінка екологічного ефекту та соціально-економічних вигід.
5. Інтегральні підходи до оцінювання ефективності природоохоронних технологій.
 - 5.1 Побудова інтегрального показника ефективності.
 - 5.2 Метод експертного оцінювання та вагові коефіцієнти критеріїв.
 - 5.3 Використання цифрових інструментів для багатокритеріального аналізу (GIS, LCA, Python-based Eco Tools).

Оцінювання ефективності природоохоронних технологій є ключовим етапом у науковому та практичному забезпеченні екологічної безпеки. Сучасні технологічні рішення у сфері охорони довкілля повинні не лише знижувати рівень забруднення, а й бути енергоефективними, економічно доцільними та екологічно збалансованими.

Для дослідників і розробників технологій важливо розуміти, що екологічна ефективність – це багатовимірне поняття, яке поєднує технічні, енергетичні, економічні та соціальні аспекти. Від того, наскільки точно проведено оцінку, залежить вибір найкращих технологічних рішень, їх інтеграція у виробничі процеси та прийняття управлінських рішень на державному рівні.

1. Загальні підходи до оцінювання ефективності природоохоронних технологій.

Система оцінювання ефективності природоохоронних технологій базується на міждисциплінарному підході, який поєднує знання з екології, енергетики, економіки та системного аналізу. Метою такого оцінювання є виявлення ступеня досягнення екологічних, енергетичних та соціально-економічних цілей за мінімальних витрат ресурсів і з урахуванням довгострокового впливу на довкілля.

1.1. Поняття ефективності природоохоронних технологій

Ефективність природоохоронної технології – це її здатність забезпечувати заданий рівень екологічної безпеки та зменшення негативного впливу на довкілля при оптимальному використанні ресурсів і мінімальних економічних витратах.

Загалом поняття ефективності у сфері природоохоронних технологій має три основні аспекти:

1. Екологічний – наскільки технологія зменшує рівень забруднення або ризик для довкілля;
2. Енергетичний – як раціонально використовуються енергоресурси;
3. Економічний – чи виправдані витрати з точки зору прибутку, окупності та соціального ефекту.

Таким чином, ефективність не є одновимірною характеристикою – вона формується на перетині технічних параметрів, екологічних показників і фінансових результатів.

1.2. Система цілей і критеріїв оцінювання

Метою оцінювання є встановлення відповідності між реальними показниками технологічного процесу та очікуваними результатами.

Система цілей може включати:

- екологічну мету – зменшення викидів, мінімізація відходів, збереження природних ресурсів;
- енергетичну мету – підвищення ККД процесів, зниження енергоємності;
- економічну мету – скорочення витрат і підвищення конкурентоспроможності виробництва.

Відповідно до поставлених цілей визначаються критерії оцінювання, серед яких:

- питомі викиди шкідливих речовин (кг/од. продукції);
- енерговитрати (кВт·год/т продукції);
- коефіцієнт утилізації вторинних ресурсів;
- собівартість природоохоронного заходу;
- інтегральний екологічний індекс.

Кожен із критеріїв може бути кількісним або якісним і розглядатися окремо чи у складі комплексного показника.

1.3. Класифікація методів оцінювання

Методи оцінювання ефективності природоохоронних технологій поділяють на кілька основних груп:

1. Екологічні методи – базуються на вимірюванні показників забруднення, рівня токсичності, біологічної стійкості екосистем (наприклад, метод LCA, метод екологічного індексу, аналіз вуглецевого сліду).

2. Енергетичні методи – визначають ефективність використання енергії в процесі реалізації технології, зокрема через енергетичний баланс і показники ККД.

3. Економічні методи – оцінюють фінансову результативність екотехнологій, враховуючи витрати на впровадження, експлуатацію, амортизацію та екологічні вигоди.

4. Інтегральні методи – поєднують екологічні, енергетичні та економічні критерії у єдину систему (наприклад, метод багатокритеріального аналізу, експертного оцінювання, інтегрального показника ефективності).

Такі методи дозволяють проводити комплексну оцінку, яка враховує не лише поточний стан, але й довгострокові наслідки впровадження природоохоронних технологій.

2. Екологічні критерії оцінювання

Екологічні критерії є базовими при визначенні ефективності природоохоронних технологій, оскільки саме вони відображають головну мету – зменшення негативного впливу виробництва на довкілля.

Оцінювання за екологічними критеріями дозволяє кількісно визначити рівень поліпшення стану навколишнього середовища, оцінити потенційні ризики для екосистем і здоров'я людини, а також сформулювати наукове підґрунтя для прийняття управлінських рішень.

2.1. Кількісні показники впливу технологій на довкілля

Кількісна оцінка екологічної ефективності технології базується на визначенні показників, які характеризують ступінь забруднення окремих компонентів біосфери – повітря, води, ґрунтів.

Основні показники включають:

- питомі викиди шкідливих речовин у повітря (E_a), кг/од. продукції;
- концентрацію забруднювальних речовин у стічних водах (C_s), мг/л;
- обсяг утворених твердих відходів (W_t), кг/рік;
- коефіцієнт утилізації відходів (K_u) = (кількість утилізованих відходів / загальна кількість відходів) $\times 100\%$;
- Індекс забруднення атмосфери (I_a), який інтегрує концентрації основних домішок (SO_2 , NO_x , CO , пил тощо).

Для порівняння технологій між собою застосовують нормовані показники, тобто співвідношення фактичних значень до гранично допустимих (ГДК). Якщо $I < 1$, технологія вважається екологічно безпечною, якщо $I > 1$ – потребує вдосконалення або додаткових очисних заходів.

2.2. Методика розрахунку індексів забруднення та екологічного ризику

Для комплексної оцінки впливу використовують індекси забруднення, які дозволяють врахувати сукупний ефект кількох забруднювачів.

Найпоширеніші індекси:

1. Індекс забруднення атмосфери (ІЗА):

$$ІЗА = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ГДК_i} \quad (1)$$

де C_i - середньорічна концентрація i -тої речовини;

$ГДК_i$ - гранично допустима концентрація.

2. Індекс токсичності стічних вод (I_s):

$$I_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ГДК_i} \quad (2)$$

3. Індекс екологічного ризику (R_e):

$$R_e = P \times C \quad (3)$$

де P – імовірність виникнення негативної події (аварії, витoku, відмови системи);

C – масштаб наслідків (економічні, екологічні або соціальні втрати).

Значення R_e дозволяє класифікувати технології за рівнем ризику:

- $R_e < 0.1$ - низький ризик;
- $0.1 \leq R_e < 0.5$ - помірний ризик;
- $R_e \geq 0.5$ - високий ризик.

Такі індекси використовують при екологічному аудиті, сертифікації технологій та екологічному моделюванні.

2.3. Комплексні екологічні показники (ЛСА, екологічна ефективність, вуглецевий слід)

Сучасна екологічна оцінка не обмежується лише контролем за викидами або концентраціями забруднювачів.

Застосовуються інтегровані підходи, що враховують повний життєвий цикл технології або продукту.

Аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA):

Метод охоплює всі етапи – від видобутку сировини, транспортування, виробництва, споживання до утилізації. Результатом є визначення сумарного екологічного навантаження у вигляді «екологічного сліду» (ЕСО-Score).

Екологічна ефективність (Есо-eficiency):

Це співвідношення економічної вигоди до екологічного впливу:

$$EE = \frac{\text{Економічна вигода}}{\text{Екологічний вплив}} \quad (4)$$

Чим вище значення EE , тим більш збалансованою є технологія.

Вуглецевий слід (Carbon Footprint):

Показує кількість викидів парникових газів (у CO_2 -еквіваленті), пов'язаних із виробництвом чи споживанням продукту. Використовується як основний критерій оцінки технологій у рамках кліматичної політики ЄС (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM).

Таким чином, екологічні критерії дозволяють не лише визначити ефективність конкретних технологічних рішень, а й забезпечити їх відповідність міжнародним стандартам екологічного менеджменту та вимогам сталого розвитку.

3. Енергетичні критерії оцінювання

Енергетичні показники відіграють ключову роль у визначенні ефективності природоохоронних технологій, оскільки саме споживання енергії є одним із головних чинників впливу на довкілля. Будь-який процес очищення, перероблення або утилізації вимагає певних енергетичних затрат, тому оцінка енергоефективності дозволяє з'ясувати, наскільки раціонально використовується енергія, чи виправдані втрати ресурсів, і який потенціал має технологія для вдосконалення. Зменшення енергоспоживання в системах екологічного захисту – це не лише економічне, але й екологічне завдання, адже скорочення витрат енергії прямо знижує рівень викидів парникових газів і зменшує вуглецевий слід виробництва.

3.1. Поняття енергоефективності та енергоємності технологічних процесів

Енергоефективність технологічного процесу – це здатність технології забезпечувати заданий рівень очищення або утилізації при мінімальному споживанні енергії. Цей показник відображає, наскільки ефективно енергія, що надходить у систему, перетворюється в корисну роботу, а не витрачається марно.

Ключові показники енергоефективності:

1. Коефіцієнт корисної дії (ККД):

$$\eta = \frac{E_{\text{кор}}}{E_{\text{заг}}} \times 100\% \quad (5)$$

де $E_{\text{кор}}$ - корисна енергія, що використовується у процесі;

$E_{\text{заг}}$ - загальні енергетичні витрати.

2. Енергоємність технології (E_e):

$$E_e = \frac{E_{\text{спож}}}{Q_{\text{прод}}} \quad (6)$$

де $E_{\text{спож}}$ - спожита енергія;

$Q_{\text{прод}}$ - кількість очищеної води, повітря чи утилізованих відходів (у відповідних одиницях).

Зменшення енергоємності є основною метою модернізації природоохоронних технологій, оскільки саме цей параметр безпосередньо впливає на економічну та екологічну результативність.

3.2. Показники енергетичної ефективності систем очищення

Для кількісної оцінки енергетичної ефективності природоохоронних технологій застосовують спеціальні питомі показники, що характеризують витрати енергії на одиницю ефекту очищення або перероблення.

До них належать:

- питоме енергоспоживання систем очищення повітря (E_p): кВт·год/1000 м³ очищеного повітря;
- питоме енергоспоживання установок очищення стічних вод (E_s): кВт·год/м³ очищеної води;
- питоме енергоспоживання процесів утилізації відходів (E_u): кВт·год/т відходів;
- енергетичний коефіцієнт ефективності (η_e):

$$\eta_e = \frac{\text{Рівень очищення}}{\text{Енергетичні витрати}} \quad (7)$$

Наприклад, при використанні електрофільтрів у газоочистці η_e залежить від питомої витрати електроенергії на 1 кг вилученого пилу, тоді як для біофільтраційних систем – від об'єму повітря, що проходить через фільтр при мінімальних енергозатратах.

Підвищення енергетичної ефективності досягається шляхом: оптимізації режимів роботи обладнання, рекуперації тепла та повторного використання енергії, переходу на відновлювані джерела енергії (біогаз, сонячну, геотермальну) та впровадженням систем енергетичного моніторингу (Energy Management Systems, ISO 50001).

3.3. Визначення енергетичного балансу та коефіцієнта корисної дії екотехнологій

Енергетичний баланс технології – це співвідношення між усіма видами спожитої та виробленої енергії у процесі реалізації екологічної системи.

Для природоохоронних технологій важливо визначити, чи компенсується енергетична вартість процесу отриманим екологічним ефектом.

Загальна форма балансу:

$$E_{\text{вх}} = E_{\text{вих}} + E_{\text{втрат}} \quad (8)$$

де $E_{\text{вх}}$ - загальна енергія, що надходить у систему;

$E_{\text{вих}}$ - енергія, яка перетворюється у корисну роботу;

$E_{\text{втрат}}$ - втрати через неідеальність процесу (теплові, механічні, електричні).

Для порівняння різних технологій використовується енергетичний коефіцієнт екологічної ефективності (K_e):

$$K_e = \frac{E_{\text{зконом}}}{E_{\text{спож}}} \quad (9)$$

де $E_{\text{зконом}}$ - зекономлена енергія за рахунок оптимізації процесів або впровадження нових технологій.

Якщо $K_e > 1$, технологія вважається енергетично ефективною, якщо $K_e < 1$ - потребує вдосконалення.

Таким чином, енергетичні критерії дозволяють оцінити реальну ресурсну ефективність природоохоронних технологій, забезпечити баланс між екологічною доцільністю та енергетичною раціональністю, а також є базою для розрахунків економічної ефективності, що розглядатиметься у наступному пункті.

4. Економічні критерії оцінювання

Економічна оцінка ефективності природоохоронних технологій є необхідною складовою прийняття управлінських рішень, оскільки будь-яка екологічна ініціатива потребує фінансових ресурсів.

Економічні критерії дають змогу визначити, наскільки витрати на впровадження природоохоронних заходів є виправданими, яку економічну вигоду або соціально-екологічний ефект вони приносять у довгостроковій перспективі.

Основна мета економічного аналізу полягає у досягненні оптимального співвідношення між витратами та екологічним результатом, тобто пошуку точки рівноваги між екологічною безпекою й економічною рентабельністю.

4.1. Собівартість природоохоронних заходів і термін окупності інвестицій

Першим кроком економічного аналізу є визначення повної собівартості природоохоронного заходу, яка охоплює як капітальні, так і експлуатаційні витрати (ф-ла 10).

$$C = C_{\text{кап}} + C_{\text{експ}} + C_{\text{ен}} + C_{\text{мат}} + C_{\text{пер}} \quad (10)$$

де $C_{\text{кап}}$ - капітальні інвестиції у споруди, обладнання, технології;

$C_{\text{експ}}$ - витрати на експлуатацію систем (обслуговування, персонал);

$C_{\text{ен}}$ - витрати на енергію;

$C_{\text{мат}}$ - витрати на матеріали, реагенти;

$C_{\text{пер}}$ - транспортні та інші допоміжні витрати.

Далі розраховується термін окупності (Т) - період, протягом якого інвестиції повертаються завдяки економії ресурсів або додатковому прибутку:

$$T = \frac{C_{\text{кап}}}{E_{\text{екон}}} \quad (11)$$

де $E_{\text{екон}}$ - річний економічний ефект від впровадження технології.

Чим менше значення Т, тим більш привабливою є технологія з точки зору інвестування.

4.2. Методика оцінки економічної ефективності (NPV, IRR, PI, Payback)

Для детальної оцінки інвестиційної доцільності природоохоронних проектів використовують класичні фінансово-економічні показники:

1. Чиста приведена вартість (Net Present Value, NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t - C_t}{(1+r)^t} \quad (11)$$

де R_t - дохід або економічний ефект у році t ;

C_t - витрати;

r - ставка дисконту.

Якщо $NPV > 0$, проект вважається економічно ефективним.

2. Внутрішня норма прибутковості (Internal Rate of Return, IRR): Це таке значення r , при якому $NPV = 0$. Якщо $IRR > r_e$ (нормативна ставка прибутковості), проект доцільний.

3. Індекс прибутковості (Profitability Index, PI):

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (12)$$

Якщо $PI > 1$, проект прибутковий.

4. Період окупності (Payback Period, PP): Визначається як мінімальний час, за який накопичений дохід дорівнює вкладеним інвестиціям. Застосування цих методів у природоохоронній сфері дозволяє оцінити, наскільки ефективно перетворюються екологічні інвестиції в економічні вигоди.

4.3. Вартісна оцінка екологічного ефекту та соціально-економічних вигід

Окрім фінансової ефективності, природоохоронні технології створюють непрямі економічні та соціальні вигоди, які необхідно враховувати при комплексній оцінці.

До таких вигід належать:

- скорочення витрат на ліквідацію наслідків забруднення;
- зменшення штрафних санкцій за порушення екологічного законодавства;
- покращення стану здоров'я населення та умов праці;
- підвищення вартості земель і об'єктів нерухомості на екологічно чистих територіях;
- створення нових робочих місць у сфері «зеленої» економіки.

Вартісна оцінка екологічного ефекту здійснюється за формулою:

$$E_{\text{екол}} = (Z_{\text{п}} - Z_{\text{ф}}) + E_{\text{дод}} \quad (13)$$

де $Z_{\text{п}}$ - витрати до впровадження технології;

$Z_{\text{ф}}$ - витрати після впровадження;

$E_{\text{дод}}$ - додатковий економічний ефект (прибуток, зменшення збитків, екологічна рента).

Сукупний економічний ефект екотехнології визначається як:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{екол}} + E_{\text{енер}} + E_{\text{соц}} \quad (14)$$

де $E_{\text{енер}}$ - енергетична економія, а $E_{\text{соц}}$ - соціально-економічні вигоди.

Отже, економічні критерії дозволяють оцінити не лише комерційну ефективність природоохоронних рішень, а й їхню суспільну корисність, сприяючи прийняттю зважених рішень у сфері екологічного інвестування.

5. Інтегральні підходи до оцінювання ефективності природоохоронних технологій

Інтегральна оцінка ефективності є найповнішим інструментом аналізу, оскільки поєднує екологічні, енергетичні та економічні критерії в єдину систему. Такий підхід дозволяє здійснити багатокритеріальне порівняння різних технологічних рішень, визначити оптимальний варіант для впровадження й обґрунтувати стратегічні рішення у сфері екологічного менеджменту.

Інтегральні методи є основою для створення цифрових моделей сталого виробництва, оцінки життєвого циклу (LCA) і формування політики «зелених» інвестицій.

5.1. Побудова інтегрального показника ефективності

Інтегральний показник ефективності природоохоронної технології формується шляхом окремих критеріїв (екологічних, енергетичних, економічних), що мають різні одиниці виміру.

Загальна формула інтегрального показника:

$$I_{\text{ІНТ}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot K_i \quad (15)$$

де $I_{\text{ІНТ}}$ - інтегральний показник ефективності;
 w_i - ваговий коефіцієнт важливості i -го критерію;
 K_i - нормоване значення відповідного показника.

Для нормування застосовується лінійна інтерполяція:

$$K_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (16)$$

де X_i - поточне значення показника; X_{\min} , X_{\max} - межі діапазону.

Вагові коефіцієнти w_i визначаються експертним шляхом або методом аналітичної ієрархії (АНР). Чим більше значення $I_{\text{ІНТ}}$ (наближається до 1), тим більш збалансованою та ефективною є технологія.

5.2. Метод експертного оцінювання та вагові коефіцієнти критеріїв

Для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв застосовується експертне оцінювання. Група фахівців (5–15 експертів) аналізує відносну значущість кожного критерію за шкалою від 0 до 1. Отримані оцінки осереднюються, нормуються та використовуються для обчислення інтегрального показника.

