

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра екології

С. С. Душкін

КУРС ЛЕКЦІЙ

«РЕСУРСО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ»

Харків
ХНАДУ
2026

УДК 628. 628.477.6:[629.33:620.9]

ББК

Душкін С.С. Курс лекцій з дисципліни «Ресурсо- та енергозбереження»
/ Душкін Станіслав Сергійович: Курс лекцій. Харків: ХНАДУ, 2026. – 89 с.

Курс лекцій розроблено відповідно вимог освітньо-професійної програми «Екологічна безпека» другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю Е2 Екологія під навчальне аудиторне навантаження 16 годин (8 лекцій).

Зміст лекцій відповідає робочій програмі навчальної дисципліни ОК 6 «Ресурсо- та енергозбереження» 2026 р.

Мова навчання – державна

Душкін С.С., 2026

ХНАДУ, 2026

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Лк1. Ресурсо- та енергозбереження в транспортному секторі: європейські підходи та нормативні засади..... | 4 |
| Лк2. Основні напрями та технології ресурсо- і енергозбереження в промисловості та транспорті..... | 13 |
| Лк3. Еколого-економічні аспекти та технологічні основи вторинної переробки кольорових металів..... | 21 |
| Лк4. Рециклінг вторинної сировини, що містить дорогоцінні метали: технології переробки автомобільних каталізаторів..... | 27 |
| Лк5. Законодавче регулювання та технологічні цикли вторинної переробки свинцево-кислотних акумуляторів..... | 38 |
| Лк6. Екологічні та соціальні виклики виробництва та утилізації літій-іонних акумуляторів..... | 56 |
| Лк7. Екологічні аспекти рециклінгу мастильних матеріалів та технології виробництва альтернативного палива..... | 67 |
| Лк8. Переробка зношених шин (ELT) у системі циркулярної економіки та енергозбереження..... | 79 |

Лекція 1

Ресурсо- та енергозбереження в транспортному секторі: європейські підходи та нормативні засади

Мета лекції: сформувати цілісне розуміння ролі транспортної галузі у споживанні ресурсів, розкрити принципи сталого розвитку через механізми енергозбереження та авторециклінгу, а також вивчити нормативно-правову базу ЄС, що регулює екологічну безпеку та ефективність транспорту.

План лекції

1. Актуальність ресурсо- та енергозбереження в умовах сталого розвитку
2. Транспортний сектор як джерело ресурсних та енергетичних втрат
3. Повний життєвий цикл транспортного засобу та його вплив на довкілля
4. Еколого-економічні переваги утилізації транспортних засобів
5. Система авторециклінгу як інструмент ресурсо- та енергозбереження
6. Основні директиви ЄС у сфері утилізації та енергоефективності транспорту
7. Роль директив ЄС у формуванні сучасної політики ресурсо- та енергозбереження

1. Актуальність ресурсо- та енергозбереження в умовах сталого розвитку

Сьогодні людство перебуває на етапі, коли традиційна лінійна модель економіки «видобув – виготовив – спожив – викинув» вичерпала свій потенціал і веде до глобальної екологічної кризи. Саме тому ресурсо- та енергозбереження виступає не просто технічним завданням, а ключовим інструментом реалізації стратегії сталого розвитку.

1.1. Концепція сталого розвитку як фундамент

Сталий розвиток – це розвиток, який задовольняє потреби нинішнього покоління без шкоди для здатності майбутніх поколінь задовольняти їхні власні потреби. В основі лежить тріада інтересів:

– економічні: підвищення прибутковості за рахунок зниження собівартості продукції (менше витрат на сировину та енергію – вища конкурентоспроможність);

– екологічні: зменшення антропогенного навантаження, збереження біорізноманіття та боротьба зі зміною клімату;

– соціальні: забезпечення безпечного та чистого середовища для життя людей, створення нових «зелених» робочих місць.

1.2. Проблема обмеженості ресурсів та антропогенного тиску

Сучасний світ характеризується гострим дефіцитом природних копалин. Постійне зростання населення та промислових масштабів призводить до того, що планета не встигає відновлювати свої ресурси. У цьому контексті раціональне використання кожного кілограма металу чи кіловата енергії стає питанням виживання економічних систем.

Особливого значення набуває повний життєвий цикл продукції. Це означає, що ми повинні дбати про збереження ресурсів не тільки тоді, коли

машина їздить дорогами, а починаючи з моменту видобутку залізної руди для її кузова і закінчуючи поверненням матеріалів у виробництво після її утилізації.

1.3. Специфіка транспортного сектору

Транспортний сектор, і зокрема автомобільна галузь, є одним із найбільших «споживачів» планети. Він належить до найбільш ресурсо- та енергоємних галузей світового господарства – використовуються величезні обсяги енергії (як на виробництво, так і на рух); споживається ледова частка світового видобутку металів, гуми та складних полімерів.

Саме через це питання підвищення енергоефективності, повторного використання матеріалів (рециклінгу) та мінімізації відходів у транспортній галузі виведено в пріоритет як на рівні національних урядів, так і в міжнародних угодах, зокрема в межах ЄС.

2. Транспортний сектор як джерело ресурсних та енергетичних втрат

Автомобільний транспорт є однією з найбільш ресурсо- та енергоємних галузей світової економіки. Його функціонування супроводжується значними втратами як на етапі створення продукту, так і в процесі його життєдіяльності та завершення експлуатації.

2.1. Ресурсна інтенсивність виробництва

Виробництво транспортних засобів вимагає залучення колосальних обсягів природних багатств. Кожен автомобіль – це результат переробки тонн сировини, що видобувається по всьому світу.

Метали та матеріали: для виготовлення сучасних автомобілів щорічно споживаються великі обсяги чорних та кольорових металів (сталі, чавун, алюміній, мідь), а також полімерів і гуми.

Водні ресурси: технологічні процеси, особливо фарбування та гальванічне виробництво, потребують значних обсягів води.

Енергозатрати виробництва: процеси плавки, штампування та складання є надзвичайно енергоємними, що робить транспортний сектор значним споживачем первинної енергії ще до початку використання авто за призначенням.

2.2. Транспорт як джерело екологічної небезпеки

Автомобільний транспорт здійснює значний вплив на довкілля не лише під час спалювання палива, а й протягом усього циклу свого існування. Основною проблемою є накопичення транспортних засобів, які вийшли з експлуатації (Відпрацьовані Засоби Енергоспоживання – ВЗЕ).

Обсяги відходів: щороку у світі утворюється близько 10 млн тонн відходів від транспортних засобів, що припинили свою роботу.

Складність структури: після завершення терміну служби автомобіль перетворюється на складний багатокомпонентний відхід. Він містить як цінні матеріали, так і небезпечні речовини.

Ризики за відсутності утилізації: якщо не існує належної системи збору та переробки, ВЗЕ стають джерелом екологічної небезпеки для ґрунтів, підземних вод та атмосфери.

2.3. Втрати через неефективне управління ресурсами

Незважаючи на високу вартість сировини, значна частина матеріалів втрачається назавжди, якщо вони потрапляють на звалища.

Вторинна сировина: Більшість матеріалів, які містяться в автомобілі, є цінною вторинною сировиною, придатною для повторного використання.

Енергетичний потенціал: Відходи, які не підлягають механічній переробці (наприклад, деякі види пластику), можуть бути джерелом енергії, але при простому захороненні цей ресурс втрачається.

2.4. Енергоефективність та кліматичні виклики

Транспортний сектор є головним чинником зростання енергоспоживання у містах та основним джерелом викидів парникових газів.

Споживання палива: Неефективні двигуни та застарілі технології призводять до перевитрат паливно-енергетичних ресурсів.

Кліматичний вплив: Висока частка викопного палива в енергобалансі транспорту безпосередньо корелює зі зміною клімату.

3. Повний життєвий цикл транспортного засобу та його вплив на довкілля

Сучасний підхід до оцінювання екологічної та енергетичної ефективності транспорту не обмежується лише аналізом викидів під час руху. Він ґрунтується на концепції аналізу повного життєвого циклу (Life Cycle Assessment – LCA). Це дозволяє побачити реальну картину споживання ресурсів та формування негативного впливу на кожному етапі існування автомобіля.

3.1. Структура життєвого циклу

Життєвий цикл транспортного засобу складається з чотирьох основних стадій:

- проектування: на цьому етапі закладаються характеристики майбутнього авто: вибір матеріалів (що мають бути придатними до рециклінгу), визначення рівня аеродинаміки та типу силової установки;

- виробництво: включає видобуток сировини, виготовлення компонентів та безпосереднє складання на заводі. Це етап інтенсивного споживання енергії, металів та води;

- експлуатація: найтриваліший етап, протягом якого відбувається основне споживання паливно-енергетичних ресурсів та викиди шкідливих речовин в атмосферу;

- утилізація: кінцевий етап, який за умови правильної організації перетворює відпрацьований об'єкт на джерело ресурсів для нового циклу.



Таким чином, структура життєвого циклу транспортного засобу охоплює всі етапи його існування – від закладання інженерних рішень на стадії проектування до утилізації після завершення строку служби. Кожна зі стадій робить свій внесок у загальний екологічний слід автомобіля, проте їхній вплив є нерівномірним за масштабами та характером навантаження на довкілля.

Комплексний підхід до аналізу життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) дозволяє кількісно оцінити енергоспоживання, викиди парникових газів та використання ресурсів на кожному етапі, а також виявити критичні точки, де впровадження інноваційних технологій або альтернативних енергетичних рішень є найбільш доцільним. Саме тому LCA розглядається як ключовий інструмент обґрунтування переходу автомобільного транспорту до більш енергоефективних і кліматично нейтральних моделей розвитку.

3.2. Вплив на навколишнє середовище на кожному етапі

На кожному з перелічених етапів відбувається негативний вплив на довкілля:

- ресурсні втрати: постійне вилучення корисних копалин для нових деталей;
- енергетичні втрати: високі витрати електроенергії та палива на виробничих лініях;
- забруднення: формування складних багатокomпонентних відходів, які можуть стати джерелом екологічної небезпеки при неправильному поводженні.

3.3. Вирішальна роль етапу утилізації

Особливе значення в цій системі має саме етап утилізації. Він розглядається не просто як знищення залишків, а як механізм замикання циклу. Саме на цьому етапі визначається можливість повернення матеріальних і енергетичних ресурсів у господарський обіг, що дозволяє уникнути лінійної моделі «виробництво-смітник».

4. Еколого-економічні переваги утилізації транспортних засобів

Утилізація транспортних засобів, що вийшли з експлуатації (ВЗЕ), не є просто санітарним заходом для очищення територій від металобрухту. Це складний процес, який приносить значні вигоди як для економіки держави, так і для екологічного стану планети. Розглянемо ці переваги детально.

4.1. Економічні переваги: від відходів до доходів

Економічний ефект від переробки авто базується на принципі «вторинні ресурси дешевші за первинні».

Зниження собівартості виробництва - використання вторинного алюмінію або сталі потребує значно менше витрат, ніж видобуток руди та її переплавка. Це дозволяє автовиробникам знижувати витрати на сировину.

Створення нових ринків та робочих місць: індустрія авторециклінгу – це ціла мережа підприємств: центри збору, демонтажні майстерні, заводи з переробки пластику, гуми та скла. Це стимулює розвиток малого та середнього бізнесу.

Економія енергії - виробництво металів із брухту споживає на 70–95% менше енергії, ніж виробництво з первинної сировини. В масштабах країни це колосальна економія енергоресурсів.

4.2. Екологічні переваги: мінімізація шкоди

Екологічний аспект утилізації є критично важливим для збереження природних екосистем:

- зменшення обсягів захоронення відходів: автомобіль, який не потрапив на звалище, – це мінус 1–1,5 тонни складного сміття, яке розкладалося б десятиліттями;

- запобігання забрудненню токсичними речовинами: професійна утилізація передбачає безпечне зливання експлуатаційних рідин (мастила, гальмівні рідини, антифриз). Один літр відпрацьованого мастила, потрапивши в ґрунт, може забруднити до 1000 тонн ґрунтових вод;

- зниження викидів парникових газів: Оскільки переробка потребує менше енергії, ніж видобуток сировини, загальний вуглецевий слід промисловості суттєво зменшується.

4.3. Ресурсний потенціал утилізації (у цифрах)

Сучасна технологія дозволяє повернути у виробництво до 85–95% маси автомобіля:

- метали: майже 100% чорних та кольорових металів з авто підлягають нескінченній переробці без втрати якості;
- полімери: сучасні методи дозволяють переробляти до 30–50% пластикових деталей на нові компоненти або ізоляційні матеріали;
- скло та гума: використовуються для виготовлення будівельних матеріалів, дорожнього покриття або нових скляних виробів.

5. Система авторециклінгу як інструмент ресурсо- та енергозбереження

Авторециклінг – це комплексна система технологічних, економічних та організаційних заходів, спрямованих на повернення матеріалів, що містяться в автомобілях, у повторний господарський обіг. Це не просто «розбирання на брухт», а високотехнологічна індустрія, що працює за принципом замкненого циклу.

5.1. Технологічні етапи системи авторециклінгу

Ефективна система авторециклінгу складається з декількох послідовних стадій:

- збір та логістика: організація пунктів прийому автомобілів, що вийшли з експлуатації. На цьому етапі вирішується питання «юридичної смерті» авто – зняття з обліку та перетворення його на об'єкт переробки;
- деполюція (знешкодження): критично важливий етап з точки зору екології. З автомобіля видаляються всі небезпечні рідини: паливо, мастила, гальмівна та охолоджуюча рідини, холодоагенти з кондиціонерів. Також вилучаються акумулятори та піротехнічні елементи (подушки безпеки);
- демонтаж: зняття вузлів та агрегатів, які ще мають ресурс і можуть бути використані як вживані запчастини після відновлення. Також вилучаються матеріали, які легко відділити: скло, шини, великі пластикові елементи;
- шредування (подрібнення): залишки кузова потрапляють у шредерну установку, де вони подрібнюються на дрібні фрагменти;
- сепарація: використання магнітних, повітряних та флотаційних методів для розділення подрібненої маси на чорні метали, кольорові метали та так званій «шредерний залишок» (пластик, текстиль, гума).

5.2. Роль авторециклінгу в енергозбереженні

Авторециклінг є одним із найефективніших методів економії енергії в промисловості.

Енергія на виплавку: для переробки сталевих брухтів потрібно лише 25% енергії від тієї кількості, що необхідна для виробництва сталі з руди.

Алюміній: переробка алюмінієвих деталей економить до 95% енергії порівняно з первинним виробництвом.

Логістична енергія: використання вторинної сировини, що знаходиться «під рукою» в містах, значно скорочує витрати палива на транспортування сировини з копалин, які часто розташовані на інших континентах.

5.3. Авторециклінг як частина «циркулярної економіки»

У сучасній європейській практиці авторециклінг розглядається не як окремий процес, а як частина циркулярної економіки (Circular Economy). Це означає, що автовиробники ще на етапі конструювання (Design for Recycling) мають дбати про те, щоб машину було легко розібрати, а її матеріали можна було легко ідентифікувати та переробити.

6. Основні директиви ЄС у сфері утилізації та енергоефективності транспорту

Перехід до економіки замкненого циклу в Європейському Союзі закріплений на законодавчому рівні. Для студентів технічних та економічних спеціальностей важливо розуміти, що «екологічність» європейського транспорту – це не просто тренд, а суворе виконання регламентів.

6.1. Директива 2000/53/ЄС (Директива про ВТЗ)

Це основоположний документ, який регулює поводження з транспортними засобами, що вийшли з експлуатації (End-of-Life Vehicles – ELV).

Мета: мінімізувати вплив відпрацьованих авто на довкілля та стимулювати рециклінг.

Ключові вимоги: обмеження використання важких металів (свинець, ртуть, кадмій, шестивалентний хром) у нових автомобілях.

Виробники зобов'язані маркувати компоненти та матеріали для полегшення їх ідентифікації при розбиранні.

Встановлення цільових показників: з 2015 року рівень повторного використання та відновлення має становити не менше 95% від середньої маси автомобіля за рік.

6.2. Директива 2006/66/ЄС про батареї та акумулятори

Зі зростанням кількості електромобілів цей документ набув стратегічного значення.

Регулює збір, переробку та утилізацію акумуляторів.

Забороняє вивезення використаних автомобільних акумуляторів на звалища або їх спалювання.

Встановлює відповідальність виробника за фінансування витрат на збір та переробку батарей.

6.3. Директива 2009/28/ЄС та 2012/27/ЄУ про енергоефективність

Ці нормативні акти спрямовані на зниження загального енергоспоживання в транспортному секторі.

Впровадження стандартів енергоефективності для двигунів.

Стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел (ВДЕ) у транспорті.

Вимоги до державних закупівель: державні органи повинні купувати лише енергоефективні транспортні засоби.

6.4. Принцип «Розширеної відповідальності виробника» (EPR)

Це ключова юридична концепція ЄС. Вона означає, що відповідальність виробника за продукт розширюється на стадію після споживання — тобто до моменту, коли авто стає відходом. Виробник має або сам створити систему утилізації своїх машин, або заплатити за те, щоб це зробив хтось інший.

7. Роль директив ЄС у формуванні сучасної політики ресурсо- та енергозбереження

Завершальний розділ нашої лекції присвячений аналізу того, як європейське законодавство трансформує глобальний ринок та які виклики це ставить перед Україною. Директиви ЄС – це не просто перелік заборон, а дорожня карта для переходу до нової економічної моделі.

7.1. Трансформація промислового мислення

Завдяки впровадженню жорстких нормативів, європейська політика змінила підхід до автомобіля як до товару:

Відповідальність від «колиски до могили»: виробники тепер змушені думати про долю машини через 15–20 років після її продажу. Це стимулює інновації в матеріалознавстві (використання мономатеріалів, які легше переробляти).

Стимулювання ринку вторинної сировини: Директиви встановлюють квоти на використання перероблених матеріалів у нових авто. Це робить авторециклінг стабільним бізнесом, а не просто екологічною ініціативою.

7.2. Вплив на енергетичну незалежність

Політика енергозбереження в транспорті, закріплена в директивах, має стратегічне значення для безпеки:

– зменшення паливної залежності: перехід на енергоефективні двигуни та альтернативне паливо знижує потребу в імпорті нафтопродуктів;

– енергоощадність через рециклінг: кожна тонна вторинного металу – це зекономлені мегавати електроенергії, що зміцнює загальний енергобаланс регіону.

7.3. Перспективи для України в контексті євроінтеграції

Для України імплементація європейських директив у транспортному секторі є обов'язковою умовою згідно з Угодою про асоціацію.

Створення законодавчої бази: Україна має прийняти закони, що відповідають Директиві 2000/53/ЄС, щоб зупинити перетворення країни на «кладовище» старих автомобілів з Європи.

Запуск системи розширеної відповідальності виробника (EPR): впровадження зборів або механізмів, які забезпечать фінансування майбутньої утилізації імпортованих та вироблених авто.

Розвиток індустрії переробки: створення сучасних шредерних заводів та центрів деполуції (знешкодження), що дозволить не лише покращити екологію, а й забезпечити українську металургію дешевшою сировиною.

Контрольні питання

1. Дайте визначення поняттю «сталий розвиток». Які три основні сфери інтересів він об'єднує?
2. Чому транспортний сектор вважається одним із найбільш ресурсо- та енергоємних у світовій економіці?
3. Поясніть концепцію «повного життєвого циклу» (LCA) транспортного засобу. З яких етапів він складається?
4. Які основні види відходів утворюються після завершення експлуатації автомобіля і в чому полягає їхня екологічна небезпека?
5. Що таке «деполуція» автомобіля і чому цей етап є критично важливим у системі авторециклінгу?
6. Які економічні переваги отримує держава та бізнес від впровадження системи переробки старих авто?
7. Порівняйте енерговитрати на виробництво сталі та алюмінію з первинної сировини та з металобрухту. Який відсоток енергії вдається зекономити?
8. Яка головна мета Директиви ЄС 2000/53/ЄС (Директива про ВТЗ)?
9. Який цільовий показник (у відсотках від маси авто) встановлено в ЄС для повторного використання та відновлення матеріалів?
10. У чому полягає принцип «Розширеної відповідальності виробника» (EPR)?
11. Як Директива 2006/66/ЄС регулює питання утилізації акумуляторів, і чому це стає особливо актуальним із розвитком електромобільності?
12. Опишіть технологічний процес шредування та подальшої сепарації матеріалів.
13. Які кроки має зробити Україна для імплементації європейських стандартів у сфері авторециклінгу згідно з Угодою про асоціацію?
14. Що таке «Design for Recycling» (проектування з урахуванням утилізації) і як цей підхід впливає на сучасне автомобілебудування?
15. Як система авторециклінгу сприяє зміцненню енергетичної незалежності країни?

Лекція 2

Основні напрями та технології ресурсо- і енергозбереження в промисловості та транспорті

Мета лекції: розкрити сутність сучасних технологій ресурсо- та енергозбереження, обґрунтувати роль вторинних матеріальних ресурсів у зниженні енерговитрат та вивчити шляхи впровадження принципів циркулярної економіки у промисловому та транспортному секторах.

План лекції

1. Поняття та класифікація технологій ресурсо- та енергозбереження
2. Матеріальне ресурсозбереження як складова сталого виробництва
3. Енергозбереження та підвищення енергоефективності технологічних процесів
4. Вторинні матеріальні ресурси та їх роль у зниженні енерговитрат
5. Енергетичне відновлення відходів як елемент циркулярної економіки
6. Ресурсо- та енергозбереження в транспортному секторі
7. Значення європейського досвіду для формування національної політики ресурсо- та енергозбереження

1. Поняття та класифікація технологій ресурсо- та енергозбереження

Ресурсо- та енергозбереження в сучасному розумінні – це не просто економія, а стратегічний напрям розвитку промисловості, що охоплює сукупність організаційних, технічних і технологічних заходів. Ці заходи спрямовані на системне зменшення споживання природних, матеріальних та енергетичних ресурсів на всіх етапах виробничого циклу при обов'язковому збереженні або підвищенні якості та конкурентоспроможності продукції.

1.1. Сутність та об'єкти впливу

Технології енерго- та ресурсозбереження класифікують залежно від того, на який об'єкт вони спрямовані:

– матеріальне ресурсозбереження: заходи, що забезпечують раціональне використання сировини, допоміжних матеріалів та комплектуючих. Це досягається через зменшення відходів та впровадження безвідходних технологій;

– енергозбереження: комплекс рішень для оптимізації споживання палива, електричної та теплової енергії. Це включає як заміну обладнання на більш ефективне, так і усунення прямих витрат енергії;

– комплексні (інтегровані) технології: найбільш сучасний підхід, де економія матеріалів автоматично веде до зниження витрат енергії (наприклад, використання легких сплавів у машинобудуванні зменшує витрати енергії на їх обробку та подальше транспортування виробів).

1.2. Роль у сучасній економіці

Впровадження таких технологій розглядається як ключовий інструмент підвищення стійкості підприємств. Це дозволяє:

- знизити собівартість: пряма економія на закупівлі ресурсів та оплаті енергоносіїв;
- зменшити екологічний тиск: мінімізація видобутку первинної сировини та скорочення обсягів промислових викидів;
- підвищити енергетичну безпеку: зменшення залежності виробництва від коливань цін на зовнішніх енергетичних ринках.

2. Матеріальне ресурсозбереження як складова сталого виробництва

Матеріальне ресурсозбереження передбачає раціональне використання сировини, зменшення матеріаломісткості продукції та максимальне залучення вторинних ресурсів у виробничий цикл. Це один із фундаментальних напрямів, що дозволяє підприємствам переходити до моделі сталого розвитку, забезпечуючи баланс між економічною ефективністю та екологічною відповідальністю.

Особливе значення має зниження втрат матеріалів на всіх стадіях технологічного процесу - від проектування до утилізації виробів. Ефективне матеріальне ресурсозбереження в промисловості досягається через:

- оптимізацію конструкцій: перегляд геометричних та фізичних параметрів виробів для зменшення кількості необхідної сировини без втрати функціональності;
- використання новітніх матеріалів: широке впровадження легких та композитних матеріалів, які мають кращі експлуатаційні характеристики при меншій масі;
- замкнені виробничі цикли: організація процесів таким чином, щоб відходи одного етапу ставали цінною сировиною для іншого.

В основі матеріального ресурсозбереження лежить перехід від лінійної моделі до циркулярної. Це означає не лише економію на початковому етапі, а й створення умов для легкого розбирання та повторного використання компонентів виробу після завершення терміну його експлуатації. Такий підхід дозволяє підприємствам значно скоротити витрати на закупівлю первинної сировини та мінімізувати обсяги промислових відходів, що підлягають захороненню.

3. Енергозбереження та підвищення енергоефективності технологічних процесів

Енергозбереження в промисловому секторі є критично важливим фактором, який визначає не лише екологічну безпеку, а й фінансову стабільність будь-якого підприємства. У цьому розділі ми детально розглянемо різницю між простим заощадженням енергії та системним підвищенням енергоефективності, а також проаналізуємо технічні методи оптимізації енергоспоживання.

3.1. Фундаментальні відмінності між енергозбереженням та енергоефективністю

Перш за все, необхідно чітко розрізняти ці два терміни, які часто помилково вважаються синонімами. Енергозбереження - це насамперед організаційний підхід, який спрямований на зменшення обсягів споживання енергії за рахунок відмови від певних процесів або простої економії (наприклад, вимкнення обладнання в неробочий час). Це необхідний, але лише початковий етап управління ресурсами, який має певні фізичні межі.

