

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ЗАХИСТУ РОСЛИН БІОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕКОЛОГІЇ**

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету
Захисту рослин біотехнології та
екології

Юлія КОЛОМІЄЦЬ

(підпис)

« ____ » _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
Екології агросфери та екологічного
контролю

Олена НАУМОВСЬКА

(підпис)

« ____ » _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему: « Екологічний аналіз життєвого циклу оптоволокна »

Спеціальність – 101 «Екологія»

Освітньо-професійна програма «Екологія»

Гарант освітньої програми
докт. пед. наук, професор

(підпис)

Володимир БОГОЛЮБОВ

Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи
доц., к. с.-г.н.

(підпис)

Олена НАУМОВСЬКА

Виконала

(підпис)

Анастасія ЗАГОРОДНЯ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ЗАХИСТУ РОСЛИН БІОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕКОЛОГІЇ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Екології агросфери та екологічного контролю,
канд. с.-г. наук, доцент
Олена НАУМОВСЬКА
_____ (підпис)

«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Загородній Анастасії Яківні

Спеціальність: 101 – «Екологія»

Освітньо – професійна програма: «Еколог»

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи «Екологічний аналіз життєвого циклу оптоволокна»

затверджена наказом від «27» жовтня 2025 року №2537 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру «29» травня 2026 р.

Перелік питань, що підлягають дослідженню: екологізація логістично – експлуатаційних етапів інфраструктури, обґрунтування застосування безпечних полімерних оболонок та оптимізація рециклінгу композитних відходів волоконно – оптичних ліній зв'язку.

Дата видачі завдання «26» вересня 2025 р.

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

Олена НАУМОВСЬКА

Завдання взяла до виконання

Анастасія ЗАГОРОДНЯ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна бакалаврська робота викладена на **42 сторінках**, містить **6 таблиць, 8 рисунків та 21 джерел** використаної літератури.

Актуальність теми. Стрімка цифровізація та масштабне розгортання інфраструктури електронних комунікацій зумовили виникнення нових специфічних викликів у сфері екологічної безпеки. Специфіка екологічного менеджменту в телекомунікаційному секторі полягає у необхідності комплексного управління складними матеріальними потоками високотехнологічної продукції та оцінюванні прихованого екологічного сліду, який супроводжує всі етапи життєвого циклу пасивної мережевої інфраструктури. Багатокомпонентна структура сучасних кабелів, де скляні нитки міцно з'єднані з гідрофобними гелями, металевою бронею та стійкими полімерними захисними оболонками, унеможлиблює просту механічну переробку. Це призводить до депонування відходів на звалищах з тривалим періодом їх біологічної деградації, що створює потенційну загрозу довгострокового забруднення навколишнього середовища мікропластиком та важкими металами.

Мета дослідження: Комплексне оцінювання екологічного сліду та антропогенного навантаження на всіх етапах життєвого циклу волоконно-оптичної інфраструктури та розробка проєктно-технологічних рішень щодо його мінімізації та екологізації.

Завдання дослідження:

1. Дослідити науково-методологічні основи та фази процедури оцінювання життєвого циклу (LCA) продукції за стандартами ISO 14040/14044;
2. Проаналізувати матеріально-енергетичний баланс, технологічну специфіку та вуглецевий слід етапу видобутку сировини й промислового виробництва оптичного волокна;

3. Здійснити порівняльну техніко-екологічну характеристику впливу траншейного та безтраншейного (ГНБ) методів прокладання кабелю на рослинно-грунтовий покрив та підземні горизонти;
4. Обґрунтувати напрямки екологізації пасивної інфраструктури шляхом застосування безпечних безгалогенних і біорозкладних полімерних матеріалів для оболонок кабелів;
5. Оптимізувати технологічні рішення щодо тристадійної кріогенно-механічної переробки та рециклінгу композитних відходів волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) для їхнього повторного використання.

Об'єкт дослідження: Процеси екологізації логістично-експлуатаційних етапів інфраструктури, впровадження безгалогенних і біорозкладних матеріалів для оболонок кабелів та технологія кріогенно-механічного рециклінгу композитних відходів волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Предмет дослідження: Кількісні та якісні параметри екологічного сліду ВОЛЗ: енергомісткість виробництва преформ, емісія забруднюючих речовин, площі механічного руйнування ґрунтів, терміни біологічного розкладу полімерів та показники виходу очищеного кварцового скрапу при рециклінгу.

Основні наукові та практичні результати:

6. **Аналіз фаз ОЖЦ та регулювання:** Систематизовано чотири послідовні фази ОЖЦ (визначення мети, інвентаризаційний аналіз (LCI), оцінювання впливу (LCIA) та інтерпретація) для ВОЛЗ. Досліджено адаптацію українського законодавства до Директиви 2011/65/EU та механізми розширеної відповідальності виробника, які стимулюють перехід на безсвинцеві припої та оболонки без шкідливих пластифікаторів.
7. **Оцінка виробничого та логістичного етапів:** Встановлено, що найбільша частка вуглецевого сліду формується на стадії високотемпературного хімічного осадження з парової фази (MCVD,

OVD, VAD) та витягування світловода при 2000 °C через високу енергомісткість процесів. Доведено, що превентивний моніторинг пасивної інфраструктури подовжує термін служби систем і знижує обсяги генерації відходів.

8. **Порівняння методів будівництва:** Здійснено техніко-екологічне зіставлення методів прокладання кабелю. Визначено, що траншейний метод спричиняє механічне руйнування профілю ґрунту з тривалим терміном відновлення (3–5 років), тоді як безтраншейний метод (ГНБ) мінімізує поверхневі порушення (термін відновлення до 1 року), але потребує контролю за утилізацією бурового бентонітового розчину для запобігання забрудненню підземних горизонтів.
9. **Екологізація та рециклінг матеріалів:** Обґрунтовано заміну токсичних ПВХ-оболонок на безгалогенні компаунди класу LSZH та біорозкладні полімери (PLA) на основі крохмалю, що повністю усуває ризики виділення токсичного хлороводню (HCl) та діоксинів при термічних інцидентах. Оптимізовано тристадійну матеріально-технологічну схему кріогенно-механічного рециклінгу (із руйнуванням матеріалу за допомогою рідкого азоту при -196 °C та сепарацією), яка забезпечує розділення відходів на чисті полімерні гранули та кварцовий скрап. Отриманий очищений кварцовий скрап (фракція 10–100 мкм) запропоновано як активний пуцолановий наповнювач для виробництва високоміцного фібробетону у будівництві (підвищення міцності на стиск на 15–20%), що знижує рівень фінального захоронення кабельних залишків.

Ключові слова: оцінювання життєвого циклу (LCA), волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ), екологічний слід, компаунди LSZH, біополімер PLA, горизонтально-направлене буріння (ГНБ), кріогенно-механічний рециклінг, фібробетон, розширена відповідальність виробника.

Зміст	
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1.....	10
НАУКОВО – МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ	10
1.1.Методологія оцінювання життєвого циклу (LCA) продукції за стандартами ISO 14040/14044	10
1.2. Специфіка застосування екологічного менеджменту в галузі телекомунікацій. 12	
1.3 Нормативно – правове регулювання екологічної безпеки цифрової інфраструктури в Україні.....	14
РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕТАПІВ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ОПТОВОЛОКОННОЇ ПРОДУКЦІЇ.....	18
2.2. Екологічні наслідки транспортування, прокладання та будівництва волоконно – оптичних ліній зв’язку	20
2.3. Екологічні аспекти експлуатації пасивної інфраструктури	24
2.4. Проблеми поводження з відходами та управління кінцевою стадією життєвого циклу оптичних кабелів	27
РОЗДІЛ 3.....	32
ПРОЄКТНО – ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ З ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВОЛОКОННО – ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ.....	32
3.1. Оптимізація логістичних та експлуатаційних етапів пасивної інфраструктури	32
3.2 Обґрунтування вибору новітніх екологічно безпечних матеріалів для оболонок кабельної продукції	34
3.3. Технологічні методи ефективної переробки та рециклінгу композитних відходів волоконно – оптичних ліній зв’язку	35
ВИСНОВОК	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	40

ВСТУП

Актуальність теми. Масштабне розгортання пасивної інфраструктури електронних комунікацій та стрімка цифровізація економіки зумовили виникнення нових специфічних викликів у сфері екологічної безпеки. Специфіка екологічного менеджменту в телекомунікаційному секторі полягає у необхідності комплексного управління складними матеріальними потоками високотехнологічної продукції та оцінюванні прихованого екологічного сліду, який супроводжує всі етапи життєвого циклу волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ).

