



Government of the Netherlands

UABIO

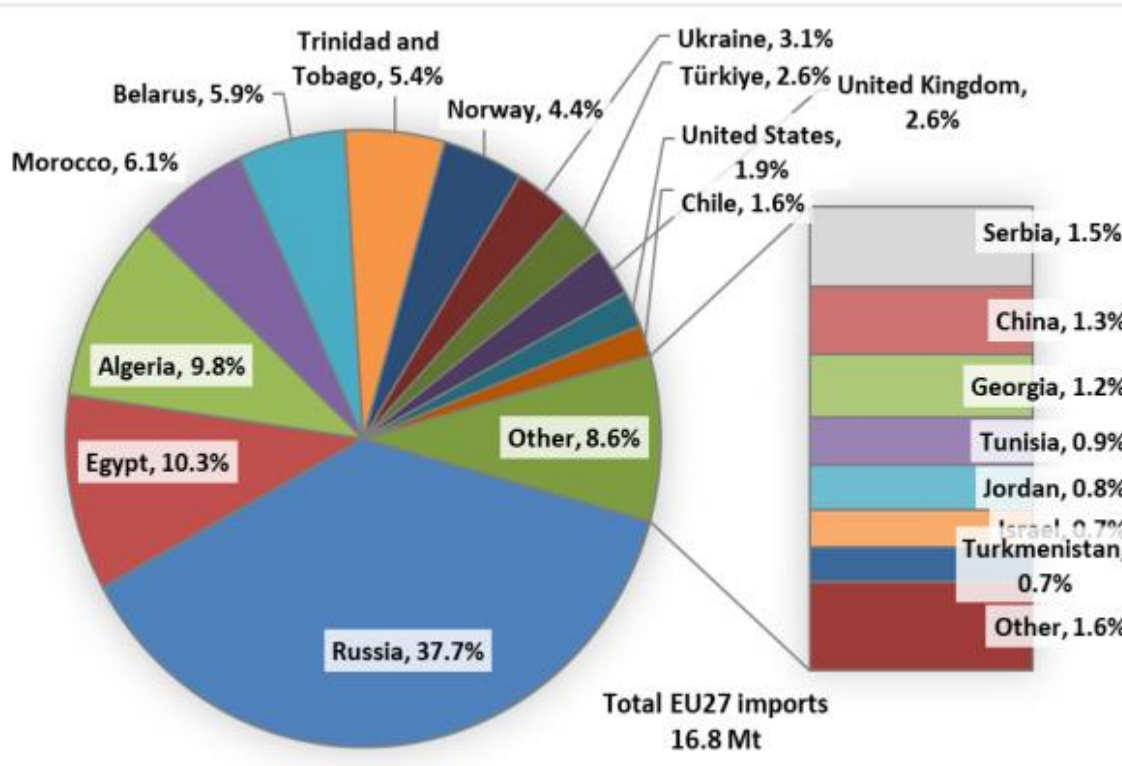
Тренінг з питань скорочення викидів парникових газів

Зменшення викидів ПГ в секторах виробництва цементу, мінеральних добрив та при виробництві електричної енергії

Володимир Крамар, к.т.н.,
експерт Біоенергетичної асоціації України

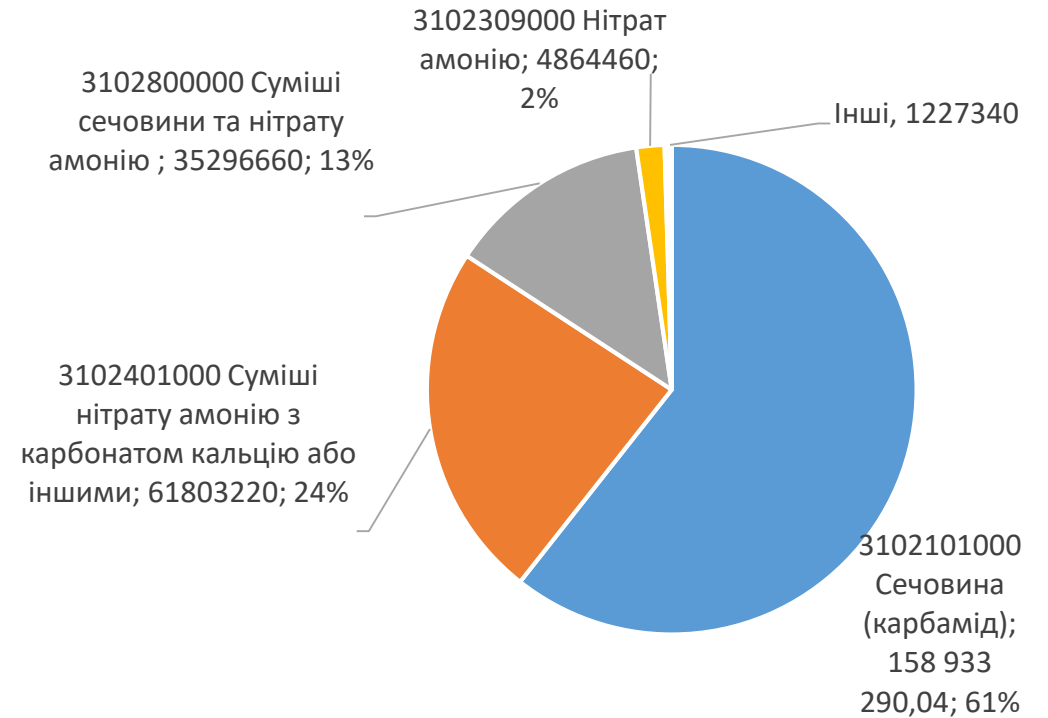


Виробництво мінеральних добрив



Основні експортери добрив, охоплених СВМ, до ЄС-27 у 2019 р.