Енергоефективність, у свою чергу, - це технічний та технологічний показник, який демонструє співвідношення між отриманим корисним результатом (продукцією, послугою) та витраченою на це енергією. Підвищення енергоефективності означає випуск тієї самої або більшої кількості товарів при менших питомих витратах енергоносіїв. Це досягається шляхом впровадження інноваційного обладнання та інтелектуальних систем управління.

Логіка сучасної промисловості вимагає переходу саме до енергоефективних стратегій. Якщо енергозбереження може бути досягнуто за рахунок обмежень, то енергоефективність забезпечує зростання виробництва при одночасному зниженні енергетичного навантаження. Такий підхід дозволяє підприємству залишатися конкурентоспроможним на ринку, де ціни на енергоносії мають постійну тенденцію до зростання.

Системне поєднання обох підходів формує політику енергоменеджменту. Вона базується на постійному моніторингу, аудиті енергетичних потоків та впровадженні найкращих доступних технологій (ВАТ - Best Available Techniques). Тільки за такої умови можна досягти максимального економічного ефекту, який вимірюється мільйонами гривень заощаджених коштів щорічно.

3.2. Напрями оптимізації енергоспоживання в технологічних процесах

Основним споживачем енергії на будь-якому виробництві є технологічне обладнання: електродвигуни, печі, компресорні установки та системи опалення. Оптимізація їхньої роботи починається з енергетичного аудиту, який виявляє місця найбільших втрат. Часто виявляється, що до 30-40% енергії витрачається марно через застарілі конструкції або неправильне налаштування систем.

Одним із найбільш ефективних методів є модернізація електроприводів. Встановлення частотних перетворювачів дозволяє регулювати швидкість роботи двигунів залежно від реального навантаження, що економить до 25% електроенергії. Крім того, заміна старих двигунів на сучасні аналоги класу енергоефективності IE3 або IE4 значно знижує теплові втрати та підвищує загальний ККД системи.

Термомодернізація та утилізація скидного тепла: у багатьох промислових процесах величезна кількість теплової енергії просто викидається в атмосферу через димові труби або системи охолодження. Впровадження рекуператорів дозволяє використовувати це тепло для підігріву

вхідної сировини або води для опалення приміщень, що радикально знижує споживання природного газу.

Автоматизація управління енергоспоживанням: системи SCADA та «розумні» лічильники дозволяють відстежувати споживання в режимі реального часу, виявляти пікові навантаження та автоматично корегувати роботу обладнання. Це виключає людський фактор і забезпечує роботу техніки в оптимальному режимі, що є запорукою тривалої та енергоефективної експлуатації.

4. Вторинні матеріальні ресурси та їх роль у зниженні енерговитрат

Використання вторинних матеріальних ресурсів (ВМР) є одним із найбільш дієвих способів одночасного вирішення екологічних та енергетичних проблем. У цьому розділі ми проаналізуємо, як саме рециклінг матеріалів дозволяє суттєво скоротити енергетичні витрати промисловості порівняно з видобутком та переробкою первинної сировини.

4.1. Енергетичний потенціал рециклінгу матеріалів

Головна перевага використання вторинної сировини полягає у величезній різниці в енергомісткості процесів. Видобуток руди, її збагачення та подальша плавка вимагають колосальних витрат палива та електроенергії. Натомість переплавка вже готового металу або переробка пластику дозволяє «оминути» найбільш енергоємні початкові стадії виробничого циклу. Так виробництво алюмінію з брухту вимагає лише 5% від тієї енергії, яка потрібна для його отримання з бокситів. Це означає, що кожна перероблена алюмінієва деталь економить до 95% електроенергії. Аналогічна ситуація спостерігається у сталеливарній промисловості, де використання металобрухту замість залізної руди дозволяє знизити енерговитрати на 70-75%.

Окрім металів, значний енергозберігаючий потенціал мають скло та папір. Виробництво скла з культу (битого скла) потребує значно нижчих температур у печах, що зменшує споживання природного газу. Переробка макулатури економить не лише лісові ресурси, а й близько 40% енергії, необхідної для виробництва паперу з деревної пульпи. Таким чином, рециклінг стає не просто екологічною ініціативою, а потужним інструментом енергетичного менеджменту.

Системне впровадження ВМР у виробництво дозволяє державі та підприємствам знизити рівень енергозалежності. Кожна тонна вторинної сировини повернена в обіг, це фактично «законсервована» енергія, яка була витрачена раніше і тепер використовується повторно. Це фундаментальний принцип, на якому базується стійкість сучасної енергоефективної економіки.

4.2. Вторинні ресурси як інструмент декарбонізації промисловості

Окрім прямої економії енергії, використання ВМР відіграє ключову роль у декарбонізації – зниженні викидів вуглекислого газу (CO₂). Оскільки більша частина енергії в світі все ще виробляється шляхом спалювання викопного палива, будь-яке скорочення енергоспоживання автоматично веде до зменшення «вуглецевого сліду» продукції.

Застосування вторинної сировини дозволяє значно спростити технологічні ланцюжки. Менша кількість стадій обробки матеріалу означає меншу кількість точок викидів шкідливих речовин. Це особливо важливо для галузей з високою інтенсивністю викидів, таких як металургія, хімічна промисловість та виробництво будівельних матеріалів (цементу, скла, цегли).

Важливим аспектом є також розвиток ринку вторинних полімерів. Сучасні технології дозволяють переробляти пластикові відходи у високоякісні гранули, які за своїми властивостями майже не поступаються первинному поліетилену чи поліпропілену. Враховуючи, що пластик виробляється з нафтопродуктів, його рециклінг безпосередньо економить вичерпні нафтові ресурси та енергію на їх переробку.

Впровадження концепції «відходи як ресурс» вимагає створення відповідної інфраструктури: від систем роздільного збору до високотехнологічних сортувальних комплексів. Лише за умови стабільного постачання якісної вторинної сировини промисловість зможе повноцінно інтегрувати ці ресурси у свої енергоєфективні стратегії, забезпечуючи перехід до повноцінної циркулярної моделі.

5. Енергетичне відновлення відходів як елемент циркулярної економіки

Енергетичне відновлення (Waste-to-Energy) є важливою ланкою циркулярної економіки, яка дозволяє видобувати енергію з тих відходів, які неможливо переробити матеріально. Це дозволяє не лише скоротити обсяги захоронення відходів на сміттєзвалищах, а й отримати відновлюване паливо для потреб промисловості та енергетики.

5.1. Технології перетворення відходів на енергію

Процес енергетичного відновлення базується на використанні термічних та біологічних методів обробки відходів. Найбільш поширеним методом є пряме спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) на спеціалізованих заводах, оснащених сучасними системами очищення викидів. Це дозволяє виробляти пару, яка використовується для генерації електроенергії або в системах централізованого тепlopостачання. Окрім прямого спалювання, існують більш технологічні методи, такі як піроліз та газифікація.

Піроліз – це термічне розкладання відходів без доступу кисню, в результаті якого утворюються синтез-газ та піролізна олія, що можуть використовуватися як паливо або сировина для хімічної промисловості. Газифікація ж дозволяє перетворювати органічну частину відходів на горючий газ при високих температурах, що забезпечує значно вищий ККД порівняно зі звичайним спалюванням.

Важливим напрямом є виробництво альтернативного палива – RDF (Refuse Derived Fuel) та SRF (Solid Recovered Fuel). Це паливо отримують шляхом подрібнення та висушування фракцій відходів з високою теплотворною здатністю (пластик, папір, дерево). Використання RDF на цементних заводах або ТЕЦ дозволяє замішувати значну частку викопного

вугілля або природного газу, що суттєво знижує енергоємність виробництва та вуглецевий слід підприємств.

Біоенергетичні технології, такі як анаеробне зброджування органічних відходів, дозволяють отримувати біогаз. Цей процес відбувається у біогазових установках, де бактерії розщеплюють органіку з виділенням метану. Отриманий біогаз можна очистити до стану біометану і закачувати в газову мережу або використовувати для виробництва «зеленої» електрики, що є ідеальним прикладом замкненого енергетичного циклу.

5.2. Роль енергетичного відновлення в управлінні відходами

Енергетична утилізація відходів займає четверту сходинку в європейській ієрархії поводження з відходами, поступаючись лише запобіганню утворення, повторному використанню та рециклінгу. Вона є незамінним інструментом для безпечної переробки тих залишків, які вже не підлягають подальшому механічному чи хімічному відновленню через високий ступінь забруднення або деградації матеріалу. Впровадження таких об'єктів дозволяє містам та промисловим вузлам ставати більш енергонезалежними. Наприклад, у багатьох європейських країнах сміттєспалювальні заводи розташовані безпосередньо в межах міст і забезпечують теплом цілі житлові райони. Це мінімізує витрати на логістику відходів та втрати в теплових мережах, створюючи ефективну локальну енергосистему, інтегровану в міську інфраструктуру.

Екологічний аспект енергетичного відновлення полягає у запобіганні викидам метану зі сміттєзвалищ – газу, який у 25 разів агресивніший за CO₂ у плані парникового ефекту. Замість того, щоб гнити на полігонах, відходи стають джерелом корисної енергії. Сучасні системи фільтрації на таких заводах настільки досконалі, що викиди від спалювання сміття часто чистіші, ніж викиди від звичайних газових котелень.

Для України розвиток сектору Waste-to-Energy є критично важливим у контексті європейської інтеграції та виконання національних планів з управління відходами. Створення мережі заводів з виробництва RDF та біогазових установок дозволить не лише вирішити проблему переповнених сміттєзвалищ, а й зміцнити енергетичну безпеку країни за рахунок власних відновлюваних джерел енергії.

6. Ресурсо- та енергозбереження в транспортному секторі

Транспортна галузь є одним із найбільших споживачів енергетичних ресурсів та значним джерелом викидів парникових газів. Ресурсозбереження в цьому секторі вимагає комплексного підходу, що поєднує технічну модернізацію рухомого складу, використання альтернативних видів палива та впровадження інтелектуальних систем управління логістикою.

6.1. Технічні та технологічні напрями підвищення енергоефективності

Основним вектором розвитку сучасного транспорту є підвищення ККД енергетичних установок та зниження питомих витрат палива. Це досягається

шляхом вдосконалення конструкцій двигунів внутрішнього згорання (ДвЗ), зменшення маси транспортних засобів через використання алюмінієвих сплавів та композитів, а також покращення аеродинамічних характеристик. Кожне зниження маси авто на 10% дозволяє економити від 5% до 7% палива, що є суттєвим показником для магістральних перевезень.

Важливою складовою є перехід на альтернативні джерела енергії. Електрифікація транспорту та розвиток водневих технологій дозволяють не лише знизити залежність від нафтопродуктів, а й інтегрувати транспорт у загальну енергосистему як мобільні накопичувачі енергії. Використання гібридних силових установок, які рекуперують енергію гальмування, дозволяє економити до 30% енергії в умовах міського циклу руху, де часті зупинки є неминучими.

Окремим напрямом є впровадження систем «Smart Logistics» та інтелектуальних транспортних систем (ITS). Використання GPS-моніторингу, датчиків контролю рівня палива та програм для оптимізації маршрутів дозволяє виключити порожні пробіги та зменшити час простою в заторах. Це не потребує зміни конструкції авто, але дає швидкий економічний ефект за рахунок організаційного ресурсозбереження.

6.2. Екологізація та ресурсозбереження в експлуатації

Окрім економії палива, ресурсозбереження на транспорті охоплює питання подовження терміну служби вузлів та агрегатів. Використання високоякісних мастильних матеріалів та сучасних систем фільтрації дозволяє збільшити міжсервісні інтервали, що зменшує кількість відпрацьованих масел та запчастин, які потребують утилізації. Це пряма економія матеріальних ресурсів протягом усього життєвого циклу транспортного засобу.

Розвиток мультимодальних перевезень також відіграє ключову роль. Перенесення вантажів з автошляхів на залізничний або річковий транспорт дозволяє в рази знизити енерговитрати на перевезення однієї тонни вантажу. Це вимагає розбудови відповідної інфраструктури та хабів, але в масштабах держави є найбільш стратегічним шляхом енергозбереження в секторі перевезень.

7. Значення європейського досвіду для формування національної політики ресурсо- та енергозбереження

Для України, яка знаходиться на шляху європейської інтеграції, імплементація досвіду ЄС у сфері ресурсозбереження є не лише вимогою міжнародних угод, а й питанням національної економічної безпеки. Європейський Зелений курс (European Green Deal) визначає чіткі орієнтири для трансформації промисловості та транспорту.

7.1. Законодавчі та фінансові інструменти ЄС

Європейська модель базується на поєднанні жорстких нормативних вимог та потужних фінансових стимулів. Директиви ЄС щодо енергоефективності та управління відходами створюють правила гри, за яких

підприємству стає вигідніше інвестувати в оновлення технологій, ніж платити великі екологічні податки або штрафи за надмірне споживання енергії.

Важливим інструментом є система торгівлі викидами (ETS) та механізм прикордонного вуглецевого коригування (СВАМ). Ці механізми стимулюють українських експортерів впроваджувати енергоефективні технології вже сьогодні, щоб зберегти доступ до європейських ринків у майбутньому. Використання фондів ЄС для підтримки «зелених» проєктів дозволяє бізнесу отримувати доступ до дешевих кредитів та грантів на модернізацію обладнання.

7.2. Практична імплементація в Україні

Вивчення досвіду таких країн, як Німеччина чи Польща, показує, що успішне ресурсозбереження починається з енергоменеджменту на муніципальному та промисловому рівнях. Україна вже розпочала шлях створення мережі енергоаудиторів та запровадження обов'язкової сертифікації енергоефективності будівель, що є лише першим кроком у великій програмі модернізації країни.

Контрольні питання

1. У чому полягає принципова різниця між поняттями «енергозбереження» та «енергоефективність»?
2. За якими ознаками класифікуються технології ресурсозбереження?
3. Яким чином оптимізація конструкції виробу на етапі проєктування впливає на його загальну матеріаломісткість?
4. Поясніть енергетичний феномен рециклінгу алюмінію.
5. Яке місце посідає «енергетичне відновлення відходів» (Waste-to-Energy) в ієрархії поводження з відходами ЄС?
6. Які технології дозволяють отримувати енергію з органічних відходів?
7. Як зниження маси транспортного засобу впливає на його енергоефективність?
8. Яку роль відіграють інтелектуальні транспортні системи (ITS) у ресурсозбереженні без зміни конструкції автомобіля?
9. Що таке «вуглецевий слід» продукції і як використання вторинної сировини допомагає його зменшити?
10. Які основні цілі Європейського зеленого курсу (European Green Deal) мають найбільший вплив на стратегію розвитку української промисловості?
11. Що таке паливо RDF та SRF?
12. Як впровадження частотних перетворювачів на електродвигунах впливає на енергоспоживання підприємства?
13. Опишіть роль систем енергоменеджменту (ISO 50001) у забезпеченні сталого ресурсозбереження.
14. Яким чином рекуперація скидного тепла може змінити енергетичний баланс промислового цеху?
15. Як концепція «відходи як ресурс» змінює економічну модель підприємства?

Лекція 3

Еколого-економічні аспекти та технологічні основи вторинної переробки кольорових металів

Мета лекції: розкрити стратегічне значення кольорової металургії у світовій економіці; обґрунтувати еколого-економічну ефективність використання вторинної сировини; ознайомити з тенденціями зростання частки рециклінгу кольорових металів та сформуванню у студентів розуміння ролі цієї галузі у забезпеченні сталого розвитку промисловості.

План лекції

1. Роль кольорової металургії у світовій економіці та обсяги виробництва
2. Еколого-економічна ефективність утилізації вторинної сировини (авторециклінг)
3. Класифікація кольорових металів та металевих відходів
4. Вимоги стандартів до підготовки та якості брухту кольорових металів
5. Методи та технологічні стадії сепарації металевого брухту

1. Роль кольорової металургії у світовій економіці та обсяги виробництва

Кольорова металургія є однією з базових галузей промисловості, яка щороку виробляє понад 100 млн тонн різноманітних металів, що налічують близько 70 основних різновидів. Ця галузь забезпечує критично важливими матеріалами високотехнологічні сектори: авіабудування, електроніку, космічну галузь та сучасне машинобудування.

Найбільші обсяги споживання та виробництва припадають на алюміній, показники якого сягають 12-15 млн тонн первинного та 6-7 млн тонн вторинного металу на рік. На другому місці знаходиться мідь (близько 10 млн тонн), після якої йдуть цинк та свинець. Така структура виробництва свідчить про високу залежність світової економіки від доступності цих ресурсів.

У промислово розвинених країнах спостерігається чітка тенденція до зростання частки вторинної сировини у загальному балансі виробництва. Це зумовлено виснаженням природних родовищ та складністю видобутку руд із низьким вмістом корисного компонента. Впровадження технологій рециклінгу дозволяє не лише стабілізувати ринок металів, а й значно знизити капітальні витрати на створення нових потужностей.

Крім того, розвиток кольорової металургії безпосередньо корелює з інноваційним потенціалом держави. Країни, що володіють технологіями глибокої переробки брухту кольорових металів, отримують значні конкурентні переваги на світовому ринку, оскільки вторинний метал за своїми фізико-хімічними властивостями після належної очистки не поступається первинному, але має значно нижчу собівартість.

2. Еколого-економічна ефективність утилізації вторинної сировини (авторециклінг)

Утилізація кольорових металів є одним із найважливіших завдань сучасної промисловості, оскільки вона дозволяє одночасно вирішувати комплекс технологічних, економічних та екологічних проблем. У контексті транспортного сектору особливої актуальності набуває авторециклінг – система повної утилізації та переробки вузлів і агрегатів транспортних засобів після завершення терміну їх експлуатації.

2.1. Економічні та технологічні переваги

Виробництво металів із вторинної сировини є значно вигіднішим за всіма показниками порівняно з первинним видобутком із руди. Це зумовлено наступними факторами:

- зниження енерговитрат: наприклад, виготовлення продукції з вторинного алюмінію потребує лише 5-10% енергії порівняно з повним циклом первинного виробництва;
- повернення дефіцитних матеріалів: рециклінг дозволяє повертати у виробничий цикл дорогі та рідкісні кольорові метали, що скорочує витрати на закупівлю сировини;
- зниження собівартості: використання брухту дозволяє суттєво зменшити капітальні вкладення в енергоносії та логістику видобутку.

2.2. Екологічний аспект та сталий розвиток

Переробка металів безпосередньо сприяє захисту навколишнього середовища та збереженню природних екосистем:

- запобігання забрудненню: своєчасна утилізація перешкоджає потраплянню токсичних продуктів розпаду та хімічних сполук у ґрунт і воду.
- скорочення викидів: процеси переплавки вторинної сировини супроводжуються значно меншими обсягами викидів парникових та шкідливих газів в атмосферу порівняно з рудним видобутком;
- зменшення обсягів відходів: автоматизовані системи сепарації дозволяють ефективно вилучати металеві елементи навіть із загального потоку міського сміття, що є ключовим етапом ресурсозбереження.

Впровадження ефективних систем авторециклінгу дозволяє не лише забезпечити промисловість необхідною сировиною, а й сформувати закритий цикл використання ресурсів, що є основою сучасної екологічної та промислової політики.

3. Класифікація кольорових металів та металевих відходів

Ефективність вторинної переробки кольорових металів безпосередньо залежить від правильності їх класифікації на етапі збирання, сортування та підготовки до переплавки. Некоректне віднесення металів до технологічних груп або змішування несумісних сплавів призводить до погіршення якості вторинної сировини, збільшення енерговитрат та втрат цінних компонентів.

Класифікація кольорових металів у вторинній металургії має не довідковий, а прикладний характер і використовується для:

- вибору методів механічної та фізичної сепарації;
- формування однорідних партій брухту;
- прогнозування поведінки металів під час плавки;
- забезпечення стабільного хімічного складу вторинних сплавів.

3.1. Класифікація кольорових металів за фізико-хімічними властивостями

У Європі прийнята єдина класифікація металевих відходів (European Steel Scrap Specification), якою встановлюються технічні умови на сталевий брухт. У США з тією ж метою Інститут промисловості рециклінгу розробив і щорічно актуалізує «Класифікатор відходів» (Scrap Specifications Circular), що встановлює технічні умови на металеві та неметалеві відходи.

В Україні, згідно ДСТУ 1639-2009, лом і відходи кольорових металів і сплавів класифікують за найменуваннями відповідних металів і сплавів. Лом і відходи за характеристиками і показниками якості поділяють на види. Вид брухту і відходів характеризують за характером його утворення, фізичним станом (кускові відходи, стружка, паста тощо), габаритними розмірами, розмірами і масою окремих шматків та за хімічним складом.

Згідно Наказу №228 від 29.08.2025 ДСТУ з 01.01.2026 р. скасовано для гармонізації законодавства України з ЄС. Основними актуальними документами для України є: серії стандартів EN 12861:2018, EN 13920 та [з-н України «Про металобрухт»](#).

Легкі метали До легких кольорових металів належать алюміній, магній, титан, берилій та літій. Вони характеризуються малою густиною, високою питомою міцністю та чутливістю до домішок заліза, міді й кремнію.

У вторинній металургії легкі метали потребують:

- ретельного відокремлення від чорних металів;
- контролю складу сплавів;
- обмеження повторних циклів переплавки для запобігання деградації властивостей.

Найбільші обсяги вторинної переробки припадають на алюмінієві сплави, що широко використовуються в транспорті та будівництві.

Важкі кольорові метали До цієї групи входять мідь, нікель, свинець, цинк та олово. Вони мають вищу густину, високу електропровідність і відносно добру стійкість до багаторазової переплавки.

У вторинній переробці важкі метали:

- є основним джерелом економічної вигоди;
- часто вилучаються з кабельного, акумуляторного та електротехнічного брухту;
- допускають багаторазовий рециклінг без істотної втрати властивостей.

Тугоплавкі метали До тугоплавких металів належать вольфрам, молібден, хром, ванадій та інші елементи з температурою плавлення понад 1650 °С. Їх вторинна переробка є технологічно складною через високі енерговитрати та необхідність спеціалізованого обладнання.

У вторинній металургії ці метали:

- зазвичай переробляються у вигляді концентратів або легуючих добавок;

- вилучаються з інструментального та жароміцного брухту;

- мають високу стратегічну цінність.

Благородні метали Золото, срібло, платина та метали платинової групи мають виняткову хімічну інертність і високу ринкову вартість. Основним джерелом їх вторинної сировини є електронний та електротехнічний брухт.

Вилучення благородних металів:

- є економічно доцільним навіть при низьких концентраціях;

- здійснюється з використанням спеціалізованих хіміко-металургійних методів;

- потребує суворого контролю та ліцензування.

Радіоактивні метали Радіоактивні елементи (технецій, полоній тощо) не розглядаються як об'єкти класичної вторинної металургії. Поводження з такими матеріалами регламентується нормами радіаційної безпеки і передбачає ізоляцію або захоронення, а не повторне використання.

3.2. Класифікація металевих відходів у практиці рециклінгу

Окрім поділу за хімічною природою, металеві відходи класифікують за:

- походженням (виробничі, побутові, транспортні, електронні);

- формою та розмірами (листові, стружкові, литі, пресовані);

- ступенем засміченості неметалевими домішками.

Саме ця класифікація є базовою для вибору методів подрібнення, типів сепараторів; та режимів плавки.

Неправильна ідентифікація брухту призводить до забруднення сплавів і зниження якості готової продукції.

4. Вимоги стандартів до підготовки та якості брухту кольорових металів

Якість вторинної сировини безпосередньо впливає на енерговитрати під час плавки та фізичні властивості майбутніх виробів. Брухт кольорових металів повинен відповідати суворим державним та міжнародним стандартам, що регулюють вміст домішок та фізичний стан матеріалу.

Основні вимоги стандартів включають:

- хімічна чистота: обмеження вмісту сторонніх металів (наприклад, заліза в алюмінієвих сплавах), що можуть погіршити характеристики металу;

- механічна підготовка: брухт має бути очищений від мастил, фарби, пластмаси, гуми та ізоляційних матеріалів. Наявність неметалевих включень призводить до підвищеного утворення шлаку та шкідливих викидів;

- безпековий контроль: обов'язкова перевірка на відсутність вибухонебезпечних предметів та закритих ємностей з рідинами. Окремим пунктом стоїть радіаційний контроль, який має підтвердити безпеку кожної партії брухту.

Підготовка брухту за стандартами дозволяє металургійним підприємствам використовувати його як повноцінну заміну первинній

сировині. Це не лише економить ресурси, а й підвищує термін експлуатації плавильних печей за рахунок відсутності агресивних хімічних домішок.

5. Методи та технологічні стадії сепарації металевого брухту

Процес сепарації є критичним етапом, який дозволяє перетворити змішаний металобрухт на високоякісну вторинну сировину, придатну для виготовлення нових сплавів. Після попереднього подрібнення в молоткових дробарках, матеріал проходить через систему автоматизованої сепарації, яка базується на використанні фізичних властивостей різних металів.