Сучасні оптичні кабелі мають складну гетерогенну структуру, де скляні нитки міцно з'єднані з гідрофобними гелями, металевою бронею та стійкими полімерними захисними оболонками. Це унеможливорює їхню просту механічну переробку й призводить до накопичення списаної кабельної продукції на полігонах твердих побутових відходів. Зважаючи на тривалий період біологічного розкладу полімерів, депонування таких відходів створює потенційну загрозу довгострокового забруднення екосистем мікропластиком та важкими металами.

У зв'язку з цим виникає нагальна потреба в імплементації міжнародної методології оцінювання життєвого циклу (LCA) за стандартами ISO 14040/14044 для оптимізації екологічних параметрів ВОЛЗ, обґрунтування переходу на безпечні безгалогенні й біорозкладні компаунди, а також впровадження новітніх технологій кріогенно-механічного рециклінгу композитних кабельних залишків.

Мета дослідження: комплексне оцінювання екологічного сліду й антропогенного навантаження на всіх етапах життєвого циклу волоконно-оптичної інфраструктури та розробка проєктно-технологічних рішень щодо його мінімізації.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі **завдання:**

1. Дослідити науково-методологічні засади та фази процедури оцінювання життєвого циклу (LCA) продукції за стандартами ISO 14040/14044;
2. Проаналізувати матеріально-енергетичний баланс та вуглецевий слід етапу видобутку сировини й високотемпературного промислового виробництва оптичного волокна;
3. Здійснити порівняльну техніко-екологічну характеристику впливу традиційного траншейного та безтраншейного методів прокладання кабелю на компоненти довкілля;
4. Обґрунтувати напрямки екологізації інфраструктури через застосування безпечних безгалогенних і біорозкладних полімерних матеріалів для захисних оболонок кабелів;
5. Оптимізувати технологічні рішення щодо тристадійної кріогенно-механічної переробки та рециклінгу композитних відходів ВОЛЗ для їхнього повторного використання у будівництві.

Об'єкт дослідження: процеси екологізації логістично-експлуатаційних етапів інфраструктури, впровадження безгалогенних і біорозкладних матеріалів для оболонок кабелів та технологія кріогенно-механічного рециклінгу композитних відходів волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Предмет дослідження: кількісні та якісні параметри екологічного сліду ВОЛЗ: енергомісткість процесів синтезу преформ, емісія забруднюючих речовин, площі механічного руйнування ґрунтів, терміни біологічного розкладу полімерних оболонок та показники виходу очищеного кварцового скрапу при кріогенному рециклінгу.

РОЗДІЛ 1

НАУКОВО – МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

1.1.Методологія оцінювання життєвого циклу (LCA) продукції за стандартами ISO 14040/14044

В умовах інтенсифікації антропогенного тиску на біосферу та глобалізації екологічних криз, особливої актуальності набуває розробка та впровадження об'єктивних інструментів оцінювання екологічної безпеки виробничих систем. У сучасній міжнародній практиці екологічного менеджменту найбільш комплексним і фундаментальним підходом визнано методологію оцінювання життєвого циклу (ОЖЦ; англ. LCIA - Life Cycle Assessment, LCA). Дана концепція базується на комплексному аналізі матеріальних та енергетичних потоків на всіх етапах існування продукту – від придбання сировини чи її виготовлення з природних ресурсів до остаточного видалення, що дозволяє уникнути суб'єктивізму та суб'єктивного перенесення екологічного навантаження з одного етапу виробництва на інший. Методологічні засади цього підходу зафіксовані у стандартах ISO 14040 та ISO 14044, які в Україні діють як ДСТУ ISO 14040:2013 та ДСТУ ISO 14044:2013.

Процедура ОЖЦ є ітераційним процесом і чітко типізується за чотирма послідовними фазами, кожна з яких виконує специфічну аналітичну функцію в загальній структурі дослідження.

Перша фаза полягає у визначенні мети та меж систем. На цьому етапі дослідник встановлює просторово – часові рамки аналізу, обґрунтовує доцільність дослідження та визначає цільову аудиторію. Ключовим елементом цієї фази є вибір функціональної одиниці, яка виступає математичним еталоном

для кількісного виміру всіх вхідних і вихідних потоків речовин та енергії. Правильне окреслення меж системи дозволяє чітко диференціювати прямі та опосередковані чинники впливу на довкілля.

Друга фаза охоплює інвентаризаційний аналіз життєвого циклу. Цей етап є найбільш трудомістким, оскільки пов'язаний з безпосереднім збором, систематизацією та верифікацією первинних емпіричних даних. У межах інвентаризаційного аналізування формуються детальні балансові моделі, де кількісно фіксуються вхідні потоки, такі як споживання відновних і невідновних природних ресурсів, сировинних компонентів, палива та води. Також вихідні потоки, що включають емісію забруднюючих речовин в атмосферне повітря, скиди у водні об'єкти та генерацію твердих і специфічних відходів виробництва.

Третя фаза є оцінюванням впливу протягом життєвого циклу, під час якої зібрані інвентаризаційні дані трансформуються у кількісні показники екологічних наслідків. Кількісні параметри викидів класифікуються та моделюються за екологічними еквівалентами в межах конкретних категорій впливу. До базових категорій належить потенціал глобального потепління, що вимірюється в кілограмах еквівалента вуглецю діоксиду, потенціал підкислення ґрунтових комплексів, потенціал евтрофікації поверхневих водойм, а також показники хронічної токсичності для людини та біотичних компонентів екосистем.

Четвертий етап – інтерпретація результатів життєвого циклу, де проводиться систематичне порівняння та критичний аналіз даних, отриманих на етапах інвентаризації та оцінки впливу. Головною метою цього етапу є виявлення так званих «екологічних гарячих точок», тобто тих стадій життєвого циклу або технічних процесів, які роблять найбільший негативний внесок у деградацію навколишнього середовища. На основі інтерпретації формуються науково обґрунтовані висновки та розробляються управлінські рішення, спрямовані на екологізацію виробничої системи та оптимізацію використання ресурсів підприємства.



Рис. 1.1. Обов'язкові та додаткові елементи оцінювання впливу протягом життєвого циклу (ОВЖЦ) згідно з ISO 14044

1.2. Специфіка застосування екологічного менеджменту в галузі телекомунікацій

Телекомунікаційна галузь та інфраструктура електронних комунікацій тривалий час розглядалися в науковій літературі як екологічно нейтральні сектори порівняно з традиційними галузями важкої промисловості. Проте стрімка цифровізація економіки та масштабне розгортання волоконно – оптичних ліній зв'язку зумовили виникнення нових специфічних викликів у сфері екологічної безпеки. Специфіка екологічного менеджменту в телекомунікаційному секторі полягає у необхідності комплексного управління складними матеріальними потоками високотехнологічної продукції та

оцінювання прихованого екологічного сліду, який супроводжує всі етапи життєвого циклу пасивної мережевої інфраструктури.

Важливим інструментом екологічного менеджменту на сучасному етапі є концепція екологічного сліду, яка дозволяє оцінити сумарний тиск підприємства на природні екосистеми шляхом вимірювання площі біологічно продуктивної території для забезпечення його ресурсами та асиміляції відходів. Для телекомунікаційних компаній цей показник інтегрує не лише пряме споживання електричної енергії активним обладнанням, а й непрямі витрати ресурсів на виробництво, транспортування, прокладання та подальшу експлуатацію оптичних кабелів. Впровадження систем екологічного менеджменту відповідно до стандартів серії ISO14000 вимагає від підприємств зв'язку детального моніторингу матеріальних потоків та переходу до стратегії збалансованого природокористування.

Основне екологічне навантаження в контексті пасивної телекомунікаційної інфраструктури локалізоване на етапах виробництва оптичного волокна та кінцевого поводження з кабельною продукцією, що вийшла з експлуатації. Процес виготовлення оптичного волокна назується на високотемпературному плавленні надчистого кварцового скла, що супроводжується значною енергомісткістю та відповідними викидами парникових газів. Водночас етап утилізації відходів волоконною – оптичних ліній зв'язку ускладняється багатокомпонентною структурою сучасних кабелів, де скляні нитки міцно з'єднані з гідрофобними гелями, металевою бронею та стійкими полімерними захисними оборочками. Це унеможливорює просту механічну переробку розробки спеціалізованих технологій сепарації матеріалів, що робить проблему управління відходами цифрової інфраструктури одним із пріоритетних завдань екологічного менеджменту галузі.