Приклад вагових коефіцієнтів:

Критерій	Позначення	Ваговий коефіцієнт (w_i)
Екологічний	w_1	0.45
Енергетичний	w_2	0.30
Економічний	w_3	0.25

Тоді інтегральна оцінка має вигляд:

$$I_{\text{ІНТ}} = 0.45K_{\text{екол}} + 0.30K_{\text{енер}} + 0.25K_{\text{екоп}}$$

Цей підхід забезпечує гнучкість і можливість адаптації системи оцінювання до конкретних умов підприємства або галузі.

5.3. Використання цифрових інструментів для багатокритеріального аналізу

Сучасна практика оцінювання ефективності природоохоронних технологій активно використовує цифрові аналітичні платформи, які поєднують дані моніторингу, математичне моделювання та штучний інтелект.

Основні цифрові інструменти:

- GIS (геоінформаційні системи) – дозволяють просторово аналізувати розміщення джерел забруднення, оцінювати територіальний ефект технологій;
- LCA-платформи (GaBi, SimaPro, OpenLCA) – проводять автоматизований розрахунок впливів життєвого циклу технологій;

- Python-based Eco Tools – відкриті бібліотеки (numpy, pandas, matplotlib, pyLCA) для побудови моделей оцінки ефективності;
- Моделі багатокритеріального аналізу (MCDM, TOPSIS, ANP) – дозволяють інтегрувати різнотипні показники в єдину шкалу прийняття рішень.

Використання таких інструментів дає змогу:

- зменшити суб'єктивність експертних оцінок;
- автоматизувати обробку великих масивів екологічних даних;
- візуалізувати результати оцінки для прийняття стратегічних управлінських рішень.

Висновки до лекції 2

Методи оцінювання ефективності природоохоронних технологій ґрунтуються на поєднанні екологічних, енергетичних і економічних критеріїв, що забезпечує комплексний підхід до аналізу впливу технологій на довкілля.

Інтегральні методи дозволяють перейти від фрагментарного до системного управління екологічною ефективністю, підвищити точність оцінок і створити основу для розробки нових «зелених» технологій.

Контрольні запитання

1. У чому полягає мета оцінювання ефективності природоохоронних технологій?
2. Які основні групи критеріїв застосовують для оцінки ефективності екотехнологій?
3. Як класифікуються методи оцінювання — за якими ознаками здійснюється поділ?
4. Що розуміють під екологічними критеріями оцінки природоохоронних технологій?
5. Які кількісні показники використовуються для оцінювання рівня забруднення довкілля?
6. Як розраховується індекс екологічного ризику (R_e) і що він характеризує?
7. Які показники визначають енергетичну ефективність природоохоронних систем?
8. Як обчислюється енергетичний баланс технологічного процесу?
9. У чому полягає відмінність між енергетичною ефективністю та енергоємністю технології?
10. Які основні фінансово-економічні показники використовують для оцінки інвестиційної доцільності екотехнологій (NPV, IRR, PI, PP)?
11. Як визначити термін окупності природоохоронних заходів і які чинники впливають на нього?
12. У чому полягає сутність вартісної оцінки екологічного ефекту?
13. Як формується інтегральний показник ефективності природоохоронної технології?
14. Яким чином визначаються вагові коефіцієнти критеріїв у процесі експертного оцінювання?

15. Які сучасні цифрові інструменти використовуються для багатокритеріального аналізу ефективності природоохоронних технологій (GIS, LCA, Python-based Tools)?

ТЕМА 2. СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМКИ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

ЛЕКЦІЯ 3. Технології очищення викидів та стічних вод

План лекції

1. Загальні принципи очищення промислових викидів і стічних вод.
 - 1.1 Класифікація забруднювальних речовин за агрегатним станом і хімічною природою.
 - 1.2 Механізми формування викидів і стічних потоків.
 - 1.3 Основні стадії очищення – механічна, фізико-хімічна, біологічна.
2. Технології очищення газових викидів.
 - 2.1 Механічне очищення – пиловловлювачі, циклони, фільтри.
 - 2.2 Абсорбційні, адсорбційні та каталітичні методи.
 - 2.3 Термічне та плазмове знешкодження газових домішок.
3. Технології очищення стічних вод.
 - 3.1 Механічне очищення – відстоювання, фільтрація, флотація.
 - 3.2 Фізико-хімічне очищення – коагуляція, сорбція, іонний обмін, мембранні методи.
 - 3.3 Біологічне очищення – аеротенки, біофільтри, біореактори з активним мулом.
4. Інноваційні методи очищення.
 - 4.1 Наноматеріали та фотокаталітичні технології.
 - 4.2 Використання біосорбентів і мікроорганізмів-деструкторів.
 - 4.3 Енергозберігаючі та замкнуті системи очищення.
5. Контроль ефективності очищення та вторинне використання очищених ресурсів.
 - 5.1. Методи аналітичного контролю якості очищення.
 - 5.2. Використання очищеної води у замкнених циклах.
 - 5.3. Повторне використання уловлених газів і осадів як вторинних ресурсів.

Промислові викиди та стічні води є одним із головних джерел антропогенного навантаження на довкілля. Їхній вплив охоплює атмосферу, гідросферу, ґрунтовий покрив і біосферу загалом. Саме тому розроблення та впровадження ефективних технологій очищення цих потоків є ключовим завданням сучасної екологічної науки та практики природоохоронної діяльності.

У контексті сталого розвитку та європейської інтеграції України технології очищення набувають стратегічного значення. Вони стають частиною глобальної трансформації промисловості — від лінійної моделі «виробництво–споживання–відходи» до циркулярної, де кожен компонент технологічного процесу розглядається як потенційне джерело вторинних ресурсів.

Метою лекції є формування системного уявлення про принципи, методи та технології очищення газових і рідких викидів, визначення основних

напрямів їх удосконалення та енергетичної оптимізації.

1. Загальні принципи очищення промислових викидів і стічних вод

1.1. Класифікація забруднювальних речовин за агрегатним станом і хімічною природою

Забруднювальні речовини, що потрапляють у довкілля з промисловими викидами та стічними водами, класифікують за кількома основними ознаками:

За агрегатним станом:

- газоподібні (оксиди сірки, азоту, вуглецю, леткі органічні сполуки);
- рідкі (нафтопродукти, кислоти, розчини солей, ПАР);
- тверді (пил, зола, суспендовані частинки, осад).

За хімічною природою:

- неорганічні – оксиди, солі важких металів, мінеральні кислоти;
- органічні – спирти, альдегіди, феноли, вуглеводні, ПАР;
- біологічні – мікроорганізми, токсичні метаболіти, патогенні агенти.

За токсичністю:

- речовини I–IV класів небезпеки згідно з ДСТУ 12.1.007:2016.

Для вибору технології очищення важливо враховувати фізико-хімічні властивості речовин (розчинність, леткість, щільність, полярність, стійкість до окиснення), оскільки саме вони визначають доцільність застосування механічних, хімічних чи біологічних методів.

1.2. Механізми формування викидів і стічних потоків

Виникнення промислових викидів і стічних вод пов'язане з особливостями технологічних процесів, де відбуваються:

- хімічні реакції (зокрема, горіння, випаровування, розкладання);
- теплові процеси (сушіння, плавлення, випал, термічна обробка);
- механічне подрібнення або транспортування сировини, що призводить до утворення пилу й аерозолів;
- змивання залишків реагентів і продуктів реакцій з поверхонь апаратури або сировини у стічні води.

Викиди й стічні потоки можуть бути локальними (характерними для певної установки) або дифузними (розсіяними в межах підприємства).

Для їх кількісної оцінки застосовують показники маси забруднення (кг/год, т/рік), концентрації (мг/м³, мг/л) і інтенсивності викиду (г/с).

1.3. Основні стадії очищення — механічна, фізико-хімічна, біологічна

Процес очищення промислових викидів і стічних вод зазвичай має багатоступеневу структуру, яка включає три основні стадії:

- механічне очищення – видалення великих частинок, зависей, піску, жиру. Застосовують решітки, пісколовки, відстійники, фільтри, циклони. Ефективність - 40–70 % при первинному очищенні.
- фізико-хімічне очищення – перетворення розчинених або колоїдних забруднень на осад або газоподібну фазу. Методи: коагуляція, флоатція, сорбція, іонний обмін, нейтралізація, абсорбція. Ефективність - 70–95 % при

комбінованому використанні.

- біологічне очищення – окиснення органічних сполук за участю мікроорганізмів. Використовують біофільтри, біореактори, аеротенки. Ефективність - понад 90 % для органічних забруднень.

Комплексне поєднання цих стадій дозволяє досягти глибокого очищення стічних вод і викидів, яке відповідає нормативам ЄС та ДСТУ 7368:2013.

2. Технології очищення газових викидів

Газоподібні викиди промислових підприємств є основним джерелом забруднення атмосфери. Вони містять пил, аерозолі, токсичні гази, пари органічних речовин, оксиди сірки, азоту, вуглецю, сполуки важких металів, а також канцерогенні леткі органічні сполуки (ЛОС).

Основним завданням систем очищення є зменшення концентрації шкідливих речовин до нормативних меж, визначених відповідно до ДСП 201–97 та Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди.

Залежно від агрегатного стану та фізико-хімічних властивостей забруднювачів, технології очищення поділяються на механічні, фізико-хімічні та термічні методи.

2.1. Механічне очищення – пиловловлювачі, циклони, фільтри

Механічне очищення газових потоків спрямоване на видалення твердих частинок (пилу, золи, аерозолів) з допомогою сил інерції, гравітації або фільтрації.

Це – перший і обов'язковий етап більшості систем очищення.

Основні типи механічних апаратів:

Гравітаційні пиловловлювачі – осаджують частинки за рахунок різниці густини (ефективність 40–60 %, для частинок >50 мкм).

Циклони – використовують відцентрову силу; ефективні для частинок 5–50 мкм. Ефективність залежить від швидкості газового потоку і форми циклону (типові моделі – ЦН-15, СДКЦ).

Рукавні фільтри (тканинні або полімерні) – затримують частинки пилу на поверхні пористого матеріалу. Ефективність – до 99,9 %, застосовується на цементних, металургійних і хімічних підприємствах.

Електрофільтри – діють на принципі електростатичного осадження заряджених частинок на електродах; ефективність – 95–99 % навіть для частинок <1 мкм.

Механічне очищення не змінює хімічного складу газу, але створює умови для подальшого хімічного або термічного знешкодження.

2.2. Абсорбційні, адсорбційні та каталітичні методи

Фізико-хімічні методи очищення застосовують для видалення газоподібних компонентів, які не можуть бути відділені механічно.

Основними є абсорбція, адсорбція та каталітичні процеси.

Абсорбційні методи

Абсорбція – це поглинання газоподібних забруднювачів рідиною

(абсорбентом).

Залежно від механізму розрізняють:

- фізичну абсорбцію (розчинення газу у рідині – наприклад, SO₂ у воді або органічних розчинниках);
- хімічну абсорбцію (реакція газу з абсорбентом – наприклад, нейтралізація HCl лужними розчинами NaOH або Ca(OH)₂).

Приклади апаратів – скрубери, барботажні та плівкові колони.

Переваги: висока ефективність (до 95 %), можливість утилізації уловлених компонентів.

Недоліки: утворення рідких відходів.

Адсорбційні методи

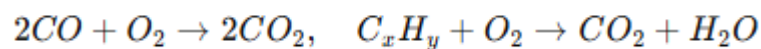
Адсорбція полягає у поглинанні газів твердими пористими матеріалами (адсорбентами) – активованим вугіллям, силікагелем, цеолітом.

Метод ефективний для очищення викидів від органічних парів, летких вуглеводнів, розчинників. Адсорбент регенерується термічно або вакуумним способом. Ефективність – 90–99 %.

Каталітичні методи

Каталітичне очищення застосовують для окиснення або відновлення шкідливих компонентів (наприклад, CO, NO_x, органічних парів) за участю каталізаторів (Pt, Pd, CuO, V₂O₅).

Типові реакції:



Каталітичні процеси широко використовують у транспорті, енергетиці та хімічній промисловості як альтернатива термічному спалюванню, бо вони енергоощадні та не створюють вторинних забруднень.

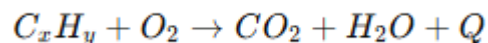
2.3. Термічне та плазмове знешкодження газових домішок

Термічні методи базуються на окисненні шкідливих речовин при високій температурі (700–1200 °C).

Основний принцип – перетворення токсичних газів на нешкідливі продукти: CO₂, H₂O, N₂.

Використовуються у факельних установках, реакторах спалювання летких органічних сполук (ЛОС) та горючих газів.

Типова реакція:



де Q – теплова енергія, яку можна частково рекуперувати для нагріву газів.

Плазмові технології - це високотемпературні процеси (до 4000–6000 °C), де руйнування молекул забруднювачів здійснюється дією електричної плазми.

Переваги:

- повне знешкодження токсичних і стійких органічних сполук (наприклад, діоксинів);
- мінімальне утворення вторинних продуктів;
- можливість енергетичної утилізації.

Недолік – висока енергоємність і складність керування процесом, тому плазмові системи застосовують переважно для локальних викидів з високою

токсичністю (фармацевтика, мікроелектроніка, військова промисловість).

3. Технології очищення стічних вод

Стічні води є одним із наймасовіших джерел забруднення довкілля, оскільки утворюються практично на всіх етапах виробництва – від підготовки сировини до кінцевого продукту. Їхній склад надзвичайно різноманітний і залежить від виду промисловості, технологічного процесу, режиму роботи підприємства та застосовуваних реагентів.

Мета систем очищення – зниження концентрації шкідливих домішок до нормативів скидання у водні об'єкти (відповідно до Водного кодексу України, ДСТУ 7368:2013, Директиви 91/271/ЄЕС).

Ефективна система водоочищення передбачає послідовне застосування кількох етапів: механічного, фізико-хімічного та біологічного очищення, а також, за потреби, стадію доочищення або знезараження.

3.1. Механічне очищення — відстоювання, фільтрація, флоатація

Механічні методи очищення призначені для видалення нерозчинених домішок: зависей, піску, твердих частинок, жиру, плаваючих речовин. Основними апаратами є:

- решітки та сита – для затримання великих фракцій (ефективність 20–30 %);
- пісколовки – видаляють важкі частинки діаметром понад 0,25 мм;
- відстійники – горизонтальні, вертикальні або радіальні; принцип дії – осадження частинок під дією гравітації;
- флоатаційні установки – застосовують для видалення легких домішок (нафти, жиру, ПАР) за допомогою бульбашок повітря.

Механічне очищення зменшує концентрацію завислих речовин у середньому на 40–60 % і підготовлює воду до подальшої обробки фізико-хімічними методами.

3.2. Фізико-хімічне очищення – коагуляція, сорбція, іонний обмін, мембранні методи

Ця група процесів призначена для видалення розчинених, колоїдних і дрібнодисперсних забруднень, які не можна усунути механічно.

Коагуляція та флоатація

У процесі коагуляції до стічної води додають реагенти – коагулянти (солі Al, Fe), які сприяють об'єднанню дрібних частинок у більші флокули, що легко осідають або спливають.

Флоатація може бути електрохімічною (утворення бульбашок на електродах) або пневматичною. Ефективність – 70–95 % для колоїдних і органічних забруднень.

Сорбція

Застосовується для вилучення органічних сполук, барвників, фенолів, нафтопродуктів.

Сорбенти – активоване вугілля, торф, цеоліти, біосорбенти.

Можлива регенерація сорбентів термічними або хімічними методами.

Іонний обмін

Ефективний для вилучення іонів важких металів (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{6+}). Використовуються катіоніти (KU-2, Amberlite IR-120) і аніоніти (АН-31, Dowex 1X8).

Після насичення – смоли регенеруються кислотами або лугами.

Мембранні методи

До них належать ультрафільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос, електродіаліз. Вони забезпечують глибоке очищення до рівня 99 %, дозволяючи видаляти не лише органічні речовини, а й віруси та бактерії.

Мембранні системи використовують у харчовій, фармацевтичній, енергетичній галузях.

3.3. Біологічне очищення – аеротенки, біофільтри, біореактори з активним мулом

Біологічне очищення ґрунтується на здатності мікроорганізмів розкласти органічні речовини до простих сполук – CO_2 , H_2O , NO_3^- . Воно є ключовою стадією для видалення біогенних елементів (азоту, фосфору) та органічних забруднень.

Аеротенки

У цих апаратах суміш стічної води й активного мулу насичується киснем. Мікроорганізми (бактерії, грибки, найпростіші) окиснюють органіку, формуючи пластівці мулу, які потім відокремлюються у вторинних відстійниках. Ефективність – до 95 % за БСК₅, 90 % за зваженими речовинами.

Біофільтри

Полягають у пропусканні води через шар інертного завантаження (щєбінь, пластик, кераміка), на поверхні якого розвивається біоплівка. Вона здійснює біохімічне окиснення органічних речовин.

Переваги – простота, стабільність, можливість роботи при змінних навантаженнях.

Біореактори з фіксованою або рухомою біоплівкою

Сучасні системи MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) поєднують переваги біофільтрів і аеротенків. Використовують полімерні носії з великою питомою поверхнею. Ефективність – до 98 %, при цьому зменшується об'єм споруд і витрати енергії.

Біологічні методи є екологічно безпечними та економічно доцільними, проте потребують підтримання стабільних умов (температури, аерації, рН) для життєдіяльності біоценозу.

4. Інноваційні методи очищення

Сучасний етап розвитку технологій захисту довкілля характеризується переходом від традиційних реакторно-фільтраційних систем до інтелектуальних, енергозберігаючих і саморегулювальних технологій очищення.

Інноваційні рішення спрямовані на досягнення максимальної екологічної ефективності при мінімальних енергетичних і матеріальних затратах, а також на утилізацію вторинних ресурсів у рамках циркулярної

економіки.

До провідних напрямів належать нанотехнології, фотокаталітичні процеси, біотехнологічні підходи та створення замкнених систем очищення з мінімальними втратами.

4.1. Наноматеріали та фотокаталітичні технології

Використання наноматеріалів є одним із найперспективніших напрямів сучасного очищення газових і рідких середовищ.

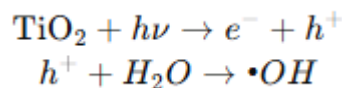
Наночастинки мають високу питому поверхню, каталітичну активність і сорбційну здатність, що дозволяє ефективно вилучати навіть сліди токсичних речовин.