Основними промисловими методами сепарації є:

– магнітна сепарація: використовується як перший етап для швидкого та ефективного вилучення чорних металів (сталі, чавуну) із загального потоку брухту. Використання потужних електромагнітів або постійних магнітів дозволяє очистити кольорові метали від залізних домішок, що є обов'язковою умовою для отримання чистих сплавів;

– електродинамічна сепарація (вихрові струми): один із найбільш прогресивних методів, заснований на взаємодії змінного магнітного поля з вихровими струмами, що виникають у кольорових металах. Ця технологія дозволяє автоматично відокремлювати частинки алюмінію, міді та латуні від інертних неметалевих матеріалів (пластику, гуми, скла);

– мокрі методи сепарації: включають сепарацію у важких середовищах, а також гравітаційні та гідравлічні методи. принцип базується на різниці питомої ваги матеріалів: важкі метали осідають на дно, тоді як легші фракції або неметалеві включення вимиваються або спливають;

– піротехнічний та радіаційний контроль: незалежно від обраного методу механічної сепарації, весь брухт обов'язково проходить через стадії безпекового контролю для виявлення вибухонебезпечних предметів або джерел випромінювання.

Ефективне поєднання цих методів дозволяє досягти майже 100% чистоти металів, що повертаються у виробничий цикл. Це не лише економить дефіцитну сировину, а й радикально знижує енергоємність кінцевого продукту, оскільки підготовлений таким чином брухт потребує мінімальної кількості енергії для переплавки.

Контрольні питання

1. Яка роль кольорової металургії у структурі світової економіки?
2. Які кольорові метали займають лідируючі позиції за обсягами виробництва у світі?
3. Поясніть термін «авторециклінг».
4. У чому полягає еколого-економічна перевага переробки алюмінію?
5. Які екологічні ризики мінімізуються завдяки системному збору та переробці брухту кольорових металів?
6. Назвіть 5 основних технологічних груп кольорових металів.
7. Чим відрізняються «важкі» кольорові метали від «тугоплавких»?

8. Яке значення має вилучення благородних металів з електронного брухту?
9. Чому «піротехнічний контроль» є обов'язковою стадією підготовки брухту?
10. Які вимоги висувають державні стандарти до механічної підготовки металевого брухту?
11. Як наявність неметалевих домішок (пластику, мастил, гуми) впливає на процес переплавки кольорових металів?
12. Опишіть принцип роботи електродинамічного сепаратора (сепарація вихровими струмами).
13. У яких випадках при підготовці вторинної сировини доцільно використовувати магнітну сепарацію?
14. Поясніть сутність «мокрих» методів сепарації.
15. Яким чином радіаційний контроль впливає на якість та безпеку готових сплавів у вторинній металургії?

Лекція 4

Рециклінг вторинної сировини, що містить дорогоцінні метали: технології переробки автомобільних каталізаторів

Мета лекції: сформувати у студентів системні знання про технологічний цикл утилізації автомобільних нейтралізаторів, методи вилучення металів платинової групи (МППГ) та екологічну значущість цього процесу.

План лекції

1. Еколого-економічна доцільність рециклінгу МППГ: аналіз дефіциту платини, паладію та родію на світовому ринку
2. Конструктивні особливості та склад каталізаторів: вплив будови вузла на вибір технології утилізації
3. Підготовчий цикл переробки: механічна обробка, подрібнення та методи експрес-аналізу сировини
4. Металургійні методи вилучення металів: порівняльна характеристика гідро- та пірометалургійних технологій
5. Афінаж та отримання чистих компонентів: фінальна стадія виробництва та досвід рециклінгу в Україні

1. Еколого-економічна доцільність рециклінгу МППГ: аналіз дефіциту платини, паладію та родію на світовому ринку.

1.1. Аналіз світового ринку металів платинової групи (МППГ)

Метали платинової групи (МППГ) – платина (Pt), паладій (Pd), родій (Rh), іридій (Ir), рутеній (Ru) та осмій (Os) за класифікацією відносяться до стратегічних матеріалів. Їхня роль у сучасному світі виходить далеко за межі ювелірної справи або інвестиційних злитків. Насамперед, це критично важливі промислові метали, без яких неможливе функціонування сучасного машинобудування, хімічного синтезу та енергетики.

Автомобільна промисловість як домінуючий споживач

Основним драйвером ринку МППГ є екологічні стандарти (Euro-6 та вище). Для їх виконання кожен сучасний автомобіль з ДВЗ оснащується каталітичним нейтралізатором. Статистика свідчить про наступне розподілення споживання:

– паладій (Pd): автомобільний сектор поглинає близько 85–90% всього світового видобутку. Паладій є основним компонентом для бензинових двигунів, де він виступає каталізатором окислення вуглеводнів;

– платина (Pt): хоча вона широко відома як інвестиційний метал, понад 40% її обсягу йде в автопром, переважно для дизельних двигунів та інноваційних водневих паливних елементів;

– родій (Rh): Це найрідкісніший і найдорожчий метал групи. Майже 95% родію використовується для відновлення оксидів азоту (NO_x). Замінити його іншим компонентом у трикомпонентних каталізаторах на даний момент технічно неможливо.

Аналіз попиту та пропозиції

Протягом останнього десятиліття на ринку спостерігається стійкий структурний дефіцит.

Обмеженість видобутку: понад 80% світових запасів зосереджено лише у двох регіонах – ПАР (Бушвельдський комплекс) та РФ (Норильський промисловий район). Будь-які політичні чи економічні коливання в цих регіонах миттєво спричиняють цінові шоки.

Дисбаланс: наприклад, у 2017 році світовий видобуток паладію склав приблизно 6,7 млн унцій, тоді як реальна потреба тільки автомобільної галузі перевищила 10,2 млн унцій. Ця різниця у 3,5 млн унцій покривається виключно за рахунок складських запасів та вторинної переробки.

Цінова волатильність: через дефіцит ціна на паладій за кілька років зросла в 1,5–2 рази, а ціна на родій у пікові періоди сягала позначки понад 20 000 доларів за унцію, що робить переробку навіть одного старого каталізатора економічно вигідною операцією.

Роль рециклінгу в балансуванні ринку

За даними аналітичних агентств (наприклад, Johnson Matthey), частка вторинної платини на світовому ринку вже досягла 31,6%, а паладію – 18,3%. Без сектора рециклінгу світова автомобільна промисловість зупинилася б протягом кількох місяців через фізичну відсутність металів.

Для України цей напрямок є стратегічно перспективним. Оскільки власного видобутку МПП в країні немає, єдиним джерелом цієї сировини є збір та глибока переробка автомобільних компонентів. Це дозволяє зменшити валютні витрати на імпорт дорогоцінних металів та створити технологічний цикл з високою доданою вартістю.

Для розуміння глобального масштабу проблеми та того, як ці цифри трансформуються у реальний бізнес, рекомендую ознайомитися з [аналітикою](#) одного з провідних гравців ринку в Україні.

1.2. Природні ресурси vs Вторинна сировина: порівняльна характеристика

Для глибокого розуміння технологічної переваги рециклінгу необхідно проаналізувати фізичні обсяги енерговитрат та сировини, необхідних для отримання ідентичної кількості чистого металу з надр землі та з відпрацьованих вузлів автомобілів.

Ефективність концентрації (промисловий вміст)

Згідно з даними досліджень, різниця в концентрації МПП є вражаючою:

– природні родовища: промислова переробка однієї тонни корінних платинових родовищ дає лише 2–5 грамів металу на тонну (г/т). У комплексних родовищах цей показник може бути ще нижчим – від 0,1 до 0,01 г/т. Це означає, що для отримання об'єму металу, необхідного для одного каталізатора, гірничо-збагачувальний комбінат має підняти на поверхню, подрібнити та піддати хімічній обробці цілу вантажівку руди;

– вторинна сировина: в 1 кілограмі керамічного наповнювача автомобільного каталізатора міститься від 2 до 5 грамів МПП. Тобто

концентрація корисного компонента у вторинній сировині у 1000 разів вища, ніж у найбагатшій природній руді.

Технологічні та енергетичні витрати

Видобуток з природних джерел пов'язаний з колосальними капітальними вкладеннями:

– гірничі роботи: розробка шахт глибиною понад 1-2 км (характерно для ПАР), що потребує складних систем вентиляції, водовідливу та транспортування породи;

– збагачення: багаторазове флотаційне збагачення величезних мас породи для отримання концентрату;

– енергоємність: сумарні енерговитрати на отримання 1 унції платини з руди у десятки разів перевищують енерговитрати на її вилучення шляхом рециклінгу.

Концепція «Урбаністичного родовища»

У сучасній екологічній інженерії відпрацьовані каталізатори розглядаються як техногенні (або урбаністичні) родовища. На відміну від природних покладів, які вичерпуються і стають географічно важкодоступними, «урбаністичне родовище» постійно оновлюється та знаходиться безпосередньо в місцях концентрації споживачів (великі міста, промислові центри).

Щорічно у світі підлягає рециклінгу близько 40 млн одиниць каталізаторів. Це стабільний, прогнозований та надзвичайно багатий ресурс, який дозволяє країнам, що не мають власних платинових копалин, забезпечувати свої потреби в стратегічних металах.

Економічний аспект вилучення

Висока концентрація металу в малих об'ємах сировини дозволяє будувати компактні переробні підприємства замість гігантських металургійних заводів. Наприклад, один невеликий цех з переробки каталізаторів за обсягом випущеної платини може бути еквівалентним середній за розміром шахті. Це робить бізнес на вторинній сировині надзвичайно мобільним та стійким до ринкових коливань.

1.3. Екологічні ризики та сталий розвиток

Рециклінг автомобільних каталізаторів – це не лише питання прибутку, а й критичний елемент екологічної безпеки:

- запобігання забрудненню специфічними відходами:
 - відпрацьований каталізатор, що відслужив свій термін (зазвичай 100–150 тис. км), накопичує в собі небезпечні сполуки;
 - токсичні залишки: окрім керамічної основи, всередині «стільников» осідають мікрочастинки недогорілого палива, сажа та сполуки сірки;
 - важкі метали: хоча платина та паладій є інертними, при неправильному зберіганні на відкритих звалищах під впливом опадів вони можуть утворювати розчинні сполуки, що потрапляють у ґрунтові води;

– проблема вилучення: сталевий корпус нейтралізатора з часом піддається корозії, що призводить до руйнування внутрішньої структури та розпилення дрібнодисперсного керамічного пилю, який містить залишки МПГ;

– зменшення «вуглецевого сліду» (Carbon Footprint):

- видобуток металів платинової групи з природних друд є одним із найбільш енергоємних і «брудних» процесів у світовій металургії;

- Емісія CO₂: для отримання 1 кг платини з руди в атмосферу викидається у десятки разів більше вуглекислого газу, ніж при її вилученні з вторинної сировини;

– деградація ландшафту: традиційний видобуток призводить до утворення гігантських кар'єрів та відвалів породи, які на десятиліття виводять землі з господарського обігу;

– використання води: гірничо-збагачувальні комбінати споживають мільйони кубометрів прісної води, що в умовах глобального дефіциту ресурсів стає критичним фактором;

Концепція сталого розвитку та циркулярної економіки: рециклінг каталізаторів ідеально вписується в модель циркулярної економіки (Circular Economy), де відходи одного циклу стають цінною сировиною для іншого.

– замкнений цикл: метали, вилучені зі старих авто, повертаються на заводи для наплення на нові каталізатори. Цей процес може повторюватися нескінченно без втрати якості металу.

– відповідність стандартам: впровадження таких технологій в Україні дозволяє вітчизняним підприємствам відповідати директивам ЄС щодо поводження з відходами (наприклад, Waste Framework Directive).

Таким чином, інженер-еколог має розглядати утилізацію нейтралізатора не як «сміття», а як спосіб збереження екосистем та зниження техногенного навантаження на планету.

1.4. Економічна рентабельність рециклінгу

Економіка переробки автомобільних каталізаторів базується на унікальному поєднанні високої вартості кінцевого продукту та відносно низьких витрат на логістику порівняно з видобутком руди. Для інженера-еколога розуміння фінансової складової є ключовим, оскільки саме рентабельність забезпечує життєздатність екологічних ініціатив.

Фактори ціноутворення на ринку вторинної сировини

Вартість відпрацьованого каталізатора не є фіксованою і залежить від трьох основних змінних:

– біржові котирування (LME): ціни на платину, паладій та родій змінюються щодня. Оскільки ці метали торгуються у доларах США за тройську унцію, внутрішній ринок України також сильно залежить від курсу валют.

– вміст металів за типом носія:

- бензинові авто: основний акцент на паладій та родій;

- дизельні авто: переважає платина;

- преміум-сегмент та спецтехніка: катализатори великих об'ємів можуть містити у 2–3 рази більше металів, ніж малолітражні авто.

– ступінь зносу: тривала експлуатація двигуна з несправною системою запалювання призводить до «отруєння» катализатора або вигорання активного шару, що знижує його цінність при прийомі.

Механізми повернення інвестицій

Головна складність бізнесу на рециклінгу полягає у необхідності точного вхідного аналізу. Для забезпечення рентабельності підприємства використовують:

– рентгенофлуоресцентний аналіз (XRF): портативні спектрометри дозволяють за 30 секунд визначити масову частку металів у кераміці з точністю до 0,01%. Без такого приладу ризик фінансових втрат при закупівлі сировини зростає в рази;

– глибина вилучення: рентабельність вважається високою, якщо технологічна лінія забезпечує повернення понад 95% дорогоцінних металів. Втрата навіть 5% родію через недосконалість фільтрів або хімічних реакторів може зробити весь процес переробки збитковим.

Український контекст та «тіньовий» ринок

В Україні економіка рециклінгу має свою специфіку. Через відсутність державного стимулювання утилізації, більшість вузлів потрапляє на переробку через мережу приватних закупівель.

Оскільки повний цикл афінажу (доведення до чистоти 99,99%) потребує надскладного обладнання, значна частина української сировини експортується у вигляді збагаченого концентрату або подрібненої кераміки на заводи Німеччини, Бельгії (наприклад, Umicore) або Польщі.

Таким чином, рециклінг МПП є одним із найбільш високоприбуткових сегментів поводження з відходами, де інтелектуальна складова (аналіз та технологія вилучення) вартує більше, ніж сама сировина.

2. Конструктивні особливості та склад катализаторів: вплив будови вузла на вибір технології утилізації.

Розуміння внутрішньої будови нейтралізатора є критичним для вибору методу його утилізації. Саме конструкція визначає, наскільки складним буде процес механічного вилучення активної речовини та які хімічні реагенти знадобляться на етапі вилуговування.

2.1. Принципи роботи та хімізм нейтралізації

Автомобільний каталітичний нейтралізатор – це хімічний реактор проточного типу. Його завдання забезпечити максимальну площу контакту вихлопних газів з активною речовиною при мінімальному газодинамічному опорі.

Хімічні реакції: у сучасному трикомпонентному нейтралізаторі (TWC – Three-Way Catalytic converter) одночасно протікають три типи реакцій:

– окислення чадного газу (CO): $2\text{CO} + \text{O} \rightarrow 2\text{CO}_2$. За цей процес відповідає переважно платина (Pt) або паладій (Pd).

– окислення незгорілих вуглеводнів (CH): $C_xH_y + nO_2 \rightarrow xCO_2 + yH_2O$.
Активним компонентом також виступають Pt та Pd.

– відновлення оксидів азоту (NO_x): $2NO_x \rightarrow xO_2 + N_2$. Це найскладніший етап, який забезпечує родій (Rh).

Оскільки родій є найдорожчим та найрідкіснішим металом, технологія переробки має бути налаштована на його максимальне збереження. Навіть незначні втрати родію через неправильний температурний режим плавки роблять рециклінг економічно недоцільним.

2.2. Класифікація носіїв: кераміка vs метал

В основі будь-якого нейтралізатора лежить монолітний блок (носій), на який нанесено каталитичний шар.

Керамічні носії (Cordierite):

– Склад: магній-алюмосилікатна кераміка.

– Будова: має структуру бджолиних стільників (honeycomb).

– Особливості переробки: кераміка крихка, що полегшує процес подрібнення (подрібнюється в пил у кульових млинах). Проте вона потребує високих температур при плавці (понад 1200 °C) через високу температуру плавлення самої основи.

Металеві носії:

– Склад: тонка гофрована стрічка з жароміцної феритної сталі, легованої алюмінієм.

– Особливості переробки: такі каталізатори важче подрібнювати механічно. Їх переробка зазвичай потребує інших методів сепарації, оскільки активний шар може відшаровуватися від металевої стрічки при термічному шоці.

2.3. Морфологія активного шару (Washcoat)

Коштовні метали не наносяться безпосередньо на кераміку. Між ними знаходиться проміжний шар – washcoat.

– Функція: Створення шорсткої поверхні з величезною питомою площею (до 100–200 м²/г).

– Склад: Оксид алюмінію (Al₂O₃) з добавками оксидів церію (Ce) та цирконію (Zr).

– Значення для інженера: під час експлуатації через перегрів (понад 900 °C) площа washcoat може зменшуватися (спікатися), що призводить до «замуровування» частинок платини всередині оксиду. Це ускладнює подальше хімічне вилучення металів при гідрометалургійній переробці.

2.4. Специфіка дизельних систем (DPF та SCR)

Дизельні двигуни мають свою специфіку, що безпосередньо впливає на склад вторинної сировини:

– DOC (Diesel Oxidation Catalyst): Містить велику кількість платини (для роботи при низьких температурах дизельного вихлопу), але майже не містить паладію.

– DPF (Сажовий фільтр): Це керамічний блок з глухими каналами. Він накопичує велику кількість сажі та золи. При переробці DPF необхідно спочатку проводити процедуру випалювання вуглецевих залишків, інакше

вони будуть сорбувати (поглинати) розчини коштовних металів на етапі вилуговування.

– SCR (Selective Catalytic Reduction): Використовує сечовину. Такі блоки часто містять оксиди ванадію або вольфраму, які є токсичними та потребують окремої нейтралізації при утилізації.

3. Попередній цикл та механічна підготовка сировини

Перш ніж дорогоцінні метали потраплять у хімічні реактори, відпрацьовані нейтралізатори повинні пройти стадію механічної деструкції та гомогенізації. Це необхідно для того, щоб перетворити громіздку деталь автомобіля на дрібнодисперсну шихту, готову до вилуговування або плавки.

3.1. Логістика та первинне сортування

Процес переробки починається з ідентифікації. Не всі каталізатори однакові, і помилка на етапі сортування може призвести до значних фінансових збитків.

– Маркування та каталоги: кожен заводський каталізатор має серійний номер. За спеціалізованими базами даних (наприклад, Eco Cat App) визначається приблизний вміст Pt, Pd та Rh для конкретної моделі авто.

– Розподіл за типом палива: бензинові каталізатори сортуються окремо від дизельних (DOC) та сажових фільтрів (DPF), оскільки вони потребують різних режимів подальшої обробки.

– Візуальний контроль: відсіювання «пустишок» – каталізаторів, з яких активний шар був вимитий або вибитий у процесі експлуатації.

3.2. Механічне розкриття та декантація

Мета етапу – вилучити керамічне або металеве «ядро» зі сталевого корпусу.

– Обладнання: використовуються потужні гідравлічні алігаторні ножиці або стрічкові пилки. Корпус розрізається вздовж, після чого керамічний моноліт випресовується.

– Видалення ізоляції: важливо повністю видалити шар теплоізоляції (керамічне волокно), оскільки воно не містить дорогоцінних металів, але значно збільшує об'єм сировини та поглинає дорогі хімічні реагенти.

– Декантація: процес відділення внутрішнього вмісту від металеві оболонки. Отриманий матеріал називається «керамічним ломом».

3.3. Подрібнення та гомогенізація

Для того, щоб хімічні реагенти могли взаємодіяти з платиною, вона має бути доступною.

– Грубе подрібнення: керамічні блоки подаються у щоківі дробарки, де вони подрібнюються до фракції 10–20 мм.

– Тонке перемелювання: далі сировина потрапляє у кульові або вібраційні млини. Кінцевий продукт – дрібний порошок (пудра) з розміром частинок менше 100 мікрон.

– Гомогенізація: це ретельне перемішування отриманого порошку. Оскільки вміст металів у різних частинах катализатора може відрізнятися, тільки однорідна суміш дозволяє отримати репрезентативну пробу для аналізу.

3.4. Методи експрес-аналізу (XRF)

Після подрібнення необхідно точно знати, скільки грамів металу знаходиться в партії порошку.

– Рентгенофлуоресцентний аналіз (XRF): це основний метод у рециклінгу. Спектрометр опромінює пробу рентгенівськими променями, а за вторинним випромінюванням визначає вміст Pt, Pd, Rh за лічені секунди.

– Пробоотбір: з гомогенізованої маси беруть кілька точкових проб, які потім порівнюються. Це гарантує чесність розрахунків між постачальником та переробником.

Розділ 4. Металургійні технології вилучення металів

Після того як катализатор був подрібнений у гомогенний порошок, настає стадія хімічного або термічного розділення компонентів. Головна проблема полягає в тому, що МПГ (метали платинової групи) надзвичайно стійкі до зовнішніх впливів, тому для їх вилучення потрібні або агресивні хімічні середовища, або надвисокі температури.

4.1. Гідрометалургійні процеси («мокрі» технології)

Гідрометалургія базується на переході металів із твердого стану в розчин за допомогою рідких реагентів (вилуговування).

Вилуговування: найпоширенішим реагентом є «царська горілка» (суміш концентрованих азотної HNO_3 та соляної HCl кислот) або соляна кислота з додаванням окиснювачів (хлору, пероксиду водню).

Хімізм процесу: Платина та паладій утворюють розчинні хлоридні комплекси, наприклад, гексахлороплатинову кислоту $\text{H}_2(\text{PtCl}_6)$.

Селективне осадження: Після того як метали перейшли у розчин, їх потрібно розділити. Це робиться шляхом послідовного додавання реагентів (наприклад, хлориду амонію), які змушують конкретний метал випадати в осад у вигляді солі.

Переваги: Можливість роботи з невеликими обсягами сировини, висока селективність (можна вилучати метали окремо).

Недоліки: Утворення величезної кількості токсичних стічних вод та необхідність утилізації агресивних кислотних залишків.

4.2. Пірометалургійні методи («сухі» технології)

Методи базуються на плавці сировини при температурах 1500–2000 °С.

– Використання металу-колектора: оскільки температура плавлення платини дуже висока, до подрібненої кераміки додають «колектор» – інший метал (мідь, залізо або свинець). При плавці метали платинової групи розчиняються в колекторі, утворюючи важкий сплав, який опускається на дно печі.

– Шлакоутворення: керамічна основа (кордієрит) перетворюється на легкий шлак, який спливає на поверхню і видаляється.

– Електродугова плавка: найсучаснішим методом є використання плазмово-дугових печей, які дозволяють досягати надвисоких температур і забезпечують вилучення до 98% металів.

Переваги: висока продуктивність, можливість переробки великих партій сировини, відсутність рідких токсичних відходів (шлак можна використовувати у будівництві).

Недоліки: величезні витрати електроенергії та необхідність дорогого обладнання для очищення відхідних газів.

4.3. Порівняльний аналіз методів

Вибір методу залежить від масштабу підприємства:

Малі підприємства (лабораторний тип): Обирають гідрометалургію через нижчу вартість обладнання на старті.

Промислові гіганти: Обирають пірометалургію через швидкість процесу та можливість повної автоматизації.

4.4. Інноваційні підходи: біовилуговування

Останнім часом активно досліджується використання специфічних бактерій, які здатні виділяти органічні кислоти та вимивати платину з кераміки. Це найбільш екологічний шлях, але він потребує тривалого часу (тижні замість годин у печі).

5. Афінаж, стандартизація та ринок в Україні

Після металургійної переробки ми отримуємо не чистий метал, а концентрат або сплав (так званий «корольок»), де вміст платиноїдів може коливатися від 10% до 15%. Для того, щоб ці метали можна було знову використовувати в промисловості або реалізувати на біржі, вони мають пройти процедуру афінажу.

5.1. Хімічний афінаж до високої чистоти

Афінаж – це комплекс фізико-хімічних методів для отримання металів високої чистоти (не менше 99,9%).

Процес розчинення: отриманий на попередніх етапах концентрат повторно розчиняють у «царській горілці». Згідно з технологічними картами, спочатку процес йде без підігріву (4–5 годин), а потім розчин нагрівають до 110–120 °С. Це дозволяє перевести в рідку фазу понад 99% платини.

Осадження хлорплатинату: у розчин додають хлористий амоній (NH_4Cl). В результаті утворюється яскраво-жовтий осад – хлорплатинат амонію.

Прожарювання: отриманий осад фільтрують, промивають і піддають термічній обробці при температурі до 1000 °С протягом 10–12 годин.

Результат: утворюється губчаста платина (сірий порошок), яку потім пресують і плавлять в електричних печах для отримання злитків. Аналогічні, але складніші цикли проводяться для розділення паладію та родію.

5.2. Контроль якості та стандартизація

Продукт рециклінгу має відповідати суворим міжнародним та державним стандартам, оскільки МПГ прирівнюються до банківських металів.

Проба: стандартною для промислового використання є чистота 999,5 або 999,9. Наявність навіть 0,1% сторонніх домішок (заліза, свинцю) може критично змінити каталітичні властивості майбутнього виробу.

ДСТУ та ISO: В Україні операції з дорогоцінними металами регулюються Законом «Про державне регулювання видобутку, виробництва і використання дорогоцінних металів». Кожна партія афінованого металу повинна мати паспорт аналізу, підтверджений сертифікованою лабораторією.

5.3. Огляд ринку переробки в Україні

Україна має значний потенціал у сфері рециклінгу МПГ, але галузь має свої особливості:

1. Сировинна база: основне джерело – мережа СТО та спеціалізовані пункти прийому (наприклад, `Leokat`, `Autonovad`), які акумулюють відпрацьовані вузли.