1.3 Нормативно – правове регулювання екологічної безпеки цифрової інфраструктури в Україні

Формування ефективної системи нормативно – правового регулювання екологічної безпеки цифрової інфраструктури в Україні відбувається в контексті глибокої євроінтеграційної трансформації національного природоохоронного законодавства. Угода про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, ратифікована у 2014 році, передбачає поступове наближення вітчизняних регламентів, екологічних стандартів та економічних інструментів до *acquis* ЄС у сфері охорони довкілля. Для телекомунікаційної галузі, зокрема для виробників та експлуатантів волоконно – оптичних ліній зв'язку, це означає необхідність перегляду підходів до управління матеріальними потоками на всіх етапах життєвого циклу продукції – від проєктування та закупівлі сировини до поводження з відходами, що утворюються після списання кабельної інфраструктури.

Ключовим вектором адаптації українського законодавства до європейських норм у контексті екологічної безпеки електронного та електротехнічного обладнання, до якого належать і компоненти волоконно – оптичних систем, є імплементація вимог Директиви 2011/65/EU про обмеження використання деяких небезпечних речовин в електричному та електронному обладнанні (RoHS). Це директива встановлює гранично допустимі концентрації таких високотоксичних елементів, як свинець ртуть, кадмій шестивалентний хром, пролібромовані дифенілові ефіри, у матеріалах, що використовуються для виготовлення кабельної продукції, з'єднувачів, термозбіжних муфт та іншого пасивного обладнання телекомунікаційних мереж. В Україні відповідні вимоги впроваджено через. Технічний регламент щодо обмеження використання деяких небезпечних речовин в електричному обладнанні, затверджений постановою

Кабінету Міністрів України, який зобов'язує виробників та імпортерів забезпечувати відповідність продукції встановленим екологічним критеріям. Для волоконно – оптичних кабелів це означає необхідність переходу на без свинцеві припої для металізованих елементів, використання полімерних оболонок без галогенвмісних складів гідрофобних гелів, які не містять шкідливих пластифікаторів та біоцидних добавок.

Паралельно з технічним нормуванням складу телекомунікаційної продукції в Україні активно розвивається система економічних механізмів стимулювання екологізації виробництва та поводження з відходами, що безпосередньо впливає на вартісні показники життєвого циклу оптоволоконних систем. Базовим інструментом лишається екологічний податок, передбачений Податковим кодексом України, який справляється за розміщення відходів у спеціально відведених місцях чи об'єктах, включаючи відходи кабельної продукції, що втратили споживчі властивості. Ставки цього продукту диференціюються залежно від класу небезпеки відходів та дотримання природоохоронного законодавства, що створює фінансовий стимул для підприємств телекомунікаційної галузі впроваджувати технології селективного збирання, демонтажу та попередньої обробки списаних оптичних кабелів з метою зменшення обсягів остаточного захоронення.

Значно потужнішим важелем, наближення якого до європейських стандартів є пріоритетом екологічної політики України, є концепція розширеної відповідальності виробника, що впроваджується відповідно до Закону України, «Про відходи» та Директиви ЄС 2008/98/ЕС про відходи. Механізм розширеної відповідальності виробника покладає на виробника або імпортера телекомунікаційного обладнання, включаючи оптичні кабелі, не лише обов'язок забезпечити екологічну безпечність виробництва, а й фінансову та організаційну відповідальність за збирання, транспортування, повторне використання, рециклінг та екологічно безпечне видалення продукції після завершення терміну її експлуатації. Для волоконно – оптичних кабелів, складний композитний

складний композитний склад який ускладнює процеси механічної сепарації скла від полімерної матриці, запровадження розширеної відповідальності виробника стимулює виробників до розробки так званих конституцій, орієнтованих на переробку, які передбачають можливість легкого розділення скляного волокна, металевих елементів броні та поліетиленових або полівінілхлоридних оболонок без використання агресивних хімічних реагентів. Додатковим економічним стимулом, передбаченим стимулом, передбаченням чинним українським законодавством та узгодженим із практикою Європейського Союзу, є система екологічного оподаткування викидів вуглекислого газу про експлуатації пасивних волоконно – оптичних ліній зв'язку є мінімальним, опосередкований вуглецевий слід виробництва оптичного волокна, яке потребує значних витрат електроенергії для високотемпературного плавлення кварцових заготовок та роботи хімічних реакторів осадження парової фази, підпадає під дію цього податку. Таким чином, підвищенням ставок екологічного податку на викиди вуглекислого газу або запровадження механізмів вуглецевого коригування на імпорту продукцію створює додаткові фінансові передумови для вітчизняних виробників кабельної продукції інвестувати в енергоефективні технології виробництва оптоволокон, зокрема в модернізацію електричних печей для плавлення систем рекуперації тепла на підприємствах.

Отже система нормативно – правового регулювання екологічної безпеки цифрової інфраструктури в Україні набуває ознак комплексності, поєднуючи технічні обмеження на вміст небезпечних речовин у кабельній продукції, економічні стимули для зменшення обсягів захоронення відходів через механізм розширеної відповідальності виробника та фіскальні важелі впливу на вуглецевий слід виробничих процесів. Адаптація українського законодавства до відповідних директив Європейського Союзу створює методологічне підґрунтя для проведення повноцінних оцінок життєвого циклу волоконно – оптичної продукції в національному контексті. Водночас практична реалізація цих норм стикається з викликами, пов'язаним з недостатньою розвиненістю

інфраструктури переробки складних композитних відходів, нерівномірним застосуванням екологічних стандартів на різних підприємствах методик розрахунку екологічного сліду саме для волоконно – оптичних виробів, що обумовлює актуальність подальших наукових досліджень у цьому напрямі.

РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕТАПІВ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ОПТОВОЛОКОННОЇ ПРОДУКЦІЇ

2.1. Матеріально – енергетичний баланс та вуглецевий слід етапу видобутку сировини й виробництва

Аналіз початкового етапу життєвого циклу волоконно - оптичного кабелю за методологією LCA вимагає детального дослідження ланцюжка «вхідних» ресурсів та «вихідних екологічних деструкцій, починаючи від вилучення мінеральної сировини й закінчуючи одержанням готового виробу. Історико – технічні передумови розвитку оптичних мереж свідчать, що головною вимогою до конструкцій світлодіодів є мінімізація оптичного загасання, що досягається виключно через використання надчистого кварцового скла (SiO_2).

Основним сировинним джерелом для цього є високоякісні кварцові піски, які проходять глибоке збагачення та хімічне очищення. Проте безпосередній інвентаризаційний аналіз (LCA) показує, що екологічний слід етапу видобутку є відносно малим порівняно з етапом промислового синтезу та витягування волокна.

Головне екологічне навантаження та формування потенціалу глобального потепління (GWP) зосереджені на стадії виробництва оптичних преформ. Сучасна промисловість використовує високотехнологічні методи хімічного осадження з парової фази, зокрема процеси MCVD (рис. 2.1.), OVD (рис. 2.2.) або VAD (рис. 2.3.).

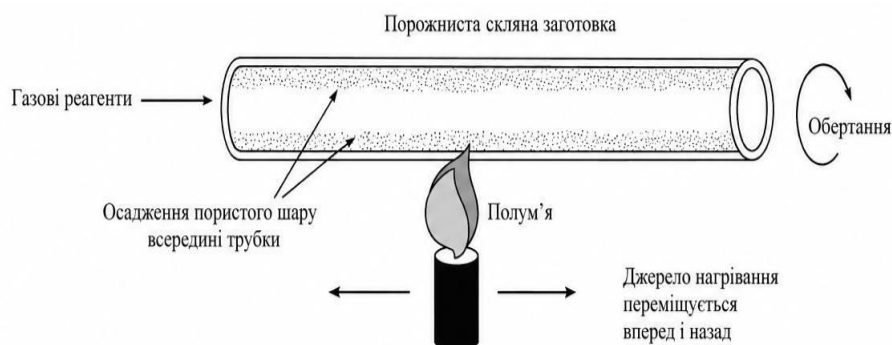


Рис. 2.1. Схема методу модифікованого хімічного осадження з парової вази (MCVD)