Типові наноматеріали, що застосовуються:

- TiO_2 (діоксид титану) – основний фотокаталізатор;
- ZnO , Fe_2O_3 , CuO – використовуються у гетерогенних каталітичних системах;
- нанокompозити на основі графену або вуглецевих нанотрубок – мають високу електропровідність і стабільність.

Фотокаталітичне очищення

Базується на збудженні напівпровідникових каталізаторів ультрафіолетовим або видимим світлом, у результаті чого утворюються активні радикали ($\bullet\text{OH}$, O_2^-), що окиснюють органічні забруднювачі:



Фотокаталітичні реактори використовують для знезараження води, руйнування органічних барвників, фенолів, ЛОС. Переваги – відсутність вторинних відходів, низька енергоємність, можливість сонячного живлення.

4.2. Використання біосорбентів і мікроорганізмів-деструкторів

Біотехнологічні методи очищення поєднують високу ефективність і природну здатність живих організмів до деструкції поллютантів.

Основні напрями — біосорбція та біодеструкція.

Біосорбція

Це процес поглинання забруднень природними або модифікованими біоматеріалами – торфом, мохами, бактеріальними клітинами, грибами. Такі сорбенти мають функціональні групи ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$), здатні зв'язувати іони важких металів і органічні речовини. Приклад – використання грибів *Aspergillus niger* для вилучення Cu^{2+} і Ni^{2+} із водних розчинів.

Мікроорганізми-деструктори

Це бактерії, які здатні розкладати складні органічні сполуки:

- *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Bacillus*, *Nitrosomonas* – для очищення від нафтопродуктів і фенолів;
- *Thiobacillus ferrooxidans* – для біоокиснення сірковмісних сполук;
- *Alcanivorax borkumensis* – спеціалізований штам для біоремедіації морських розливів нафти.

Умови ефективної роботи – температура 20–35 °С, рН 6,5–8, наявність поживних речовин і кисню. Переваги – низька собівартість, природність процесу, можливість самоочищення системи.

4.3. Енергозберігаючі та замкнуті системи очищення

Інноваційні технології все частіше проектуються як замкнуті екосистеми, у яких очищення поєднується з повторним використанням енергії та ресурсів. Такі системи реалізують принцип «Zero Emission» – нульових викидів.

Основні напрямки розвитку:

- мембранні біореактори (MBR) – поєднують біологічне очищення та ультрафільтрацію, забезпечують повну утилізацію води;
- системи рекуперації тепла з димових газів або стічних вод – підвищують енергоефективність на 15–30 %;
- електрохімічне очищення (ЕО, ECF) – використовує електричний струм для окиснення забруднень без реагентів;
- аеробно-анаеробні каскади – дозволяють одночасно виробляти біогаз і очищати стічні води.

Приклади замкнених систем:

- водооборотні цикли на металургійних і машинобудівних заводах (повторне використання до 95 % води);
- очистка й утилізація CO₂ для виробництва метанолу або біопалива (Power-to-Methanol).
- використання осаду стічних вод для виробництва біогазу або компосту.

Інноваційні технології орієнтовані на мінімізацію енергоспоживання, створення «зелених» виробництв і досягнення вуглецевої нейтральності.

5. Контроль ефективності очищення та вторинне використання очищених ресурсів

Контроль ефективності технологій очищення є важливою складовою системи екологічного менеджменту підприємства. Він забезпечує відповідність роботи очисних споруд екологічним нормативам, дозволяє оперативно виявляти збої у процесах очищення та визначати потенціал повторного використання очищених середовищ і відходів.

У сучасних умовах контроль дедалі частіше здійснюється за допомогою автоматизованих систем моніторингу (АСМ), що інтегруються з цифровими платформами екологічного управління.

5.1. Методи аналітичного контролю якості очищення

Аналітичний контроль здійснюється на всіх етапах очищення – на вході, після кожної стадії та на виході системи.

Основні показники контролю визначаються для кожного типу середовища:

Для газових викидів:

концентрації пилу, SO₂, NO_x, CO, CO₂, летких органічних сполук (ЛОС), температури, вологості, швидкості потоку; використовуються газоаналізатори, спектрометри, оптичні детектори розсіювання.

Для стічних вод:

показники зважених речовин, БСК₅, ХСК, вміст нафтопродуктів, фенолів, іонів важких металів, азоту та фосфору;
методи – фотометрія, титриметрія, потенціометрія, хроматографія, ІЧ-спектроскопія.

Для біологічного очищення:

визначають активність мулу, концентрацію розчиненого кисню, мікробіологічний склад біоценозу.

Ключові аналітичні показники ефективності:

$$\eta = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%$$

де η – ефективність очищення, %;

C_0 – концентрація забруднення до очищення;

C_1 – після очищення.

Для високоефективних систем цей показник має бути не менше 90–95 %, а для токсичних речовин – понад 99 %.

5.2. Використання очищеної води у замкнених циклах

Сучасна концепція раціонального природокористування передбачає повторне використання очищених стічних вод у виробничих процесах, що дозволяє суттєво знизити споживання природних ресурсів.

Такі системи називаються оборотними або замкненими водооборотними циклами.

Типові напрями повторного використання:

- технологічне охолодження обладнання;
- промивання сировини або устаткування;
- приготування технологічних розчинів;
- полив зелених зон на території підприємства.

Для замкнених систем важливо забезпечити стабільну якість води – контроль рН, електропровідності, вмісту солей і зависей.

У ряді випадків застосовується доочищення за допомогою зворотного осмосу або ультрафільтрації.

На сучасних промислових підприємствах України коефіцієнт повторного використання води вже досягає 70–95 %, що відповідає принципам циркулярної економіки.

5.3. Повторне використання уловлених газів і осадів як вторинних ресурсів

Очищення промислових викидів і стічних вод супроводжується утворенням осадів, шламів, уловлених газів і пилу, які можуть розглядатися не як відходи, а як цінні вторинні ресурси.

Приклади вторинного використання:

- уловлений пил металургійного виробництва – джерело цинку, міді, заліза (повертається у доменний процес).
- осади стічних вод целюлозно-паперової промисловості – використовуються для виробництва компостів і біогазу.

- діоксид вуглецю з газових викидів – сировина для синтезу метанолу або карбонатів.
- зола ТЕС – компонент для виготовлення цементу та будівельних сумішей.

Технологічний принцип:

$$R = \frac{M_{пов}}{M_{заг}} \times 100\%$$

де R – ступінь утилізації відходів, %;

$M_{пов}$ – маса повторно використаних речовин;

$M_{заг}$ – загальна маса утворених відходів.

Застосування таких підходів знижує навантаження на полігони, скорочує витрати на утилізацію та сприяє формуванню замкнених ресурсних циклів виробництва.

Висновок до Лекції 3

Технології очищення викидів і стічних вод є фундаментом сучасної системи екологічної безпеки. Вони забезпечують не лише зменшення шкідливих впливів на довкілля, а й створюють умови для раціонального використання ресурсів, енергозбереження та переходу до безвідходних технологій.

У лекції розглянуто класифікацію та принципи очищення, сучасні методи видалення забруднень із газових і рідких потоків, а також інноваційні рішення – нанотехнології, біосорбцію, мембранні й фотокаталітичні системи. Особлива увага приділена контролю ефективності очищення та можливостям вторинного використання очищених середовищ і осадів у рамках циркулярної економіки.

Таким чином, сучасні технології очищення є ключовим елементом сталого промислового розвитку, інтегрованим у глобальні екологічні стратегії та науково-технічний прогрес.

Контрольні запитання

1. Які основні групи забруднювальних речовин виділяють у складі промислових викидів і стічних вод, та як вони класифікуються за агрегатним станом?
2. Які основні механізми формування промислових викидів і стічних потоків у технологічних процесах?
3. У чому полягають відмінності між механічним, фізико-хімічним і біологічним очищенням стічних вод?
4. Які принципи дії циклонів, рукавних фільтрів і електрофільтрів при очищенні газових викидів?
5. У чому різниця між абсорбційними, адсорбційними та каталітичними методами очищення газів?
6. Які хімічні реакції лежать в основі каталітичного окиснення оксиду вуглецю (СО) та вуглеводнів?
7. Поясніть принцип дії термічного та плазмового знешкодження газових домішок. У яких випадках ці методи доцільно застосовувати?

8. Які основні методи механічного очищення стічних вод і які показники їхньої ефективності?
9. Як діють процеси коагуляції, сорбції, іонного обміну та мембранного очищення у фізико-хімічних методах?
10. Які мікроорганізми використовуються у процесах біологічного очищення води, і які фактори впливають на їхню активність?
11. Які переваги наноматеріалів у процесах фотокаталітичного очищення? Як діє TiO_2 як фотокаталізатор?
12. Що таке біосорбція і які природні матеріали можуть бути використані як біосорбенти для вилучення важких металів?
13. У чому полягають переваги замкнених систем очищення (“Zero Emission”) та як вони реалізуються на сучасних підприємствах?
14. Які основні показники визначають ефективність очищення газових і рідких середовищ? Як обчислюється коефіцієнт очищення?
15. Які шляхи вторинного використання уловлених газів, осадів і побічних продуктів очищення ви знаєте, і як це сприяє розвитку циркулярної економіки?

ЛЕКЦІЯ 4. Біотехнологічні та цифрові рішення у сфері захисту довкілля

План лекції

1. Сутність та роль біотехнологій у системі екологічної безпеки.
 - 1.1. Поняття екобіотехнологій та їх класифікація.
 - 1.2. Природні механізми самоочищення біосфери як основа біотехнологічних процесів.
 - 1.3. Сфери застосування біотехнологій у захисті довкілля.
2. Мікробіологічні технології очищення середовищ.
 - 2.1. Біоремедіація ґрунтів і водних екосистем.
 - 2.2. Біодеградація нафтопродуктів, пестицидів, органічних забруднень.
 - 2.3. Використання генетично модифікованих мікроорганізмів (ГМО) у біоочищенні.
3. Біоінженерні системи перероблення відходів і виробництва енергії.
 - 3.1. Анаеробне зброджування та виробництво біогазу.
 - 3.2. Біоконверсія органічних відходів у добрива, компости, біопалива.
 - 3.3. Замкнені біоенергетичні цикли та концепція “Waste-to-Energy”.
4. Цифрові технології моніторингу та управління станом довкілля.
 - 4.1. Сенсорні системи та Інтернет речей (IoT) у контролі забруднення.
 - 4.2. Використання штучного інтелекту, великих даних (Big Data) та супутникових технологій у моделюванні екосистем.
 - 4.3. Цифрові платформи екологічного управління та GIS-рішення для підтримки прийняття рішень.
5. Інтеграція біотехнологічних та цифрових підходів у сучасні системи захисту довкілля.
 - 5.1. Концепція “Smart Eco-Systems” – інтелектуальні екологічні технології.
 - 5.2. Приклади біоцифрових рішень у промисловості, енергетиці, агросекторі.
 - 5.3. Перспективи розвитку біоцифрової екології в контексті Цілей сталого розвитку (SDGs).

1. Сутність та роль біотехнологій у системі екологічної безпеки

Біотехнології відіграють ключову роль у сучасній системі екологічної безпеки, оскільки вони дозволяють використовувати потенціал живих організмів для знешкодження, перероблення та утилізації забруднень у довкіллі.

На відміну від традиційних фізико-хімічних технологій, біотехнологічні процеси є екологічно дружніми, енергоефективними та здатними до саморегуляції, що робить їх пріоритетним напрямом сталого розвитку.

Завдяки досягненням мікробіології, генної інженерії та системного аналізу сьогодні формується нова галузь – екобіотехнологія, яка поєднує природні механізми самоочищення з цифровими інструментами моніторингу та управління екосистемами.

1.1. Поняття екобіотехнологій та їх класифікація

Екобіотехнологія – це галузь науки і практики, що досліджує та впроваджує методи використання мікроорганізмів, клітин, ферментів та біополімерів для захисту довкілля, відновлення природних систем і перероблення відходів.

За напрямками застосування виділяють такі основні групи:

- біоремедіаційні технології – очищення ґрунтів, води, повітря від токсичних речовин.
- біодеструктивні технології – розкладання органічних забруднень (нафта, пестициди, полімери).
- біоконверсійні технології – перетворення відходів у біопаливо, біогаз або добрива.
- біоіндикаційні та біомоніторингові системи – контроль стану довкілля за допомогою біосенсорів і живих організмів.
- Генетично інженерні екотехнології – створення штамів-деструкторів і біокаталізаторів із підвищеною ефективністю.

Екобіотехнології можуть бути природними, коли використовуються природні мікроорганізми, або штучно створеними, що базуються на модифікованих біосистемах.

1.2. Природні механізми самоочищення біосфери як основа біотехнологічних процесів

Біотехнологічні методи мають своїм науковим підґрунтям природні механізми самоочищення, які відбуваються в біосфері протягом мільйонів років.

Ці процеси базуються на діяльності мікроорганізмів, що розкладають органічні сполуки та перетворюють їх на нетоксичні продукти.

Основні механізми самоочищення:

- біохімічне окиснення органічних речовин до CO_2 і H_2O ;
- нітрифікація та денітрифікація – перетворення азотних сполук;
- фотосинтез – поглинання CO_2 і вироблення кисню;
- седиментація та біoadсорбція – осадження частинок мікроорганізмами;
- компостування – аеробне розкладання органіки ґрунтовими бактеріями.

Таким чином, біотехнологічні системи – це інтенсифіковані моделі природних процесів, адаптовані до умов промислового використання.

1.3. Сфери застосування біотехнологій у захисті довкілля

Біотехнології знаходять широке застосування в різних секторах природоохоронної діяльності:

- очищення води та стічних потоків – використання біофільтрів, аеротенків, мембранних біореакторів, бактеріальних консорціумів для знешкодження органічних забруднень.
- очищення ґрунтів і підземних вод (біоремедіація) – застосування бактерій і грибів-деструкторів для деградації вуглеводнів, фенолів, пестицидів.
- оброблення відходів – анаеробне зброджування органіки з утворенням біогазу, біокомпостування, біоліз пластмас.

- моніторинг довкілля – створення біосенсорів, здатних визначати концентрації токсикантів у реальному часі.
- біоенергетика – отримання енергії з відходів і біомаси, зменшення викидів CO₂.

Біотехнологічні рішення активно впроваджуються у водоочисній, харчовій, аграрній, нафтохімічній, медичній та енергетичній галузях, забезпечуючи перехід до екологічно безпечних виробництв.

2. Мікробіологічні технології очищення середовищ

Мікробіологічні технології є одним із найефективніших інструментів у сфері біотехнологічного захисту довкілля. Вони базуються на здатності мікроорганізмів використовувати токсичні або органічні речовини як джерело живлення, перетворюючи їх на нешкідливі продукти. Ці процеси дозволяють очищати воду, ґрунт, атмосферу без застосування агресивних хімічних реагентів і без утворення вторинного забруднення.

2.1. Біоремедіація ґрунтів і водних екосистем

Біоремедіація – це комплекс заходів, спрямованих на відновлення екологічних властивостей забруднених середовищ шляхом використання мікроорганізмів, грибів або рослин. Основні типи біоремедіації:

- In situ – очищення безпосередньо на місці забруднення (наприклад, біовентиляція, біостимуляція, біопідживлення).
- Ex situ – очищення після вилучення забрудненого середовища (біореактори, біополя, компостування).

Ключові механізми біоремедіації:

- біодеградація – руйнування складних органічних сполук до простих;
- біотрансформація – часткова зміна структури токсиканта з утворенням менш небезпечних сполук;
- біоаккумуляція – накопичення забруднювачів у клітинах мікроорганізмів;
- фітобіоремедіація – очищення з використанням рослин, що поглинають або розкладають забруднювачі.

Приклади застосування:

- очищення ґрунтів після розливів нафти за допомогою родів *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Bacillus*;
- очищення водойм від фенолів, нітратів і фосфатів за участю *Nitrosomonas* і *Nitrobacter*;
- рекультивация полігонів ТПВ шляхом введення мікробних консорціумів для прискорення деградації полімерів.

Ефективність біоремедіації може досягати 80–95 %, особливо при підтриманні оптимальної температури, вологості та аерації.

2.2. Біодеградація нафтопродуктів, пестицидів, органічних забруднень

Біодеградація – це процес розщеплення складних органічних сполук мікроорганізмами до простих продуктів, таких як CO₂, H₂O, NH₃, CH₄.

Основні групи забруднень, що піддаються біодеградації:

- нафтопродукти – алкани, ароматичні вуглеводні, поліциклічні сполуки;
- пестициди – хлорорганічні, фосфорорганічні, карбаматні;
- органічні кислоти, спирти, феноли, формальдегіди, полімери.

Біохімічні етапи деградації:

- первинне окиснення забруднювачів ферментами оксидазами й пероксидазами;
- розщеплення вуглецевих ланцюгів до коротших фрагментів;
- мінералізація до простих неорганічних речовин.

У процесі беруть участь мікроорганізми:

- *Alcanivorax borkumensis*, *Pseudomonas putida*, *Candida tropicalis* – руйнують вуглеводні нафти;
- *Phanerochaete chrysosporium* (білий гнильний гриб) – розкладає пестициди та полімери;
- *Mycobacterium sp.* – ефективно деструктує феноли й анілінові сполуки.

Застосування біодеградаційних технологій дозволяє відновити екосистеми після аварій, техногенних катастроф або довготривалого антропогенного навантаження.

2.3. Використання генетично модифікованих мікроорганізмів (ГМО) у біоочищенні

Використання генетично модифікованих мікроорганізмів (ГМО) є передовим напрямом сучасної екобіотехнології.

Метою їх створення є підвищення здатності до деградації токсичних речовин, адаптації до екстремальних умов середовища та стійкості до важких металів.

Основні напрями генної модифікації:

1. Введення генів, що кодують ферменти деструкції ароматичних сполук (наприклад, ген *nah* для деградації нафталену).

2. Створення мультифункціональних штамів із комбінованими властивостями (наприклад, *Pseudomonas fluorescens* із генами металорезистентності).

3. Інженерія метаболічних шляхів для посилення швидкості біодеградації.

Переваги:

- збільшення швидкості очищення у 2–3 рази;
- можливість обробки токсичних і стійких сполук (ПХБ, діоксини, бензапірен);
- стабільність роботи при низьких температурах або високих концентраціях забруднень.