2. Технологічний розрив: в Україні добре розвинені етапи збору, механічної обробки та отримання концентратів. Проте глибокий афінаж до проби 999,9 часто виконується на закордонних підприємствах (Польща, Німеччина), куди експортується наш концентрат.

3. Законодавчі бар'єри: необхідність вдосконалення системи обліку та стимулювання легальної здачі каталізаторів власниками авто. Каталізатори просто «вирізають» без заміни, що погіршує екологію, але створює потік сировини для ринку.

5.4. Техніка безпеки та екологічний моніторинг

Робота на афінажних дільницях пов'язана з високими ризиками:

Хімічна безпека: Робота з концентрованими кислотами та парами хлору потребує потужних систем аспірації та використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Термічна безпека: Робота з розплавами при температурах понад 1500 °С.

Поводження з відходами: Кислі стоки після вилуговування повинні проходити обов'язкову нейтралізацію перед скиданням у каналізацію.

Контрольні питання:

1. Поясніть термін «урбаністичне родовище». Чому відпрацьовані каталізатори вважаються більш цінною сировиною, ніж природна руда?

2. Які три основні метали платинової групи (МПГ) використовуються в автомобільних нейтралізаторах і за нейтралізацію яких саме токсичних газів відповідає кожен із них?

3. У чому полягає основна відмінність у складі активного шару каталізаторів для бензинових та дизельних двигунів?

4. Опишіть будову «washcoat» (проміжного шару). Яку роль він відіграє в процесі каталізу та як змінюється його структура при перегріві двигуна?

5. Порівняйте керамічні та металеві носії (моноліти). Які особливості кожного типу слід враховувати під час механічної підготовки до переробки?

6. Яке призначення етапу гомогенізації подрібненого керамічного порошку перед проведенням аналізу?
7. Принцип роботи XRF-спектрометра: чому цей прилад є незамінним у пункті прийому вторинної сировини?
8. Які екологічні ризики виникають при стихійному накопиченні відпрацьованих каталізаторів на звалищах?
9. Суть гідрометалургійного методу: які переваги та головні екологічні недоліки використання «мокрих» технологій?
10. Що таке «метал-колектор» у пірометалургії? Які метали найчастіше використовують у цій ролі та чому?
11. Чому сажові фільтри (DPF) потребують попередньої термічної обробки (випалювання) перед початком хімічного вилучення металів?
12. Опишіть процес отримання «губчастої платини». На якому етапі афінажу вона утворюється?
13. Які вимоги висуваються до чистоти (проби) афінованих металів для їх повторного використання в промисловості?
14. Яка роль «царської горілки» в процесі афінажу? Опишіть температурний режим та тривалість реакції розчинення концентрату.
15. Які основні фактори впливають на ціноутворення відпрацьованого каталізатора на внутрішньому ринку України?

Лекція 5

Законодавче регулювання та технологічні цикли вторинної переробки свинцево-кислотних акумуляторів

Мета лекції: сформувати системні знання про нормативно-правове регулювання та технологічні цикли рециклінгу свинцево-кислотних акумуляторів, розкрити еколого-економічну доцільність переробки небезпечних відходів відповідно до стандартів ЄС (директиви RoHS, WEEE), а також детально вивчити послідовність етапів дезактивації та металургійні методи вилучення вторинного свинцю для забезпечення замкненого циклу виробництва.

План лекції

1. Міжнародне та вітчизняне законодавство у сфері поводження з електронними відходами (Директиви RoHS, WEEE)
2. Еколого-економічне обґрунтування рециклінгу АКБ: світовий досвід та стан в Україні
3. Вплив конструктивних особливостей акумуляторів на вибір методу утилізації
4. Етапи технологічного процесу: від збору та дезактивації електроліту до розділення компонентів
5. Класифікація методів вилучення вторинного свинцю (піро-, гідро- та електрометалургія)

1. Міжнародне та вітчизняне законодавство у сфері поводження з електронними відходами (Директиви RoHS, WEEE).

1.1. Глобальні виклики та концепція розширеної відповідальності виробника (EPR)

Сучасний стан глобальної економіки характеризується експоненціальним зростанням обсягів електронних відходів (e-waste). Свинцево-кислотні акумулятори (LAB – Lead-Acid Batteries) займають особливе місце в цій структурі, оскільки вони є найбільш перероблюваним продуктом у світі, проте їх неконтрольований обіг несе критичні екологічні ризики.

Основною проблемою є не дефіцит технологій, а економічна доцільність. У країнах з перехідною економікою часто домінує неформальний сектор переробки, де вилучення свинцю відбувається примітивними методами (вилавка на відкритому вогні), що призводить до забруднення ґрунтів та отруєння персоналу. Наприклад ситуація в Агбоглоші (Гана), яка тривалий час вважалася найбільшим звалищем електроніки у світі. Звалище Агбоглоші одне з найзабрудненіших місць на планеті. У 2013 році за версією «Blacksmith Institute» звалище Агбоглоші обігнало зону відчуження в Чорнобилі за забрудненістю. Знаходиться у передмісті Аккри, столиці Гани. Агбоглоші було надзвичайно красивим місцем з річками, ставком, великою кількістю

риби, доки сюди, з кінця 1990-х років, не почали звозити з усього світу комп'ютерну техніку яка відпрацювала свій термін. Після вилучення цінних металів, пластикові корпуси і кожухи кабелів спалюють просто на звалищі. Токсини, такі як свинець, арсен, кадмій і ртуть перевищують норми концентрації в сотні раз.





Спроби впровадження західних стандартів там наштовхувалися на відсутність механізму фінансування збору, тіншового імпорту, корупційних ризиків та технологічного розриву. Саме такі приклади дали поштовх до юридичного закріплення відповідальності тих, хто випускає товар на ринок.

Концепція розширеної відповідальності виробника (EPR)

Розширена відповідальність виробника (Extended Producer Responsibility, EPR) – це стратегія захисту довкілля, за якої відповідальність виробника за продукт поширюється на стадію післяспоживчого циклу життєвого циклу продукту.

Ключові принципи EPR:

– фінансова відповідальність: виробник оплачує збір, транспортування та утилізацію відпрацьованих товарів;

– організаційна відповідальність: створення систем зворотного викупу (take-back schemes);

– стимулювання еко-дизайну: якщо продукт важко переробити, екологічний збір для виробника стає вищим.

Для кращого розуміння різниці між традиційним підходом та моделлю EPR, розглянемо наступну таблицю 1:

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз моделей управління відходами

| Параметр порівняння | Традиційна модель (Municipal Waste Management) | Модель розширеної відповідальності (EPR) |
|-----------------------------------|---|--|
| Хто відповідальний за утилізацію? | Місцеві органи влади (муніципалітети). | Виробники, імпортери, дистриб'ютори. |
| Джерело фінансування | Податки громадян або комунальні платежі. | Екологічний збір, включений у вартість товару. |
| Мета системи | Санітарне очищення територій (вивіз на полігон). | Максимальне повернення ресурсів у виробничий цикл. |
| Логістичний ланцюг | Лінійний (виробництво -> споживання -> смітник). | Циркулярний (виробництво -> споживання -> рециклінг -> виробництво). |
| Вплив на дизайн продукту | Мінімальний (виробнику байдуже, що буде з товаром). | Високий (виробник зацікавлений у легкому розбиранні виробу). |

1.2. Директива WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) 2012/19/EU

Директива WEEE є основним інструментом Європейського Союзу для регулювання збору, утилізації та відновлення відпрацьованого електричного та електронного обладнання. Її головна мета – мінімізація впливу e-waste на довкілля шляхом стимулювання вторинної переробки.

Директива охоплює широке коло товарів, які поділені на категорії. Свинцево-кислотні акумулятори часто розглядаються як компонент у складі складного обладнання, наприклад ДБЖ, або як окремий продукт, що підпадає під супутні регламенти.

Основні вимоги Директиви:

– роздільний збір: держави-члени повинні забезпечити системи, що дозволяють кінцевим користувачам та дистриб'юторам повертати відходи безкоштовно.

– норми збору (Collection Targets): мінімальний рівень збору має становити 65% від середньої ваги обладнання, випущеного на ринок за три попередні роки, або 85% від обсягу утворених відходів.

– пріоритет переробки: Директива встановлює ієрархію: запобігання утворенню відходів > підготовка до повторного використання > рециклінг > інша утилізація (наприклад, енергетична).

Згідно з Директивою, все обладнання повинно мати спеціальне маркування. Це не просто формальність, а юридична вимога для ідентифікації товарів, що підлягають особливій утилізації, наприклад, символ перекресленого сміттевого контейнера на колесах з горизонтальною лінією під ним. Лінія вказує на те, що продукт був випущений на ринок після 13 серпня 2005 року (для акумуляторів під символом також додається хімічний символ металу (Pb для свинцю), якщо його вміст перевищує 0,004%).

Для різних категорій обладнання встановлені конкретні відсоткові показники маси, яка повинна бути повернута в оборот (табл. 2).

Таблиця 2 – Показники ефективності утилізації (Recovery Targets)

| Категорія обладнання (приклад) | Рівень відновлення (Recovery) | Рівень рециклінгу (Recycling) |
|---|----------------------------------|----------------------------------|
| Велика побутова техніка | 85% | 80% |
| ІТ та телекомунікаційне обладнання | 80% | 75% |
| Джерела безперебійного живлення (з АКБ) | 80% | 75% |
| Споживче обладнання (інструменти) | 75% | 55% |

Одним із найбільших викликів для Директиви WEEE є виробники, які продають товари онлайн через міжнародні маркетплейси, але не реєструються в національних системах утилізації та не сплачують екологічні внески. Це створює нерівні умови конкуренції для локальних виробників, які сумлінно виконують норми закону.

1.3. Директива RoHS (Restriction of Hazardous Substances) 2011/65/EU

Якщо Директива WEEE регулює питання «що робити з відходами», то Директива RoHS фокусується на етапі виробництва, обмежуючи використання небезпечних речовин в електричному та електронному обладнанні (ЕЕО).

Основна мета та сфера застосування

Головне завдання RoHS – запобігти потраплянню токсичних металів у довкілля під час експлуатації та, що найважливіше, під час термічної утилізації відходів. Це забезпечує безпеку здоров'я працівників переробних заводів та полегшує подальший рециклінг матеріалів.

Директива встановлює гранично допустиму концентрацію (0,1% від ваги однорідного матеріалу) для низки речовин (табл 3).

Таблиця 3.

| Речовина | Хімічний символ | Чому обмежена? |
|----------------------|-----------------|--|
| Свинець | Pb | Нейротоксичність, накопичення в організмі. |
| Ртуть | Hg | Ураження центральної нервової системи. |
| Кадмій | Cd (межа 0,01%) | Канцерогенність, токсичність для нирок. |
| Шестивалентний хром | Cr VI | Висока корозійна активність та токсичність. |
| Бромовані антипірени | PBB, PBDE | Стійкі органічні забруднювачі, виділяють діоксини при горінні. |

RoHS обмежує використання свинцю, але свинцево-кислотні акумулятори все ще існують. Це стає можливим завдяки механізму Додатку III та IV до Директиви, який містить перелік винятків:

1. Свинець у припоях: Тривалий час дозволявся для медичного та військового обладнання через вимоги до надійності (безсвинцеві припої можуть утворювати «вуса», що спричиняють короткі замикання).

2. Свинцево-кислотні АКБ: Оскільки на даний момент для багатьох промислових та стартерних завдань немає повноцінної економічно вигідної альтернативи з таким же циклом життя, вони виведені з-під прямої заборони RoHS, але регулюються спеціалізованим «Батарейним регламентом».

Продовжуємо. Цей підрозділ є критично важливим, оскільки він базується на найновішому законодавстві ЄС, яке кардинально змінює правила гри для виробників свинцево-кислотних акумуляторів (LAB).

1.4. Регламент ЄС про батареї та акумулятори (2023/1542)

На зміну старій Директиві 2006/66/ЄС прийшов новий Регламент (EU) 2023/1542, який став чинним у 2024 році. Головна відмінність Регламенту від Директиви полягає в тому, що він має пряму дію в усіх країнах ЄС без потреби впровадження в національні закони, що уніфікує вимоги до переробки.

Нова класифікація акумуляторів

Регламент чітко розділяє типи батарей, що важливо для технологічного циклу:

1. Портативні (Portable): Вага до 5 кг, загального призначення.
2. Стартерні (SLI – Starting, Lighting, Ignition): Саме сюди відноситься більшість автомобільних свинцево-кислотних АКБ.
3. LMT (Light Means of Transport): Для електросамокатів та велосипедів.
4. Електромобільні (EV): Тягові батареї.
5. Промислові (Industrial): Резервне живлення, сонячні станції.

Ключові нововведення: Цифровий паспорт та рециклінг

Регламент впроваджує термін "Digital Battery Passport" (Цифровий паспорт батареї) – електронний реєстр для кожної АКБ ємністю понад 2 кВт·год.

Основні вимоги Регламенту:

Декларація вуглецевого сліду (Carbon Footprint): Виробник зобов'язаний розраховувати обсяг викидів CO₂ на всіх етапах: від видобутку свинцю до утилізації.

Обов'язковий вміст вторинної сировини: Це найважливіший пункт для свинцево-кислотної галузі. Законом встановлено мінімальні частки металів, отриманих шляхом рециклінгу, які повинні бути у новій батареї (табл 4).

Таблиця 4 – Нормативи вмісту рецикльованих матеріалів у нових АКБ

| Матеріал | З 2031 року | З 2036 року |
|--------------|-------------|-------------|
| Свинець (Pb) | 85% | 94% |
| Літій (Li) | 6% | 12% |
| Кобальт (Co) | 16% | 26% |
| Нікель (Ni) | 6% | 15% |

Регламент підвищує планку для переробних заводів. Якщо раніше достатньо було просто виплавити свинець, то тепер контролюється відсоток вилучення кожної фракції.

Регламент вимагає, щоб портативні акумулятори в пристроях були легкозамінними. Хоча це менше стосується автомобільних АКБ (які і так знімні), це суттєво впливає на дизайн промислових блоків безперебійного живлення, де акумуляторні збірки мають бути модульно доступними для швидкого демонтажу та заміни.

1.5. Гармонізація українського законодавства із нормами ЄС

Україна, як кандидат у члени ЄС, взяла на себе зобов'язання привести екологічне законодавство у відповідність до європейських стандартів. Ключовим етапом став перехід від радянської моделі «поводження з відходами» до європейської моделі «управління ресурсами» (табл. 5).

Закон України «Про управління відходами» (№ 2320-IX) Цей закон, що набрав чинності у липні 2023 року, є рамковим і впроваджує основні поняття Директив ЄС у наше правове поле.

Основні зміни для галузі акумуляторів:

– ієрархія управління відходами: законодавчо закріплено пріоритет рециклінгу над захороненням. свинцево-кислотні АКБ офіційно заборонено вивозити на звичайні полігони ТПВ.

– класифікація відходів: впроваджено Національний перелік відходів, гармонізований із переліком ЄС (List of Waste). Відпрацьовані АКБ класифікуються як небезпечні відходи.

– інформаційна система «ЕкоСистема»: запровадження електронного обліку відходів. Кожен етап переміщення акумулятора – від СТО до переробного заводу – має фіксуватися в цифровій системі.

Впровадження EPR (POB) в Україні На даний момент розробляється спеціальний закон «Про батареї та акумулятори», який має деталізувати механізм Розширеної відповідальності виробника.

Реальний стан та виклики України:

Тіньовий ринок: Значна частина свинцю в Україні переробляється кустарним методом через відсутність жорсткого контролю за дрібними приймальними пунктами. Це призводить до втрати електроліту, який просто виливається в каналізацію.

Лицензування: Для роботи з АКБ підприємство повинно мати ліцензію на поводження з небезпечними відходами та відповідати жорстким вимогам щодо наявності очисних споруд (згідно з Постановою КМУ №1120).

Вплив війни: Руйнування логістичних ланцюгів та великих промислових центрів переробки (наприклад, на сході країни) створило дефіцит потужностей для безпечної утилізації промислових АКБ зі зруйнованих об'єктів енергетики.

Таблиця 5 – Порівняльна характеристика регулювання (Україна vs ЄС)

| Параметр | Поточний стан в Україні | Стандарт ЄС (Регламент 2023/1542) |
|------------------------|---|--|
| Збір АКБ | Переважно стихійний (через грошові виплати за брухт). | Організовані мережі збору під егідою виробників (РОВ). |
| Цифровий паспорт | На стадії розробки (ЕкоСистема). | Обов'язковий для великих промислових батарей. |
| Утилізація електроліту | Часто ігнорується дрібними гравцями. | Суворий контроль та 100% нейтралізація/рециклінг кислоти. |
| Відповідальність | Адміністративні штрафи (часто низькі). | Величезні санкції та заборона виходу на ринок (Market access). |

2. Еколого-економічне обґрунтування рециклінгу АКБ: світовий досвід та стан в Україні.

Свинцево-кислотні акумулятори є еталоном циркулярної економіки. На відміну від літій-іонних батарей, де рециклінг часто є збитковим без субсидій, переробка СКА – це високорентабельний бізнес (табл. 6).

Економічні переваги вторинного свинцю:

– Енергоефективність: отримання свинцю з брухту потребує лише 25-30% енергії, необхідної для його виплавки з руди.

– Нескінченний цикл: свинець можна переробляти безліч разів без втрати його фізико-хімічних властивостей.

– Логістична вигода: родовища свинцю зосереджені в декількох країнах (Китай, Австралія, США), тоді як «родовища» відпрацьованих АКБ є всюди, де є автотранспорт.

Таблиця 6 – Порівняльна таблиця витрат на виробництво свинцю:

| Параметр | Первинний свинець (з руди) | Вторинний свинець (рециклінг) |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Енерговитрати | 100% (базовий рівень) | 25 – 35% |
| Вихід металу | 5 – 10% (з маси руди) | 60 – 65% (з маси АКБ) |
| Витрати на логістику сировини | Високі (транспортування з шахт) | Низькі (збір у великих містах) |
| Екологічні податки | Високі (за порушення ландшафту) | Пільгові (за утилізацію відходів) |

Економічне обґрунтування рециклінгу базується не лише на прибутку від продажу свинцю, а й на уникненні витрат (avoided costs) на ліквідацію екологічних катастроф (табл. 7).

Основні вектори забруднення:

– свинцева токсичність: свинець – це кумулятивна отрута. При потраплянні в ґрунт він не розкладається.

– кислотна деградація: пролитий електроліт різко змінює рН ґрунту, що призводить до загибелі мікрофлори та вимивання важких металів у підземні води.

– аерозольні викиди: при кустарній переробці (випалюванні) свинець потрапляє в атмосферу у вигляді дрібнодисперсного пилу, який осідає в легенях.

Таблиця 7 – Порівняння вартості переробки та вартості рекультивації

| Дія | Вартість (умовні одиниці) | Результат |
|-------------------------------------|---------------------------|---|
| Професійна переробка 1 т АКБ | + 150–200 \$ (прибуток) | Повернення 600 кг свинцю в оборот. |
| Захоронення 1 т АКБ на звалищі | - 500–800 \$ (збитки) | Забруднення підземних вод, штрафи. |
| Рекультивація 1 га землі від свинцю | - 50 000 – 150 000 \$ | Часткове відновлення родючості через 10-20 років. |

2.3. Світовий досвід: Моделі стимулювання збору (США, ЄС, Китай)

Ефективність рециклінгу свинцю у світі тримається на трьох різних підходах до стимулювання збору. Кожна з цих моделей має свої переваги, які Україна може запозичити (табл. 8).

1. Модель США: Система «депозиту» (Core Charge)

Це найбільш ринкова та успішна модель у світі (забезпечує 99% збору).

Механізм: При купівлі нового акумулятора покупець сплачує «заставну вартість» (депозит), зазвичай це \$15–25. Ці гроші повертаються покупцеві миттєво, якщо він приносить старий акумулятор.

Результат: Акумулятор перетворюється на «валюту». Навіть якщо власник його викине, його підбере інша людина, щоб отримати ці гроші.

Перевага: Система працює сама по собі без державних субсидій, на чистому економічному інтересі.

2. Модель ЄС: Реєстрація та «зелений» збір

Тут основний акцент на юридичній відповідальності виробника (EPR), яку ми розглядали у Розділі 1.

Механізм: Виробники сплачують внески в спеціальні фонди (PRO). Ці кошти йдуть на дотування логістики збору у віддалених регіонах, де возити брухт на завод не вигідно.

Кейс Німеччини: Кожен магазин, що продає АКБ, зобов'язаний прийняти старий акумулятор безкоштовно. Якщо магазин відмовляється він отримує величезний штраф.

3. Модель Китаю: Боротьба з нелегалами та консолідація

Китай тривалий час був центром «брудної» переробки, але з 2015 року радикально змінив політику.

Механізм: Введення податку на споживання (4%) для виробників, які не мають власних потужностей з рециклінгу. Держава закрила тисячі дрібних кустарних цехів, дозволивши працювати лише гігантським заводам з потужністю від 100 000 тонн на рік.

Результат: Різке зниження викидів свинцю в атмосферу та створення світових лідерів у галузі вторинної металургії.

Таблиця 8 – Порівняльна таблиця світових моделей

| Параметр | Модель США (Депозитна) | Модель ЄС (Регуляторна) | Модель Китаю (Державна) |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---|
| Головний стимул | Грошова виплата споживачу. | Законодавчий обов'язок виробника. | Жорсткий екологічний контроль та податки. |
| Рівень збору | ~99% | ~90–95% | ~80% (швидко зростає) |
| Хто платить за систему? | Кінцевий споживач. | Виробник (через собівартість). | Виробник та держава. |

2.4. Аналіз ринку та інфраструктури рециклінгу в Україні

Україна має значний промисловий потенціал для переробки свинцево-кислотних акумуляторів (СКА), проте ринок залишається дезорганізованим через відсутність працюючої моделі розширеної відповідальності виробника (EPR).

На відміну від багатьох інших видів відходів, для свинцю в Україні існують сучасні заводи, побудовані за європейськими технологіями (зокрема, з використанням італійського обладнання Engitec Technologies).

Основні центри переробки:

– МНПК «ВЕСТА» (Дніпро): найбільший комплекс у Східній Європі з повним циклом – від переробки брухту до випуску нових АКБ.

– завод «Рекуперація свинцю» (група компаній «ТАС»): Спеціалізоване підприємство, що фокусується на екологічно безпечній утилізації та отриманні марочного свинцю.

– ТОВ «Еко-Стандарт»: Підприємства, що спеціалізуються на десульфурізації шлаків та нейтралізації електроліту.

Проблема завантаженості: Незважаючи на те, що сумарна потужність українських заводів перевищує 100 000 тонн на рік (що повністю покриває внутрішні потреби), вони часто завантажені лише на 40–60% через дефіцит офіційної сировини.

Головною економічною особливістю України є домінування неформального сектору збору. Реальна схема обігу АКБ в Україні:

1. Точка збору: Дрібні пункти прийому металобрухту, де АКБ приймають за готівку.

2. Первинна обробка: Часто на таких пунктах електроліт просто зливають у землю для полегшення ваги та транспортування, що є екологічним злочином.

3. Перепродаж: Брухт акумуляторів накопичується великими партіями та продається на заводи (або експортується як «свинцевий брухт», що часто обмежено законом).

3. Вплив конструктивних особливостей акумуляторів на вибір методу утилізації.

Для інженера-технолога вторинної переробки свинцево-кислотний акумулятор (СКА) – це багатокомпонентна система, що складається з металів,

оксидів, полімерів та агресивного електроліту. Ефективність рециклінгу залежить від того, наскільки якісно ці фракції будуть розділені на етапі механічного подрібнення.

Основні конструкційні вузли як об'єкти сепарації (табл. 9):

1. Свинцеві решітки (Струмоводи) – це найбільш цінна частина, оскільки вона складається з металевого свинцю з додаванням легуючих елементів: свинець (Pb) + сурма (Sb), кальцій (Ca), олово (Sn) або селен (Se). Решітки легко відокремлюються від активної маси під час вібросепарації завдяки різниці в густині та твердості.
2. Активна маса (Паста) – «брудна» частина акумулятора, яка створює найбільше проблем при виплавці. Склад: Суміш оксидів свинцю (PbO, PbO₂) та сульфату свинцю (PbSO₄), що утворюється під час розряду. Паста містить сірку. Якщо її не десульфуризувати перед плавкою, вона перетворюється на діоксид сірки (SO₂), що потребує дороговартісних систем газоочищення.
3. Корпус та кришка - сучасні АКБ на 95% складаються з поліпропілену. Після подрібнення та промивання він перетворюється на гранулят, який знову використовується для виробництва нових корпусів АКБ.
4. Сепаратори (Діелектричні перегородки) - розміщуються між пластинами для запобігання короткому замиканню: матеріал: Мікропористий полівінілхлорид (PVC), поліетилен (PE) або скловолокно (в AGM-батареях). ПВХ-сепаратори є небажаними при термічній переробці, оскільки при нагріванні виділяють хлор, який руйнує футеровку печей та є токсичним. У сучасних АКБ їх намагаються замінювати на поліетиленові.
5. Борни (Виводи) та міжелементні з'єднання - найчистіший свинець у всьому акумуляторі. Вони зазвичай виготовляються методом лиття під тиском і майже не містять шламів активної маси, що робить їх ідеальними для швидкого переплаву без глибокої очистки.