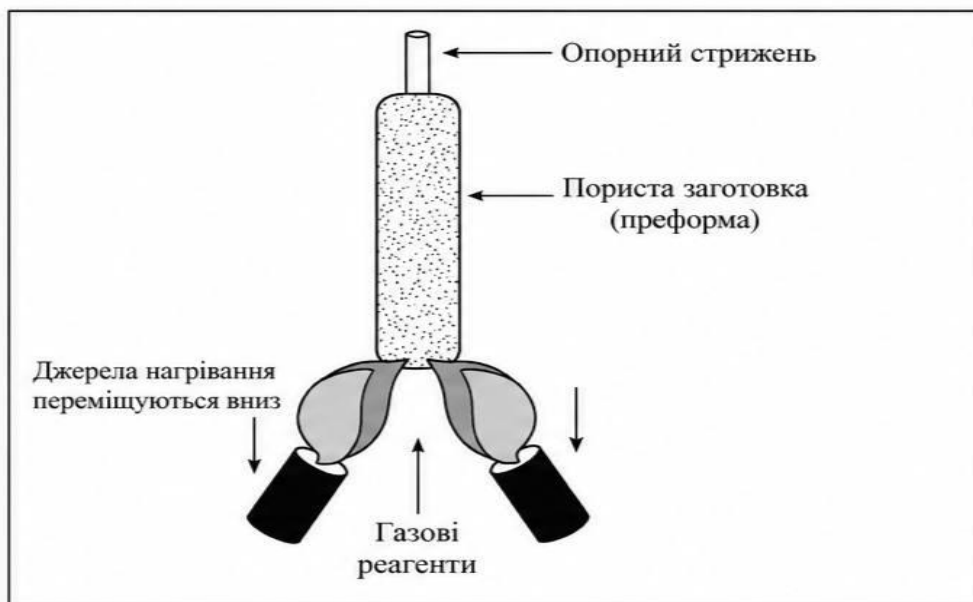


Рис. 2.2. Схема методу зовнішнього осадження з парової фази (OVD)

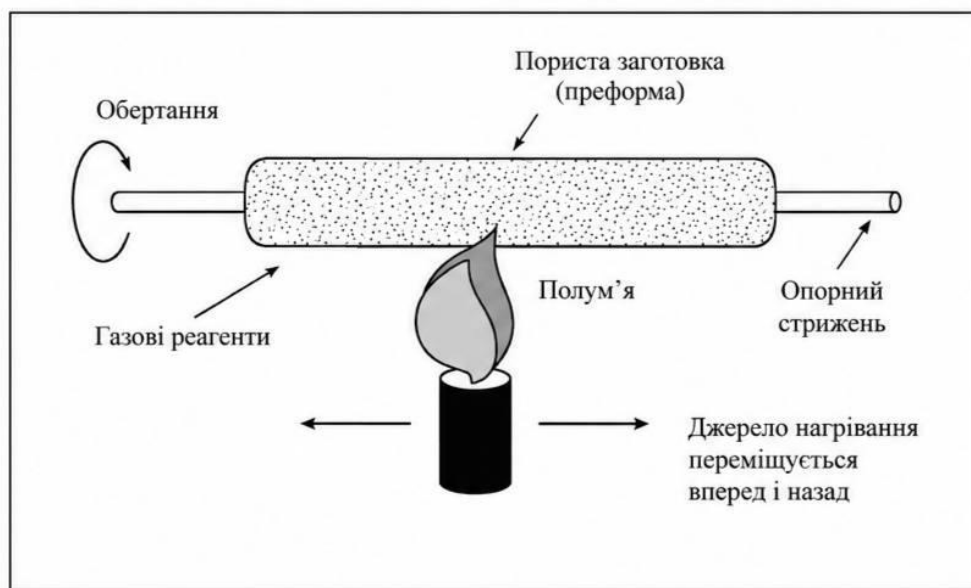


Рис. 2.3 Схема методу осьового осадження з парової фази (VAD)

Технологічна специфіка цих процесів полягає у проведенні хімічних реакцій між тетраходним кремнієм (SiCl_4) та киснем усередині кварцових заготовок при екстремально високим температурах, що досягають 1600 – 2000 °C.

Для забезпечення таких температурних режимів промисловості індукційній та газовій печі споживають значні обсяги електричної. Кількісні розрахунки енергетичного балансу показують, що питомі витрати енергії на плавлення та осадження речовини є найвищими. Це зумовлює суттєвий опосередкований екологічний слід, оскільки генерація такої кількості електроенергії супроводжується значними викидами діоксиду вуглецю (CO_2), оксидів азоту (NO_x) та сірки (SO_x) в атмосферне повітря спалювальними установками ТЕС.

Другою критичною стадією виробничого етапу є витягування світловода на спеціалізованих вежах. Готова преформа розігрівається у графітових печах опору до температури близько 2000 °C, за якої скло набуває пластичності, придатної для каліброваного витягування нитки діаметром 125 мкм. Цей процес є безперервним та високоенергомістким. Додатковим аспектом екологічного впливу на цій стадії є нанесення первинного захисного покриття (епоксиакрилатних смол), яке піддається ультрафіолетовому затвердінню, що супроводжується виділенням незначних обсягів легких органічних сполук (ЛОС).

Таким чином, етап видобутку сировини та промислового виробництва оптоволоконна характеризується високою ресурсо – та енергомісткістю, утворюючи основну частку, вуглецевого сліду в загальній структурі життєвого циклу пасивної інфраструктури лінії зв'язку.

2.2. Екологічні наслідки транспортування, прокладання та будівництва волоконно – оптичних ліній зв'язку

Після завершення виробничого етапу та формування готового оптичного кабелю настає фаза його транспортування до місця прокладання, яка хоча й має менший внесок у загальний вуглецевий слід порівняно з виробництвом, однак

створює додаткове навантаження, пов'язане зі спалюванням моторного палива автотранспортом. Інвентаризаційний аналіз (LCI) цього етапу фіксує викиди вуглекислого газу, оксидів азоту, оксидів вуглецю, летких органічних сполук та твердих частинок, які утворюються в результаті роботи двигунів внутрішнього згоряння вантажних автомобілів. Потім показники викидів залежать від відстані транспортування, вантажопідйомності транспортного засобу, типу пального (дизельне пальне або бензин), а також від дорожніх умов. В Україні, де значна частина оптичних кабелів імпортується від європейських або азійських виробників, відстань транспортування може сягати кількох тисяч кілометрів, що зумовлює формування помірного опосередкованого екологічного сліду в категоріях потенціалу глобального потепління та підкислення атмосферних опадів.

Основним етапом, що формує найбільш помітні локальні екологічні порушення в межах життєвого циклу оптоволоконної продукції, є процес будівництва або прокладання волоконно – оптичних ліній зв'язку. У сучасній практиці телекомунікаційного будівництва використовують дві основні технологічні схеми: традиційний траншейний метод (рис.2.4) , що передбачає розкриття ґрунтового профілю на всю глибину закладання кабелю, та безтраншейний метод горизонтально (рис. 2.5.) – направлено буріння (ГНБ), який мінімізує порушення земної поверхні. Задля повноти аналізу в цьому дослідженні розглянуто обидва методи, оскільки вибір конкретної технології залежить від типу території (відкрита місцевість, урбанізоване середовище, болотистості ґрунти, водні перешкоди) та економічних чинників.

Традиційний траншейний метод, прокладання передбачає механічне розкриття ґрунту за допомогою екскаваторів або багатоковшевих кабелеукладачів з наступним укладанням кабелю в підготовлену траншею глибиною, як правило, від 0,8 до 1,5 метрів залежно від типу ґрунту та кліматичних умов. Екологічний вплив цього методу полягає в порушенні суцільності ґрунтового покриву, знищенні рослинності в смузі відведення, зміні

природного рельєфу, а також зміні водно – фізичних властивостей ґрунтів, зокрема порушені їхньої структури, ущільнені нижніх горизонтів та змін водно – повітряного режиму. Особливої актуальності ці наслідки набувають на орних землях сільськогосподарського призначення, де відновлення родючості ґрунтів може тривати від трьох до п'яти років навіть за умови проведення рекультиваційних заходів. На територіях об'єктів ПЗФ та лісових масивах траншейне прокладання спричинює фрагментацію біотопів порушення міграційних шляхів ґрунтової мезофауни та зниження біорізноманіття в місцях безпосереднього втручання.