Потенційні ризики:

- неконтрольоване розповсюдження ГМО в природі;
- вплив на природні мікробні спільноти;
- необхідність створення регульованих біореакторних умов.

Саме тому використання ГМО у біоочищенні супроводжується екологічним моніторингом і правовим контролем згідно з Конвенцією про біобезпеку (Картахенський протокол, 2000 р.).

3. Біоінженерні системи перероблення відходів і виробництва енергії

Сучасна концепція сталого розвитку вимагає переходу від традиційних технологій утилізації відходів до ресурсоефективних систем, у яких побічні продукти стають джерелом енергії та вторинних ресурсів.

Біоінженерні технології поєднують біологічні процеси з інженерними рішеннями, забезпечуючи перетворення органічних речовин у біогаз, біопаливо або добрива. Вони ґрунтуються на керованому використанні мікроорганізмів, ферментів та біореакторних систем, що дозволяє оптимізувати процеси ферментації, зброджування й біоконверсії.

3.1. Анаеробне зброджування та виробництво біогазу

Анаеробне зброджування (метанове бродіння) – це біотехнологічний процес перетворення органічних відходів у біогаз (суміш метану CH_4 і діоксиду вуглецю CO_2) за участю мікроорганізмів, які живуть без доступу кисню.

Основні етапи процесу:

1. Гідроліз – розщеплення полімерів (целюлози, білків, жирів) на прості сполуки.
2. Ацидогенез – утворення органічних кислот, спиртів, водню.
3. Ацетогенез – перетворення проміжних продуктів у оцтову кислоту, CO_2 та H_2 .
4. Метаногенез – утворення метану метаноутворювальними бактеріями (*Methanobacterium*, *Methanoseta*).

Основні типи сировини:

- харчові, сільськогосподарські та комунальні відходи;
- гній, мул стічних вод, осади очисних споруд;
- відходи біомаси лісової та харчової промисловості.

Типовий склад біогазу: CH_4 - 50–70 %; CO_2 - 30–45 %; H_2S , NH_3 , H_2 <1%.

Енергетичний потенціал: 1 м³ біогазу \approx 5,5–6,0 кВт·год енергії. Застосовується для генерації електроенергії, опалення, транспорту (після очищення до біометану).

Формула розрахунку виходу біогазу:

$$V_{BG} = \alpha \cdot m_{ORG}$$

де V_{BG} - об'єм біогазу, м³;

α - коефіцієнт газоутворення (0,35–0,6 м³/кг сухої речовини);

m_{ORG} - маса органічної речовини, кг.

Анаеробні біореактори можуть бути мезофільними (35–37 °С) або термофільними (55–57 °С). Термофільний режим забезпечує швидшу конверсію, але потребує більшої енергії.

3.2. Біоконверсія органічних відходів у добрива, компости, біопалива

Біоконверсія – це процес керованого перетворення органічної маси в корисні продукти за допомогою мікроорганізмів, грибів або ферментів.

Основні напрями біоконверсії:

1. Компостування – аеробне розкладання органічних відходів для одержання добрив.

- Сировина: побутові відходи, листя, харчові рештки, осади стічних вод.

- Тривалість: 20–40 діб у біореакторах або буртах.

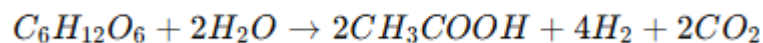
- Оптимальні умови: вологість 50–60 %, температура 50–60 °С, pH ≈ 7.

- Ефективність зниження маси відходів — до 40 %.

2. Ферментативна гідролізація – отримання цукрів із целюлозних відходів, які далі можуть бути перетворені на біоетанол або біобутанол.

3. Мікробна ферментація – синтез біополімерів (PHA, PLA) або органічних кислот, які замінюють нафтохімічні продукти.

4. Біогідроген – отримання водню за участю фотосинтезуючих бактерій (*Rhodobacter*, *Clostridium*).



Біоконверсійні технології дають змогу поєднати екологічне очищення із виробництвом відновлюваної енергії, що робить їх важливим елементом біоекономіки.

3.3. Закриті біоенергетичні цикли та концепція “Waste-to-Energy”

Концепція “Waste-to-Energy (WtE)” означає перетворення відходів на енергію шляхом біологічних або термохімічних процесів.

Біоінженерні системи WtE інтегрують анаеробне зброджування, газифікацію, піроліз, ферментацію для створення закритих циклів виробництва енергії.

Основні елементи закритого біоенергетичного циклу:

1. Збір і сортування органічних відходів.

2. Біоконверсія (анаеробне зброджування, ферментація).

3. Використання біогазу або біопалива для генерації енергії.

4. Повернення залишкових продуктів (дигестату, попелу) у ґрунт як добрив.

Таким чином, досягається циклічність матеріальних і енергетичних потоків, мінімізується обсяг відходів, що підлягають захороненню.

Економічні переваги:

- зниження витрат на утилізацію;

- скорочення викидів метану на полігонах;

- виробництво “зеленої” енергії, що відповідає вимогам Директиви ЄС 2009/28/ЄС.

Формула енергетичного балансу біоенергетичного циклу:

$$E_{net} = E_{prod} - E_{cons}$$

де E_{net} - чиста енергія, отримана з процесу;

E_{prod} - енергія, вироблена біосистемою;

E_{cons} - енергія, витрачена на обробку та підтримання процесів.

Якщо $E_{net} > 0$, система вважається енергетично ефективною.

4. Цифрові технології моніторингу та управління станом довкілля

Розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для екологічної науки й практики. Інструменти збору, аналізу та візуалізації даних дозволяють забезпечити оперативний, точний і прогностичний контроль стану природного середовища. Поєднання біотехнологічних процесів із цифровими системами формує основу нової парадигми – інтелектуального управління довкіллям (Smart Environmental Management).

4.1. Сенсорні системи та Інтернет речей (IoT) у контролі забруднення

Інтернет речей (IoT) – це мережа взаємопов'язаних пристроїв, здатних збирати та передавати дані в реальному часі. У сфері екології такі пристрої виконують функції сенсорів моніторингу параметрів повітря, води, ґрунту, шуму, радіаційного фону, вібрацій тощо.

Основні типи екологічних сенсорів:

- газоаналізатори (визначають концентрації CO_2 , CO , NO_x , SO_2 , O_3 , ЛОС);
- волого- та термосенсори для вимірювання мікрокліматичних параметрів;
- фотометричні сенсори для контролю мутності й кольоровості води;
- біосенсори – пристрої, що використовують біологічні елементи (ензими, клітини, антитіла) для виявлення токсичних речовин.

Приклад реалізації:

- міські системи “Smart Air Quality”, які передають дані з датчиків якості повітря у хмарні сервіси;
- автоматизовані станції моніторингу річок, що контролюють рН, розчинений кисень, ХСК і температуру;
- агроекологічні мережі IoT для контролю вологості ґрунтів і внесення добрив.

Такі системи інтегруються з аналітичними платформами (наприклад, ThingSpeak, Google Cloud IoT, Microsoft Azure IoT Hub) для обробки великих масивів екологічних даних.

4.2. Використання штучного інтелекту, великих даних (Big Data) та супутникових технологій у моделюванні екосистем

Сучасна екологічна аналітика дедалі більше базується на технологіях Big Data та штучного інтелекту (AI). Ці інструменти дозволяють виявляти закономірності, прогнозувати зміни стану довкілля та моделювати сценарії розвитку екосистем.

Основні напрямки застосування:

1. Моделювання забруднення атмосфери.

Алгоритми машинного навчання прогнозують концентрації CO_2 , NO_x , твердих частинок (PM_{2.5}) на основі метеорологічних і транспортних даних.

2. Оцінка якості води.

Нейронні мережі аналізують комплексні показники (ХСК, БСК₅, рН, ТSS) і прогнозують періоди евтрофікації або цвітіння води.

3. Земельний моніторинг.

Використання супутникових систем *Sentinel*, *Landsat*, *WorldView* для оцінки деградації ґрунтів, зміни рослинного покриву, вирубок лісів.

4. Система раннього попередження про надзвичайні ситуації.

AI-сервіси прогнозують ризики пожеж, підтоплень або промислових аварій.

Приклад формули прогнозованої моделі (спрощено):

$$Y_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_{i,t} + \epsilon_t$$

де Y_t - прогнозований екологічний показник (наприклад, концентрація CO₂);

$X_{i,t}$ - вхідні фактори (температура, швидкість вітру, промислове навантаження);

β_i - вагові коефіцієнти моделі;

ϵ_t - випадкова похибка.

Технології AI та Big Data забезпечують можливість створення цифрових двійників екосистем (Digital Twins) – комп'ютерних моделей, які відтворюють екологічні процеси у реальному часі.

4.3. Цифрові платформи екологічного управління та GIS-рішення

Цифрові платформи управління довкіллям інтегрують дані з різних джерел (сенсорів, супутників, лабораторій, підприємств) і забезпечують прийняття рішень у системі Environmental Decision Support System (EDSS).

Основні функції цифрових екоплатформ:

- збір і зберігання великих обсягів даних (Data Warehouse);
- геоінформаційна візуалізація (GIS-карти);
- оцінка екологічних ризиків і формування звітності;
- підтримка екологічних аудитів і сертифікацій (ISO 14001, EMAS).

Приклади застосування:

- EcoCity Dashboard – моніторинг міських показників (повітря, шум, освітленість);
- NASA Earthdata – доступ до супутникових даних для моделювання клімату;
- ArcGIS Environment – побудова екологічних карт забруднення й прогнозування ризиків.

Переваги цифрових платформ:

- оперативність і прозорість управління;
- доступність даних для громадськості;
- автоматизоване формування звітів для державних структур;
- інтеграція з національними системами моніторингу довкілля.

5. Інтеграція біотехнологічних та цифрових підходів у сучасні системи захисту довкілля

Сучасна екологічна політика й наука поступово переходять від фрагментарних технологічних рішень до інтегрованих біоцифрових систем, у яких поєднуються переваги біотехнологій (ефективність, природовідповідність, енергозбереження) з можливостями цифрових інструментів (моніторинг, аналітика, прогнозування). Таке поєднання утворює нову парадигму управління довкіллям – “Smart Eco-Systems”, де екологічні процеси контролюються й оптимізуються в реальному часі.

5.1. Концепція “Smart Eco-Systems” — інтелектуальні екологічні технології

“Smart Eco-Systems” – це екологічно орієнтовані системи, які здатні самостійно збирати, аналізувати й адаптуватися до змін у навколишньому середовищі завдяки взаємодії біологічних і цифрових компонентів.

Основні принципи:

1. Сенсоризація процесів – оснащення біотехнологічних установок (біореакторів, біофільтрів) датчиками для контролю параметрів у реальному часі.

2. Автоматичне управління – використання алгоритмів машинного навчання для регулювання подачі субстратів, температури, рН, вологості тощо.

3. Зворотний зв’язок і адаптація – система саморегулюється відповідно до екологічних умов, забезпечуючи стабільну ефективність.

4. Енергетична оптимізація – мінімізація витрат за рахунок розумного керування енергоспоживанням.

Приклади:

- біореактори для очищення стічних вод, які автоматично змінюють режим аерації залежно від рівня кисню;
- “розумні” полігони ТПВ, оснащені сенсорами для контролю виділення метану й температури компостування;
- агроєкосистеми з інтегрованими біосенсорами, які регулюють подачу біодобрив і вологи.

5.2. Приклади біоцифрових рішень у промисловості, енергетиці та агросекторі

Інтеграція біологічних і цифрових технологій активно впроваджується у різних галузях:

1. Промисловість:

- автоматизовані системи очищення газових викидів із біофільтрами, керованими IoT-платформами;
- цифрові моделі біореакторів, що оптимізують виробництво біогазу.

2. Енергетика:

- “розумні” біоенергетичні комплекси, які об’єднують сенсорний моніторинг із системами управління енергообігом;

- цифрові двійники біогазових установок для прогнозування продуктивності.

3. Агросектор:

- використання біопрепаратів і цифрових систем точного землеробства для контролю стану ґрунтів і внесення біодобрих;
- інтегровані модулі моніторингу вологості, біомаси й мікробіологічної активності ґрунту.

Такі рішення знижують антропогенне навантаження, підвищують ефективність використання ресурсів і сприяють переходу до кліматично нейтральної економіки.

5.3. Перспективи розвитку біоцифрової екології в контексті Цілей сталого розвитку (SDGs)

Біоцифрова екологія є важливим напрямом реалізації Цілей сталого розвитку ООН (Agenda 2030), зокрема:

- Ціль 6: чиста вода та санітарія – впровадження біореакторних систем і цифрового моніторингу водних ресурсів;
- Ціль 7: доступна та чиста енергія – розвиток біоенергетики на основі відходів;
- Ціль 11: сталий розвиток міст – “розумні міста” з інтегрованими сенсорними мережами;
- Ціль 12: відповідальне споживання та виробництво – циркулярна економіка, перероблення відходів;
- Ціль 13: боротьба зі зміною клімату – зменшення викидів парникових газів через біотехнологічні рішення.

Таким чином у найближчі десятиліття можна очікувати злиття біологічних наук, цифрових технологій і штучного інтелекту в єдину систему управління природними процесами – “екоменеджмент”.

Висновок до Лекції 4

Біотехнологічні та цифрові рішення формують основу нової екологічної парадигми – керованих, адаптивних і стійких систем захисту довкілля.

Якщо біотехнології відтворюють природні механізми очищення та відновлення, то цифрові інструменти дозволяють точно контролювати, прогнозувати й оптимізувати ці процеси.

Інтеграція двох підходів забезпечує: зменшення антропогенного навантаження, раціональне використання ресурсів, підвищення енергоефективності, та створення “розумних” екосистем, що самостійно підтримують екологічну рівновагу.

Таким чином, біоцифрові екотехнології – це не лише науковий тренд, а реальний інструмент сталого розвитку та формування вуглецево-нейтрального майбутнього.

Контрольні запитання

1. Що таке екобіотехнологія, і які основні напрями її застосування у сфері захисту довкілля?

2. Які природні механізми самоочищення біосфери лежать в основі біотехнологічних процесів?
3. Назвіть основні сфери практичного використання біотехнологій у промисловості та природоохоронній діяльності.
4. У чому полягає сутність біоремедіації, та які її основні типи (in situ, ex situ)?
5. Які біохімічні процеси забезпечують біодеградацію нафтопродуктів і пестицидів?
6. Які переваги та ризики пов'язані з використанням генетично модифікованих мікроорганізмів (ГМО) у біоочищенні?
7. Які етапи включає анаеробне зброджування та який хімічний склад має біогаз?
8. У чому полягає процес біоконверсії органічних відходів і які продукти можуть бути отримані в результаті?
9. Що означає концепція “Waste-to-Energy”, і як вона реалізується в біоенергетичних циклах?
10. Які типи сенсорів використовуються у системах моніторингу довкілля в рамках технології Інтернету речей (IoT)?
11. Як застосування штучного інтелекту та технологій Big Data сприяє моделюванню стану екосистем?
12. Які функції виконують цифрові платформи екологічного управління та GIS-системи?
13. У чому полягає концепція “Smart Eco-Systems” і які її ключові технологічні компоненти?
14. Наведіть приклади біоцифрових рішень у промисловості, енергетиці та аграрному секторі.
15. Як інтеграція біотехнологій і цифрових систем сприяє досягненню Цілей сталого розвитку ООН (SDGs)?

ТЕМА 3. НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЛЕКЦІЯ 5. Теоретичні основи енергозбереження та зменшення вуглецевого сліду

План лекції

1. Енергозбереження як ключовий компонент екологічної безпеки.
 - 1.1. Визначення, принципи та значення енергозбереження.
 - 1.2. Взаємозв'язок між енергоефективністю та екологічною стійкістю.
 - 1.3. Енергетичні баланси та показники ефективності використання енергії.
2. Джерела енергетичних втрат у промислових системах.
 - 2.1. Теплові втрати, нераціональне використання електроенергії та сировини.
 - 2.2. Вплив технологічних параметрів на енергоемність виробництва.
 - 2.3. Методи діагностики та моніторингу енергетичних втрат.
3. Концепція вуглецевого сліду: визначення, оцінювання, нормативні вимоги.
 - 3.1. Поняття «вуглецевий слід» та його екологічне значення.
 - 3.2. Методи розрахунку вуглецевого сліду для продуктів, процесів і підприємств.
 - 3.3. Міжнародні стандарти оцінювання парникових викидів (ISO 14064, GHG Protocol).
4. Методи зменшення вуглецевого сліду.
 - 4.1. Енергоефективні технології та оптимізація виробництва
 - 4.2. Використання відновлюваних джерел енергії.
 - 4.3. Карбонозахоплення (CCS, CCU) та екологічна компенсація.
5. Моделювання енергетичної ефективності та декарбонізація економіки.
 - 5.1. Методи системного аналізу енергетичних потоків.
 - 5.2. Цифрове моделювання енергоспоживання та життєвого циклу продукту (LCA).
 - 5.3. Стратегії декарбонізації у промисловості та транспорті.

1. Енергозбереження як ключовий компонент екологічної безпеки

Енергозбереження є фундаментальним принципом сталого розвитку, який поєднує економічну ефективність, екологічну безпеку та соціальну відповідальність. У глобальному контексті воно виступає ключовим інструментом у боротьбі зі зміною клімату, зменшенні викидів парникових газів і збереженні природних ресурсів.

Для екології енергозбереження – це не лише технічна стратегія, а система управління потоками енергії в межах антропогенних і природних процесів, спрямована на мінімізацію екодеструктивних наслідків.

1.1. Визначення, принципи та значення енергозбереження

Енергозбереження – це сукупність організаційних, технічних, технологічних і поведінкових заходів, спрямованих на раціональне

використання енергоресурсів і зниження непродуктивних витрат енергії без зменшення рівня виробництва чи якості життя.

Основні принципи енергозбереження:

- пріоритет ефективності над споживанням – спочатку оптимізація процесів, потім нарощування потужностей;
- комплексність – врахування всіх етапів енергетичного циклу: від видобутку до кінцевого використання;
- зворотний зв'язок – постійний моніторинг і корекція параметрів споживання;
- інноваційність – впровадження технологій, що мінімізують втрати та підвищують ККД систем;
- екологічна орієнтованість – пріоритет заходів, які зменшують вплив на довкілля.

Енергозбереження сприяє:

- зниженню енергоємності ВВП;
- скороченню викидів CO₂, SO₂, NO_x;
- зменшенню екологічних ризиків від енергетичного виробництва;
- підвищенню ресурсної незалежності держави.