Таблиця 9 – Матеріальний баланс типового стартерного АКБ (17 кг)

| Компонент | Масова частка (%) | Вага (кг) | Призначення у вторинній переробці |
|--|-------------------|-----------|--|
| Металевий свинець (решітки, борни) | 25 – 30% | 4.2 – 5.1 | Переплав на м'який свинець або сплави. |
| Свинцева паста (оксиди, сульфати) | 35 – 40% | 6.0 – 6.8 | Відновлювальна плавка (піро- або гідрометалургія). |
| Електроліт (H ₂ SO ₄ + H ₂ O) | 20 – 25% | 3.4 – 4.2 | Нейтралізація або регенерація. |
| Поліпропілен (корпус) | 5 – 8% | 0.8 – 1.3 | Вторинна грануляція. |
| Інші пластики та сепаратори | 1 – 3% | 0.2 – 0.5 | Утилізація або спалювання з рекуперацією енергії. |

При розрахунку економіки заводу з переробки АКБ, «вихід» свинцю рахують не від повної ваги батареї, а від сухої ваги без електроліту. Зазвичай це 60-65% металу від загальної маси нерозібраного акумулятора.

температурного режиму печі та кількість флюсів.

3.1. Хімічний склад та морфологія шламів

Після механічного подрібнення акумулятора та відділення пластику й металевих решіток, залишається дрібнодисперсна фракція – активна маса або

шлам. Це найбільш хімічно активна частина АКБ, яка пройшла сотні циклів «заряд-розряд».

Хімічна трансформація в циклі експлуатації У новому акумуляторі позитивні пластини складаються з діоксиду свинцю (PbO_2), а негативні – з губчастого свинцю (Pb). Однак у відпрацьованому акумуляторі (особливо глибоко розрядженому або сульфатованому) хімічний склад значно змінюється. Основними компонентами шламів є:

– Сульфат свинцю ($PbSO_4$): Становить від 40% до 60% маси шламу. Це головне джерело сірки, яка при плавці без попередньої підготовки перетворюється на токсичний газ SO_2 .

– Оксиди свинцю (PbO , PbO_2): Продукти недорозряду та деградації активної маси.

– Металевий свинець (Pb): Дрібні частки, що обсіпалися з решіток.

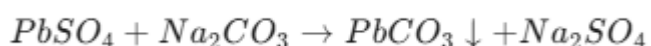
Морфологія та фізичні властивості Шлам являє собою вологий пастоподібний матеріал темно-коричневого або сірого кольору. Розмір часток від 0,1 до 100 мкм, вологість 8–12%. Висока вологість збільшує енерговитрати на сушку перед плавкою.

Вплив легуючих добавок на якість вторинної сировини У сучасних акумуляторах свинець ніколи не буває чистим. Для покращення характеристик виробники додають інші метали, які при рециклінгу стають «домішками» (табл.10).

Таблиця 10.

| Елемент | Навіщо додали в АКБ? | Вплив на переробку (Рециклінг) |
|--------------|---|--|
| Сурма (Sb) | Зміцнює решітки (в АКБ "Hybrid" або "Antimony"). | Потребує афінажу, якщо потрібно отримати «м'який» чистий свинець (99.9%). |
| Кальцій (Ca) | Зменшує саморозряд та википання води (АКБ "Ca/Ca"). | При плавці переходить у шлак, збільшуючи його об'єм та втрати свинцю. |
| Олово (Sn) | Покращує корозійну стійкість. | Важко відділити від свинцю; зазвичай залишається в сплаві. |
| Барій (Ba) | Використовується як розширювач у пасті. | Може ускладнювати фільтрацію електроліту при гідрометалургійній переробці. |

Гідрометалургійна підготовка (Десульфуризація) Для того, щоб зменшити викиди сірки, шлам перед плавкою піддають десульфуризації – обробці розчином соди (Na_2CO_3) або їдкого натру ($NaOH$).



В результаті отримуємо карбонат свинцю, який легко плавиться, та розчин сульфату натрію, який можна кристалізувати та продавати як побічний продукт (наприклад, для виробництва пральних порошків).

3.3. Електроліт: властивості, концентрація та небезпеки

Електроліт у свинцево-кислотних акумуляторах – це водний розчин сірчаної кислоти. У відпрацьованих батареях його стан значно відрізняється від первинного, що впливає на технологію його нейтралізації або регенерації.

Хімічні та фізичні характеристики У новому, повністю зарядженому акумуляторі, густина електроліту становить приблизно 1,27–1,29 г/см³, що відповідає концентрації кислоти біля 35–38%.

Зміни у відпрацьованому електроліті:

1. Зниження густини: Через сульфатацію пластин частина кислоти зв'язується у твердий сульфат свинцю (PbSO₄). У "старих" АКБ густина може падати до 1,10–1,15 г/см³.

2. Забруднення металами: Під час експлуатації в розчин переходять іони свинцю (Pb²⁺), сурми, міді та заліза. Це робить електроліт не просто кислим, а токсичним розчином, який не можна просто нейтралізувати крейдою і злити в каналізацію.

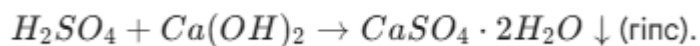
3. Наявність шламу: Відпрацьований електроліт часто є каламутним через дрібні частки активної маси, що перебувають у зваженому стані.

Технологічні методи поводження з електролітом

На сучасних заводах з переробки використовують три основні шляхи:

1. Пряма нейтралізація (найпростіший метод)

Кислоту змішують із вапняним молоком (Ca(OH)₂) або каустичною содою.



Утворюється велика кількість технічного гіпсу, який часто забруднений свинцем і потребує захоронення як небезпечний відхід.

2. Отримання товарного сульфату натрію

Електроліт нейтралізують содою (Na₂CO₃), після чого розчин фільтрують, випарюють і кристалізують.

Отримують чистий сульфат натрію (Na₂SO₄), який є цінною сировиною для скляної промисловості та виробництва миючих засобів.

3. Регенерація (найбільш екологічний метод)

Очищення електроліту від домішок металів та його концентрування для повторного використання у виробництві нових АКБ (табл. 11). Це вимагає складних систем мембранної фільтрації.

Таблиця 11 – Порівняльна таблиця агресивності електроліту

| Стан АКБ | Густина (г/см ³) | Концентрація H ₂ SO ₄ (%) | Наявність домішок Pb |
|--------------------------------|------------------------------|---|---------------------------------|
| Новий (заряджений) | 1.28 | ~38% | Відсутня |
| Б/В (робочий) | 1.20 | ~27% | Низька |
| Відпрацьований (сульфатований) | 1.12 | ~16% | Висока |
| Глибоко розряджений | < 1.10 | < 13% | Дуже висока (шламова суспензія) |

Сучасний ринок пропонує три основні типи свинцево-кислотних систем, кожна з яких потребує специфічного підходу до переробки через різницю у фізичному стані електроліту та складі пластин (табл. 12).

Класичні стартерні АКБ Стандартні акумулятори з рідким електролітом є найбільш «зручними» для рециклінгу. Конструктивна особливість – рідка фаза легко зливається. Метод утилізації –

використовується класична схема механічного подрібнення з подальшою гідродинамічною сепарацією. Оскільки пластини легко відокремлюються від корпусу, такі АКБ є ідеальною сировиною для короткобарабанних печей (пірометалургія).

Акумулятори системи AGM: В батареях типу AGM (Absorbent Glass Mat) електроліт абсорбований у скловолоконних матах. Електроліт неможливо просто злити. Скловолоконний сепаратор щільно «спресований» з активною масою. При механічному подрібненні скловолокно подрібнюється в дрібний пил, який забруднює свинцеву пасту. Технологічне рішення: Для AGM-батареї обов'язковим є етап інтенсивної промивки та флотації, щоб відокремити частки скла від оксидів свинцю перед плавкою, інакше збільшується вихід шлаку в печі.

Гелеві акумулятори (GEL): В GEL-АКБ електроліт перебуває у стані желеподібного силікагелю (SiO_2). Високий вміст діоксиду кремнію в усьому об'ємі блоку пластин. Кремній є потужним шлакоутворювачем. При прямій пірометалургійній плавці гелевих АКБ утворюється надмірна кількість в'язкого шлаку, який "запирає" свинець, знижуючи його вихід. Для таких акумуляторів пріоритетною є гідрометалургійна десульфурізація. Попереднє хімічне вилучення сульфатів дозволяє знизити температуру плавки та нівелювати негативний вплив силікагелю.

Легуючі добавки (Ca, Sb, Sn) та афінаж Конструкція решіток (сплави) визначає кінцевий етап утилізації – рафінування.

Таблиця 12

| Тип сплаву решітки | Особливість конструкції | Вибір методу очищення (Афінажу) |
|--------------------------|--|--|
| Малосурм'янисті (Low Sb) | Тверді решітки, стійкі до глибоких розрядів. | Пірометалургійне окиснення: Сурма легко видаляється продувкою повітрям у рафінувальних котлах. |
| Кальцієві (Ca/Ca) | Тонкі решітки, мінімальне обслуговування. | Флюсова очистка: Кальцій потребує спеціальних реагентів (флюсів) для переведення його в шлак при нижчих температурах. |
| Срібновмісні (Ag) | Преміум-сегмент, висока корозійна стійкість. | Електролітичне рафінування: Тільки електроліз дозволяє економічно вигідно вилучити срібло та отримати надчистий свинець (99.99%). |

4. Етапи технологічного процесу: від збору та дезактивації електроліту до розділення компонентів.

Технологічний цикл переробки СКА на сучасних заводах є автоматизованим ланцюгом, де головною метою є 100% сепарація фракцій.

Етап 1: Приймання та вхідний контроль

Дефектовка: Сортування за типом конструкції (WET, AGM, GEL), оскільки вони потребують різних режимів подрібнення.

Зважування: Фіксація маси для розрахунку виходу свинцю.

Етап 2: Злив та дезактивація електроліту

Це критичний етап перед подрібненням, щоб запобігти корозії обладнання та викидам аерозолів.

Метод: Перевертання акумуляторів на конвеєрі або проколювання днища.

Деактивація: Зібрана кислота спрямовується на блок нейтралізації вапняним молоком $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або на установку отримання сульфату натрію Na_2SO_4 .

Етап 3: Подрібнення (Дроблення) Використовуються молоткові дробарки. Акумулятор руйнується на шматки розміром 20–50 мм. У процесі подрібнення постійно подається вода для охолодження ножів та осадження свинцевого пилу.

Етап 4: Гідродинамічна сепарація (Флотація) Розділення відбувається у водному середовищі за рахунок різної густини матеріалів:

Легка фракція (спливає): Поліпропілен та поліетилен. Відправляється на мийку та грануляцію.

Середня фракція (зважена): Сепаратори (PVC/PE) та ебоніт. Вилучаються для подальшої утилізації.

Важка фракція (осідає): Металеві решітки, борни та свинцева паста (шлам).

Етап 5: Відділення пасты (Фільтрація) Суміш свинцю та оксидів проходить крізь вібросита. Металевий свинець залишається на ситах, а тонка паста проходить крізь них, після чого зневоднюється на фільтр-пресах до вологості 8–10%.

На рисунку 1 представлена принципова технологічна схема сучасного автоматизованого комплексу з переробки відпрацьованих свинцево-кислотних акумуляторів (СКА). Ця схема базується на методах механічного подрібнення та гідродинамічної сепарації, що дозволяє досягти глибокого розділення компонентів.

Слід зазначити, що ефективність механічного розділення на етапах 4 та 5 безпосередньо визначає економіку всього заводу. Чим якісніше паста відокремлена від металевих решіток, тим меншим буде утворення шлаку в плавильних печах і тим вищим буде прямий вихід чистого свинцю. Крім того, отримання на 5-му етапі кеку з вологістю не вище 10% дозволяє значно економити паливо при подальшій термічній обробці та забезпечує стабільність роботи систем газоочищення.

Таким чином, механічна підготовка перетворює небезпечний несортований брухт на стандартизовану сировину (свинцевий концентрат, металевий брухт та полімерні гранули), готову до фінальних стадій відновлення металу. Це створює фундамент для вибору оптимального методу вилучення свинцю – піро-, гідро- або електрометалургійного, які ми розглянемо у наступному розділі.

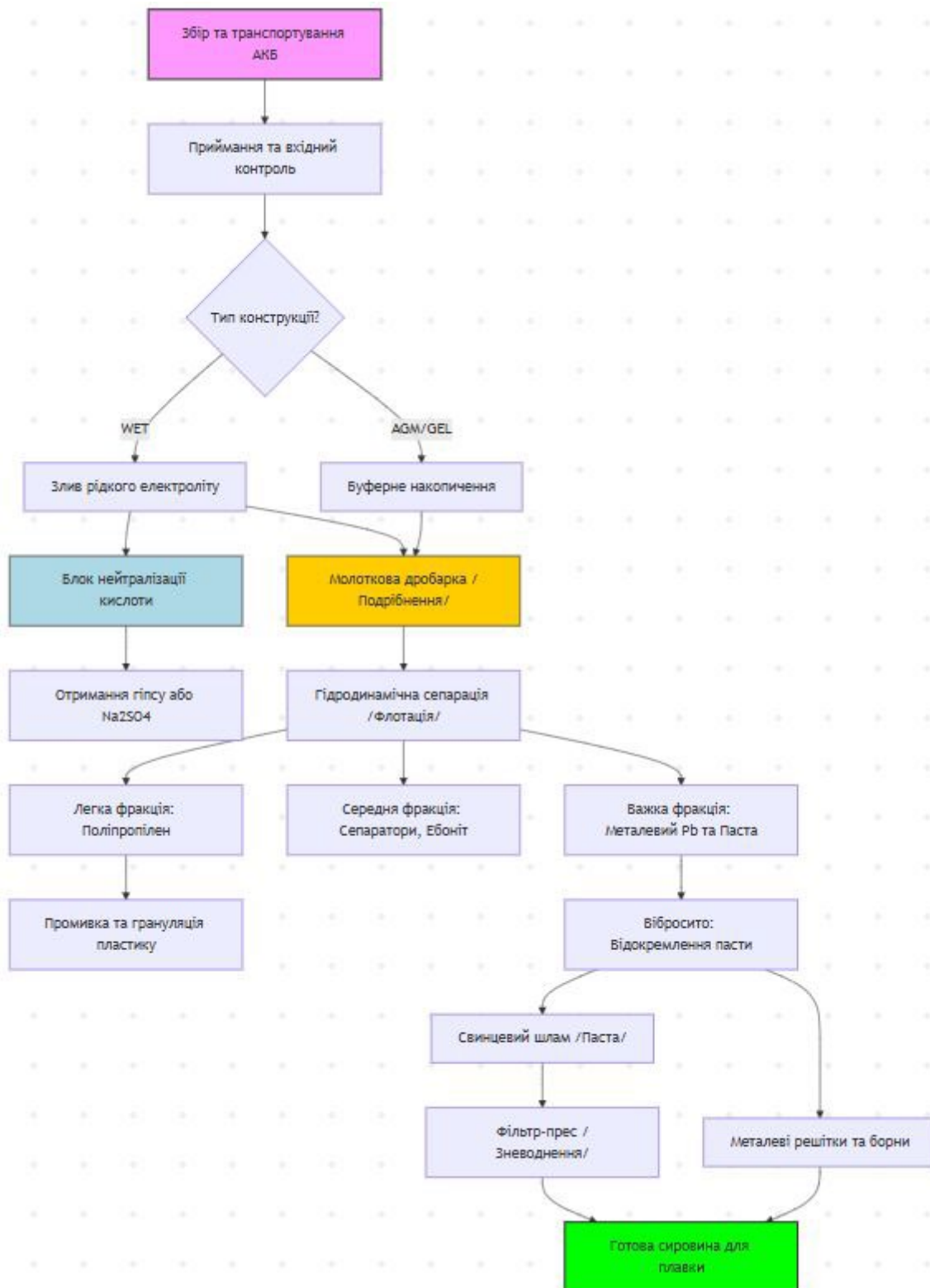


Рисунок 1 – Схема розподілу матеріальних потоків та виходу товарних фракцій при механічній сепарації СКА.

5. Класифікація методів вилучення вторинного свинцю (піро-, гідро- та електрометалургія).

Після механічного розділення на етапі 5 ми отримуємо два основні джерела металу: свинцеву пасту (шлам) та металеві решітки. Вибір методу їх

переробки залежить від технічного оснащення заводу та вимог до чистоти кінцевого продукту.

Пірометалургія (Термічне відновлення) Це «золотий стандарт» галузі. Процес відбувається у короткобарабанних або шахтних печах при температурах 1000 – 1200 °С. Технологія: Свинцевий концентрат змішується з відновником (кокс або антрацит) та флюсами (сода, залізна стружка). Флюси зв'язують залишки сірки та перетворюють домішки у легкоплавкий шлак. Результат: Чорновий свинець або свинцево-сурм'янисті сплави.

Гідрометалургія (Хімічне вилучення) Сучасний екологічний підхід, що виключає стадію високотемпературної плавки. Технологія: Паста розчиняється в електролітах (наприклад, у фторсилікатній кислоті). Свинець переходить у розчин, з якого потім виділяється хімічним осадженням або електролізом. Результат: Висока екологічність (відсутність димових газів) та можливість отримання сполук свинцю високої чистоти.

Електрометалургія (Рафінування) Використовується для отримання надчистого «м'якого» свинцю (99,97 – 99,99%). Технологія: Електролітичне розчинення анодів із чорнового свинцю з подальшим осадженням чистого металу на катодах. Результат: Повне вилучення цінних домішок (срібла, олова) та отримання металу преміум-класу для нових акумуляторів.

Контрольні питання

1. У чому полягає принципова різниця між Директивою WEEE та Директивою RoHS стосовно електронного обладнання та АКБ?
2. Розкрийте зміст поняття «Розширена відповідальність виробника» (EPR). Хто несе фінансовий тягар за утилізацію АКБ у цій моделі?
3. Які мінімальні частки вторинного свинцю (у %) мають міститися в нових акумуляторах до 2031 та 2036 року згідно з нормами ЄС?
4. Чому виробництво вторинного свинцю з брухту АКБ є енергетично вигіднішим за видобуток первинного металу з руди?
5. Які основні токсичні компоненти АКБ становлять найбільшу загрозу для довкілля у разі несанкціонованого захоронення?
6. Поясніть механізм роботи системи «депозиту» (Core Charge) у США. Завдяки чому вона забезпечує рівень збору понад 99%?
7. Чому переробка акумуляторів типу AGM та GEL є технологічно складнішою за переробку класичних стартерних АКБ (WET)?
8. Яку приблизну частку (у %) від загальної маси відпрацьованого акумулятора становить метал (решітки та борни)?
9. Чому злив електроліту має відбуватися до моменту механічного подрібнення корпусу в дробарці?
10. За яким фізичним принципом відбувається розділення поліпропілену та свинцевих компонентів у гідродинамічному сепараторі?
11. Яке цільове значення вологості (у %) має мати свинцева паста після виходу з фільтр-пресу для ефективної плавки?

12. Яку роль виконують флюси (сода, залізна стружка) під час термічного відновлення свинцю в печі?
13. У чому полягає головна екологічна перевага гідрометалургійних методів порівняно з пірометалургійними?
14. Для яких цілей використовується електролітичне рафінування свинцю і якої чистоти металу воно дозволяє досягти?
15. Які основні економічні фактори перешкоджають повній завантаженості офіційних заводів з переробки АКБ в Україні?

Лекція 6

Екологічні та соціальні виклики виробництва та утилізації літій-іонних акумуляторів

Мета лекції: сформувати у студентів цілісне розуміння повного життєвого циклу літій-іонних акумуляторів (Li-ion), висвітлити критичні екологічні наслідки видобутку сировини, проаналізувати соціально-етичні проблеми галузі та визначити технологічні бар'єри, що заважають створенню замкнутого циклу рециклінгу, аналогічного свинцевій індустрії.

План лекції

1. Глобальний екологічний слід видобутку критичної сировини (Li, Co, Ni).
2. Соціально-етичні виклики та «конфліктні мінерали» в ланцюгу постачання.
3. Технологічні бар'єри рециклінгу Li-ion акумуляторів: хімічна різноманітність та пожежна небезпека.
4. Технологічні тренди та інновації в переробці

1. Глобальний екологічний слід видобутку критичної сировини (Li, Co, Ni).

1.1. Глобальний екологічний слід видобутку літію та нікелю

Видобуток критичної сировини для Li-ion акумуляторів зосереджений у специфічних географічних зонах, що створює локальні екологічні катастрофи заради глобального «озеленення» транспорту.

«Літійевий трикутник» та водний стрес Понад 50% світових запасів літію зосереджено у високогірних солончаках Чилі, Аргентини та Болівії. Видобуток тут здійснюється методом випаровування розсолу (рапи) – наземні розсоли викачуються у гігантські випарувальні басейни. Процес концентрування літію триває від 12 до 18 місяців. *Екологічний виклик:* для отримання 1 тонни літію необхідно випарувати близько 2 000 000 літрів води. *Наслідки:* це призводить до різкого зниження рівня ґрунтових вод. Місцеві фермери та корінні народи втрачають доступ до питної води, а унікальні екосистеми (наприклад, місця проживання фламінго) руйнуються через засолення та висихання водойм.



Рисунок 1. Процес видобутку літію методом випаровування (солончак Атакама, Чилі)

На зображенні представлено об'єкти компанії SQM Lithium поблизу Пайне. Цей візуальний матеріал демонструє ключові етапи отримання літєвої сировини:

– випаровувальні басейни: на задньому плані видно каскад гігантських штучних лагун з ропою. Колір води (від яскраво-зеленого до бірюзового (Рис.2)) змінюється залежно від концентрації солей літію в процесі багатомісячного сонячного випаровування.



Рисунок 2. Зміна концентрації літію в процесі випаровування

1. Початкова ропка (0.15% Li, Темно-синій): Відповідає щойно викачаній підземній воді з мінімальним вмістом металу.
2. Стадія насичення (0.80% Li, Бірюзовий): Вода стає світлішою, насичується солями калію та магнію.
3. Проміжний концентрат (2.50% Li, Світло-зелений): Активна фаза, що вимагає найбільшої площі басейнів і триває до 12 місяців.
4. Фінальний концентрат (6.00% Li, Яскраво-зелений/Жовтий): Отримана гранична концентрація, яка є сировиною для хімічного виробництва карбонату літію.

– збір карбонату літію: важка техніка формує насипи викристалізованої солі та карбонату літію – це біла порошкоподібна речовина, яка після збору направляється на подальше очищення.

Еколого-географічний контекст: ландшафт підкреслює пустельний характер регіону. Викачування мільйонів літрів мінералізованої води з-під поверхні солончака для заповнення цих басейнів створює дефіцит вологи в навколишніх ґрунтах, що є головною екологічною проблемою «літєвого трикутника».

Видобуток нікелю: кислотні дощі та хвости Нікель є ключовим елементом високоенергоємних катодів (NMC, NCA). Його видобуток та збагачення пов'язані з високим хімічним навантаженням:

– проблема сульфідних руд: при плавлі нікелевих руд виділяється велика кількість діоксиду сірки (SO₂), що є причиною кислотних дощів, які знищують ліси в радіусі десятків кілометрів навколо заводів.

Порівняння екологічного сліду (витрати ресурсів)

| Ресурс | Об'єкт впливу | Основна проблема |
|-------------|-----------------------------|--|
| Літій (Li) | Гідросфера | Дефіцит прісної води, падіння рівня водоносних горизонтів. |
| Нікель (Ni) | Атмосфера та Світовий океан | Викиди SO ₂ , кислотні дощі, забруднення морського дна хвостами збагачення. |



Рисунок 3. Нирольський промисловий район (РФ)

– гідрометалургійний ризик (НРАЛ): сучасний метод вилучення нікелю з латеритних руд (Індонезія) потребує величезної кількості сірчаної кислоти під високим тиском. *Наслідки:* утилізація «хвостів» (відходів збагачення) часто проводиться шляхом глибоководного скидання в океан, що загрожує кораловим рифам та морській фауні.



Рисунок 4. Видобуток нікелю (Індонезія)



Рисунок 5. Промисловий кластер компанії Tsingshan

1.2. Кобальт: соціально-етичні виклики та «конфліктні мінерали»

Якщо літій – це проблема води, то кобальт (Co) – це [проблема прав людини](#). Понад 70% світового видобутку кобальту зосереджено в Демократичній Республіці Конго (ДРК), що створює унікальний комплекс проблем для ланцюга постачання Li-ion акумуляторів.

В ДРК значна частина кобальту видобувається не промисловими гігантами, а так званими «артизанальними» (кустарними) шахтарями. Видобуток ведеться вручну в нерегульованих шахтах без жодних засобів безпеки. Обвали та отруєння токсичним пилом є буденністю. *Дитяча праця*: За даними міжнародних організацій (Amnesty International), тисячі дітей задіяні на промивці та сортуванні руди, оскільки кобальт часто залягає близько до поверхні. *Вплив на здоров'я*: Постійний контакт із кобальтовим пилом призводить до важких захворювань дихальних шляхів («кобальтова легеня») та серцево-судинних патологій.

[«Кобальт часто прирівнюють до «кривавих алмазів»](#). Кошти від його продажу в деяких регіонах Конго використовуються для фінансування збройних угруповань, що підтримує стан постійного військового конфлікту.