Безтраншейний метод горизонтально – направлено буріння є технологічно складнішим, але суттєво екологічно безпечнішим для неземних екосистем, оскільки він не потребує розкриття ґрунтового профілю на всій трасі прокладання. Технологія ГНБ полягає у прокладанні кабелю через спеціально пробурений підземний канал без вилучення ґрунту на поверхню на більшій частині траси, за винятком початкової та кінцевої точок буріння. Однак цей метод не є абсолютна екологічно нейтральним, оскільки він супроводжується використанням бурових розчинів на основі води, бентонітової глини та полімерних добавок, які можуть просочуватися в прилеглі ґрунти та підземні води за відсутності належної герметизації свердловин. Крім того, у разі прокладання кабелю під водними перешкодами (річками озерами) існує ризик потрапляння бурового шламу та залишкових компонентів розчину у водне середовище, що може спричинити локальне підвищення рівня каламутності води та осідання завислих речовин на донні відклади.

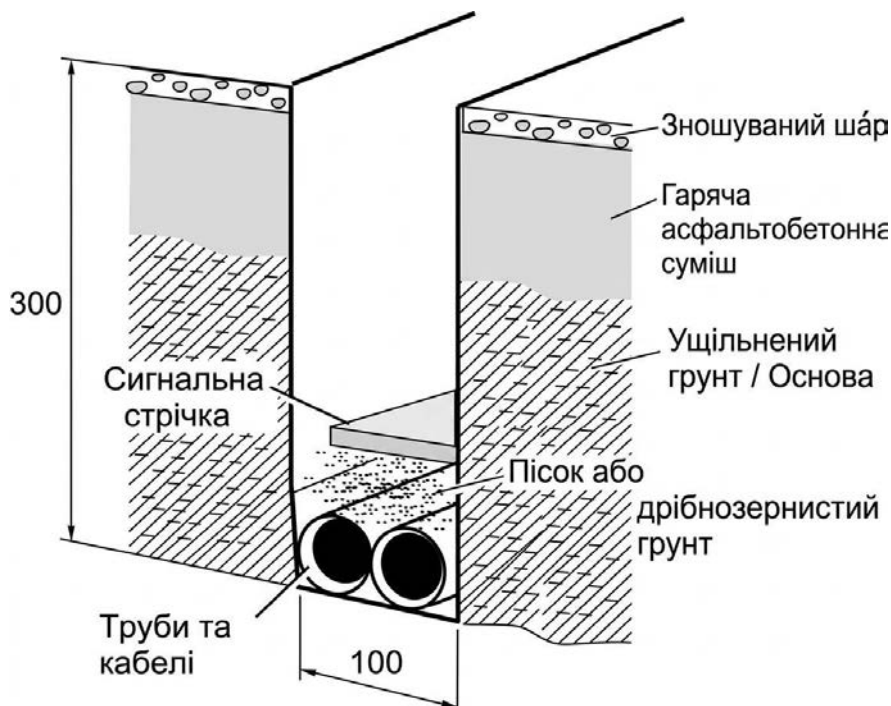


Рис. 2.4. Траншейний метод закладання оптоволоконних табелів

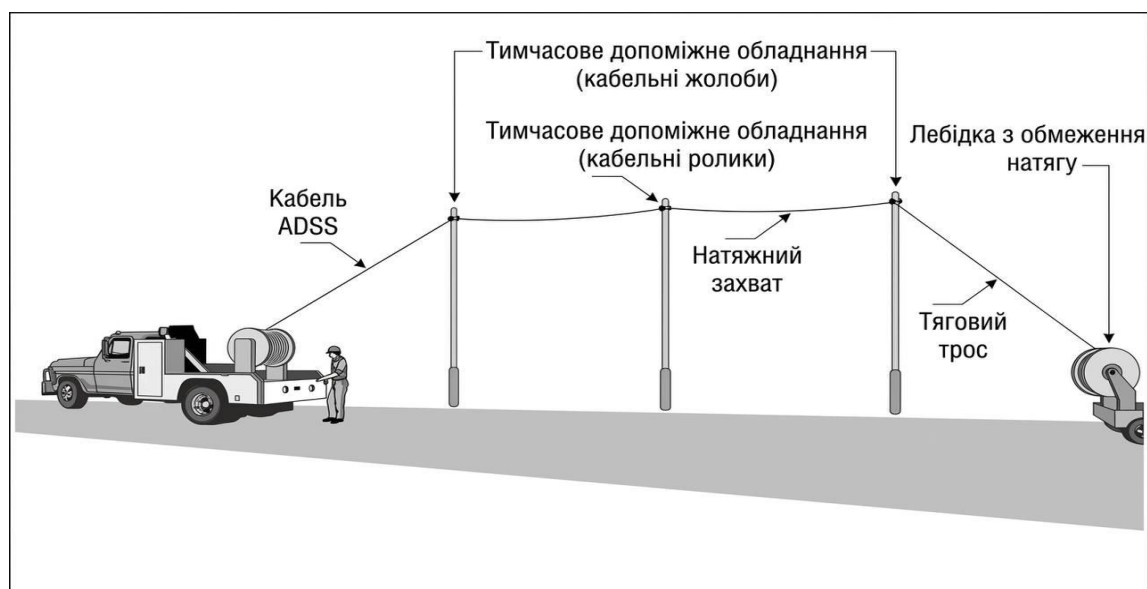


Рис. 2.5. Безтраншейний метод закладання оптоволоконних кабелів

Порівняльний аналіз екологічних наслідків обох методів, виконаний на основі узагальнення даних наукових досліджень, свідчить, що траншейний метод має значно більший прямий вплив на ґрунтово рослинний покрив, однак його наслідки є локальними та, за умови проведення повної рекультивації, потенційно зворотними. Безтраншейний метод зберігає ґрунтовий профіль, але створює довготривалі ризики хімічного забруднення підземних горизонтів у разі

використання неякісних бурових розчинів або порушення технології буріння. Таким чином, вибір методу прокладання в кожному конкретному випадку має ґрунтуватися на компромісі між технічною доцільністю, економічною ефективністю та мінімізацією екологічного ризику з урахуванням уразливості конкретної території.

Після завершення будівельних робіт настає етап експлуатації пасивної волоконно – оптичної інфраструктури, який однак, не супроводжується жодним прямими викидами забруднювальних речовин або споживанням енергії на передавання опричного сигналу. Саме ця особливість – повна енергетична пасивність після прокладання – робить оптичні пр привабливими для використання в довгострокових телекомунікаційних проєктах порівняно з мідним аналогами, які потребують постійного електричного живлення для передавання сигналу на великі відстані. Однак неземне обладнання, що обслуговує оптичні мережі (підсилювачі, термінали, комунікатори), усе ж споживає електроенергію, хоча й у значно менших обсягах порівняно з мідними системами.

2.3. Екологічні аспекти експлуатації пасивної інфраструктури

Інвентаризаційний аналіз складу відходів волоконно-оптичного кабелю показує, що вони належать до багатокomпонентних відходів IV класу небезпеки (малонебезпечні) згідно з українською класифікацією, проте їх зберігання на полігонах твердих побутових відходів є екологічно невиправданим, враховуючи тривалий період біологічного розкладу полімерних матеріалів (поліетилен, полівінілхлорид, поліамід), який становить від 100 до 400 років залежно від умов навколишнього середовища. Крім того, спалювання таких відходів без попереднього розділення супроводжується виділенням токсичних газоподібних продуктів, зокрема хлористого водню (HCl) у разі горіння полівінілхлоридних

оболонки та діоксинів, що унеможлиблює використання термічних методів нейтралізації без спеціалізованого газоочисного обладнання.

Сучасні технологічні рішення для переробки відходів оптичних кабелів перебувають на стадії промислових випробувань і не є широко доступними. Найбільш перспективним напрямком вважається механічне розділення з використанням багатоступеневого дроблення, магнітного та електростатичного розділення для розділення металеві броні, полімерних гранул та скловолокна. Отримане скловолокно може бути використане як наповнювач для будівельних матеріалів (наприклад, для фібробетону) або як сировина для виробництва скловати, що значно зменшує обсяги звалищ. Полімерну фракцію, за умови її достатньої чистоти, можна направляти на вторинну переробку для виготовлення технічної продукції нижчого сорту.

У вітчизняній практиці управління відходами волоконно-оптичних кабелів перебуває на ранній стадії розвитку. Чинні нормативні документи (Закон України «Про відходи», Порядок поводження з відходами телекомунікаційного обладнання) декларують принцип розширеної відповідальності виробника, але механізм його реалізації для конкретних видів композитних кабелів на практиці не відпрацьований. В результаті переважна більшість виведених з експлуатації оптичних кабелів в Україні накопичується на складах підприємств зв'язку або вивозиться на звалища твердих побутових відходів без попередньої обробки, що створює потенційну загрозу довгострокового забруднення навколишнього середовища мікропластиком та важкими металами, що входять до складу декоративних покриттів або металевих елементів кабелів.