1.2. Взаємозв'язок між енергоефективністю та екологічною стійкістю

Енергоефективність – це ключовий чинник формування екологічної стійкості суспільства та економіки. Кожен етап зменшення енергоспоживання автоматично знижує обсяг парникових і токсичних викидів, а також потребу у видобутку сировини.

Залежність енергоспоживання від екологічного навантаження:

$$E_{eco} = f(Q_E, \eta, P)$$

де E_{eco} - екологічний ефект енергоспоживання;

Q_E - обсяг спожитої енергії;

η - коефіцієнт енергоефективності;

P - потенціал відновлення ресурсів.

Згідно з дослідженнями Міжнародного енергетичного агентства (IEA), підвищення енергоефективності на 1 % призводить до скорочення викидів CO₂ на 0,3–0,4 %, що підтверджує прямий зв'язок між енергозбереженням і кліматичною стабільністю.

Основні напрями енергоефективності:

- оптимізація технологічних процесів (теплообмін, компресія, освітлення);
- модернізація обладнання (електродвигуни класу IE3+, LED, рекуперація);
- зменшення транспортних і теплових втрат;
- енергетичний аудит і системи моніторингу (ISO 50001).

1.3. Енергетичні баланси та показники ефективності використання енергії

Оцінка енергозбереження базується на енергетичному балансі, який відображає співвідношення між отриманою, корисно використаною та втраченою енергією.

Узагальнена формула енергетичного балансу:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{кор}} + Q_{\text{втр}}$$

де $Q_{\text{вх}}$ - загальна кількість поданої енергії;

$Q_{\text{кор}}$ - енергія, використана на корисну роботу;

$Q_{\text{втр}}$ - втрати у вигляді тепла, шуму, вібрацій тощо.

Коефіцієнт корисного використання енергії (ККЕ):

$$\eta_E = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{вх}}} \times 100\%$$

Для енергетичних систем високої ефективності $\eta_E \geq 85\%$, тоді як у традиційних промислових технологіях – лише 50–60 %.

Енергетичні баланси є основою для енергетичних аудитів, оптимізації процесів виробництва та моделювання вуглецевого сліду.

2. Джерела енергетичних втрат у промислових системах

Енергетичні втрати є головною причиною низької ефективності промислових процесів і надмірного впливу на довкілля. У середньому на більшості підприємств лише 40–60 % спожитої енергії перетворюється на корисну роботу, решта – розсіюється у вигляді тепла, вібрацій, втрат у мережах або неефективного спалювання.

Розуміння джерел таких втрат є першим кроком до створення енергоефективних і екологічно безпечних технологій.

2.1. Теплові втрати, нераціональне використання електроенергії та сировини

Теплові втрати

Тепло – найпоширеніша форма енергетичних втрат у промисловості. Основними причинами теплових втрат є:

- недостатня ізоляція технологічного обладнання;
- втрати через димові гази та неутилізоване відпрацьоване тепло;
- використання застарілих теплообмінників і котлів;
- витоки пари, перегрівання або нераціональна вентиляція.

Втрати теплової енергії можна оцінити за формулою:

$$Q_{\text{втр}} = \alpha \cdot A \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{зовн}}) \cdot t$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

A - площа поверхні теплопередачі, м²;

$T_{\text{вн}}$, $T_{\text{зовн}}$ - температура всередині й зовні, °С;

t - час, с.

Втрати електроенергії:

- перевантаження трансформаторів і двигунів;
- втрати в лініях електропередач через низький коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$);
- робота електроустаткування у режимі холостого ходу.

Енергозберігаючі рішення: використання перетворювачів частоти, компенсаційних конденсаторів, регульованих приводів.

Втрати сировини

Відходи сировини – це приховані енергетичні втрати, адже на їх виробництво вже була витрачена енергія. Наприклад, у металургії до 20 % енергії губиться через утворення шлаків, у харчовій промисловості – через надлишкові теплові втрати при сушінні або пастеризації.

2.2. Вплив технологічних параметрів на енергоємність виробництва

Енергоємність виробництва – це кількість енергії, необхідна для виготовлення одиниці продукції:

$$E_{\text{пит}} = \frac{E_{\text{заг}}}{Q_{\text{прод}}}$$

де $E_{\text{пит}}$ - питомі витрати енергії, кВт·год/т;

$E_{\text{заг}}$ - загальне споживання енергії, кВт·год;

$Q_{\text{прод}}$ -обсяг продукції, т.

Показник $E_{\text{пит}}$ залежить від:

- технологічних режимів (температури, тиску, швидкості реакцій);
- ефективності обладнання (ККД, ступеня зносу, режиму роботи);
- якості сировини (вологість, зольність, хімічний склад);
- організації виробничого процесу (логістика, планування, резервування потужностей).

Наприклад, у цементній промисловості зміна вологості сировини на 1 % збільшує енерговитрати на випал на 3–4 %, а у хімічних виробництвах нераціональне співвідношення реагентів знижує енергоефективність реакційного процесу на 10–15 %.

Енергоємність – це інтегральний показник якості технологічного процесу. Її мінімізація означає не лише економію, а й зменшення вуглецевого сліду.

2.3. Методи діагностики та моніторингу енергетичних втрат

Для виявлення енергетичних втрат застосовуються системи енергетичного аудиту та цифрового моніторингу. Енергетичний аудит дозволяє оцінити, де, коли й чому відбуваються втрати, і розробити коригувальні дії.

Основні методи діагностики:

- тепловізійний контроль – визначення зон надмірного теплового випромінювання;
- акустична діагностика – виявлення витоків газу або пари;
- балансовий метод – порівняння поданої енергії з корисно використаною;
- метод енергетичних індикаторів (EnPI) аналіз динаміки питомих витрат енергії;
- цифровий моніторинг (IoT, SCADA) – безперервний збір і аналіз даних у реальному часі.

Формула енергетичного індикатора:

$$EnPI = \frac{E_{\text{факт}}}{E_{\text{баз}}} \times 100\%$$

де $E_{\text{факт}}$ - поточне споживання енергії;

$E_{\text{баз}}$ - базове (еталонне) споживання.

Якщо $E_{\text{нPI}} < 100\%$, ефективність зростає; якщо $E_{\text{нPI}} > 100\%$ - процес став більш енергоємним.

Моніторинг енергетичних потоків дозволяє своєчасно виявляти відхилення, прогнозувати ризики й підтримувати енергетичну стабільність виробництва.

3. Концепція вуглецевого сліду: визначення, оцінювання, нормативні вимоги

Проблема зміни клімату стала глобальним викликом сучасності, а контроль за викидами парникових газів — ключовим напрямом екологічної політики. Для кількісної оцінки впливу діяльності людини на клімат використовується показник «вуглецевий слід» (carbon footprint), який характеризує сумарний обсяг викидів парникових газів, спричинених виробництвом або споживанням продукту, процесу чи послуги.

3.1. Поняття «вуглецевий слід» та його екологічне значення

Вуглецевий слід – це сукупна кількість викидів парникових газів, виражена у еквіваленті CO_2 ($\text{CO}_2\text{-eq}$), що виникає в результаті певної діяльності, усього життєвого циклу продукту або функціонування організації.

До парникових газів, що враховуються під час розрахунку, належать: діоксид вуглецю (CO_2); метан (CH_4); закис азоту (N_2O); фторвмісні гази (HFCs, PFCs, SF_6 , NF_3).

Екологічне значення показника полягає в тому, що він дозволяє кількісно оцінити вплив конкретного підприємства, продукту чи технології на глобальне потепління. Зниження вуглецевого сліду є одним із головних критеріїв сталого розвитку та екологічної ефективності виробництва.

3.2. Методи розрахунку вуглецевого сліду для продуктів, процесів і підприємств

Розрахунок вуглецевого сліду базується на концепції життєвого циклу продукту (Life Cycle Assessment, LCA), яка охоплює всі етапи: видобуток сировини, виробництво, транспортування, експлуатацію, утилізацію.

Загальна формула оцінювання може бути подана як:

$$CF = \sum (A_i \times EF_i),$$

де CF – вуглецевий слід, кг $\text{CO}_2\text{-екв.}$;

A_i – обсяг спожитих ресурсів або енергії (паливо, електроенергія, матеріали);

EF_i — коефіцієнт викидів для відповідного виду ресурсу.

Методика передбачає три рівні аналізу:

- продуктовий рівень – оцінювання викидів, пов'язаних із виготовленням окремого товару;
- процесний рівень – аналіз енергоємності технологічних процесів;
- корпоративний рівень – визначення сумарних викидів підприємства за рік.

Окрім прямих викидів (Score 1), враховують також:

- непрямі енергетичні викиди (Score 2) – від споживання електроенергії та тепла;
- інші непрямі викиди (Score 3) – від транспортування, відходів, використання продукції.

3.3. Міжнародні стандарти оцінювання парникових викидів (ISO 14064, GHG Protocol)

Для уніфікації підходів до обчислення та звітності щодо викидів парникових газів розроблено низку міжнародних стандартів.

Основними з них є:

- ISO 14064 – серія стандартів Міжнародної організації зі стандартизації, що визначає принципи обліку, верифікації та звітності про викиди на організаційному рівні;
- ISO 14067 – встановлює вимоги до оцінки вуглецевого сліду продукції (Product Carbon Footprint);
- GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol) – міжнародний протокол, розроблений Світовим ресурсним інститутом (WRI) і Всесвітньою радою підприємств зі сталого розвитку (WBCSD), який деталізує методологію обліку викидів за трьома категоріями (Score 1, 2, 3).

Використання цих стандартів забезпечує порівнянність даних між підприємствами, прозорість екологічної звітності та сприяє впровадженню корпоративних стратегій декарбонізації.

4. Методи зменшення вуглецевого сліду

Зменшення вуглецевого сліду є ключовим елементом переходу до низьковуглецевої економіки. Основна мета полягає у зниженні викидів парникових газів, пов'язаних із виробничою, транспортною та побутовою діяльністю. Це досягається шляхом впровадження енергоефективних технологій, використання відновлюваних джерел енергії, уловлювання та утилізації вуглецю, а також за допомогою компенсаційних механізмів (offsets).

4.1. Енергоефективні технології та оптимізація виробництва

Енергоефективність – основа скорочення вуглецевого сліду. Оптимізація енергоспоживання на підприємствах дозволяє зменшити не лише витрати на енергоресурси, а й обсяг викидів CO₂. Основні напрями підвищення енергоефективності:

- впровадження технологій рекуперації тепла у металургії, хімічній та будівельній промисловості;
- використання частотно-регульованих електроприводів та енергоощадного освітлення;
- автоматизація та цифрове управління технологічними процесами;
- перехід на безвідходні або замкнені цикли водо- та теплопостачання;
- модернізація транспортних систем, логістики та перевезень.

Енергетичний ефект можна виразити за формулою:

$$\Delta E = E_0 - E_1,$$

де ΔE – зекономлена енергія, E_0 – енерговитрати до впровадження заходу, E_1 – енерговитрати після впровадження.

Кожен відсоток зниження енерговитрат безпосередньо зменшує вуглецевий слід пропорційно питомому коефіцієнту викидів.

4.2. Використання відновлюваних джерел енергії

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) – це один із найперспективніших напрямів декарбонізації економіки. Їхня перевага полягає у відсутності або мінімальній кількості викидів CO_2 під час експлуатації. До ВДЕ належать:

- сонячна енергія – фотоелектричні та термальні системи для генерації електроенергії й тепла;
- вітрова енергія – вітроелектростанції, які працюють без спалювання палива;
- біоенергетика – використання біогазу, біоетанолу, біодизелю як заміників викопних палив;
- гідроенергетика та геотермальна енергія – стабільні джерела, придатні для базового навантаження.

Заміна енергії з викопного палива на відновлювану дозволяє скоротити викиди CO_2 до 80–100% у розрахунку на одиницю виробленої енергії. Крім того, поєднання ВДЕ з системами накопичення енергії (акумулятори, водневі сховища) підвищує стабільність енергопостачання.

4.3. Карбонзахоплення (CCS, CCU) та екологічна компенсація

Технології уловлювання, використання та зберігання вуглецю (Carbon Capture and Storage – CCS, Carbon Capture and Utilization – CCU) спрямовані на зменшення концентрації CO_2 у атмосфері.

Основні етапи процесу CCS:

- уловлювання CO_2 безпосередньо з димових газів або повітря;
- транспортування вуглекислого газу через трубопровід або в рідкому стані;
- зберігання у геологічних формаціях – нафтових родовищах, соляних печерах або підземних водоносних горизонтах.

CCU-технології передбачають використання уловленого CO_2 як сировини для хімічних процесів – синтезу метанолу, карбонатів, біопалива, а також для тепличного господарства.

Екологічна компенсація (carbon offsets) – це механізм, за якого організація компенсує власні викиди шляхом інвестування у проекти, що скорочують або поглинають CO_2 :

- лісовідновлення і рекультивація земель;
- розвиток сонячних і вітрових електростанцій;
- впровадження енергоефективних технологій у країнах, що розвиваються.

Таким чином, комплексне застосування енергоефективності, ВДЕ, технологій CCS/CCU і компенсаційних заходів дозволяє досягти вуглецевої нейтральності (carbon neutrality) – стану, коли обсяг викидів дорівнює обсягу їх поглинання або компенсації.

5. Моделювання енергетичної ефективності та декарбонізація економіки

Моделювання енергетичних процесів і систем є важливим інструментом для розроблення стратегій енергоефективності, прогнозування споживання ресурсів та оцінки потенціалу скорочення викидів парникових газів. На основі таких моделей можна обґрунтовувати екологічну політику, розраховувати економічну доцільність технологічних рішень і визначати шляхи декарбонізації галузей економіки.

5.1. Методи системного аналізу енергетичних потоків

Системний аналіз дає змогу досліджувати взаємозв'язки між різними енергетичними процесами на підприємстві або в масштабах регіону. Основними інструментами такого аналізу є:

- енергетичні баланси – визначення вхідних і вихідних потоків енергії для системи, що аналізується;
- діаграми Санкі – графічне зображення потоків енергії, яке показує втрати на кожному етапі;
- аналіз ексергії – оцінювання якісної сторони енергетичних перетворень, тобто здатності енергії виконувати корисну роботу;
- індекс енергоефективності (Energy Efficiency Index) – співвідношення фактичного споживання енергії до еталонного.

Рівень енергоефективності можна виразити співвідношенням:

$$\eta_e = (E_{кор} / E_{вх}) \times 100\%,$$

де η_e – коефіцієнт енергетичної ефективності,

$E_{кор}$ – корисно використана енергія,

$E_{вх}$ – загальна спожита енергія.

Такі методи дозволяють виявити «вузькі місця» у виробничих процесах і розрахувати потенціал зменшення енерговитрат та відповідних викидів CO₂.

5.2. Цифрове моделювання енергоспоживання та життєвого циклу продукту (LCA)

Сучасний підхід до оцінки енерговитрат і вуглецевого сліду базується на цифровому моделюванні життєвого циклу продукту (Life Cycle Assessment, LCA). Цей метод охоплює всі етапи – від видобутку сировини до утилізації продукції.

Основні етапи LCA:

1. Визначення мети та меж системи.
2. Збір даних про матеріальні та енергетичні потоки.
3. Оцінка впливу на довкілля (викиди CO₂, SO₂, NO_x, тверді частинки).
4. Інтерпретація результатів для прийняття рішень.

LCA застосовується для порівняння альтернативних технологій, вибору оптимального матеріалу або процесу, розрахунку індексу енергетичного впливу (Energy Impact Index).

Цифрові технології (big data, IoT, штучний інтелект) дозволяють проводити реальний моніторинг енергоспоживання і моделювати сценарії скорочення викидів. Наприклад, за допомогою програм OpenLCA, SimaPro або GaBi можна точно оцінити вуглецевий слід підприємства.

5.3. Стратегії декарбонізації у промисловості та транспорті

Декарбонізація – це процес поступового зменшення або усунення викидів вуглецю з енергетичних, промислових і транспортних систем. Основні напрями реалізації стратегій декарбонізації:

- у промисловості: – перехід на електрифіковані та водневі технології нагрівання;
- використання вторинних енергоресурсів і замкнених циклів виробництва;
- уловлювання та утилізація вуглецю;
- цифровізація процесів управління енергією;
- у транспорті:
 - розвиток електромобільності та зарядної інфраструктури;
 - впровадження синтетичних і біологічних палив (e-fuels, біометан, біодизель);
 - оптимізація маршрутів і логістики;
 - поступова відмова від двигунів внутрішнього згоряння.

Комплексна реалізація цих заходів дозволяє формувати низьковуглецеву економіку, яка поєднує економічну ефективність із екологічною стійкістю. Вона є основою для досягнення кліматичних цілей, визначених Паризькою угодою (2015) та Європейським зеленим курсом.

Висновок до лекції 5

Енергозбереження та зменшення вуглецевого сліду є ключовими складовими сучасної екологічної політики та стратегії сталого розвитку. В умовах глобальних кліматичних змін саме раціональне використання енергоресурсів, оптимізація технологічних процесів і впровадження чистих енергетичних рішень визначають здатність держав і підприємств забезпечувати економічне зростання без шкоди для довкілля.

Поняття вуглецевого сліду дає змогу кількісно оцінити вплив людської діяльності на кліматичну систему, а міжнародні стандарти ISO 14064, ISO 14067 і GHG Protocol створюють основу для уніфікованої системи обліку та контролю парникових викидів.

Зменшення вуглецевого навантаження можливе завдяки застосуванню енергоефективних технологій, переходу на відновлювані джерела енергії, розвитку технологій уловлювання та повторного використання вуглецю (CCS, CCU), а також реалізації механізмів екологічної компенсації.

Цифрове моделювання енергетичних процесів і аналіз життєвого циклу продукту (LCA) дозволяють приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо підвищення ефективності та скорочення викидів. Реалізація стратегій декарбонізації у промисловості й транспорті є важливим кроком на шляху до формування низьковуглецевої економіки, яка поєднує технологічний прогрес, енергетичну незалежність та екологічну безпеку.

Контрольні запитання

1. У чому полягає сутність концепції вуглецевого сліду?