Реакція світових брендів та технологічні наслідки Соціальний тиск змусив автовиробників (Tesla, Apple, BMW) змінити підхід до розробки акумуляторів:

- впровадження цифрових сертифікатів для відстеження кожної партії кобальту від шахти до заводу (Responsible Cobalt Initiative);

- перехід на LFP (Lithium Iron Phosphate): масовий перехід на залізо-фосфатні акумулятори, які взагалі не містять кобальту, попри їх меншу енергоємність;

– зменшення вмісту: в акумуляторах типу NMC (Нікель-Марганець-Кобальт) частка кобальту постійно знижується (перехід від складу 1:1:1 до 8:1:1).

2. Складність конструкції Li-ion як бар'єр для рециклінгу

2.1. Хімічна та конструктивна різноманітність (The Chemical Chaos)

Першим і найбільш критичним бар'єром для створення універсальної індустрії рециклінгу є відсутність єдиного стандарту катодних матеріалів у літій-іонних системах. На відміну від свинцево-кислотних акумуляторів, де активна маса завжди базується на діоксиді свинцю, Li-ion батареї демонструють справжній «хімічний хаос». На переробні підприємства одночасно потрапляють старі мобільні пристрої з високим вмістом кобальту (LCO), тягові батареї електромобілів зі складними потрійними сплавами (NMC або NCA) та сучасні стаціонарні накопичувачі на базі літій-залізо-фосфату (LFP). Кожен із цих типів потребує специфічних реагентів та окремих температурних режимів для вилучення корисних компонентів, що унеможлиблює роботу заводів у режимі «єдиного конвеєра».

Ситуація додатково ускладнюється динамічною зміною пропорцій металів усередині однієї групи хімікатів. Наприклад, у найбільш поширених катодах NMC індустрія пройшла шлях від збалансованого співвідношення 1:1:1 (нікель-марганець-кобальт) до формул 6:2:2 та навіть 8:1:1. Такий тренд на «нікелізацію» диктується прагненням здешевити виробництво за рахунок зменшення частки дорогого кобальту. Для рециклінгових компаній це стає логістичним кошмаром: вміст цінних металів у кожній партії брухту стає непередбачуваним, що вимагає постійного перерахунку економічної рентабельності та коригування хімічних процесів екстракції безпосередньо «на ходу».

Крім хімічного складу, величезний бар'єр створює варіативність геометричних форм-факторів та внутрішньої архітектури комірок. На ринку співіснують три основні типи конструкцій: циліндричні (наприклад, широко відомі 18650 або 2170), призматичні у жорстких алюмінієвих корпусах та м'які полімерні пакети (pouch cells). Кожен тип має власну систему герметизації, різну товщину стінок корпусу та специфічні способи з'єднання внутрішніх електродів. Автоматизована лінія, налаштована на розкриття жорстких призматичних блоків, виявиться абсолютно неефективною або навіть небезпечною при спробі обробки м'яких пакетів, що потребує величезної частки ручної праці на стадії попереднього сортування.

Наступним рівнем складності є різноманітність допоміжних матеріалів, зокрема електролітів та сепараторів, які безпосередньо впливають на чистоту фінального продукту. Виробники використовують різні суміші органічних розчинників (етиленкарбонат, диметилкарбонат) та солей (переважно LiPF_6), які при механічному подрібненні змішуються з активною масою. Якщо у свинцевих акумуляторах електроліт – це стабільний розчин сірчаної кислоти, то в Li-ion системах це летючі та токсичні сполуки, які при випадковому змішуванні різних типів батарей можуть вступати в непередбачувані реакції,

забруднюючи цінну «чорну масу» сторонніми органічними домішками, які вкрай важко видалити на стадії рафінування.

Зрештою, відсутність обов'язкового міжнародного маркування (так званих «цифрових паспортів батарей») робить процес ідентифікації вхідної сировини напівсліпим. На відміну від алюмінієвих банок або пластикових пляшок, які мають чіткі коди переробки, акумуляторна комірка після вилучення з корпусу часто не має жодних розпізнавальних знаків щодо своєї хімії. Це змушує операторів застосовувати дорогі методи експрес-аналізу (наприклад, рентгенофлуоресцентну спектроскопію) для кожної партії. Як результат, висока вартість ідентифікації та сортування за хімічним складом стає головним економічним «гальмом», що робить вторинну переробку Li-ion систем менш привабливою порівняно з прямим видобутком первинної сировини.

2.2. Проблема «Чорної маси» та адгезії матеріалів

Фундаментальною перешкодою для ефективного рециклінгу є надзвичайно висока адгезія активних матеріалів до металевих струмоприймачів. У структурі Li-ion акумулятора катодна суміш (оксиди металів) та анодна суміш (графіт) нанесені на тонку алюмінієву та мідну фольгу відповідно. Для забезпечення стабільної роботи пристрою протягом тисяч циклів заряд-розряд виробники використовують спеціальні високоміцні полімерні сполучні речовини (біндери), найпоширенішим з яких є полівініліденфторід (PVDF). Цей полімер створює стійкий хімічний зв'язок, який не руйнується при звичайному механічному подрібненні, що призводить до того, що значна частина цінних металів залишається «приклеєною» до фольги, забруднюючи фракції алюмінію та міді.

Процес отримання так званої «чорної маси» (Black Mass) – суміші графіту та оксидів металів вимагає повного руйнування цього полімерного зв'язку. На сучасних підприємствах це досягається або шляхом піролізу (термічного розкладання біндера при температурах 500–600°C), або за допомогою селективного розчинення в агресивних органічних розчинниках, таких як N-метил-2-піролідон (NMP). Обидва методи мають суттєві недоліки: піроліз призводить до незворотної втрати літію, який переходить у шлак, та викидів токсичних фторованих газів, а використання розчинників створює величезні об'єми рідких відходів, які потребують дорогої регенерації, що критично підвищує собівартість кінцевого продукту.

Наступним технологічним викликом є сепарація графіту від металевої частини «чорної маси». Графіт становить до 25–30% ваги акумулятора, і в процесі подрібнення він перетворюється на надтонкий пил, який буквально обволікає частинки кобальту, нікелю та літію. Через високу сорбційну здатність графіту подальше вилучення металів методом вилуговування (leaching) стає менш ефективним, оскільки вуглецевий шар перешкоджає доступу кислотних реагентів до металевих центрів. Це змушує інженерів впроваджувати додаткові стадії флотації або високотемпературного випалу графіту, що знову ж таки збільшує енергоємність процесу та вуглецевий слід вторинного виробництва.

Проблема чистоти «чорної маси» також загострюється через присутність міді та алюмінію у вигляді мікрочасток, що утворюються при подрібненні фольги. Навіть мізерні частки міді (менше 0,1%) у складі відновленого катодного матеріалу є критичним дефектом, оскільки при виробництві нових акумуляторів вони стають центрами росту дендритів – гострих кристалічних структур, що проколюють сепаратор і викликають внутрішнє коротке замикання. Таким чином, рециклінг Li-ion систем потребує значно вищого рівня селективності розділення, ніж переробка свинцю, де допуски на чистоту вторинної сировини є набагато ширшими.

Зрештою, «чорна маса» є хімічно нестабільною субстанцією, схильною до саморозігріву та виділення газів при зберіганні. Оскільки вона містить дрібнодисперсні метали та залишки електроліту (солі LiPF_6), при контакті з вологою повітря починається реакція гідролізу з утворенням фтороводню. Це вимагає від заводів не лише герметизації ліній подрібнення, а й створення спеціальних умов для транспортування та зберігання отриманого концентрату в інертній атмосфері або під шаром спеціальних рідин. Така логістична складність робить «чорну масу» не просто сировиною, а небезпечним напівфабрикатом, що суттєво обмежує можливість її переробки на стандартних металургійних підприємствах.

2.3. Механізм теплового розгону та пожежна безпека

Найбільшим викликом для безпеки на стадії механічного подрібнення є залишкова енергія, що зберігається в акумуляторах (SoC – State of Charge). На відміну від свинцево-кислотних батарей, які можна повністю розрядити до безпечного стану, Li-ion комірки часто потрапляють на утилізацію з пошкодженими контролерами (BMS), що робить їхню повну деактивацію неможливою. При фізичному руйнуванні корпусу в дробарці виникає миттєве внутрішнє коротке замикання між катодом та анодом через прокол сепаратора. Це провокує локальне виділення тепла, яке за мілісекунди ініціює екзотермічні реакції розкладання електроліту, що є пусковим механізмом для катастрофічного процесу, відомого як тепловий розгін.

Процес теплового розгону характеризується лавиноподібним зростанням температури до 600–900°C, що супроводжується інтенсивним газовиділенням. При досягненні критичної позначки у 150°C кристалічна решітка оксидів металів на катоді починає руйнуватися, вивільняючи вільний кисень безпосередньо всередину комірки. Цей кисень миттєво вступає в реакцію з горючими органічними розчинниками електроліту, створюючи ефект «внутрішнього пальника», який неможливо загасити шляхом перекриття доступу зовнішнього повітря. Для заводів з рециклінгу це означає необхідність проектування дробарок, здатних витримувати вибуховий тиск та працювати в атмосфері інертних газів (азоту або аргону).

Окрім термічного впливу, пожежа Li-ion акумулятора супроводжується викидом надзвичайно токсичного «хімічного коктейлю». При горінні солі електроліту утворюється фтороводень (HF) – газ, який при контакті зі слизовими оболонками людини перетворюється на кислоту, що спричиняє важкі хімічні опіки та системне отруєння організму. Наявність HF вимагає

використання специфічних корозійностійких матеріалів (наприклад, тефлонового покриття або нержавіючої сталі особливих марок) для всього вентиляційного обладнання та систем газоочищення, що в рази здорожує будівництво цехів переробки порівняно зі свинцевою індустрією.

Специфіка гасіння таких пожеж також створює серйозний бар'єр для масової утилізації. Використання води як вогнегасної речовини при горінні літєвих систем може призвести до утворення вибухонебезпечного водню та розбризкування палаючого електроліту. Більше того, вода, використана при гасінні, насичується іонами важких металів та сполуками фтору, перетворюючись на небезпечний рідкий відхід, який не можна скидати в загальну каналізацію без дорогої багатоступеневої очистки. Це змушує підприємства інвестувати в автоматизовані системи пожежогасіння на основі хладонів або спеціальних сухих порошоків, які здатні поглинати теплову енергію без хімічної взаємодії з літєм.

Нарешті, ризик самозаймання зберігається навіть після завершення активної фази горіння, що називається ефектом «повторного займання» (re-ignition). Пошкоджені комірки можуть тліти годинами або навіть днями через залишкові хімічні реакції в активній масі, що робить логістику та тимчасове зберігання брухту Li-ion надзвичайно складним завданням. На заводах з рециклінгу доводиться впроваджувати зони карантину з цілодобовим термічним моніторингом за допомогою тепловізорів. Така багатошарова система безпеки – від інертного середовища в дробарках до карантинних майданчиків – є головною причиною високих капітальних витрат (CAPEX), що на сьогодні гальмує розвиток галузі у всьому світі.

3. Економіка утилізації та стратегія «Другого життя» (Second Life)

Економічна модель рециклінгу Li-ion акумуляторів сьогодні перебуває у стані формування та суттєво програє налагодженій десятиліттями індустрії переробки свинцю. Головний виклик полягає в тому, що вартість складних технологічних операцій з вилучення чистих металів часто перевищує ринкову вартість отриманої сировини, що змушує шукати шляхи продовження терміну експлуатації батарей без їхнього фізичного руйнування.

Першим критичним фактором є надзвичайно висока вартість логістики та спеціалізованої підготовки брухту до переробки. Через ризик самозаймання відпрацьовані Li-ion акумулятори класифікуються міжнародними правилами як «Небезпечний вантаж 9-го класу», що вимагає використання сертифікованих герметичних контейнерів із вогнетривким наповнювачем (вермікулітом) та спеціально обладнаного транспорту. Витрати на безпечне перевезення пошкоджених батарей до заводу можуть становити до 25–40% від загальної вартості рециклінгу, що робить дрібні пункти збору економічно нерентабельними та вимагає створення великих регіональних хабів.

По-друге, рентабельність переробки прямо залежить від хімічного складу катода, який постійно змінюється під тиском ринку. Найбільш прибутковим є рециклінг старих кобальтових батарей (LCO), але їхня частка стрімко падає. У випадку з масовими залізо-фосфатними акумуляторами (LFP)

вартість вилучених металів (літію, заліза та фосфату) на сьогодні нижча за енерговитрати на їхнє розділення. Це створює ситуацію, коли без державних субсидій або законодавчих вимог щодо обов'язкової частки вторинної сировини в нових авто, приватний бізнес не має стимулів інвестувати в глибоку переробку бюджетних типів АКБ.

Третім економічним бар'єром є екстремальна чистота вторинних матеріалів, необхідна для «замикання циклу». Щоб отриманий літій або нікель можна було знову використати в електромобілях, їхня чистота повинна сягати 99,9% (Battery Grade). Досягнення такого показника вимагає складних багатоступеневих гідрометалургійних циклів із використанням великої кількості хімічних реагентів та систем тонкої фільтрації. Будь-яке коливання цін на первинні метали на світових біржах може миттєво зробити вторинну сировину неконкурентоспроможною порівняно з продукцією гірничодобувних компаній.

Четвертий аспект – це відсутність автоматизації на стадії розбирання корпусів та вилучення модулів. Кожен автовиробник використовує власну унікальну конструкцію пакунків, систем охолодження та способів кріплення комірок. Це змушує переробні заводи використовувати переважно ручну працю для первинного розбирання, що в умовах високої вартості робочої сили в розвинених країнах робить процес утилізації збитковим. Лише перехід до модульного дизайну та «дизайну для переробки» (Design for Recycling) може змінити цю ситуацію в майбутньому.

Нарешті, як альтернатива дорогій утилізації, виникла *концепція Second Life (Друге життя)*. Коли тягова батарея втрачає 20–30% своєї початкової ємності, вона більше не може забезпечувати необхідну динаміку та запас ходу електромобіля, проте залишається ідеальним накопичувачем для стаціонарних завдань. Використання таких батарей у системах зберігання енергії (ESS) для сонячних станцій або резервного живлення дата-центрів дозволяє відкласти витратну утилізацію на 10–15 років. Це створює нову економічну нішу, де вживана батарея стає не відходом, а цінним ресурсом, що суттєво знижує загальну вартість володіння електромобілем для кінцевого споживача.

4. Технологічні тренди та інновації в переробці

Основна мета інновацій – максимально зберегти додану вартість матеріалів, мінімізувати використання первинних реагентів та знизити вуглецевий слід вторинної сировини до рівня, нижчого за показники прямого видобутку.

4.1. Прямий рециклінг (Direct Recycling)

Найбільш перспективним і водночас складним методом є прямий рециклінг, який спрямований на відновлення функціональності катодних матеріалів без їхнього повного хімічного розкладання. Замість того, щоб розчиняти оксиди металів у кислотах до окремих іонів, ця технологія передбачає механічне відділення катодної суміші від алюмінієвої фольги з наступним очищенням від залишків біндера (PVDF) за допомогою надкритичного CO₂ або спеціальних органічних розчинників. Такий підхід

дозволяє зберегти дорогу кристалічну структуру оксиду, що є найбільш енергоємним етапом у виробництві нових акумуляторів. Ключовим етапом прямого рециклінгу є процес «релітації» – насичення деградованого катодного матеріалу втраченими іонами літію. В процесі експлуатації частина літію безповоротно зв'язується в структурі SEI-шару або застрягає в кристалічній решітці, що призводить до втрати ємності. Ці методи дозволяють вводити новий літій у структуру катода за допомогою гідротермального оброблення або електрохімічного осадження. Це знижує споживання енергії на 70% порівняно з гідрометалургією та зменшує викиди парникових газів, оскільки виключає стадію високотемпературного синтезу нових оксидів.

4.2. Кріогенне подрібнення та інертна атмосфера

Для вирішення критичної проблеми пожежної небезпеки під час механічної обробки все частіше застосовується кріогенне подрібнення. Акумулятори перед потраплянням у дробарку проходять через камеру з рідким азотом, де охолоджуються до температур нижче -150°C . При таких екстремально низьких температурах електроліт повністю замерзає, перетворюючись на тверду інертну масу, що виключає можливість виникнення короткого замикання та теплового розгону навіть при повному розчавлюванні комірки.

Також кріогенний метод значно покращує якість розділення матеріалів. Пластикові корпуси, сепаратори та полімерні сполучні речовини при замерзанні стають надзвичайно крихкими, що дозволяє легко відокремити їх від пластичних металів (міді та алюмінію) шляхом звичайного просіювання або повітряної класифікації. Це забезпечує отримання чистої «чорної маси» з мінімальним вмістом полімерних домішок, що критично важливо для подальшої хімічної очистки та підвищення виходу придатних для повторного використання металів.

4.3. Біометалургія та «зелене» вилуговування

У пошуках альтернативи агресивним неорганічним кислотам (сірчаній, азотній), які створюють величезні об'єми токсичних стоків, дослідники звертаються до біометалургії. Цей метод базується на використанні специфічних мікроорганізмів та грибів, які в процесі своєї життєдіяльності виділяють органічні кислоти (лимонну, шавлеву, глюконову). Ці природні реагенти здатні селективно вимивати літій, кобальт та нікель із «чорної маси» при помірних температурах, не пошкоджуючи графітову фракцію.

Біовилуговування має значний потенціал для переробки LFP-акумуляторів, де низька вартість металів не виправдовує використання дорогих хімікатів. Органічні кислоти легше піддаються біологічному розкладанню, що радикально спрощує систему очищення стічних вод заводу. Попри те, що процес протікає повільніше за класичну гідрометалургію, його низька капіталомісткість та екологічна безпека роблять його ідеальним для невеликих локальних підприємств у межах концепції циркулярної економіки.

4.4. Дизайн для переробки (*Design for Recycling*)

Найважливішим трендом, що зароджується на стику проектування та утилізації, є зміна філософії створення акумуляторів. Провідні виробники

починають відмовлятися від використання нерозбірних клейових з'єднань та заливки модулів епоксидними смолами, які роблять рециклінг практично неможливим. Замість цього впроваджуються механічні кріплення та стандартизовані роз'єми, які дозволяють роботу-розбирачу демонтувати батарею за лічені хвилини.

Запровадження «цифрового паспорта продукту» в країнах ЄС стане локомотивом цієї інновації. Кожна батарея матиме мітку, яка міститиме повну інформацію про хімічний склад катода, походження сировини та історію експлуатації. Це дозволить переробним заводам заздалегідь програмувати хімічні реактори під конкретну партію матеріалу, мінімізуючи витрати реагентів та енергії. Таким чином, інновації в рециклінгу починаються не на заводі з утилізації, а на креслярській дошці інженера-конструктора.

Контрольні питання

1. У чому полягає основна екологічна проблема видобутку літію в регіоні «Літійового трикутника»?
2. Які атмосферні наслідки спричиняє виплавка нікелю з сульфідних руд без належного очищення викидів?
3. Чому кобальт, що видобувається в ДР Конго, отримав статус «конфліктного мінералу»?
4. Як соціально-етичні виклики видобутку кобальту вплинули на зміну хімічного складу сучасних катодів (наприклад, перехід до LFP)?
5. Що таке «чорна маса» (Black Mass) і чому її склад вважається технологічно складним для розділення?
6. Яку роль відіграє полімерний біндер PVDF ускладненні процесу рециклінгу Li-ion акумуляторів?
7. Поясніть фізико-хімічну суть явища «теплового розгону» (Thermal Runaway) під час механічного пошкодження акумулятора.
8. Які токсичні гази виділяються при горінні електроліту на основі солі LiPF_6 та чим вони небезпечні для персоналу?
9. Чому економічна рентабельність рециклінгу LFP-акумуляторів наразі нижча порівняно з NMC-системами?
10. За яких умов тягова батарея електромобіля вважається придатною для стратегії «Другого життя» (Second Life)?
11. У чому полягає головна перевага методу прямого рециклінгу (Direct Recycling) над гідрометалургією?
12. Як криогенне подрібнення допомагає вирішити проблему пожежної безпеки на заводах з утилізації?
13. Які переваги надає використання біовилуговування (органічних кислот та бактерій) у порівнянні з класичною металургією?
14. Яким чином концепція «цифрового паспорта батареї» може спростити автоматизацію процесів рециклінгу?
15. Чому стандартизація форм-факторів акумуляторів є критично важливою для зниження собівартості вторинної сировини?

Лекція 7

Екологічні аспекти рециклінгу мастильних матеріалів та технології виробництва альтернативного палива

Мета лекції: вивчити характер та масштаби екологічної небезпеки відпрацьованих мастильних матеріалів, опанувати сучасні фізико-хімічні методи їх регенерації та очищення, дослідити технологічні процеси отримання альтернативних видів палива з біосировини та вторинних ресурсів як стратегічний напрям підвищення енергоефективності транспортного сектору.

План лекції

1. Екологічна небезпека відпрацьованих мастильних матеріалів (ВММ)
2. Технології регенерації та очищення мастильних матеріалів
3. Технології виробництва альтернативних палив із відходів та біосировини
4. Нормативне регулювання та «Зелений тариф» у сфері альтернативної енергетики

1. Екологічна небезпека відпрацьованих мастильних матеріалів (ВММ)

1.1. Класифікація та хімічний склад відпрацьованих мастильних матеріалів (ВММ)

Відпрацьовані мастильні матеріали представляють собою складну багатокомпонентну суміш, яка суттєво відрізняється за своїми фізико-хімічними показниками від первинних (товарних) олив. У процесі експлуатації транспортного засобу мастильний матеріал піддається постійному впливу високих температур, змінного тиску, а також контакту з киснем повітря, вологою та продуктами згоряння палива. Ці фактори ініціюють низку незворотних реакцій, що призводять до деградації основи та спрацювання пакету присадок.

Хімічні зміни базової основи

Основним процесом, що визначає стан ВММ, є термоокислювальна деструкція. Під дією кисню вуглеводні оливи окислюються з утворенням первинних продуктів – пероксидів та гідрпероксидів. Подальший розвиток ланцюгових реакцій призводить до появи спиртів, альдегідів, кетонів та органічних кислот. Наявність останніх різко підвищує корозійну активність оливи.

З часом продукти окислення піддаються полімеризації та поліконденсації, що зумовлює накопичення у складі мастила високомолекулярних смолистих сполук, асфальтенів та карбоїдів. Такі зміни призводять до неконтрольованого зростання в'язкості, погіршення змащувальних властивостей та формування лакоподібних відкладень на внутрішніх поверхнях двигуна.

Класифікація забруднюючих домішок у ВММ

Склад відпрацьованої оливи можна розділити на декілька функціональних груп забруднень:

– продукти зносу металів: мікроскопічні частки заліза, міді, свинцю, олова та алюмінію, що з'являються внаслідок механічного тертя деталей. Ці метали виступають каталізаторами подальших процесів окислення вуглеводнів;

– забруднення паливом: потрапляння незгорілих фракцій бензину або дизельного палива призводить до розрідження оливи, зниження температури спалаху та втрати несної здатності мастильної плівки;

– зовнішні домішки: мінеральний пил (кремнезем), що потрапляє через систему впуску, та волога, яка накопичується у вигляді конденсату, створюючи стійкі емульсії та активізуючи процеси гідролізу присадок;

– продукти неповного згоряння палива: сажа (дисперсний вуглець), яка не лише забарвлює оливу в чорний колір, а й підвищує абразивне зношування циліндро-поршневої групи.

Відповідно до нормативної класифікації, ВММ поділяються за групами згідно з напрямками їх попереднього використання: моторні, трансмісійні, гідравлічні та індустриальні оливи. Кожна група має специфічний набір забруднювачів. Наприклад, моторні оливи характеризуються високим вмістом сажі та продуктів нітрації, тоді як гідравлічні – підвищеним вмістом вологи та продуктів механічного руйнування ущільнювачів.

Окрему категорію в хімічному складі ВММ займають залишки присадок, які після спрацювання трансформуються у шкідливі солі металів та сірковмісні сполуки.

1.2. Токсикологічний вплив на довкілля

Масштаби негативного впливу відпрацьованих мастильних матеріалів на навколишнє середовище визначаються їхньою високою міграційною здатністю та надзвичайною стійкістю до біологічного розкладання. Потрапляючи у відкриті екосистеми, ВММ стають джерелом довготривалого токсичного забруднення, яке охоплює всі компоненти біосфери.

Забруднення гідросфери та механізми впливу на водні об'єкти

Водні ресурси є найбільш вразливими до забруднення нафтопродуктами. Оскільки питома вага більшості мінеральних та синтетичних олив менша води, при потраплянні у водойму вони утворюють стійку мономолекулярну плівку на поверхні. Один літр відпрацьованої оливи здатний розтікатися на площі до 1 гектара, повністю перекриваючи процеси газообміну між водою та атмосферою.

Порушення аерації призводить до різкого зниження концентрації розчиненого кисню, що спричиняє загибель аеробних мікроорганізмів та гідробіонтів. Водночас важкі фракції оливи, змішуючись із твердими частками, осаджуються на дно, утворюючи токсичні донні відкладення. Це руйнує нерестилища риб та пригнічує бентосні організми, які відіграють ключову роль у процесах самоочищення водойм. Особливу небезпеку становлять розчинні у воді токсичні добавки та продукти окислення, які практично неможливо видалити традиційними методами механічного очищення стічних вод.