Таблиця 2.1. порівняльна характеристика впливу методів прокладання оптичного кабелю

Метод прокладання	Головні об'єкти впливу	Характер екологічного навантаження	Термін відновлення та ризику
Траншейний	Рослинно – ґрунтовий покрив, прилеглі біотопи, атмосферне повітря	Механічне руйнування профілю ґрунту, ерозія, значні викиди від важкої техніки, пошкодження корневих систем.	Тривалий (3–5 років). Ризик просідання ґрунту, втрати біорізноманіття та активізації зсувних процесів.
Безтраншейний (ГНБ)	Глибокі підземні горизонти, локальні ділянки входу та виходу бура	Мінімальне точкове порушення поверхні, можливе забруднення підземних вод буровим розчином (бентонітом).	Мінімальний (до 1 року). Ризики практично відсутні за умови правильної утилізації відпрацьованої пульпи.

Таким чином, аналіз трьох ключових етапів життєвого циклу волоконно-оптичної продукції (виробництво, виготовлення, утилізація) демонструє неоднорідність навантаження на навколишнє середовище. Найбільший внесок у потенціал глобального теплопостачання та виснаження абіотичних ресурсів формується на етапі високотемпературного виробництва оптичних преформ та витягування волокна через значне споживання електроенергії. Наступний етап – етап створення локальних порушень ґрунтового-рослинного покриву, ступінь яких залежить від обраної технології будівництва (траншейний або безтраншейний метод). Найменш вивченою та найбільшою проблемою є завершення фази життєвого циклу, що перешкоджає ефективним технологіям переробки композитних кабелів в результаті накопичення відходів на звалищах з тривалим періодом їх біологічної деградації

2.4. Проблеми поводження з відходами та управління кінцевою стадією життєвого циклу оптичних кабелів

Завершальною стадією життєвого циклу волоконно-оптичних ліній зв'язку є фаза виведення кабелів з експлуатації після закінчення їхнього нормативного терміну служби, який, за даними виробників, становить від 20 до 30 років залежно від типу кабелю, умов прокладання та інтенсивності експлуатації. Саме на цій стадії виникає одна з найскладніших екологічних проблем усього життєвого циклу — проблема поводження з багатокomпонентними композитними відходами, які не піддаються простому механічному рециклінгу через міцний фізико-хімічний зв'язок між скляними світловодами, полімерними оболонками, металевими елементами броні та гідрофобними наповнювачами.

Склад та структура відходів оптичних кабелів. Типовий волоконно-оптичний кабель являє собою гетерогенну композитну систему, в якій оптичне волокно (діаметром 125 мкм) виконане з надчистого кварцового скла (SiO_2) з легуючими добавками германію або фтору для регулювання показника заломлення. Волокно вкрите подвійним шаром захисного покриття на основі епоксикарилатних смол, які забезпечують механічну міцність та стійкість до мікровигинів. Зовнішня оболонка кабелю, яка становить від 40 до 50% загальної маси, виготовляється переважно з полівінілхлориду (ПВХ), поліетилену (ПЕ) або, в сучасніших конструкціях, з безгалогенних компаундів. Додатковими компонентами є сталеві бронестрічки або

оцинкований дріт (для захисту від гризунів та механічних пошкоджень), а також гідрофобні гелі на основі поліолефінів або силіконів, які заповнюють внутрішні порожнини кабелю для запобігання проникненню вологи.

Екологічні ризики захоронення та спалювання. Інвентаризаційний аналіз складу відходів оптичних кабелів свідчить, що вони належать до IV класу небезпеки (малонебезпечні) згідно з українською класифікацією, однак їхнє складування на полігонах твердих побутових відходів є екологічно невиправданим з огляду на тривалий період біологічного розкладу полімерних матеріалів. Полівінілхлорид, який досі широко використовується для виготовлення зовнішніх оболонок дешевих типів кабелів, має період напіврозкладу в ґрунтових умовах від 100 до 400 років залежно від температури, вологості та активності ґрунтової мікрофлори. Поліетилен, хоча й є менш токсичним, демонструє ще більшу стійкість до біодеградації — за оцінками дослідників, його повне розкладання в природних умовах може тривати понад 500 років. Крім того, у процесі старіння полімерних матеріалів під впливом ультрафіолетового випромінювання, температури та механічних навантажень відбувається їхнє поступове диспергування з утворенням мікропластику — частинок розміром менше 5 мм, які здатні мігрувати в ґрунтові води, накопичуватися в організмах гідробіонтів та потрапляти до харчових ланцюгів.

Альтернативний метод поводження з відходами — термічне знешкодження (спалювання) — також створює значні екологічні ризики. При спалюванні ПВХ-вмісних кабелів без попередньої сепарації в газоподібних продуктах горіння утворюється хлороводень (HCl) — токсична сполука, яка спричинює корозію дихальних шляхів та утворення кислотних дощів. За певних температурних умов (особливо в діапазоні 300–500 °C) з ПВХ можуть синтезуватися поліхлоровані дибензо-*p*-діоксини та дибензофурани — одна з найнебезпечніших груп стійких органічних забруднювачів, які мають канцерогенну, імунотоксичну та ендокринно-руйнівну дію навіть у надзвичайно малих концентраціях. Спалювання кабелів, що містять галогенвмісні антипірени (додаються до складу ПВХ для підвищення вогнестійкості), супроводжується виділенням бромоводню (HBr) та полібромованих діоксинів, токсичність яких порівнянна з хлорованими аналогами.

Сучасний стан поводження з відходами оптичних кабелів в Україні. У вітчизняній практиці система управління відходами волоконно-оптичних ліній зв'язку перебуває на початковій стадії розвитку. Закон України «Про управління відходами», який набрав чинності у 2023 році, декларує принципи розширеної відповідальності виробника (РВВ) та ієрархію поводження з відходами (запобігання утворенню → підготовка до повторного використання → рециклінг → інші методи утилізації → захоронення).

Однак конкретні механізми реалізації РВВ для специфічних видів композитних відходів телекомунікаційного обладнання, зокрема оптичних кабелів, на практиці ще не відпрацьовані. Відсутні галузеві нормативи утворення відходів, не розроблено технічні умови на вторинну сировину, отриману з переробки кабелів, а економічні стимули для операторів зв'язку впроваджувати екологічні практики (податкові пільги, компенсації витрат на збирання та сортування) є недостатніми.

Як наслідок, за даними галузевих звітів, переважна більшість списаних оптичних кабелів в Україні (оцінно понад 80–90% загальної маси) накопичується на складах підприємств зв'язку, телекомунікаційних компаній або вивозиться на полігони твердих побутових відходів без попередньої обробки. Лише незначна частина (переважно металеві компоненти — сталева броня, мідні провідники живлення, якщо такі є) вилучається кустарними методами. Ситуація ускладнюється тим, що багато оптичних кабелів, прокладених у 1990–2000-х роках, містять заборонені сьогодні небезпечні речовини (свинець у припоях, кадмій у стабілізаторах полімерів, полібромовані дифенілові ефіри як антипірени), що створює додаткові ризики при захороненні. Таким чином, відсутність системного підходу до управління кінцевою стадією життєвого циклу оптичних кабелів призводить до втрати цінних вторинних ресурсів (кварцового скла, полімерів, металів) та створює довгострокову загрозу забруднення довкілля мікропластиком і токсичними сполуками.



Рис. 2.6. Подрібнений кабель оптоволоконна

РОЗДІЛ 3.

ПРОЄКТНО – ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ З ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВОЛОКОННО – ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

3.1. Оптимізація логістичних та експлуатаційних етапів пасивної інфраструктури

Екологізація логістики передбачає мінімізацію відходів пакування через впровадження систем багаторазової зворотної тари (дерев'яних та пластикових котушок) і використання транспорту з низьким рівнем емісії парникових газів.

Подовження строку експлуатації пасивної інфраструктури досягається застосуванням високоякісних матеріалів та превентивного моніторингу ліній за допомогою оптичних рефлектометрів (OTDR). Це дозволяє збільшити нормативний термін служби кабелю з 20 до 40 років, знижуючи частоту заміни мереж і обсяги генерації відходів. Додатково, концепція спільного використання (шертингу) кабельних каналів та опор різними операторами мінімізує потребу у виробництві нового обладнання та зменшує антропогенний вплив на ґрунтово-рослинний покрив.