2. Які основні парникові гази враховуються під час оцінювання вуглецевого сліду?
3. Як визначається вуглецевий слід підприємства або продукту?
4. Які основні рівні (Score 1, Score 2, Score 3) виділяють при оцінюванні викидів парникових газів?
5. Які міжнародні стандарти регламентують оцінку викидів CO₂?
6. У чому полягає роль енергоефективності у скороченні вуглецевого сліду?
7. Які технології належать до відновлюваних джерел енергії?
8. Як працюють технології уловлювання та зберігання вуглецю (CCS, CCU)?
9. Що таке екологічна компенсація (carbon offset) і в яких випадках вона застосовується?
10. Які методи системного аналізу використовуються для моделювання енергетичних потоків?
11. У чому полягає методологія оцінки життєвого циклу продукту (LCA)?
12. Які цифрові інструменти використовуються для моніторингу енергоспоживання?
13. Які основні напрями декарбонізації промисловості?
14. Які стратегії декарбонізації застосовуються у транспортній галузі?
15. Як впровадження низьковуглецевих технологій впливає на досягнення цілей сталого розвитку?

ЛЕКЦІЯ 6. Концепція вуглецевого сліду та методи його зменшення

План лекції

1. Поняття та сутність вуглецевого сліду.
 - 1.1. Визначення терміна “carbon footprint” та його історичний розвиток.
 - 1.2. Види вуглецевого сліду: прямий, непрямий, повний.
 - 1.3. Роль вуглецевого сліду у глобальній кліматичній політиці.
2. Методологія оцінювання вуглецевого сліду.
 - 2.1. Основні підходи: LCA (оцінка життєвого циклу), GHG Protocol, ISO 14064.
 - 2.2. Розрахунок вуглецевого сліду для підприємства, продукту, послуги.
 - 2.3. Одиниці вимірювання та коефіцієнти еквівалентності (CO₂eq).
3. Аналіз джерел утворення парникових газів.
 - 3.1. Викиди від спалювання палива та промислових процесів.
 - 3.2. Непрямі викиди, пов’язані з енергопостачанням, транспортом і матеріалами.
 - 3.3. Біогенні та побічні джерела (сільське господарство, відходи, біомаса).
4. Методи зменшення вуглецевого сліду.
 - 4.1. Енергоефективні та низьковуглецеві технології.
 - 4.2. Впровадження відновлюваних джерел енергії.
 - 4.3. Карбонозахоплення, утилізація та зберігання (CCS/CCU).
 - 4.4. Механізми вуглецевої компенсації (carbon offset).
5. Управління вуглецевим слідом на рівні підприємств і територій.
 - 5.1. Корпоративні стратегії декарбонізації.
 - 5.2. Національні і міжнародні програми скорочення викидів.
 - 5.3. Цифрові інструменти обліку та моніторингу CO₂ (Carbon Accounting Systems).

1. Поняття та сутність вуглецевого сліду.

Вуглецевий слід є одним із ключових показників екологічного впливу діяльності людини на довкілля. Він характеризує загальний обсяг викидів парникових газів, що прямо або опосередковано виникають у результаті функціонування підприємства, виробництва продукції, надання послуг або побутової діяльності населення. Облік та управління вуглецевим слідом є основою сучасної кліматичної політики, оскільки дозволяє кількісно оцінити внесок кожного суб'єкта у зміну клімату.

1.1. Визначення терміна «carbon footprint» та його історичний розвиток

Поняття «вуглецевий слід» (carbon footprint) сформувалося на початку 2000-х років у межах глобальної ініціативи зі зменшення антропогенних викидів. Спочатку цей термін використовувався у звітах про діяльність компаній з екологічної відповідальності, а згодом набув міжнародного визнання як універсальний індикатор кліматичної ефективності.

Вуглецевий слід визначається як сукупність усіх прямих і непрямих викидів парникових газів, виражених у перерахунку на масу еквіваленту вуглекислого газу CO₂eq. До складу таких газів входять CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆.

Формула розрахунку має узагальнений вигляд:

$$CF = \sum (A_i \times G_i)$$

де CF – загальний вуглецевий слід, кг CO₂eq;

A_i – кількість утворених викидів конкретного газу, кг;

G_i – його потенціал глобального потепління (GWP).

Для порівняння: потенціал CH₄ становить 28–30, а N₂O – близько 265 відносно CO₂ (за IPCC, 2021).

1.2. Види вуглецевого сліду: прямий, непрямий, повний

Залежно від джерела походження викидів розрізняють три основні типи вуглецевого сліду:

- прямий (Score 1) – усі викиди, що утворюються безпосередньо в межах організації: спалювання палива, технологічні реакції, транспорт підприємства.
- непрямий енергетичний (Score 2) – викиди, пов'язані зі споживанням електроенергії, тепла або пари, вироблених іншими компаніями.
- інші непрямі (Score 3) – усі інші джерела, які опосередковано пов'язані з діяльністю підприємства: виробництво сировини, логістика, використання та утилізація продукції.

Сумарний показник (Total Carbon Footprint) формується як сума всіх трьох компонентів. Для повної оцінки життєвого циклу продукції слід враховувати також етапи постачання, експлуатації та перероблення.

1.3. Роль вуглецевого сліду у глобальній кліматичній політиці

Вуглецевий слід є головним кількісним показником участі держав, підприємств і громадян у боротьбі зі зміною клімату. Він використовується для:

- розроблення національних стратегій скорочення викидів;
- впровадження систем торгівлі вуглецевими квотами;
- оцінювання екологічної ефективності продукції (Carbon Label);
- моніторингу корпоративної відповідальності (ESG-звітність).

На міжнародному рівні контроль за викидами регулюється Паризькою угодою (2015), яка визначає мету обмеження зростання глобальної температури до 1,5–2 °C.

Зменшення вуглецевого сліду є базовим елементом переходу до низьковуглецевої економіки, де кожен етап виробничого циклу підлягає оцінці за критеріями енергетичної ефективності та кліматичної нейтральності.

2. Методологія оцінювання вуглецевого сліду

Оцінювання вуглецевого сліду є процесом кількісного визначення викидів парникових газів, пов'язаних із діяльністю, продуктом або послугою. Методологія розрахунку базується на принципах повноти, прозорості, наукової обґрунтованості та відтворюваності результатів. Метою оцінювання

є виявлення основних джерел викидів, їхня класифікація за рівнями впливу та пошук шляхів їх зменшення.

2.1. Основні підходи: LCA, GHG Protocol, ISO 14064

Існує кілька міжнародно визнаних методів оцінки вуглецевого сліду. Найбільш поширені такі:

- LCA (Life Cycle Assessment) – оцінка життєвого циклу продукції. Цей метод розглядає вплив на довкілля від видобутку сировини до утилізації продукту. Він охоплює всі етапи: виробництво, транспортування, використання, перероблення. Розрахунок виконується за стандартами ISO 14040 та ISO 14044;
- GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol) – глобальна методологія, розроблена Світовим банком та Всесвітньою радою зі сталого розвитку. Передбачає класифікацію викидів за трьома категоріями (Scopes 1, 2, 3) і використовується для корпоративного обліку;
- ISO 14064 – міжнародний стандарт, що визначає вимоги до обліку, верифікації та звітування про викиди парникових газів. Він встановлює структуру для підготовки звітів і підтвердження даних незалежними аудиторами.

Ці методики є взаємодоповнюючими: LCA застосовується для оцінки продуктів, а GHG Protocol і ISO 14064 – для підприємств і територій.

2.2. Розрахунок вуглецевого сліду для підприємства, продукту, послуги

Розрахунок здійснюється у кілька етапів:

1. Визначення меж системи – які процеси включаються в аналіз (виробництво, енергопостачання, логістика, споживання).
2. Збір даних про використання ресурсів (паливо, електроенергія, вода, матеріали).
3. Переведення обсягів спожитих ресурсів у відповідні обсяги викидів CO₂eq за допомогою коефіцієнтів еквівалентності.
4. Підсумування результатів і визначення загального вуглецевого сліду.

У спрощеному вигляді розрахунок проводиться за формулою:

$$CF = \sum (Q_i \times EF)$$

де CF – сумарний вуглецевий слід, т CO₂eq;

Q_i – кількість використаного ресурсу (паливо, електроенергія тощо);

EF – коефіцієнт викидів (т CO₂eq/одиночку ресурсу).

Приклад: для електроенергії EF залежить від структури енергетичного балансу країни (в Україні – близько 0,36 т CO₂eq/МВт·год).

2.3. Одиниці вимірювання та коефіцієнти еквівалентності (CO₂eq)

Усі викиди парникових газів вимірюються у перерахунку на вуглецевий еквівалент – тобто кількість CO₂, що має такий самий вплив на глобальне потепління, як і даний газ.

Коефіцієнти еквівалентності (за IPCC, 2021):

$$CO_2 = 1$$

$$CH_4 = 28-30$$

$$\begin{aligned} \text{N}_2\text{O} &= 265 \\ \text{HFCs} &= 124\text{--}14800 \\ \text{PFCs} &= 6500\text{--}9200 \\ \text{SF}_6 &= 23500 \end{aligned}$$

Отже, навіть невелика кількість деяких сполук може мати надзвичайно великий ефект у перерахунку на CO_2eq .

Під час обчислення загальних показників часто використовують поняття «вуглецева інтенсивність» (CI):

$$\text{CI} = \text{CF} / \text{Qprod}$$

де CI – кількість викидів на одиницю продукції (т $\text{CO}_2\text{eq}/\text{т}$, т $\text{CO}_2\text{eq}/\text{МВт}\cdot\text{год}$ тощо);

CF – сумарний вуглецевий слід;

Qprod – обсяг виробленої продукції або послуги.

Цей показник дозволяє порівнювати екологічну ефективність різних підприємств і технологій.

3. Аналіз джерел утворення парникових газів

Для ефективного управління вуглецевим слідом необхідно чітко ідентифікувати джерела викидів парникових газів. Вони поділяються на антропогенні (штучні) та природні. В умовах промислового розвитку саме антропогенні джерела є основними, оскільки вони формуються внаслідок спалювання палива, виробничих процесів і транспортування ресурсів.

3.1. Викиди від спалювання палива та промислових процесів

Спалювання викопних видів палива (вугілля, нафти, природного газу) є головним джерелом викидів CO_2 , CH_4 і N_2O . В енергетичному секторі формується до 70 % усіх антропогенних викидів у світі.

Рівень викидів залежить від виду палива, його складу, ефективності горіння та технологічних умов.

Для оцінки викидів CO_2 від спалювання палива застосовується формула:

$$E = Q \times C \times O \times 44/12$$

де E – маса викидів CO_2 , т;

Q – кількість спаленого палива, т або м^3 ;

C – вміст вуглецю в паливі (т C/т палива);

O – коефіцієнт окиснення (частка вуглецю, що окиснюється до CO_2);

44/12 – співвідношення молекулярних мас CO_2 і C.

Типові коефіцієнти окиснення:

вугілля – 0,98

природний газ – 0,995

нафта та нафтопродукти – 0,99

Окрім CO_2 , при неповному спалюванні утворюються CH_4 та N_2O , які мають значно вищий потенціал глобального потепління.

3.2. Непрямі викиди, пов'язані з енергопостачанням, транспортом і матеріалами

До цієї групи належать усі викиди, що виникають не безпосередньо на підприємстві, але є результатом його діяльності. Це, зокрема:

- виробництво електроенергії, яку споживає підприємство;
- транспортування сировини, готової продукції, працівників;
- виробництво матеріалів і комплектуючих;
- утилізація або переробка відходів.

У системі обліку GHG Protocol ці викиди відносяться до категорій Score 2 і Score 3. Їхній розрахунок часто базується на статистичних коефіцієнтах, які встановлюють зв'язок між спожитими ресурсами та обсягом викидів.

Приклад:

- кожен літр дизельного палива при спалюванні утворює приблизно 2,68 кг CO₂;
- кожен кВт·год електроенергії, вироблений із вугільної генерації, відповідає близько 0,8–0,9 кг CO₂.

3.3. Біогенні та побічні джерела (сільське господарство, відходи, біомаса)

Біогенні джерела парникових газів пов'язані з природними процесами розкладу органічних речовин, метаногенезом, нітрифікацією та денітрифікацією у ґрунтах. У сільському господарстві основними джерелами є:

- тваринництво – виділення CH₄ унаслідок травлення жуйних тварин;
- використання азотних добрив – утворення N₂O;
- управління гноєм – утворення CH₄ і N₂O.

У секторі відходів головними джерелами є полігони, де під дією анаеробних процесів виділяється метан.

Для оцінки таких викидів застосовується емпірична формула:

$$E = M \times EF \times (1 - R)$$

де E – обсяг утвореного CH₄, т;

M – маса органічних відходів, т;

EF – коефіцієнт утворення метану (т CH₄/т відходів);

R – частка зібраного та утилізованого газу.

Біогенний вуглець, на відміну від викопного, може бути частково нейтральним, якщо відновлення біомаси компенсує викиди. Проте це потребує ретельного моніторингу, адже надмірна експлуатація біоресурсів може призвести до вуглецевого дефіциту.

4. Методи зменшення вуглецевого сліду

Зменшення вуглецевого сліду є одним із головних напрямів переходу до сталого розвитку. Для цього застосовуються технічні, організаційні та управлінські рішення, спрямовані на підвищення енергоефективності, використання відновлюваних джерел енергії, уловлювання та зберігання вуглецю, а також компенсаційні механізми.

4.1. Енергоефективні та низьковуглецеві технології

Найефективнішим способом скорочення викидів є зниження споживання енергії через впровадження енергоефективних технологій. Це включає:

- модернізацію обладнання з підвищеним коефіцієнтом корисної дії;
- рекуперацію тепла та утилізацію відпрацьованої енергії;
- автоматизацію процесів з метою мінімізації холостого споживання;
- застосування електротранспорту, гібридних систем і теплових насосів.

Показник зменшення викидів можна визначити за формулою:

$$\Delta E = (E_{\text{баз}} - E_{\text{нов}}) \times EF$$

де ΔE – скорочення викидів, т CO_2eq ;

$E_{\text{баз}}$ – базове енергоспоживання, МВт·год;

$E_{\text{нов}}$ – енергоспоживання після модернізації, МВт·год;

EF – коефіцієнт викидів для даного джерела енергії.

4.2. Впровадження відновлюваних джерел енергії

Використання сонячної, вітрової, гідро- та біоенергії дає змогу значно знизити вуглецевий слід енергетичних систем.

Кожен мегават-година електроенергії, вироблений з відновлюваного джерела, заміщає еквівалентне споживання викопного палива.

При оцінці ефекту від переходу на відновлювані джерела застосовується формула:

$$ER = E_{\text{вд}} \times (EF_{\text{вик}} - EF_{\text{відн}})$$

де ER – скорочення викидів, т CO_2eq ;

$E_{\text{вд}}$ – обсяг заміщеної енергії, МВт·год;

$EF_{\text{вик}}$ – коефіцієнт викидів для викопної генерації;

$EF_{\text{відн}}$ – коефіцієнт для відновлюваних джерел (часто близький до нуля).

Крім того, важливу роль відіграє розвиток систем накопичення енергії, що забезпечують баланс між генерацією та споживанням і зменшують втрати.

4.3. Карбонозахоплення, утилізація та зберігання (CCS/CCU)

Технології уловлювання і зберігання вуглецю (Carbon Capture and Storage – CCS) дозволяють видаляти CO_2 безпосередньо з джерел викидів або з повітря. Основні етапи процесу:

1. Уловлювання CO_2 після спалювання палива або з відхідних газів.
2. Стиснення і транспортування газу трубопроводами.
3. Закачування у геологічні формації – нафтові пласти, соляні куполи або водоносні горизонти.

Альтернативою є технології CCU (Carbon Capture and Utilization), де вилучений вуглець використовується як сировина для виробництва синтетичного палива, будівельних матеріалів або хімічних продуктів.

Ефективність уловлювання визначається як:

$$\eta = (m_{\text{уловл}} / m_{\text{всього}}) \times 100\%$$

де η – ефективність уловлювання, %;

$m_{\text{уловл}}$ – кількість уловленого CO_2 , т;

твсього – загальний обсяг викидів, т.

4.4. Механізми вуглецевої компенсації (carbon offset)

Коли технічне скорочення викидів неможливе або економічно не вигідне, застосовують компенсаційні механізми. Це фінансування проєктів, що зменшують або поглинають CO₂ в інших секторах чи регіонах.

Основні види компенсацій:

- лісовідновлення і заліснення територій;
- відновлення торфовищ і болотних екосистем;
- підтримка програм розвитку відновлюваної енергетики;
- купівля вуглецевих кредитів на міжнародних ринках (carbon markets).

Ефективність таких заходів залежить від надійності верифікації. Вуглецеві кредити повинні бути унікальними, вимірюваними і довготривалими.

5. Управління вуглецевим слідом на рівні підприємств і територій

Системне управління вуглецевим слідом передбачає не лише технічні заходи зі зменшення викидів, а й розроблення стратегій декарбонізації, інтеграцію цифрових інструментів моніторингу та участь у міжнародних кліматичних програмах. Ефективне управління можливе лише за умови поєднання економічних стимулів, нормативного контролю і корпоративної відповідальності.

5.1. Корпоративні стратегії декарбонізації

Підприємства, що прагнуть досягти кліматичної нейтральності, розробляють власні дорожні карти декарбонізації (Decarbonization Roadmaps). До їх складу входять:

- визначення базового рівня викидів;
- встановлення коротко-, середньо- і довгострокових цілей скорочення;
- впровадження технологій зменшення енергоспоживання і переходу на чисті джерела енергії;
- підготовка щорічних звітів про викиди за стандартами GHG Protocol або ISO 14064.

Компанії, що реалізують такі стратегії, отримують конкурентні переваги, зокрема доступ до екологічного фінансування, покращення репутації та зниження ризиків регуляторного тиску.

5.2. Національні і міжнародні програми скорочення викидів

На рівні держави політика управління вуглецевим слідом формується відповідно до міжнародних зобов'язань. Основними документами є:

- Паризька угода (2015), що зобов'язує країни обмежити підвищення середньої температури до 1,5–2 °C;
- Європейський зелений курс (EU Green Deal), який передбачає досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року;
- Українська Стратегія низьковуглецевого розвитку до 2050 року, спрямована на скорочення викидів щонайменше на 60 % порівняно з рівнем 1990 року.

Управління вуглецевими потоками реалізується через податки на CO₂, систему торгівлі квотами (EU ETS), а також підтримку проєктів з енергоефективності та відновлюваної енергетики.