Деградація літосфери та вплив на ґрунтові екосистеми

Потрапляння ВММ у ґрунт ініціює глибокі структурні та функціональні зміни родючого шару. Вуглеводні мастил заповнюють капілярні пори ґрунту, що призводить до:

- гідрофобізації – ґрунт втрачає здатність вбирати та утримувати вологу, що робить його непридатним для рослинності;
- порушення азотного режиму: наявність надмірної кількості вуглецю стимулює розвиток мікрофлори, яка активно споживає ґрунтовий азот, викликаючи його дефіцит;
- хімічного отруєння – солі важких металів та поліциклічні сполуки пригнічують життєдіяльність ґрунтових безхребетних та мікроорганізмів, відповідальних за гумусоутворення.

Міграція в підземні горизонти

Через фільтрацію атмосферних опадів компоненти відпрацьованих олив здатні проникати в глибокі горизонти ґрунту, досягаючи рівня ґрунтових вод. Це створює загрозу для джерел питного водопостачання, оскільки навіть мізерні концентрації ВММ роблять воду органолептично непридатною для споживання та небезпечною через наявність канцерогенних сполук, таких як бенз(а)пірен. Процеси природної мікробіологічної деградації вуглеводнів у глибоких шарах ґрунту відбуваються надзвичайно повільно через дефіцит кисню, тому таке забруднення може зберігатися протягом десятиліть.

1.3. Вплив на здоров'я людини та біоту

Токсикологічна небезпека відпрацьованих мастильних матеріалів для живих організмів зумовлена здатністю їхніх компонентів до біоаккумуляції, що значно перевищують рівень вмісту в навколишньому середовищі. Особливу роль у цьому процесі відіграє трофічний ланцюг, через який шкідливі речовини мігрують від найпростіших організмів до організму людини.

Канцерогенна та мутагенна активність

Під час експлуатації в двигунах внутрішнього згоряння оливи збагачуються поліциклічними ароматичними вуглеводнями (ПАВ), серед яких найбільш дослідженим є бенз(а)пірен. Ці сполуки класифікуються як канцерогени першої групи. При тривалому контакті зі шкірою або вдиханні парів (особливо в умовах закритих сервісних зон) вони викликають незворотні зміни на клітинному рівні, стимулюючи розвиток онкологічних захворювань та спричиняючи мутації в наступних поколіннях.

Важкі метали як специфічні токсиканти

У складі ВММ ідентифікується широкий спектр важких металів, що потрапляють туди внаслідок зносу деталей та спрацювання присадок, наприклад:

- свинець: уражає центральну нервову систему, спричиняє розлади кровотворення та порушення функцій нирок;
- кадмій: характеризується високою кумулятивністю, накопичується в кістках та печінці, викликаючи хронічну інтоксикацію та крихкість скелета;

– хром та нікель: виступають як сильні алергени та подразники слизових оболонок, володіючи при цьому вираженими канцерогенними властивостями.

Вплив на флору та фауну

Для рослинних організмів контакт із компонентами олив призводить до фітотоксичного ефекту. Вуглеводні руйнують хлоропласти, що припиняє процес фотосинтезу. У тваринному світі найбільш вразливими є водоплавні птахи та ссавці: нафтова плівка руйнує термоізоляційні властивості пір'я та хутра, що призводить до переохолодження та загибелі. Крім того, інтоксикація через забруднену їжу викликає ураження репродуктивної системи, що веде до скорочення популяцій окремих видів.

1.4. Міжнародні та національні вимоги до поводження з ВММ

З огляду на високий ступінь екологічного ризику, відпрацьовані оливи включені до переліку небезпечних відходів у більшості міжнародних правових актів.

Базельська конвенція та транскордонне регулювання

Згідно з Базельською конвенцією про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням, ВММ віднесені до категорії відходів, що потребують особливої уваги. Основним принципом є мінімізація перевезень таких відходів між країнами та забезпечення їх переробки якомога ближче до місця утворення. Це вимагає від держав створення власної розвиненої інфраструктури для регенерації олив.

Європейські стандарти та ієрархія поводження

У країнах ЄС базовим документом є Директива 2008/98/ЄС про відходи, яка встановлює чітку ієрархію дій:

1. Запобігання утворенню – продовження терміну служби олив через покращення їх якості.
2. Підготовка до повторного використання – регенерація та відновлення властивостей.
3. Рециклінг – переробка на паливні фракції або компоненти інших матеріалів.
4. Енергетична утилізація – спалювання з отриманням енергії (допускається лише за умови наявності високоефективних систем очищення викидів).

Законодавство України

В Україні поводження з ВММ регулюється Законом «Про управління відходами» та спеціалізованими постановами Кабінету Міністрів. Нормативно зафіксовано обов'язковість збирання та передачі відпрацьованих олив спеціалізованим підприємствам, що мають відповідні ліцензії. Категорично забороняється скидання ВММ у водні об'єкти, ґрунти, каналізаційні мережі, а також їх безконтрольне спалювання в кустарних установках, що не забезпечують належного очищення димових газів.

2. Технології регенерації та очищення мастильних матеріалів

2.1. Фізичні методи попереднього очищення

Фізичні методи є першим і обов'язковим етапом будь-якої технологічної схеми переробки відпрацьованих мастильних матеріалів. Їхнє основне завдання полягає у видаленні грубодисперсних механічних домішок, вільної води та частковому вилученні зважених часток сажі. Характерною рисою цих методів є відсутність хімічного впливу на молекулярну структуру вуглеводнів базової оливи та присадок.

Гравітаційне відстоювання

Процес ґрунтується на різниці густин компонентів суміші: оливи (850–900 кг/м³), води (1000 кг/м³) та механічних часток (металів – понад 7000 кг/м³). Ефективність відстоювання прямо залежить від в'язкості середовища, тому для інтенсифікації процесу відпрацьовану оливу піддають попередньому нагріванню до температури 60–80 °С. Це знижує кінематичну в'язкість і дозволяє часткам осідати швидше згідно із законом Стокса. Недоліком методу є тривалість (від декількох годин до діб) та неможливість видалення дрібнодисперсних домішок і стійких емульсій.

Механічна фільтрація

Фільтрування забезпечує відділення твердих часток шляхом пропускання оливи крізь пористі перегородки (металеві сітки, паперові, картонні або керамічні фільтри). Процес зазвичай реалізується у два етапи:

- грубе очищення: затримання часток розміром понад 50–100 мкм для захисту обладнання подальших стадій;
- тонке очищення: вилучення часток розміром до 1–5 мкм.

Для підвищення продуктивності фільтрацію здійснюють під тиском або з використанням вакууму, що дозволяє подолати опір фільтрувального шару, який зростає в міру його засмічення.

Центрифугування

Це найбільш інтенсивний фізичний метод, що базується на розділенні фаз під дією відцентрових сил у роторах центрифуг (сепараторів). При швидкості обертання в кілька тисяч обертів на хвилину сила розділення значно перевищує силу тяжіння, що дозволяє за лічені секунди виділяти з оливи не лише воду, а й тонкодисперсні шлами. Центрифугування є критично важливим етапом для видалення води, яка утворює з оливою емульсії, оскільки вода є агресивним чинником, що спричиняє гідроліз присадок та корозію обладнання при подальшій термічній переробці.

2.2. Фізико-хімічні методи відновлення властивостей

Коли можливості суто фізичних методів вичерпано, застосовують фізико-хімічні процеси, що дозволяють видаляти домішки, які перебувають у колоїдному стані або розчинені в оливі (продукти окиснення, смоли, спрацьовані присадки).

Коагуляція

Метод полягає у штучному збільшенні розмірів дрібнодисперсних часток забруднень для їх подальшого видалення фільтрацією або

відстоюванням. Коагуляція є ефективною для очищення від сажі та смолистих сполук, які не вилучаються центрифугуванням.

Адсорбційне очищення

Процес ґрунтується на здатності адсорбентів утримувати на своїй поверхні полярні сполуки: смоли, кислоти та асфальтени. У якості адсорбентів використовують природні вибілювальні глини, силікагелі, алюмосилікати або активоване вугілля.

Контактний метод – змішування подрібненого адсорбенту з оливою з наступним фільтруванням суміші.

Перколяційний метод – пропускання оливи крізь нерухомий шар гранульованого адсорбенту (дозволяє покращити колір оливи, знизити її кислотне число та відновити прозорість).

Селективне розчинення

Базується на вибірковій здатності деяких розчинників (фурфурол, фенол, суміш пропану та бутану) розчиняти лише небажані компоненти оливи – смоли та поліциклічні вуглеводні, залишаючи корисні парафіно-нафтеніві сполуки недоторканими. Після змішування оливи з розчинником утворюються дві фази: рафінат (очищена олива) та екстракт (концентрат забруднень). Розчинник згодом регенерується відгоном і повертається в цикл.

2.3. Хімічні методи глибокої регенерації

Хімічні методи застосовуються на фінальних стадіях технологічного циклу, коли необхідно видалити найбільш стійкі продукти старіння та відновити хімічний склад базової оливи до рівня, що відповідає стандартам для первинних мастильних матеріалів. Ці процеси передбачають активну взаємодію реагентів з молекулярною структурою забруднювачів.

Серчано-кислотне очищення

Це класичний метод, що базується на обробці підігрітої відпрацьованої оливи концентрованою сульфатною кислотою (H_2SO_4). При контакті з кислотою асфальтени, смоли та поліциклічні вуглеводні вступають у реакції сульфонування та полімеризації, утворюючи важкий в'язкий осад – кислий гудрон.

Переваги: Висока ефективність видалення найбільш токсичних сполук та радикальне покращення кольору оливи.

Недоліки: Утворення великої кількості кислого гудрону, який сам по собі є вкрай небезпечним відходом, що потребує складної утилізації. Через екологічні ризики цей метод поступово витісняється більш сучасними технологіями.

Лужне очищення

Використовується як самостійний метод або як етап нейтралізації після кислотного оброблення. В оливу вводять розчини гідроксиду натрію або кальцію. Луги вступають у реакцію з органічними кислотами та ефірами, утворюючи солі, які згодом видаляються промиванням водою або центрифугуванням. Це дозволяє повністю усунути корозійну агресивність регенованої оливи.

Гідроочищення (Гідрування)

Це найбільш прогресивна та екологічно безпечна технологія глибокої регенерації. Процес відбувається в реакторах при високих температурах (250–350 °С) та високому тиску водороду в присутності каталізаторів (нікель-молібденових або кобальт-молібденових).

Механізм: Водень вступає в реакцію зі сполуками сірки, азоту та хлору, перетворюючи їх на леткі гази (H_2S , NH_3 , HCl), які легко видаляються. Одночасно відбувається насичення неграничних вуглеводнів, що суттєво підвищує стабільність оливи до подальшого окислення.

Результат: Отримана базова олива за своїми характеристиками практично не поступається продуктам первинної перегонки нафти.

2.4. Порівняльна характеристика виходу продуктів та енергоефективності

Економічна доцільність рециклінгу ВММ підтверджується порівняльним аналізом витрат ресурсів на виробництво одиниці продукції.

Вихід готової продукції

Ефективність різних технологічних схем визначається відсотком отриманої базової оливи від загального обсягу відпрацьованої сировини:

1. Просте очищення (фізичне): вихід до 90–95%, але якість продукту дозволяє використовувати його лише як пічне паливо або для змащування малонавантажених вузлів.

2. Кислотно-контактна регенерація: вихід 65–75% через значні втрати зі шламом та гудроном.

3. Вакуумна дистиляція з гідроочищенням: вихід 80–85% високоякісної базової оливи.

Енергетичний баланс та екологічний ефект

Виробництво базової оливи з нафти є багатостадійним процесом, що включає видобуток, транспортування, атмосферну та вакуумну перегонку, селективне очищення та депарафінізацію.

Енергозбереження: Для виробництва 1 л нової оливи необхідно переробити близько 60–100 л нафти. Для отримання того самого обсягу регенованої оливи потрібно лише 1.2–1.4 л відпрацьованої сировини. Енерговитрати на регенерацію в середньому на 60% нижчі, ніж на повний цикл виробництва з нафти.

Ресурсна цінність: Рециклінг дозволяє зберігати невідновлювані викопні ресурси та запобігати викидам CO_2 , які неминучі при спалюванні відпрацьованих оливи як низькоякісного палива.

3. Технології виробництва альтернативних палив із відходів та біосировини.

3.1. Виробництво біодизеля (FAME)

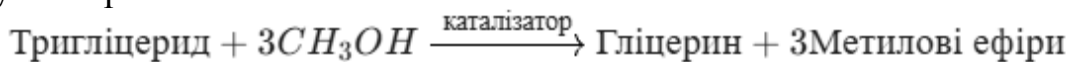
Біодизельне паливо, або метилові ефіри жирних кислот (Fatty Acid Methyl Esters – FAME), є найпоширенішою альтернативою традиційному дизельному паливу нафтового походження. Його виробництво ґрунтується на

хімічній конверсії ліпідів, що містяться в рослинних оліях або тваринних жирах.

Механізм реакції трансестерифікації

Основним технологічним процесом є трансестерифікація (переестерифікація) тригліцеридів. Молекула рослинної олії складається з радикалу гліцерину, зв'язаного з трьома ланцюгами жирних кислот. Оскільки в'язкість натуральних олій у 10–20 разів вища за в'язкість дизельного палива, їх пряме використання в сучасних двигунах неможливе через ризик закоксування форсунок та залягання поршневих кілець.

Процес трансестерифікації полягає у взаємодії олії з легким спиртом (найчастіше метанолом, рідше етанолом) у присутності каталізатора. Хімічно це виглядає як заміщення гліцеринового ядра спиртовими радикалами. Реакція описується рівнянням:



Вимоги до сировини та каталізаторів

Якість кінцевого продукту суттєво залежить від природи вихідної сировини:

- первинні рослинні олії (ріпакова, соняшникова): характеризуються стабільним складом, низьким вмістом вільних жирних кислот (ВЖК) та вологи, що полегшує перебіг реакції.

- відпрацьовані кулінарні жири (UCO – Used Cooking Oil): є більш екологічно вигідною сировиною, оскільки вирішують проблему утилізації харчових відходів. Проте вони містять значну кількість ВЖК та води, що вимагає попередньої стадії етерифікації або використання спеціальних кислотних каталізаторів для запобігання реакції омилення (утворення мила замість палива).

Як каталізатори найчастіше використовують гідроксиди натрію (NaOH) або калію (KOH). Реакція зазвичай відбувається за температури 60–70 °C та атмосферного тиску.

Продукти та очищення

Після завершення реакції суміш розділяється на дві фази за рахунок різниці густин. Верхня фаза – сирий біодизель, нижня – технічний гліцерин. Біодизель піддається обов'язковому очищенню від залишків метанолу, каталізатора та мила шляхом промивання водою або адсорбції з наступною вакуумною осушкою. Отримане паливо повинно відповідати стандарту EN 14214, що гарантує його безпечне використання в двигунах внутрішнього згорання без необхідності їхньої конструктивної модифікації.

3.2. Піроліз зношених шин та полімерних відходів

Піроліз є одним із найбільш перспективних методів термічної переробки високомолекулярних відходів (гуми, пластмас, полімерних композитів), які не піддаються біологічному розкладанню та механічному рециклінгу без втрати якості. Процес полягає у термічній деструкції органічних сполук за високих

температур (450–800 °C) в умовах штучного дефіциту або повної відсутності кисню, що запобігає класичному горінню.

Механізм перетворення сировини

Під дією теплової енергії довгі вуглеводневі ланцюги полімерів розриваються на дрібніші фрагменти. Залежно від температурного режиму та швидкості нагрівання (швидкий або повільний піроліз), вихід продуктів може змінюватися. Основним об'єктом переробки в транспортному секторі є зношені автомобільні шини, які через свій склад (каучук, сажа, металокорд, текстиль) є складним об'єктом для утилізації.

В результаті піролізу утворюються три основні фракції:

1. Рідка фракція (піролізна олива): становить 40–55% маси вихідної шини. Це суміш ароматичних, аліфатичних та нафтових вуглеводнів. За своїми енергетичними характеристиками вона наближається до мазуту. Після додаткової дистиляції та очищення від сірки та азотистих сполук піролізна олива може використовуватися як суднове паливо або паливний компонент для котельних установок.

2. Газоподібна фракція (піролізний газ): суміш метану, етану, водню та оксидів вуглецю. Газ має високу теплотворну здатність і зазвичай використовується безпосередньо в технологічному циклі для підтримки температури в реакторі піролізу, що робить установку енергетично автономною.

3. Твердий залишок (вуглецевий залишок або пірокарбон): містить вуглець та мінеральні наповнювачі. Після очищення від залишків металокорду та тонкого подрібнення він може використовуватися як технічне вуглецеве паливо або як сорбент для очищення промислових стічних вод.

Екологічні переваги методу

На відміну від прямого спалювання шин, піроліз відбувається в герметичних реакторах, що мінімізує викиди токсичних фуранів та діоксинів у атмосферу. Крім того, піроліз дозволяє повертати в обіг цінні хімічні ресурси, знижуючи потребу у видобутку первинної нафти для виробництва паливно-мастильних матеріалів.

3.3. Газифікація біомаси та отримання синтез-газу

Газифікація – це процес високотемпературного (800–1300 °C) перетворення твердої або рідкої органічної сировини на горючий газ у присутності обмеженої кількості газифікуючого агента (повітря, кисню або водяної пари).

Технологічні основи процесу

На відміну від піролізу, газифікація передбачає часткове окислення сировини. Ключовим продуктом є синтез-газ (syngas), що складається переважно з монооксиду вуглецю (CO) та водню (H₂). Процес газифікації в реакторі (газогенераторі) зазвичай поділяється на зони сушіння, піролізу, окислення та відновлення.

Якість отриманого газу залежить від газифікуючого агента:

– повітряна газифікація: найпростіша у реалізації, проте отриманий газ має низьку теплоту згоряння через велику кількість баластного азоту (N_2).

– киснева або парокиснева газифікація: дозволяє отримати калорійний газ, багатий на водень, який є ідеальною сировиною для подальшого хімічного синтезу.

Синтетичне паливо (технологія Fischer-Tropsch)

Отриманий синтез-газ після глибокого очищення від смол та сполук сірки може бути перетворений на рідкі вуглеводні (синтетичний дизель або гас) за допомогою методу Фішера-Тропша. Це дозволяє виробляти «друге покоління» біопалива (BTL – Biomass-to-Liquid), яке повністю сумісне з існуючою паливною інфраструктурою та двигунами внутрішнього згоряння.

Роль у водневій енергетиці

Газифікація біомаси також розглядається як один із основних способів отримання «зеленого» водню. Шляхом реакції конверсії оксиду вуглецю з водяною парою ($CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$) можна значно збільшити вихід водню із синтез-газу для потреб транспорту на паливних елементах.

3.4 Порівняльна характеристика традиційних та альтернативних видів палива

| Параметр порівняння | Дизельне паливо (нафтове) | Біодизель (FAME) | Синтетичний дизель (BTL / Fischer-Tropsch) | Біоетанол (добавка до бензину) | Метан (CNG / Біометан) | Пропан-бутан (LPG) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------|--|---|---|---|
| Сировинна база | Нафта | Рослинні олії | Біомаса, відходи деревини, ТПВ | Кукурудза, цукровий буряк, солома | Природний газ / Біогаз | Супутній нафтовий газ |
| Агрегатний стан | Рідкий | Рідкий | Рідкий | Рідкий | Стиснений газ (200 бар) | Зріджений газ (10–16 бар) |
| Нижня теплота згоряння | 42,5 – 43,0 МДж/кг | 37,0 – 38,0 МДж/кг | 43,0 – 44,0 МДж/кг | 26,8 МДж/кг | ~50,0 МДж/кг | ~46,0 МДж/кг |
| Октанове (цетанове) число | ЦЧ 48 – 51 | ЦЧ 51 – 58 | ЦЧ 70 – 80 | ОЧ 105 – 110 | ОЧ 120 – 130 | ОЧ 100 – 110 |
| Вміст сірки | < 10 мг/кг | Відсутня | 0 | ~35 | Відсутня | Мізерна кількість |
| Викиди сажі (PM) | Базовий рівень | Зниження на 40–60% | Зниження на 30–50% | Зниження на 20–30% (у суміші) | Практично відсутні | Зниження на 90% |
| Викиди CO_2 (повний цикл) | 100% (еталон) | Зниження на 50–85% | Зниження на 80–90% | Зниження на 60–80% | Зниження на 20–25% (до 90% для біометану) | Зниження на 10–15% |
| Вплив на ресурс двигуна | Базовий | Змашує систему | Чисте горіння, відсутність нагару | Можлива корозія паливної системи (потребує інгібіторів) | Відсутність нагару, не розріджує оливу | Чисте горіння, вище теплове навантаження на клапани |

4. Нормативне регулювання та «Зелений тариф» у сфері альтернативної енергетики

4.1. Європейські директиви та ієрархія управління відходами

В основі європейської політики лежить перехід до циркулярної економіки. Головним регулятором є [Директива 2008/98/ЕС](#) про відходи, яка впроваджує «ієрархію відходів». Стосовно мастильних матеріалів це означає, що держава повинна стимулювати саме регенерацію, а не спалювання. У країнах ЄС діють норми обов'язкового збору ВММ (до 80–95% від обсягу продажу), а виробники олив несуть розширену відповідальність за весь життєвий цикл продукту. Податкові пільги надаються тим підприємствам, які використовують у виробництві понад 25% регенованої базової оливи.

Компанії, що виробляють або імпортують оливи, зобов'язані організувати систему збору відпрацьованих продуктів (Принцип розширеної відповідальності виробника ([EPR](#))).

4.2. Національне законодавство України у сфері рециклінгу

Україна здійснює імплементацію європейських норм у національне поле. Основним документом, що визначає правила гри з 2023 року, є Закон України «[Про управління відходами](#)».

Ключові вимоги: Заборона змішування різних типів відпрацьованих олив, обов'язкове ліцензування операторів та ведення електронного обліку відходів.

Спеціалізована постанова: [Порядок збирання та утилізації відпрацьованих мастил \(олив\)](#)

4.3. Економічне стимулювання: «Зелений тариф» та акцизна політика

«Зелений тариф» – це спеціальний механізм закупівлі електроенергії, виробленої з альтернативних джерел (зокрема біогазу та біомаси), що регулюється НКРЕКП.

Біоенергетика: Для установок, що працюють на біогазі (отриманому в результаті газифікації відходів), діють підвищені коефіцієнти тарифу, що робить такі проекти інвестиційно привабливими.

Акцизи на біопаливо: В Україні діють специфічні ставки акцизного податку на паливо з вмістом біокомпонентів, що регулюється Податковим кодексом.

Інтерактивна мапа ВДЕ: [UAMAP – Мапа проектів відновлюваної енергетики України](#)

4.4. Стандартизація та верифікація сталості (ISCC)

Будь-яке альтернативне паливо повинно відповідати технічним регламентам (ДСТУ) та вимогам щодо сталого розвитку.

Стандарти: Для біодизеля це ДСТУ EN 14214, для етанольних сумішей – ДСТУ 4834:2007.

Міжнародна сертифікація: Для експорту біопалива в ЄС виробники проходять сертифікацію за системою [ISCC](#) (International Sustainability and

Carbon Certification), яка підтверджує, що паливо дійсно зменшує викиди парникових газів.

Контрольні питання

1. Чим хімічно та фізично відрізняються відпрацьовані мастильні матеріали (ВММ) від первинних товарних олив?
2. Які основні хімічні сполуки утворюються в мастилі внаслідок термоокислювальної деструкції?
3. Яку роль відіграють металеві домішки у процесі прискорення старіння оливи під час її експлуатації?
4. Яким чином мономолекулярна нафтова плівка на поверхні водою впливає на процеси газообміну та життєдіяльність гідробіонтів?
5. Опишіть механізм негативного впливу ВММ на родючість ґрунту та мікробіологічні процеси в літосфері.
6. Які компоненти ВММ мають найбільшу канцерогенну та мутагенну активність щодо організму людини?
7. У чому полягає сутність принципу «ієрархії поводження з відходами» згідно з Директивою ЄС 2008/98/ЄС?
8. Які фізичні сили забезпечують розділення фаз у процесах відстоювання та центрифугування ВММ?
9. Поясніть різницю між контактним та перколяційним методами адсорбційного очищення олив.
10. Чому метод гідроочищення (гідрування) вважається найбільш екологічно безпечним та ефективним способом глибокої регенерації?
11. Опишіть хімічну реакцію трансестерифікації, яка лежить в основі виробництва біодизеля.
12. Які основні продукти утворюються в результаті піролізу зношених автомобільних шин і як вони використовуються?
13. Порівняйте енергетичну цінність та екологічні характеристики синтетичного дизеля (BTL) і традиційного нафтового дизеля.
14. У чому полягає різниця між процесами піролізу та газифікації при виробництві альтернативних палив?
15. Як працює механізм «Зеленого тарифу» і яким чином він стимулює розвиток біоенергетичних технологій?

Лекція 8

Переробка зношених шин (ELT) у системі циркулярної економіки та енергозбереження

Мета лекції: комплексне дослідження технологічних аспектів переробки зношених шин як елемента ресурсозбереження та аналіз потенціалу використання отриманої сировини й енергії в межах замкнутого циклу виробництва.