Сучасний етап розвитку глобальної телекомунікаційної інфраструктури характеризується стрімким розширенням мереж широкосмугового доступу, де ключовим елементом виступає волоконно-оптичний кабель (ВОК). Попри очевидні технологічні та експлуатаційні переваги оптичного волокна порівняно з традиційними мідними кабелями (вища пропускна здатність, низьке загасання сигналу, стійкість до електромагнітних завад), процес його виробництва, прокладання та подальшої утилізації супроводжується значним антропогенним навантаженням на навколишнє природне середовище. Для комплексної

екологічної детермінації цього навантаження у даній роботі застосовано методологію оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment — LCA), яка регламентується міжнародними та національними стандартами серії ДСТУ ISO 14040:2013 та ДСТУ ISO 14044:2013.

Вибір методології LCA обґрунтований необхідністю уникнення так званого «перенесення екологічного тягаря» (environmental burden shifting) — явища, при якому мінімізація екологічного впливу на одній стадії (наприклад, під час експлуатації кабелю за рахунок його високої енергоефективності) призводить до лавиноподібного зростання негативних ефектів на іншій стадії (наприклад, під час видобутку високочистої кварцової сировини чи високотемпературного витягування волокна). Методика LCA дозволяє кількісно оцінити потенційні екологічні наслідки протягом усього існування продукту за кількома категоріями впливу, такими як потенціал глобального потепління (GWP), евтрофікація водойм (EP), закислення ґрунтів (AP) та виснаження абіотичних ресурсів (ADP). Відповідно до поставлених завдань, у цьому дослідженні встановлено межі системи за принципом **(Cradle-to-Gate)** з частковим урахуванням етапу деінсталяції. Нижче наведено концептуальну схему меж досліджуваної системи, що охоплює основні потоки речовини та енергії:

У межі досліджуваної системи включено такі ключові етапи:

1. Видобуток та переробка первинної сировини: Процеси отримання високочистого тетрахлориду кремнію (SiCl_4), германію (як легуючої домішки), а також матеріалів для захисних оболонок — поліетилену низького та високого тиску (ПНТ/ПВТ), полівінілхлориду (ПВХ) та амідних пластиків.
2. Виробництво кабельної продукції: Енергетичні витрати на хімічне осадження з газової фази (MCVD/VAD процеси), витягування оптичного волокна на спеціалізованих вежах, нанесення первинного акрилатного покриття та подальше формування осердя кабелю і бронекожухів.
3. Транспортна логістика: Доставка готової продукції до місця умовної інсталяції з урахуванням витрат палива магістральним транспортом.

Функціональною одиницею (Functional Unit), до якої приводитимуться всі матеріальні та енергетичні баланси у подальших розрахунках, визначено 1 кілометр (км) волоконно-оптичного кабелю заданої конфігурації з нормативним терміном експлуатації 25 років. Такий підхід забезпечує репрезентативність отриманих екологічних маркерів та дозволяє проводити порівняльний аналіз із альтернативними провідниковими аналогами.

3.2 Обґрунтування вибору новітніх екологічно безпечних матеріалів для оболонки кабельної продукції

Зовнішня захисна оболонка є найбільш критичним елементом кабелю з погляду хімічної безпеки. Традиційний полівінілхлорид (ПВХ) містить токсичні галогеновмісні сполуки та важкі метали. У межах проекту пропонується заміна ПВХ на безгалогенні компаунди з низьким димовидаленням (LSZH) та біорозкладні полімери.

Таблиця 3.1. Екологічні та технічні параметри матеріалів кабельних оболонок

Тип компаунду (матеріал)	Токсичність при горінні, утилізації	Термін розкладу та утилізація
Традиційний ПВХ (з наявним вмістом галагенів)	Виділяє токсичний хлороводень (HCL) та небезпечні діоксини.	Не розкладається біологічно; потребує захоронення.
Безгалогенний LSZH (на поліолефінах)	Повна відсутність фтору, хлору та бромів; безпечний дим.	Придатний для механічного рециклінгу у вторинний гранулят.

Біополімер PLA (на основі крохмалю)	Екологічно безпечний (відновлювальна рослинна сировина)	Контрольований біорозклад у компості за 1–2 роки.
-------------------------------------	---	---

Перевага матеріалів класу LSZH на основі поліолефінів із додаванням гідроксиду алюмінію або магнію полягає у відсутності фтору, хлору та бромів. При пожежі чи термічній утилізації ці оболонки не виділяють токсичного хлороводню (HCl) та діоксинів. Для внутрішніх мереж перспективним є застосування оболонок на основі полілактиду (PLA) або аліфатично-ароматичних кополієфірів. Вони здатні до контрольованого біологічного розкладу в умовах промислового компостування за 1–2 роки (при 5060 C), що вирішує проблему накопичення полімерів у літосфері.

3.3. Технологічні методи ефективної переробки та рециклінгу композитних відходів волоконно – оптичних ліній зв'язку

Оскільки композитна структура оптичних кабелів унеможлиблює пряму переробку, у роботі запропоновано технологічну схему тристадійної механіко-хімічної сепарації, що забезпечує глибоке розділення гетерогенних фракцій відходів відповідно до вимог Закону України «Про управління відходами».

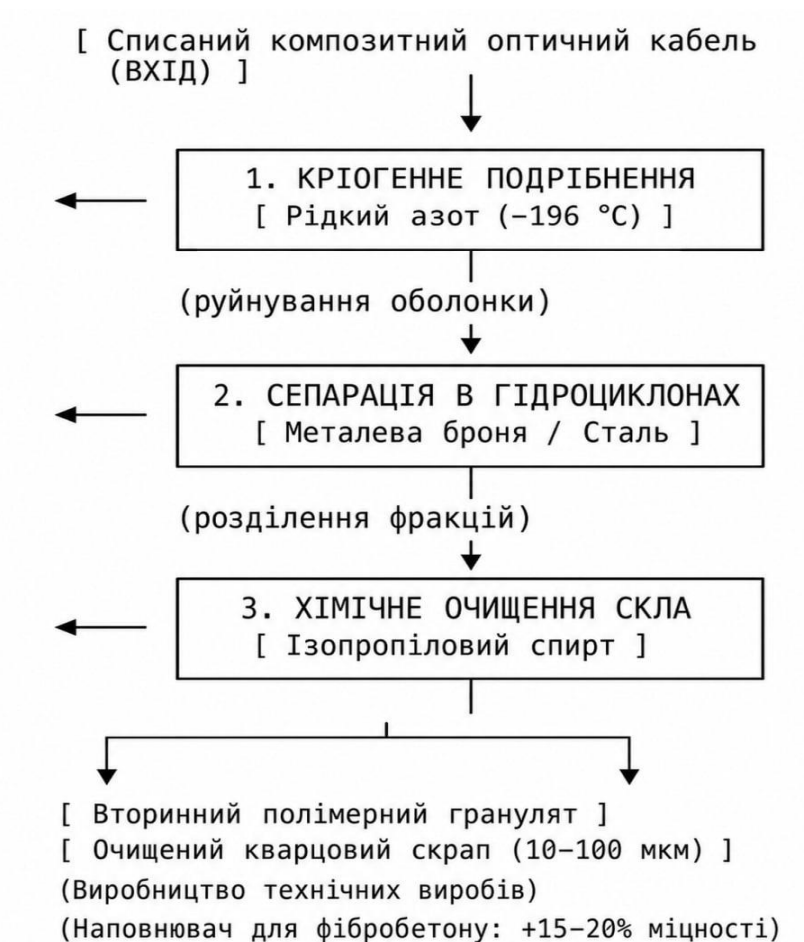


Рис. 3.1. Технологічна схема матеріальних потоків переробного комплексу кріогенно – механічного рециклінгу відходів ВОЛЗ

Технологічний цикл утилізації складається з таких послідовних етапів:

I. Попереднє кріогенне подрібнення: Відходи кабельної продукції піддаються обробці рідким азотом у кріогенному млині при температурі -196 °C}. При досягненні точки крихкості полімерні захисні оболонки втрачають еластичність і легко руйнуються під дією механічного удару, відокремлюючись від центрального силового елемента та металевої броні.

II. Багатоступенева фізична сепарація: Подрібнена суміш надходить до магнітного сепаратора, де вилучаються феромагнітні компоненти (сталевий дріт, гофрована бронестрічка). Залишкова гетерогенна пульпа спрямовується у гідроциклони, де у гравітаційному полі водного середовища відбувається

розділення легких полімерних гранул та важкої фракції подрібненого кварцового скла.