5.3. Цифрові інструменти обліку та моніторингу CO₂

Сучасні підприємства все частіше застосовують цифрові рішення для управління викидами. До них належать:

- системи автоматизованого збору даних про енергоспоживання;
- платформи Carbon Accounting Systems, що розраховують і прогнозують обсяги CO₂e_q у реальному часі;
- блокчейн-технології для забезпечення прозорості вуглецевих кредитів;
- моделювання життєвого циклу продуктів (LCA software).

Завдяки цифровим інструментам стає можливим відстеження ланцюгів постачання, оцінка впливу виробництва на довкілля та оптимізація процесів з урахуванням кліматичних ризиків.

Висновок до лекції

Вуглецевий слід є комплексним показником екологічного впливу людської діяльності на кліматичну систему планети. Його облік та управління стають ключовим завданням екологічної політики підприємств, держав і міжнародних організацій.

Ефективне зменшення викидів можливе лише за умови поєднання трьох складових: підвищення енергоефективності, розвитку відновлюваної енергетики та впровадження інноваційних технологій уловлювання і компенсації вуглецю.

Перехід до низьковуглецевої економіки є не лише екологічним, а й стратегічним напрямом сталого розвитку, який визначатиме конкурентоспроможність країн та підприємств у найближчі десятиліття.

Контрольні запитання

1. Що таке вуглецевий слід і яку роль він відіграє у сучасній екологічній політиці?
2. Які основні парникові гази враховуються під час розрахунку вуглецевого сліду?
3. У чому полягає різниця між прямими, непрямими та повними викидами (Scopes 1, 2, 3)?
4. Які міжнародні стандарти використовуються для обліку та верифікації викидів парникових газів?
5. У чому полягає методика LCA (оцінка життєвого циклу) і де вона застосовується?
6. Які основні етапи розрахунку вуглецевого сліду для підприємства?
7. Що таке коефіцієнт викидів (Emission Factor) і від чого він залежить?
8. Як визначається вуглецева інтенсивність (Carbon Intensity) і яке її практичне значення?
9. Які головні джерела антропогенних викидів парникових газів у промисловості?

10. Яким чином транспорт і логістика впливають на формування непрямих викидів?
11. Які біогенні процеси спричиняють утворення метану та закису азоту?
12. Назвіть основні технологічні підходи до зменшення вуглецевого сліду на підприємствах.
13. У чому полягає принцип дії систем уловлювання та зберігання вуглецю (CCS/CCU)?
14. Що таке механізм вуглецевої компенсації (carbon offset) і які його переваги та обмеження?
15. Які цифрові інструменти використовуються для моніторингу та управління вуглецевим слідом?

ТЕМА 4. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ МАЛОВІДХОДНОГО ВИРОБНИЦТВА

ЛЕКЦІЯ 7. Концепція циркулярної економіки та замкнених циклів виробництва

План лекції

1. Сутність і еволюція концепції циркулярної економіки
 - 1.1. Від лінійної до циркулярної моделі господарювання
 - 1.2. Основні принципи циркулярної економіки
 - 1.3. Екологічні, економічні та соціальні переваги переходу до замкнених систем
2. Структура замкнених циклів виробництва
 - 2.1. Основні елементи циркулярного виробництва
 - 2.2. Види матеріальних потоків у замкнених системах
 - 2.3. Приклади реалізації замкнених циклів у різних галузях
3. Технології перероблення, повторного використання та утилізації ресурсів
 - 3.1. Вторинна переробка матеріалів
 - 3.2. Індустріальна симбіозність і каскадне використання ресурсів
 - 3.3. Приклади успішних практик у промисловості
4. Цифрові інструменти та інновації у розвитку циркулярної економіки
 - 4.1. Роль цифровізації в управлінні ресурсними потоками
 - 4.2. Використання технологій блокчейн, IoT, big data для екологічного моніторингу
 - 4.3. Підходи до оцінювання ефективності циркулярних процесів
5. Перспективи впровадження циркулярної економіки в Україні
 - 5.1. Стан розвитку і бар'єри для реалізації концепції
 - 5.2. Нормативно-правове забезпечення та міжнародний досвід
 - 5.3. Пріоритетні напрями розвитку замкнених виробничих систем

1. Сутність і еволюція концепції циркулярної економіки

Циркулярна економіка є однією з ключових стратегій сталого розвитку, спрямованою на раціональне використання ресурсів і мінімізацію відходів. Вона базується на ідеї замкненого циклу, у якому продукти, матеріали та ресурси залишаються в обігу якомога довше, а утворення відходів зводиться до мінімуму. На відміну від традиційної лінійної моделі «взяти – виготовити – викинути», циркулярна економіка формує систему «взяти – використати – переробити – повторно застосувати».

1.1. Від лінійної до циркулярної моделі господарювання

Традиційна економічна система тривалий час функціонувала за принципом лінійного споживання, коли ресурси видобуваються, використовуються у виробництві, після чого продукти стають відходами. Такий підхід призвів до надмірного виснаження природних ресурсів, накопичення відходів і деградації екосистем.

Поступово, у другій половині ХХ століття, під впливом енергетичних криз, екологічних катастроф і зростання населення, почала формуватися нова концепція – замкнена або циркулярна економіка. Вона передбачає відновлення матеріалів і енергії в межах одного або кількох виробничих циклів.

Основна відмінність полягає у зміні логіки: від одноразового використання ресурсів до їхнього постійного обороту. Це означає перехід від поняття «споживач» до поняття «користувач», що формує нову культуру екологічно відповідального виробництва і споживання.

1.2. Основні принципи циркулярної економіки

Концепція циркулярної економіки базується на таких принципах:

- проектування без відходів – матеріали повинні бути придатні до повторного використання, ремонту чи переробки;
- подовження життєвого циклу продукту – ремонт, відновлення, модернізація та перепрода;
- використання відновлюваних ресурсів – заміна викопної сировини біоресурсами або вторинними матеріалами;
- регенерація природних систем – відновлення екосистем, ґрунтів і біорізноманіття;
- симбіоз між галузями – обмін ресурсами, коли відходи одного виробництва стають сировиною для іншого.

Завдяки цим принципам формується модель виробництва, у якій економічна вигода поєднується з екологічною доцільністю, а збереження ресурсів стає ключовою умовою розвитку.

1.3. Екологічні, економічні та соціальні переваги переходу до замкнених систем

Впровадження циркулярної економіки має багатовимірні переваги.

Екологічні: скорочення кількості відходів, зменшення обсягів видобутку сировини, зниження викидів парникових газів, збереження біорізноманіття.

Економічні: зменшення витрат на ресурси, зниження залежності від імпорту сировини, створення нових ринків переробки й екодизайну, підвищення конкурентоспроможності.

Соціальні: створення нових робочих місць у сфері ремонту, переробки, сервісу, формування культури відповідального споживання.

Циркулярна економіка формує новий тип взаємодії між суспільством, бізнесом і природою, у якому зростання економіки більше не залежить від збільшення споживання ресурсів.

2. Структура замкнених циклів виробництва

Замкнений цикл виробництва є основною практичною реалізацією концепції циркулярної економіки. Його суть полягає у створенні системи, де продукти, матеріали й енергія безперервно циркулюють, а відходи одних процесів стають ресурсами для інших. Такі системи зменшують споживання первинної сировини, підвищують ресурсну ефективність і мінімізують екологічний тиск на довкілля.

2.1. Основні елементи циркулярного виробництва

Будь-яка модель замкненого циклу складається з кількох взаємопов'язаних компонентів:

- виробництво – створення продукції з урахуванням принципів екодизайну, що забезпечує подальшу придатність до ремонту, розбирання й переробки.;
- споживання – відповідальне використання продукції, орієнтоване на подовження її життєвого циклу;
- збір і сортування – повернення відпрацьованих товарів, матеріалів та упаковки у виробничий обіг;
- перероблення – відновлення матеріалів і компонентів для повторного використання або виготовлення нової продукції;
- розподіл енергії – повторне використання вторинної енергії, що утворюється у процесах згоряння, охолодження або очищення.

Ці елементи утворюють замкнений технологічний ланцюг, у якому кожен етап підпорядкований принципу мінімізації втрат.

2.2. Види матеріальних потоків у замкнених системах

У межах циркулярної моделі розрізняють кілька типів потоків матеріалів:

- біологічні потоки – органічні матеріали, які після використання повертаються у природні екосистеми без шкоди для довкілля (біопаливо, біополімери, харчові відходи, біорозкладна упаковка);
- технічні потоки – матеріали штучного походження, що не піддаються природному розкладанню, але можуть бути багаторазово перероблені (метали, пластмаси, скло, електроніка);
- енергетичні потоки – вторинна енергія, що генерується в процесах переробки або спалювання залишків і використовується для забезпечення виробничих потреб.

Ключовим завданням системи є баланс між біологічними і технічними потоками, що дозволяє зменшити кількість відходів до мінімуму або досягти їх повного відновлення.

2.3. Приклади реалізації замкнених циклів у різних галузях

- металургія – повернення відходів плавлення та шлаків у процес виробництва сталі;
- хімічна промисловість – переробка полімерів у вторинну сировину, утилізація CO₂ для синтезу хімічних продуктів;
- будівництво – використання будівельного сміття як заповнювача для нових матеріалів.
- агропромисловість – компостування органічних відходів і виробництво біогазу;
- електроніка – збирання та відновлення компонентів, повторне використання рідкоземельних металів.

Реалізація замкнених циклів потребує не лише технічних змін, а й створення системи управління матеріальними потоками на рівні підприємств, галузей і територій.

3. Технології перероблення, повторного використання та утилізації ресурсів

Цей напрямок є практичною основою функціонування циркулярної економіки. Головна мета полягає у збереженні максимальної цінності матеріалів, енергії та продуктів якомога довше. Технології повторного використання та перероблення дозволяють зменшити потребу у первинних ресурсах, скоротити кількість відходів і викидів, а також створюють нові економічні можливості у сфері екологічних інновацій.

3.1. Вторинна переробка матеріалів

Вторинна переробка (рециклінг) – це процес повернення використаних матеріалів у виробництво для створення нової продукції. Основні типи переробки:

- механічна – подрібнення, сортування та переплавлення матеріалів (метали, скло, пластмаси);
- хімічна – перетворення полімерів у мономері або інші хімічні сполуки для повторного синтезу;
- термічна – спалювання відходів із виділенням теплової енергії або піроліз органічних речовин;
- біотехнологічна – використання мікроорганізмів або ферментів для розкладання органічних сполук.

Рівень розвитку вторинної переробки в країні часто виступає показником ефективності її екологічної політики. Наприклад, у країнах ЄС частка перероблених побутових відходів перевищує 45 %, тоді як в Україні цей показник поки становить близько 6–7 %.

3.2. Індустріальна симбіозність і каскадне використання ресурсів

Індустріальна симбіозність передбачає взаємодію між підприємствами, коли відходи одного виробництва слугують сировиною для іншого. Така співпраця дозволяє скоротити загальні енергетичні витрати, знизити навантаження на довкілля і підвищити економічну ефективність.

Приклади індустріальної симбіозності:

- використання шлаків металургії в цементному виробництві;
- постачання надлишкового тепла від ТЕЦ до житлових мікрорайонів;
- переробка харчових відходів у біогаз для енергозабезпечення фермерських господарств.

Каскадне використання ресурсів означає багатоступеневе застосування матеріалів або енергії з поступовим переходом від високоякісного до нижчого рівня використання. Наприклад, деревина спочатку використовується для виготовлення меблів, потім у вигляді трісок – для виготовлення плит, а після цього – як біопаливо.

3.3. Приклади успішних практик у промисловості

У Данії промисловий парк Калундборг став світовим прикладом індустріальної симбіозності: тепло від електростанції використовується в теплицях, вода очищається й повторно застосовується, а відходи перетворюються на добрива.

У Німеччині діють програми «Zero Waste Manufacturing», що передбачають повну утилізацію відходів у металургії та хімічній промисловості.

У Японії система «3R» (Reduce, Reuse, Recycle) інтегрована в державну політику сталого виробництва, а рівень утилізації промислових відходів перевищує 95 %.

Ці приклади демонструють, що циркулярна економіка може бути не лише екологічно вигідною, а й економічно ефективною, забезпечуючи сталий розвиток промисловості.

4. Цифрові інструменти та інновації у розвитку циркулярної економіки

Розвиток циркулярної економіки тісно пов'язаний із процесами цифровізації. Сучасні цифрові технології дозволяють ефективно відстежувати рух матеріалів, контролювати ресурси в реальному часі, автоматизувати процеси переробки та створювати прозорі системи обліку. Цифрова трансформація забезпечує новий рівень управління виробництвом, де екологічна ефективність стає інтегрованим показником разом із економічними критеріями.

4.1. Роль цифровізації в управлінні ресурсними потоками

Цифрові технології дозволяють здійснювати моніторинг і оптимізацію матеріальних та енергетичних потоків у режимі реального часу. Використання сенсорів, систем контролю та аналітичних платформ забезпечує точні дані про обсяги споживання, втрати та можливості повторного використання ресурсів.

Основні напрямки застосування цифровізації:

- автоматизований облік матеріальних і енергетичних потоків;
- прогнозування зношування обладнання та продовження терміну його експлуатації;
- виявлення надлишкових ресурсів і потенціалу для їх обміну між підприємствами;
- оптимізація логістики відходів і транспортування вторинної сировини.

4.2. Використання технологій блокчейн, IoT, big data для екологічного моніторингу

Інтернет речей (IoT) дає змогу створювати «розумні» виробничі системи, де кожен пристрій передає дані про своє енергоспоживання, стан і викиди. На основі цих даних формуються аналітичні звіти, що дозволяють визначати джерела втрат і приймати рішення щодо їх зменшення.

Блокчейн-технології забезпечують прозорість і простежуваність усіх етапів життєвого циклу продукту – від видобутку сировини до її повторного використання. Це створює довіру між виробниками, споживачами і регуляторами, а також унеможливорює маніпуляції з даними про утилізацію чи сертифікацію.

Технології big data дозволяють аналізувати великі обсяги інформації про виробництво, постачання, споживання і переробку, що допомагає прогнозувати потреби у ресурсах і будувати ефективні замкнені цикли.

4.3. Підходи до оцінювання ефективності циркулярних процесів

Для оцінки ефективності циркулярної економіки застосовуються кількісні та якісні показники, що характеризують рівень повторного використання ресурсів, зниження відходів і економію енергії. Основні показники:

- коефіцієнт повторного використання матеріалів (Rr):

$$Rr = (M_{\text{повт}} / M_{\text{заг}}) \times 100 \%,$$

де $M_{\text{повт}}$ – маса повторно використаних матеріалів, $M_{\text{заг}}$ – загальна маса матеріалів у виробництві;

- індекс ресурсної ефективності (REI):

$$REI = (Q_{\text{вих}} / Q_{\text{вх}}) \times 100 \%,$$

де $Q_{\text{вх}}$ – обсяг використаних ресурсів, $Q_{\text{вих}}$ – обсяг готової продукції;

Крім кількісних показників, важливими є якісні аспекти – рівень інноваційності технологій, прозорість управління, участь зацікавлених сторін і вплив на соціальну сферу.

5. Перспективи впровадження циркулярної економіки в Україні

Впровадження принципів циркулярної економіки в Україні є важливим напрямом екологічної модернізації виробництва та наближення до європейських стандартів сталого розвитку. Україна поступово переходить від лінійної моделі господарювання до інтегрованих систем управління ресурсами, проте процес потребує глибоких структурних, технологічних і законодавчих змін.

5.1. Стан розвитку і бар'єри для реалізації концепції

Становлення циркулярної економіки в Україні відбувається нерівномірно. У деяких галузях, таких як металургія, агропромисловість і машинобудування, вже застосовуються елементи замкнених циклів – зокрема, утилізація відходів виробництва, повторне використання тепла, очищення стічних вод і повернення матеріалів у виробництво.

Однак загальний рівень впровадження залишається низьким через низку об'єктивних бар'єрів:

- недостатня нормативна база та відсутність єдиної національної стратегії циркулярної економіки;
- низька культура сортування та поводження з відходами серед населення;
- обмежене фінансування інноваційних екопроектів;
- застаріла інфраструктура для збирання та перероблення вторинних ресурсів;
- слабка інтеграція бізнесу, науки та державних структур у питаннях сталого виробництва.

Для подолання цих перешкод необхідна державна підтримка інвестицій у переробну галузь, розвиток системи екологічного оподаткування та створення умов для зеленої економіки.

5.2. Нормативно-правове забезпечення та міжнародний досвід

Європейський Союз визначив циркулярну економіку як одну з основ Європейського зеленого курсу (EU Green Deal). У 2020 році ухвалено новий

План дій з циркулярної економіки, який передбачає підвищення повторного використання матеріалів і зниження споживання первинної сировини.

Україна, як держава-кандидат на вступ до ЄС, узяла на себе зобов'язання гармонізувати своє законодавство з європейськими нормами, зокрема в межах Угоди про асоціацію. Прийняті закони «Про управління відходами» (2023) та «Про обмеження обігу пластикових виробів» є першими кроками до реалізації циркулярної політики.

Поступово розробляються нормативи для системи розширеної відповідальності виробника (EPR) та механізмів екодизайну.

Корисним для України є досвід країн, які успішно впровадили циркулярну модель:

- Нідерланди – національна стратегія переходу до 2050 року передбачає повне заміщення викопної сировини вторинними ресурсами;
- Швеція – економічні стимули для ремонту та повторного використання товарів;
- Фінляндія – державна підтримка інноваційних стартапів у сфері перероблення.

5.3. Пріоритетні напрями розвитку замкнених виробничих систем

Для України перспективними напрями розвитку циркулярної економіки є:

- створення промислових парків замкненого типу з єдиною системою управління ресурсами;
- розвиток галузі вторинної переробки полімерів, паперу, скла та електронних відходів;
- підтримка підприємств, що впроваджують екодизайн та енергоефективні технології;
- впровадження цифрових систем відстеження матеріальних потоків;
- стимулювання наукових досліджень у сфері біотехнологій і зелених інновацій.

Ефективна реалізація цих напрямів можлива лише за умови комплексного підходу, який поєднує законодавчі, фінансові, технологічні та освітні інструменти.

Висновок до лекції

Циркулярна економіка є стратегічною альтернативою традиційній моделі господарювання, яка базується на споживанні та вичерпанні ресурсів. Вона пропонує нову парадигму розвитку, у якій матеріальні та енергетичні потоки циркулюють у замкнених циклах, мінімізуючи утворення відходів і вплив на довкілля.