План лекції

1. Зношені шини як вторинний ресурсний та енергетичний потенціал
2. Циркулярна модель та енергетичні цикли утилізації
3. Методи механічної дезінтеграції та регенерації
4. Термохімічна конверсія та енергетична трансформація шин
5. Порівняльний аналіз енергоефективності використання шин як твердого палива у промислових агрегатах
6. Стратегії стимулювання ресурсозбереження через механізм розширеної відповідальності виробника

1. Зношені шини як вторинний ресурсний та енергетичний потенціал

1.1. Компонентний склад та термодинамічні параметри еластомерних відходів

Зношені шини (End-of-Life Tyres, ELT) за своєю структурою є складним багатокомпонентним композитом, що складається з високомолекулярних полімерів (каучуків), армуючих елементів та хімічних добавок. Основним енергоносієм у складі шини є вуглеводнева частина, представлена натуральним (NR) та синтетичними каучуками (SBR, BR). Вміст каучукової фази коливається в межах 40–55 %, що безпосередньо визначає високу питому теплоту згоряння відходу. Окрім полімерів, до складу входять технічний вуглець (22–30 %), сталевий корд (12–25 %) та текстильний корд (3–5 %). Наявність сірки (1–2 %) як вулканізуючого агента є критичним фактором при виборі методу термічної утилізації через ризик емісії оксидів сірки.

Складність термічної та механічної деструкції зношених шин обумовлена не лише їхнім хімічним складом, а й специфікою просторової організації виробу. Оскільки шина проектується як надміцний композит, здатний витримувати екстремальні динамічні навантаження та термічний вплив, її утилізація потребує поетапного розділення на структурні фази. Кожна з цих фаз має різну енергетичну цінність та фізико-механічні властивості, що диктує необхідність детального вивчення анатомії шини перед вибором методу переробки.

Для візуалізації цієї складної морфологічної структури наведено схему конструктивних елементів пневматичної шини (Рис. 1). Розуміння багатошарової архітектури виробу є критичним для проектування технологічних ліній механічної сепарації та термічної деструкції.

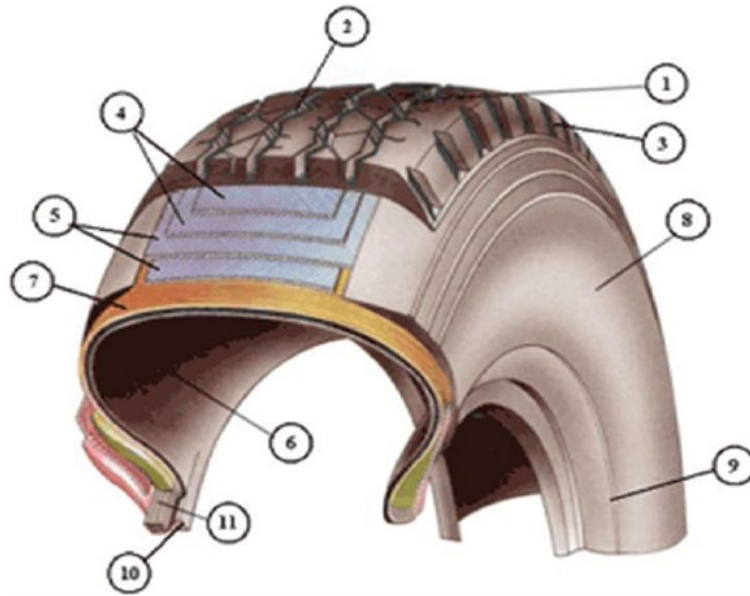


Рис. 1. Конструктивні елементи та матеріальна композиція зношеної шини: 1 – проректор; 2 – канавка протектора; 3 – плечова зона; 4 – шари сталевого брекера; 5 – захисний шар (екрануючий брекер); 6 – герметизуючий шар (іннерлайнер); 7 – каркас (текстильний або металевий корд); 8 – боковина; 9 – борт; 10 – бортове кільце (дротяний сердечник); 11 – наповнювальний шнур борту.

Аналіз представленої структури дозволяє виділити три основні фази, що підлягають розділенню в процесі рециклінгу:

- еластомерна фаза (1, 3, 6, 8): виступає основним джерелом отримання гумової крихти або піролізних дистилатів; характеризується найвищою теплою згоряння;

- металева фаза (4, 10): представлена сталевим дротом та кордом з високою міцністю на розрив; вилучення цієї фази дозволяє отримати чистий металобрухт для металургійної промисловості;

- текстильна фаза (7): синтетичне волокно (поліамід, поліефір), що потребує спеціальних методів пневматичної сепарації для запобігання засміченню кінцевого продукту переробки.

Енергетичний потенціал ELT базується на високому вмісті вуглецю та водню. Нижча теплота згоряння зношених шин (Q_i^r) становить 32–35 МДж/кг, що робить їх ефективнішим паливом порівняно з більшістю марок енергетичного вугілля (антрацит – 27–29 МДж/кг) та інших полив (Табл. 1). Розрахунок нижчої теплоти згоряння для робочої маси шинної суміші може бути виконаний за емпіричною формулою Менделєєва для палива:

$$Q_i^r = 339C^r + 1030H^r - 109(O^r - S^r) - 25W^r \text{ кДж/кг}$$

де C^r , H^r , O^r , S^r – вміст вуглецю, водню, кисню та сірки у відсотках на робочу масу, а W^r – вологість, яка для шин є мінімальною (менше 1%), що підвищує стабільність процесу горіння.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика енергетичної цінності ELT та традиційних видів палива

| Вид палива | Нижча теплота згоряння (Q^r_i), МДж/кг | Вміст вуглецю (C^r), % | Зольність (A^r), % |
|----------------------|--|----------------------------|------------------------|
| Зношені шини (суміш) | 33,5 | 70 – 85 | 10 – 15 |
| Вугілля (антрацит) | 28,2 | 80 – 90 | 15 – 30 |
| Мазут паливний | 40,5 | 85 – 88 | 0,1 – 0,2 |
| Деревна біомаса | 15,0 | 45 – 50 | 1 – 3 |

З точки зору ресурсозбереження, переробка шин дозволяє повернути у виробничий цикл стратегічну сировину. Сталевий корд, виготовлений з високоякісної легованої сталі, є готовим металобрухтом для переплавки, що потребує на 75% менше енергії, ніж виробництво сталі з руди. Технічний вуглець, що вилучається шляхом піролізу, може бути регенерований до стану, придатного для повторного використання у виробництві гумових виробів або як наповнювач у сорбційних установках. Таким чином, ELT розглядаються не як баластний відхід, а як концентрований енергоносіє та джерело вторинних полімерів.

1.2. Проблематика деградації полімерів та токсикологія продуктів неконтрольованого окиснення

Тривале зберігання зношених шин на полігонах призводить до повільної фізико-хімічної деградації еластомерної матриці під впливом ультрафіолетового випромінювання та озону. Процес старіння супроводжується деструкцією макромолекул каучуку з виділенням летких органічних сполук (ЛОС). Проте основна небезпека полягає у високій пожежній вразливості шинних накопичувачів. Через високу питому поверхню та порожнисту структуру штабелів, пожежі на звалищах шин характеризуються екстремально високими температурами та тривалістю, що робить їх майже неможливими для гасіння традиційними методами.

При неконтрольованому горінні (окисненні) шин виділяється широкий спектр високотоксичних речовин, серед яких найбільшу небезпеку становлять поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), зокрема бенз(а)пірен, а також фурані та діоксини. Процес термічного розкладу при дефіциті кисню супроводжується утворенням рідкого піролізного масла, яке проникає у ґрунтові води, спричиняючи довготривале забруднення екосистем сполуками цинку, свинцю та кадмію.

Наукове обґрунтування технологій переробки повинно враховувати механізм розриву хімічних зв'язків у структурі вулканізаційної сітки. На відміну від термопластів, шинна гума є реактопластом з тривимірною сітчастою структурою, утвореною містками сірки ($-S_n-$). Саме тому просте переплавлення є неможливим, що зумовлює необхідність застосування або глибокої механічної дезінтеграції, або хімічної девулканізації для руйнування поперечних зв'язків без значної деструкції основних ланцюгів полімеру. Вибір стратегії утилізації, від спалювання з рекуперацією енергії до механічного

рециклінгу, залежить від локального енергетичного балансу та потреби у вторинній сировині.

2. Циркулярна модель та енергетичні цикли утилізації.

2.1. Методологія LCA (Life Cycle Assessment) в управлінні потоками ELT

Ефективність енерго- та ресурсозбереження у сфері поводження зі зношеними шинами визначається на основі методології оцінки життєвого циклу (LCA). Цей інструмент дозволяє кількісно оцінити екологічний вплив продукту від видобутку сировини до фінальної утилізації («від колиски до могили»). Для магістерського рівня аналізу важливо розуміти, що в циркулярній економіці пріоритет зміщується до моделі «від колиски до колиски» (Cradle-to-Cradle), де відхід стає вихідною точкою для нового продукту.

Ключовим показником ресурсоефективності системи є коефіцієнт циклічного використання матеріалів ($C E_{idx}$), який розраховується як відношення маси вторинної сировини, повернутої у виробництво, до загальної маси вихідного продукту:

$$C E_{idx} = \frac{\sum(m_{rec} \cdot k_q)}{M_{total}}$$

де m_{rec} – маса рекуперованих матеріалів (гумова крихта, сталь), k_q – коеф. якості (деградації) матеріалу, M_{total} – загальна маса виробу.

Впровадження LCA дозволяє встановити, що енергетична утилізація (спалювання) є менш вигідною порівняно з матеріальним рециклінгом. Це зумовлено тим, що при виробництві синтетичного каучуку витрачається енергія, еквівалентна 3–4 літрам нафти на кожний кілограм виробу. Повернення гуми у вигляді грануляту дозволяє зберегти до 70–85% енергії, яка була б витрачена на синтез первинного полімеру. Таким чином, стратегія ресурсозбереження повинна базуватися на максимізації збереження молекулярної структури каучуку.

2.2. Економіко-математична модель розширеної відповідальності виробника

Циркулярна модель не може функціонувати без економічного механізму, відомого як розширена відповідальність виробника (EPR – Extended Producer Responsibility). Наукова суть цього механізму полягає в інтерналізації зовнішніх ефектів: витрати на майбутню утилізацію включаються у вартість нової шини у вигляді утилізаційного збору.

Економічна стійкість системи описується балансовим рівнянням:

$$Z_{total} \leq \sum(C_{util} + V_{res})$$

де Z_{total} – витрати на збір та транспортування ELT; C_{util} – надходження від утилізаційного збору; V_{res} – ринкова вартість отриманих ресурсів (металу, пірокарбону, енергії).

Важливо розуміти логістичну складову: через низьку насипну щільність цілих шин ціна транспортування на відстань понад 200 км може нівелювати весь енергетичний прибуток від їхньої переробки. Тому математичні моделі оптимізації в енергозбереженні завжди враховують радіус збору сировини як критичний параметр енергетичної рентабельності.

3. Методи механічної дезінтеграції та регенерації.

3.1. Кінетика подрібнення та розрахунок енергоємності процесу диспергування

Процес механічного подрібнення зношених шин є енергомісткою операцією, спрямованою на створення нової поверхні розділу фаз. Згідно закону Ріттінгера, робота, витрачена на подрібнення A , пропорційна площі новоутвореної поверхні (ΔS):

$$A = K_R \cdot \Delta S$$

де K_R – коеф. пропорційності, що залежить від фізико-хімічних властивостей гуми.

На практиці питомі енерговитрати значно зростають при переході від грубого чипування (розмір часток 50–100 мм) до тонкого диспергування (менше 1 мм). Це пояснюється високою еластичністю каучуку при позитивних температурах: значна частина підведеної енергії витрачається на пружну деформацію, яка перетворюється на тепло, а не на руйнування зв'язків. Енергетичний баланс процесу (E_{total}) можна представити як:

$$E_{total} = E_{destruct} + E_{elast} + E_{frict}$$

де $E_{destruct}$ – корисна енергія руйнування, E_{elast} – втрати на гістерезис, E_{frict} – втрати на тертя у вузлах обладнання.

3.2. Кріогенна технологія подрібнення та її переваги у збереженні структури полімеру

Одним із найбільш технологічно досконалих методів зниження енерговтрат на деформацію є кріогенне подрібнення. Метод базується на охолодженні гуми нижче температури склування (T_g), яка для більшості шинних каучуків становить від -60 до -70 °С. При переході у склоподібний стан матеріал втрачає еластичність і руйнується за механізмом крихкого зламу, що різко знижує показник E_{elast} .

Енергетична ефективність кріогенного методу оцінюється через порівняння витрат на рідкий азот та економію електроенергії на приводі млина (Табл. 2). Використання кріодеструкції дозволяє:

1. Отримати частинки з гладкою поверхнею та високою насипною щільністю.

2. Повністю відокремити метал та текстиль від гумової фази завдяки різним коефіцієнтам термічного розширення матеріалів.

3. Уникнути термічної деградації (окиснення) полімеру, що критично важливо для подальшої регенерації.

Таблиця 2. Порівняння енерговитрат різних методів подрібнення (на 1 т сировини)

| Показник | Механічне (20 °С) | Кріогенне (-80 °С) | Баротермічне |
|---|----------------------|-----------------------|--------------|
| Питома електроенергія, кВт·год | 400 – 600 | 80 – 120 | 150 – 250 |
| Витрата холодоагенту (LN ₂), кг | 0 | 500 – 800 | 0 |
| Вихід фракції < 0,5 мм, % | 15 – 20 | 60 – 80 | 40 – 50 |

3.3. Регенерація гуми: хімічна та ультразвукова девулканізація

Регенерація – це процес часткового або повного руйнування поперечних сірчаних зв'язків (C–S та S–S) при максимальному збереженні основних вуглецевих ланцюгів (C–C). З точки зору ресурсозбереження, це найвищий ступінь рециклінгу, оскільки отриманий регенерат може заміщувати до 20–30% первинного каучуку в нових шинах.

Енергія зв'язку S–S (250 кДж/моль) значно нижча за енергію зв'язку C–C (350 кДж/моль). Сучасні ультразвукові методи девулканізації використовують ефект кавітації: під дією високочастотних коливань виникають локальні напруження, які вибірково розривають саме сірчані містки. Це дозволяє здійснювати процес у безперервному режимі з мінімальним використанням хімічних реагентів-пластифікаторів, що відповідає принципам «зеленої» хімії в інженерії.

4. Термохімічна конверсія та енергетична трансформація шин.

4.1. Термодинамічне обґрунтування процесів низькотемпературного та швидкого піролізу

Піроліз зношених шин – це процес термічної деструкції високомолекулярних сполук без доступу кисню, що призводить до розриву хімічних зв'язків і утворення низькомолекулярних фракцій. З термодинамічної точки зору це ендотермічний процес, де необхідна енергія підводиться для подолання енергії активації розриву зв'язків C–C та C–S. Швидкість деструкції описується рівнянням Арреніуса:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

де k – константа швидкості реакції. Визначає кількість елементарних актів хімічного перетворення (розриву зв'язків у молекулі каучуку) за одиницю часу.

A – передекспоненціальний множник (частотний фактор). Відображає частоту зіткнень молекул та їхню орієнтацію, що потенційно можуть призвести до реакції. Для твердофазних процесів деструкції шин цей параметр залежить від структури полімерної матриці.

e – число Ейлера. Математична константа, основа натурального логарифма (2,71828).

E_a – енергія активації (Дж/моль або кДж/моль). Мінімальна енергія, яку необхідно надати системі для розриву хімічних зв'язків (C–C, C–S). Чим нижча E_a (наприклад, за наявності каталізаторів), тим менше енергії потрібно витратити на нагрів реактора)для шинних каучуків становить приблизно 140–210 кДж/моль).

R – універсальна газова стала: 8,314 Дж/(моль·К).

T – абсолютна температура (К): оскільки температура стоїть у знаменнику показника ступеня з від'ємним знаком, навіть незначне підвищення T призводить до експоненціального зростання швидкості переробки шин.

Експоненціальний множник $e^{-\frac{E_a}{RT}}$ (фактор Больцмана) фізично вказує на частку молекул, енергія яких достатня для подолання активаційного бар'єру при заданій температурі. У практичних розрахунках енергозбереження це рівняння дозволяє знайти оптимальний температурний баланс, при якому швидкість виходу піролізної оливи є максимальною при мінімальних витратах палива на нагрів.

При низькотемпературному піролізі (450–550 °С) максимізується вихід рідкої фракції (піролізної оливи), тоді як при підвищенні температури понад 700 °С домінує газифікація з утворенням синтез-газу ($H_2 + CO$). Енергетичний баланс ідеальної піролізної установки передбачає використання частини власного піролізного газу для підтримки температури в реакторі, що робить систему енергетично автономною.

4.2. Фракційний склад піролізного конденсату та методи його енергетичної апгрейдації

Рідкий продукт піролізу є складною сумішшю вуглеводнів, за своїми властивостями близькою до пічного мазуту або сирової нафти. Питома теплота згоряння піролізного масла становить 40–42 МДж/кг. Проте високий вміст сірки та наявність дрібнодисперсних вуглецевих часток потребують додаткової очистки.

Типовий вихід продуктів при оптимальному режимі (500 °С) наведено у таблиці 3:

Таблиця 3. Матеріальний баланс продуктів піролізу ELT

| Продукт піролізу | Вихід, % мас. | Основне застосування | Енергетична цінність |
|-----------------------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Піролізна олива (рідка) | 40 – 45 | Котельне паливо, сировина для НПЗ | 41 МДж/кг |
| Технічний вуглець (твердий) | 30 – 35 | Адсорбент, пігмент, наповнювач | 28–30 МДж/кг |
| Піролізний газ | 10 – 15 | Енергозабезпечення реактора | 35–40 МДж/м ³ |
| Металокорд | 10 – 12 | Вторчермет (переплавка) | — |

Твердий залишок (пірокарбон) після активації може бути використаний як вторинний технічний вуглець. Енергосбереження тут полягає у заміщенні

виробництва первинного техвуглецю, яке є екстремально енергоємним процесом, що супроводжується значними викидами CO₂.

4.3. Використання ELT як альтернативного палива (TDF) у промислових агрегатах

Найбільш прямим методом енергетичної утилізації є використання шин як палива (Tyre Derived Fuel, TDF) у цементних печах та металургійних декарбонізаторах. Цементні печі є ідеальними агрегатами для цього завдяки:

1. Екстремальним температурам (1450–2000 °C): забезпечують повний розпад складних органічних сполук, включаючи діоксини.
2. Лужному середовищу: вапняк, що є основною сировиною для цементу, природним чином нейтралізує оксиди сірки (SO_x), утворюючи гіпс, який входить до складу клінкеру.
3. Безвідходності: залізо з металокорду окислюється і заміщує залізовмісні добавки у рецептурі цементу, а зольний залишок повністю поглинається структурою клінкеру.

Економічний ефект обчислюється через коефіцієнт заміщення природного газу або вугілля. Заміна 20% традиційного палива на ELT дозволяє знизити собівартість виробництва цементу на 10–12%, одночасно вирішуючи проблему накопичення відходів у регіоні.

5. Порівняльний аналіз енергоефективності використання шин як твердого палива у промислових агрегатах.

Для коректного порівняння енергоефективності ELT необхідно використовувати показник питомої енергомісткості на одиницю вартості. Оскільки середня теплота згоряння шин становить 33-35 МДж/кг, вони є прямим конкурентом висококалорійному вугіллю. Кількість заміщеного палива (B_{sub}) розраховується за формулою:

$$B_{sub} = B_{trad} \cdot \frac{Q_{trad}}{Q_{ELT}} \cdot \eta_{rel}$$

де Q_{trad} та Q_{ELT} – нижча теплота згоряння традиційного палива та шин відповідно; η_{rel} – відносний ККД агрегату при роботі на суміші палив.

Практичні дані показують, що при використанні ELT стабільність факела та радіаційний теплообмін у печі зростають через високий вміст сажі у продуктах згоряння.

Використання шин як твердого палива (Tyre Derived Fuel) обмежується термодинамічними параметрами конкретного агрегату (Табл. 4). Основним лімітуючим фактором є вміст сірки та цинку. Якщо в цементних печах сірка абсорбується клінкером, то в металургійних котлах-утилізаторах надлишок сірки може призвести до низькотемпературної корозії поверхонь нагріву.

Таблиця 4. Термодинамічні показники спалювання різних видів палива

| Параметр | Природний газ | Вугілля (марка А) | Зношені шини (TDF) |
|---|---------------|-------------------|--------------------|
| Теоретичний об'єм повітря, м ³ /кг | 9,5 | 7,2 | 8,4 |
| Температура горіння (адіабатична), °С | ~2050 | ~1900 | ~2150 |
| Емісія твердих часток (без фільтрів), г/МДж | 0,01 | 3,5 – 5,0 | 1,2 – 2,5 |

Пряме спалювання (TDF) має найвищий ККД з точки зору миттєвого отримання теплової енергії (до 90–95%), проте воно безповоротно знищує полімерну структуру каучуку.

Піроліз, маючи нижчий прямий енергетичний ККД (близько 65–70% через витрати на підтримку реакції), забезпечує вищий системний ресурсний ефект. Він дозволяє отримати рідке паливо та технічний вуглець, виробництво якого з нафтової сировини потребує в 5 разів більше енергії, ніж його регенерація з шин. Таким чином, з точки зору глобального енергосбереження, пріоритетним є комбінований підхід: вилучення цінних фракцій методом піролізу з подальшим використанням залишків як палива.

6. Стратегії стимулювання ресурсозбереження через механізм розширеної відповідальності виробника.

Розширена відповідальність виробника (Extended Producer Responsibility, EPR) є фундаментальним інструментом екологічної політики, що перекладає фінансовий та операційний тягар утилізації відходів з муніципалітетів на виробників та імпортерів. У країнах ЄС ця модель регулюється Директивою 2008/98/ЄС про відходи. Наукова суть EPR полягає у створенні стимулів для «еко-дизайну»: чим важча переробка виробу, тим вищим є екологічний збір.

Існують три основні моделі управління потоками ELT:

1. Податкова модель: держава збирає податок і самостійно фінансує переробні потужності.

2. Модель вільного ринку: держава встановлює цілі утилізації, а суб'єкти господарювання домовляються про переробку самостійно.

3. Система EPR (колективна): виробники створюють некомерційні організації (PRO – Producer Responsibility Organizations), які організують збір та тендери на утилізацію. Остання модель визнана найбільш енергоефективною, оскільки вона мінімізує адміністративні витрати та стимулює конкуренцію серед переробників.

Транспортування зношених шин є критичним вузлом енергетичного балансу всієї системи рециклінгу. Для оптимізації логістики застосовуються два інженерні рішення:

– попереднє шредування: подрібнення шин на чипси безпосередньо на місцях збору збільшує щільність завантаження у 2,5–3 рази;

– метод «трипексного» пакування: механічне стиснення та вкладання шин одна в одну, що дозволяє оптимізувати простір без використання енергоємного обладнання для різання.

Перспективи розвитку ринку вторинної гумової сировини в Україні

В Україні потенціал ринку ELT залишається значною мірою нереалізованим, що призводить до втрати ресурсів обсягом понад 50 тис. тонн щорічно. Впровадження циркулярної моделі потребує створення реєстру суб'єктів та моніторингу життєвого циклу кожної одиниці товару.

Пріоритетними напрямками енергосбереження для національної економіки є:

Інтеграція ELT як палива у потужності цементних заводів (що вже частково реалізовано).

Використання гумового грануляту у модифікації бітумів для дорожнього будівництва, що дозволяє збільшити термін служби покриття у 1,5–2 рази, опосередковано заощаджуючи ресурси на ремонт.

Державна підтримка піролізних проектів для отримання рідких енергоносіїв у регіонах з дефіцитом традиційного палива.

Контрольні питання:

1. Які основні компоненти входять до морфологічної структури зношеної пневматичної шини та яка їхня роль у процесі переробки?
2. Як хімічний склад та морфологія зношених шин визначають їхню питому теплоту згоряння порівняно з традиційними видами викопного палива?
3. У чому полягає основна екологічна небезпека неконтрольованого термічного окиснення (горіння) шин на звалищах?
4. Поясніть концепцію «Cradle-to-Cradle» на прикладі життєвого циклу гумотехнічних виробів.
5. Яким чином методологія LCA (Life Cycle Assessment) дозволяє визначити пріоритетність між матеріальним рециклінгом та енергетичною утилізацією?
6. Визначте економічну сутність механізму розширеної відповідальності виробника (EPR) та його вплив на проектування нових шин.
7. Як змінюються питомі енерговитрати на подрібнення гуми залежно від ступеня дисперсності згідно із законом Ріттінгера?
8. Поясніть фізичну суть криогенного подрібнення та його вплив на енергетичний баланс процесу деструкції полімеру.
9. Чим відрізняються процеси механічного подрібнення та хімічної регенерації (девулканізації) з точки зору збереження молекулярної структури каучуку?
10. Проаналізуйте рівняння Арреніуса для процесу піролізу: як зміна температури на 10% впливає на константу швидкості реакції деструкції?
11. Які фізико-хімічні фактори визначають вихід рідкої та газоподібної фракцій під час термічної конверсії шин?
12. Обґрунтуйте переваги використання ELT як альтернативного палива (TDF) саме в цементній промисловості порівняно з іншими енергетичними установками.

13. Опишіть механізм нейтралізації оксидів сірки (SO_x) у лужному середовищі обертових печей під час спалювання шин.
14. Як впливає насипна щільність цілих та подрібнених шин на радіус економічно рентабельної логістики збору сировини?
15. Порівняйте системну енергоефективність двох стратегій: пряме спалювання шин для отримання пари/електроенергії та багатоступеневий піроліз із вилученням техвуглецю.