III. Хімічна екстракція гідрофобних гелів: Вилучене кварцове скло містить на поверхні сліди гідрофобних гелів (петролатумних або силіконових олій). Для їх нейтралізації застосовується промивання у замкнутому реакторі з використанням ізопропілового спирту як екологічно прийняттого розчинника. Після деградації гелю спирт рекуперується методом дистиляції та повертається в процес. У результаті замкнутого переробного циклу утворюються два комерційно цінні продукти. Очищений вторинний поліолефіновий гранулят використовується для відливу технічних пластикових виробів та будівельних дренажних труб. Очищений кварцовий скрап подрібнюється до дисперсного мікропорошку (10–100 мкм) і застосовується у промисловості будівельних матеріалів як активний мінеральний наповнювач високоефективних фібробетонів. За рахунок пуцоланової активності мікрочастинок діоксиду кремнію міцність готового бетону на стиск зростає на 15–20%. Впровадження цієї технології дозволяє знизити обсяг фінального захоронення кабельних залишків до рівня <2% від початкової маси відходів, що відповідає екологічним критеріям найкращих доступних технологій (BAT) Європейського Союзу.

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній бакалаврській роботі на основі проведених досліджень здійснено комплексне вирішення актуального науково-практичного завдання — оцінювання екологічного сліду пасивної телекомунікаційної інфраструктури та розробки заходів із її екологізації. Отримані результати дозволяють сформулювати такі висновки:

1.Обґрунтовано науково-методологічні засади ОЖЦ. Встановлено, що методологія оцінювання життєвого циклу (LCA) відповідно до стандартів ISO 14040/14044 (ДСТУ ISO 14040/14044:2013) є найбільш об'єктивним інструментом екологічного менеджменту в телекомунікаційній галузі. Вона дозволяє типізувати аналіз за чотирма послідовними ітераційними фазами (визначення мети, інвентаризація LCI, оцінювання впливу LCIA та інтерпретація результатів), що виключає суб'єктивне перенесення екологічного навантаження між різними стадіями існування продукту.

2.Визначено «екологічні гарячі точки» етапу виробництва. На основі аналізу матеріально-енергетичного балансу процесів хімічного осадження з парової фази (MCVD, OVD, VAD) та витягування світловодів доведено, що найбільша частка вуглецевого сліду (GWP) формується на початкових стадіях через високу енергомісткість промислових печей (робочі температури 1600–2000 °C). Водночас встановлено, що впровадження систем превентивного рефлектометричного моніторингу (OTDR) на етапі експлуатації дозволяє пролонгувати термін служби кабелю до 40 років, мінімізуючи частоту заміни мереж і обсяги утворення відходів.

3 Здійснено техніко-екологічне зіставлення методів будівництва. Досліджено екологічні наслідки спорудження ВОЛЗ традиційним траншейним та безтраншейним (горизонтально-направлене буріння) методами. Механічне розкриття траншей призводить до суцільного руйнування рослинно-ґрунтового покриву та тривалого терміну його рекультивації (3–5 років). Технологія ГНБ є екологічно безпечнішою для наземних екосистем (термін відновлення до 1 року),

проте потребує суворого контролю за утилізацією бурового бентонітового шламу для запобігання локальному забрудненню підземних гідрогеологічних горизонтів.

4. Доведено доцільність екологізації матеріалів оболонок. На основі аналізу кінцевої стадії життєвого циклу обґрунтовано необхідність повної заміни токсичних ПВХ-оболонок на безгалогенні компаунди класу LSZH та біорозкладні полімери (PLA) на основі кукурудзяного крохмалю. Це дозволяє нівелювати ризики емісії хлороводню (HCl), бромоводню (HBr) та високотоксичних поліхлорованих дибензо-п-діоксинів у разі термічних інцидентів, а також забезпечує контрольовану біодеградацію кабельних залишків в умовах компостування за 1–2 роки замість 100–400 років депонування на сміттєзвалищах.

5. Оптимізовано технологію рециклінгу композитних відходів. Розроблено та оптимізовано новітню тристадійну матеріально-технологічну схему кріогенно-механічної переробки списаних композитних кабелів. Застосування рідкого азоту (при -196°C) забезпечує ефективне кріогенне окрихчення та деструкцію полімерної матриці, а використання ізопропілового спирту гарантує повне очищення фракцій від гідрофобних гелів. Отриманий у процесі сепарації очищений кварцовий скрап (фракція 10–100 мкм) володіє високою пуцолановою активністю і при використанні як мінерального наповнювача у виробництві будівельного фібробетону підвищує його міцність на стиск на 15–20%. Впровадження цієї технології дозволяє знизити обсяг фінального захоронення непереробних залишків ВОЛЗ до рівня менше 2%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беліков С. Б., Кошелева О. В. Модифікація поліолефінових компаундів антипіренами для захисних оболонок кабельної продукції зв'язку // Полімерний журнал. 2023. Т. 45, № 2. С. 112–119.2.
2. Боголюбов В. М., Клименко М. О., Мельник В. І. Моніторинг довкілля: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2018. 412 с.
3. Войцицький В. М., Хижняк С. В., Дудченко О. М. Екологічний менеджмент та аудит: навчальний посібник. Київ: ВЦ «НУБіП України», 2021. 284 с.
4. Гіроль А. М. Біодеградація полілактидних матеріалів (PLA) в умовах промислового компостування // Екологічна безпека та збалансоване природокористування. 2022. № 1 (25). С. 45–52.5.
5. ДСТУ ISO 14040:2013 (ISO 14040:2006, IDT). Екологічне керування. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 26 с.6.
6. ДСТУ ISO 14044:2013 (ISO 14044:2006, IDT). Екологічне керування. Оцінювання життєвого циклу. Вимоги та настанови. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 48 с.
7. Шкарлет О. В. Екологізація логістичних ланцюгів у промислових секторах економіки України // Економіка та управління АПК. 2024. № 2. С. 78–87.8.
8. Кабінет Міністрів України. Постанова від 10.03.2017 р. № 139 «Про затвердження Технічного регламенту щодо обмеження використання деяких

небезпечних речовин в електричному та електронному обладнанні» // Офіційний вісник України. 2017. № 24. Стаття 681.

9. Клименко В. П., Савченко О. М. Прогресивні методи кріогенного подрібнення композитних відходів електронної та телекомунікаційної інфраструктури // Наукові праці НУХТ. 2023. Т. 29, № 3. С. 89–97

10. Маліновський А. С., Козловська Т. Ф. Екологічна безпека пасивних елементів цифрових мереж зв'язку // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. 2023. № 1 (91). С. 143–151.11.

11. Наумовська О. І., Боголюбов В. М. Особливості впровадження розширеної відповідальності виробника в систему екологічного контролю України // Екологічні науки. 2025. №3(58). С. 102–109.

12. Ткаченко Д. В., Руденко М. П. Вплив дисперсних відходів кварцового скла на пуцоланову активність та міцність цементних систем // Будівельні матеріали і вироби. 2024. №2. С. 14–21.

13. Черненко О. М., Бондарь В. Г. Гідроциклонна сепарація гетерогенних полімерних і мінеральних суспензій при рециклінгу кабельної продукції // Хімічна інженерія та екологія. 2022. № 4. С. 31–38.14.

14. Верховна Рада України. Закон України від 20.06.2022 р. № 2320-IX «Про управління відходами» // Відомості Верховної Ради України. 2022. № 34. Стаття 183.15. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain

15. Directives (Waste Framework Directive) // Official Journal of the European Union. 2008. L 312. P. 3–30.16.
16. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS) // Official Journal of the European Union. 2011. L 174. P. 88–110.
17. Finkbeiner M. Towards Life Cycle Sustainability Assessment: Methodological Framework and Case Studies // Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 4. P. 1940–1955.
18. Guinée J. B. Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the
19. ISO Standards. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2012. 692 p.19. ISO 14855-1:2012. Plastics — Determination of the ultimate aerobic biodegradability under controlled composting conditions — Method by analysis of evolved carbon dioxide. Geneva: International Organization for Standardization, 2012. 24p.
20. Schmidt M. Recycled quartz glass micro-powder as a pozzolanic additive in high-performance fiber-reinforced concrete // Construction and Building Materials. 2025. Vol.394.P.132–141.
21. Smith J. Toxicity and environmental risks of polyvinyl chloride (PVC) cable insulation in end-of-life management: a review // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 462. P. 113–125.