Для України впровадження цієї моделі відкриває можливості для екологічної модернізації промисловості, зростання енергоефективності та інтеграції у європейський зелений простір. Циркулярна економіка формує основу сталого розвитку, що поєднує економічну вигоду з екологічною безпекою та соціальною відповідальністю.

Контрольні запитання

1. У чому полягає основна відмінність між лінійною та циркулярною моделями економіки?
2. Які історичні передумови сприяли формуванню концепції циркулярної економіки?
3. Назвіть основні принципи циркулярної економіки та поясніть їх зміст.
4. Які екологічні та економічні переваги дає перехід до замкнених виробничих систем?
5. Що таке замкнений цикл виробництва і які його основні елементи?
6. Які типи матеріальних потоків розрізняють у межах циркулярної моделі?
7. Наведіть приклади реалізації замкнених циклів у різних галузях промисловості.
8. Які основні види технологій використовуються для вторинної переробки матеріалів?
9. У чому полягає суть індустріальної симбіозності та каскадного використання ресурсів?
10. Які приклади успішної реалізації циркулярних моделей відомі у світі?
11. Як цифрові технології сприяють управлінню ресурсними потоками у циркулярній економіці?
12. Які цифрові інструменти застосовуються для екологічного моніторингу та обліку ресурсів?
13. Як оцінюється ефективність циркулярних процесів? Назвіть основні показники.
14. Які основні бар'єри існують для впровадження циркулярної економіки в Україні?
15. Назвіть пріоритетні напрями розвитку циркулярної економіки в Україні та роль державної політики у цьому процесі.

ЛЕКЦІЯ 8. Методи мінімізації, перероблення та утилізації відходів

План лекції

1. Класифікація промислових і побутових відходів
 - 1.1. Визначення та основні поняття у сфері поводження з відходами
 - 1.2. Групи відходів за походженням, складом і небезпечністю
 - 1.3. Екологічні наслідки накопичення відходів
2. Принципи мінімізації утворення відходів
 - 2.1. Попередження утворення відходів як пріоритет екологічної політики
 - 2.2. Методи оптимізації технологічних процесів
 - 2.3. Роль екодизайну та чистіших виробничих технологій
3. Сучасні технології перероблення відходів
 - 3.1. Механічні, термічні, хімічні та біотехнологічні методи
 - 3.2. Енергетичне використання відходів (waste-to-energy)
 - 3.3. Вторинне використання матеріалів і замкнені системи ресурсного циклу
4. Методи утилізації та безпечного знешкодження відходів
 - 4.1. Санітарно-технічні методи (захоронення, стабілізація, інкапсуляція)
 - 4.2. Термічні методи (спалювання, газифікація, піроліз)
 - 4.3. Біотехнологічні підходи до знешкодження органічних відходів
5. Економічні та екологічні аспекти управління відходами
 - 5.1. Система розширеної відповідальності виробника (EPR)
 - 5.2. Механізми економічного стимулювання переробки
 - 5.3. Інтегровані підходи до управління відходами в контексті сталого розвитку

1. Класифікація промислових і побутових відходів

Проблема поводження з відходами є однією з найгостріших екологічних проблем сучасності. Зростання обсягів промислового виробництва, урбанізація та збільшення рівня споживання призвели до формування складних потоків твердих, рідких і газоподібних відходів, які становлять серйозну загрозу для довкілля та здоров'я людини. Для ефективного управління ними необхідна чітка класифікація, що враховує їхнє походження, склад, властивості та рівень небезпеки.

1.1. Визначення та основні поняття у сфері поводження з відходами

Відходи – це залишки сировини, матеріалів, напівфабрикатів, енергії або виробів, які втратили свої споживчі властивості в процесі виробництва чи споживання і не можуть бути використані без попередньої переробки.

Поводження з відходами включає їх збирання, перевезення, зберігання, перероблення, утилізацію та знешкодження.

В українському законодавстві поняття «відходи» визначене Законом України «Про управління відходами» (2023), який встановлює ієрархію підходів: попередження утворення, підготовка до повторного використання, перероблення, інше відновлення, видалення.

1.2. Групи відходів за походженням, складом і небезпечністю

Відповідно до міжнародної практики (Базельська конвенція, Європейський каталог відходів), відходи класифікуються за такими ознаками:

За походженням:

- промислові (виробничі, енергетичні, гірничі, хімічні, металургійні);
- побутові (комунальні тверді відходи, харчові, упаковка);
- сільськогосподарські (гній, добрива, рослинні рештки);
- медичні (інфекційні, фармацевтичні);
- будівельні та електронні.

За агрегатним станом: тверді, рідкі, газоподібні, шламові.

За складом: органічні (папір, дерево, пластмаси, харчові відходи) та неорганічні (метали, скло, мінерали).

За рівнем небезпеки:

- I клас – надзвичайно небезпечні (ртуть, пестициди, свинець, азбест);
- II клас – високонебезпечні (кислоти, луги, фармацевтичні відходи);
- III клас – помірно небезпечні (відходи нафтопродуктів, полімери);
- IV клас – малонебезпечні (інертні матеріали, відходи будівництва).

1.3. Екологічні наслідки накопичення відходів

Накопичення відходів призводить до деградації ґрунтів, забруднення поверхневих і підземних вод, забруднення атмосфери метаном і токсичними сполуками, а також створює вогнища вторинного забруднення.

Під час розкладу органічних відходів виділяються парникові гази (CH₄, CO₂, N₂O), що посилюють кліматичні зміни. У промислових зонах формуються так звані «антропогенні ландшафти» — техногенні відвали, золівідвали, шламонакопичувачі, які займають великі площі та створюють ризики аварійних ситуацій.

Крім екологічних, накопичення відходів має й соціально-економічні наслідки – зменшення якості життя населення, втрату земельних ресурсів і підвищення витрат на рекультивацію територій.

2. Принципи мінімізації утворення відходів

Мінімізація відходів є найвищим пріоритетом у сучасній ієрархії поводження з ними. Основна ідея полягає в тому, щоб запобігти їх утворенню ще на стадії проектування продукту або технологічного процесу. Це дає можливість зменшити навантаження на навколишнє середовище, скоротити витрати на зберігання та утилізацію і водночас підвищити ефективність використання ресурсів.

2.1. Попередження утворення відходів як пріоритет екологічної політики

Попередження утворення відходів (waste prevention) означає дії, спрямовані на зниження обсягів відходів до їх фактичного виникнення. До таких заходів належать:

- впровадження маловідходних і безвідходних технологій;
- оптимізація норм витрат сировини та матеріалів;

- заміна токсичних речовин екологічно безпечними аналогами;
- впровадження систем екологічного менеджменту (ISO 14001);
- навчання персоналу принципам ресурсоефективного виробництва.

Реалізація концепції «zero waste» на рівні підприємств дозволяє не лише зменшити кількість відходів, а й покращити фінансові показники за рахунок економії ресурсів.

2.2. Методи оптимізації технологічних процесів

Зниження кількості відходів досягається шляхом удосконалення технологічних параметрів і конструкцій обладнання. Основні напрями оптимізації:

- заміна енергоємних операцій більш ефективними;
- автоматизація контролю витрат сировини та енергії;
- перехід на замкнені цикли водопостачання та рециркуляції повітря;
- використання каталітичних і мембранних процесів для зменшення побічних продуктів;
- застосування чистих технологій (Clean Technologies), які мінімізують утворення шкідливих речовин у процесі виробництва.

Формально ефективність мінімізації можна оцінити за показником коефіцієнта утворення відходів:

$$K_v = M_{\text{відх}} / M_{\text{сир}} \times 100 \%,$$

де K_v - частка відходів від маси використаної сировини;

$M_{\text{відх}}$ - маса відходів;

$M_{\text{сир}}$ - маса використаної сировини.

2.3. Роль екодизайну та чистіших виробничих технологій

Екодизайн (ecodesign) є підходом, який враховує екологічні аспекти вже на стадії створення продукту. Основна мета — мінімізація кількості відходів протягом усього життєвого циклу продукції. Основні принципи екодизайну:

- використання матеріалів, придатних для перероблення або біорозкладу;
- проектування розбірних конструкцій для полегшення ремонту та повторного використання;
- зменшення кількості компонентів і сполук, що ускладнюють утилізацію;
- оптимізація упаковки;
- урахування енергетичних витрат при виробництві, експлуатації й утилізації.

Чистіші виробничі технології (Cleaner Production) передбачають безперервне вдосконалення процесів з урахуванням принципу «зменшити, використати повторно, переробити» (3R – Reduce, Reuse, Recycle). Їх застосування є ключовим кроком до побудови маловідходної економіки та досягнення цілей сталого розвитку.

3. Сучасні технології перероблення відходів

Перероблення відходів є проміжною ланкою між їх мінімізацією та утилізацією. Його мета – повернути відходи у виробничий або споживчий цикл у вигляді вторинної сировини, енергії чи готової продукції. Вибір

технології залежить від складу, агрегатного стану, небезпечності та можливостей економічного використання матеріалів.

3.1. Механічні, термічні, хімічні та біотехнологічні методи

Механічні методи – подрібнення, сортування, пресування, брикетування, сепарація за щільністю чи магнітними властивостями. Вони є основою первинної обробки твердих побутових і промислових відходів.

Термічні методи – спалювання, піроліз, плазмова деструкція. Такі технології дозволяють зменшити обсяг відходів у десятки разів і отримати теплову енергію, однак вимагають суворого контролю за утворенням шкідливих викидів.

Хімічні методи – нейтралізація кислот і лугів, осадження важких металів, хлорування, озонування, екстракція. Ці процеси застосовуються для очищення рідких і небезпечних промислових відходів.

Біотехнологічні методи – використання мікроорганізмів і ферментів для розкладання органічних речовин, біоконверсія органічних відходів у біогаз або біодобрива.

Комбінація різних методів у єдиному технологічному циклі дозволяє досягти високого рівня утилізації навіть складних або змішаних відходів.

3.2. Енергетичне використання відходів (waste-to-energy)

Технології перетворення відходів в енергію є важливим елементом замкненого енергетичного циклу. Вони дозволяють не лише зменшити обсяг захоронення, а й отримати додаткові джерела енергії.

Основні напрямки:

- спалювання з утилізацією тепла (високотемпературне окиснення при 800–1200 °С);
- піроліз – термічний розклад органічних відходів без доступу кисню з утворенням синтез-газу, рідких вуглеводнів і вуглецевого залишку;
- газифікація - часткове окиснення твердих відходів для отримання горючого газу, придатного для енергетичних потреб;
- анаеробне зброджування – біохімічний процес утворення біогазу (метану і CO₂) із харчових, сільськогосподарських або комунальних відходів.

Енергетичне використання відходів дозволяє знизити залежність від викопного палива і скоротити викиди парникових газів, однак потребує високих екологічних стандартів очищення викидів.

3.3. Вторинне використання матеріалів і замкнені системи ресурсного циклу

Вторинне використання відходів (рециклінг) передбачає повернення матеріалів у виробничий процес без втрати їх основних властивостей.

Приклади:

- переплавлення металів;
- повторне використання скла і пластмас;
- перероблення макулатури на папір;
- регенерація масел і мастил;

- використання золи, шлаків і будівельних відходів як заповнювачів у будівництві.

У рамках замкнених систем ресурсного циклу створюються комплекси, де відходи одного підприємства стають сировиною для іншого. Це підхід індустриальної симбіозності, який забезпечує баланс між економічною вигодою і збереженням довкілля.

4. Методи утилізації та безпечного знешкодження відходів

Утилізація відходів є заключним етапом у системі поводження з ними. Її мета – забезпечити безпечне видалення або використання відходів без шкоди для довкілля та здоров'я людини. Вибір конкретного методу залежить від складу, небезпечності та агрегатного стану відходів. У практиці застосовують три основні групи технологій: санітарно-технічні, термічні та біотехнологічні.

4.1. Санітарно-технічні методи (захоронення, стабілізація, інкапсуляція)

Санітарно-технічні методи призначені для остаточного ізолювання відходів, які не підлягають переробці чи утилізації. Найпоширенішим способом є захоронення на полігонах, де відходи розміщуються шарами з ущільненням і пересипанням інертними матеріалами. Вимоги до сучасних полігонів включають наявність гідроізоляційного шару, систем збору фільтрату та дегазації метану.

Стабілізація та інкапсуляція – це методи переведення небезпечних компонентів у хімічно інертну форму. Наприклад, важкі метали перетворюють у нерозчинні солі або включають у цементну матрицю. Ці технології забезпечують тривалу екологічну безпеку при зберіганні токсичних відходів.

4.2. Термічні методи (спалювання, газифікація, піроліз)

Термічна утилізація використовується для значного зменшення об'єму та маси відходів і одночасного отримання теплової енергії.

Спалювання – повне окиснення органічних речовин при температурі 800–1200 °С. При правильному контролі процесу та очищенні димових газів воно забезпечує високий ступінь знешкодження, проте вимагає систем фільтрації для запобігання утворенню діоксинів і фуранів.

Газифікація – часткове окиснення відходів з утворенням горючого газу (синтез-газу), який може бути використаний у когенераційних установках.

Піроліз – розкладання органічних матеріалів без доступу кисню. Дає змогу отримати паливний газ, рідке паливо (піролізну олію) і вуглецевий залишок. Перевагою є менша кількість викидів, ніж при прямому спалюванні.

4.3. Біотехнологічні підходи до знешкодження органічних відходів

Біотехнологічні методи базуються на використанні природних процесів розкладання органічних речовин під дією мікроорганізмів.

Компостування – аеробне біологічне розкладання органічних відходів (харчових, сільськогосподарських, деревних) з утворенням компосту – добрива, багатого на гумус.

Анаеробне зброджування – безкисневий процес утворення біогазу (СН₄ і СО₂), що може бути використаний як енергетичне паливо.

Біоремедіація – очищення ґрунтів і води за допомогою спеціальних мікроорганізмів, які здатні розкласти нафтопродукти, пестициди, феноли та інші забруднювачі.

Біотехнологічні рішення є екологічно безпечними, оскільки вони не утворюють токсичних побічних продуктів і сприяють природному кругообігу речовин.

5. Економічні та екологічні аспекти управління відходами

Система управління відходами повинна забезпечувати не лише екологічну безпеку, а й економічну доцільність. Перехід від моделі «збирання – зберігання – захоронення» до моделі «запобігання – перероблення – відновлення» передбачає інтеграцію екологічних та економічних механізмів, які стимулюють підприємства до впровадження ефективних природоохоронних технологій.

5.1. Система розширеної відповідальності виробника (EPR)

Розширена відповідальність виробника (Extended Producer Responsibility, EPR) – це підхід, за якого виробник або імпортер несе відповідальність за весь життєвий цикл своєї продукції, включно з етапом її утилізації після використання.

Основні інструменти системи EPR:

- створення та фінансування інфраструктури збору відходів (упаковка, батарейки, електроніка, автошини тощо);
- встановлення квот на обов'язкове перероблення певних категорій матеріалів;
- сертифікація підприємств, що займаються збором і переробленням;
- державний контроль за виконанням норм повторного використання.

Впровадження EPR в Україні передбачене Законом України «Про управління відходами» (2023) і є ключовою умовою гармонізації із законодавством ЄС.

5.2. Механізми економічного стимулювання переробки

Для заохочення підприємств до впровадження маловідходних технологій використовуються різні економічні інструменти:

- екологічне оподаткування – встановлення платежів за розміщення відходів, забруднення повітря та води;
- пільгове кредитування та державні програми підтримки підприємств, які впроваджують «зелені» технології;
- депозитно-заставна система – повернення частини вартості товару після здачі його на переробку (пляшки, акумулятори, електроніка);
- торгівля квотами на утворення чи утилізацію відходів;
- зелені інвестиції – спрямування коштів у проекти з утилізації, рекуперації тепла, виробництва біопалива.

Такі механізми сприяють створенню ринку вторинних ресурсів і формують економічну мотивацію для розвитку циркулярної економіки.

5.3. Інтегровані підходи до управління відходами в контексті сталого розвитку

Інтегроване управління відходами (Integrated Waste Management, IWM) – це система, яка охоплює всі етапи життєвого циклу відходів: від запобігання утворенню до їх остаточного видалення. Основні принципи IWM:

- пріоритет запобігання утворенню відходів;
- забезпечення повторного використання і перероблення;
- зменшення обсягів захоронення;
- участь усіх зацікавлених сторін (держава, бізнес, громада);
- застосування цифрових технологій моніторингу (IoT, GIS, big data).

Інтегровані підходи базуються на принципі екологічного менеджменту ISO 14001 та на засадах сталого розвитку, визначених ООН у Цілі 12 «Відповідальне споживання і виробництво».

Висновок до лекції

Сучасна система управління відходами є важливою складовою екологічної політики будь-якої держави. Її ефективність визначається не лише технічним рівнем утилізації, а й наявністю чітких економічних і законодавчих механізмів.

Мінімізація, перероблення та утилізація відходів дозволяють зменшити тиск на екосистеми, підвищити ресурсоефективність та створити нові економічні можливості в рамках циркулярної економіки.

В Україні перехід до таких підходів є необхідною умовою для досягнення сталого розвитку, інтеграції у європейський екологічний простір і підвищення екологічної безпеки населення.

Контрольні запитання

1. Що таке відходи і як визначається поняття «поводження з відходами» згідно із законодавством України?
2. Які основні критерії класифікації відходів використовуються у міжнародній практиці?
3. Які екологічні наслідки має накопичення промислових і побутових відходів?
4. У чому полягає суть принципу мінімізації утворення відходів?
5. Які основні методи попередження утворення відходів на підприємствах?
6. Як екодизайн впливає на скорочення кількості відходів у життєвому циклі продукції?
7. Назвіть основні види сучасних технологій перероблення відходів.
8. У чому полягає відмінність між термічними, хімічними та біотехнологічними методами перероблення?
9. Які переваги має використання технологій «waste-to-energy»?
10. Що таке вторинне використання матеріалів і як воно реалізується в промисловості?

11. Які основні принципи лежать в основі санітарно-технічних методів знешкодження відходів?
12. У чому полягає різниця між спалюванням, газифікацією та піролізом відходів?
13. Як працюють біотехнологічні методи утилізації відходів, такі як компостування і біоремедіація?
14. Що таке система розширеної відповідальності виробника (EPR) і яку роль вона відіграє у сфері управління відходами?
15. Які основні напрями розвитку інтегрованої системи управління відходами в Україні та світі?