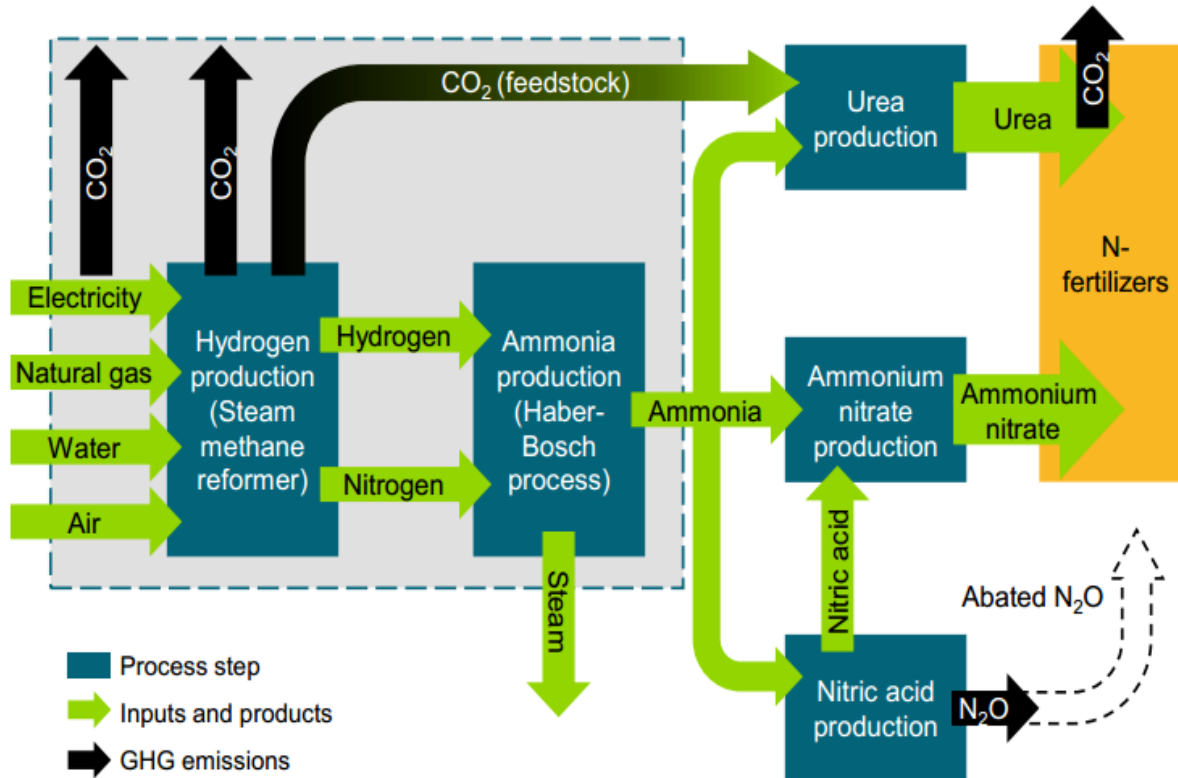
Джерело: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC134682>



Експорт міндобрив з України в 2021 р. в USD, % (частка)

Джерело: первинна інформація для розрахунку з <https://bi.customs.gov.ua/uk/trade/value-of-goods-hs-code>

Основні джерела викидів при виробництві мін. добрив



- Сьогодні виробництво аміаку генерує найбільшу частку викидів парникових газів від виробництва азотних добрив
- CO₂ утворюється при виробництві водню. Частина його викидається, інша частина перетворюється на сечовину, а потім вивільняється в полі. Інша частина CO₂, що утворюється, використовується в секторах харчових продуктів і напоїв.
- При виробництві азотної кислоти з аміаку утворюється N₂O - сильний парниковий газ.
- Європейський сектор добрив скоротив відповідні викиди N₂O на 94% між 2005 і 2020 роками, досягнувши 0,34 кг N₂O/т HNO₃, що відповідає 1,8 МтCO₂екв у 2020 році (5% від загальних викидів сектора 1 у 2020 році).

- Виробництво аміаку є енергоємним, споживаючи 8 МВт·год на тонну аміаку. Проте більша частина споживання енергії та близько 90% викидів вуглецю припадає на виробництво водню. Кожна тонна водню, виробленого типовим процесом парового риформінгу метану, призводить до викидів 9–10 тонн CO₂еквівалента і їх можна зменшити або усунути за допомогою альтернативних шляхів виробництва водню: електроліз води, уловлювання та зберігання більшої частини CO₂, що виробляється, і заміну природного газу біометаном.
- Багато з цих технологій зараз є дорожчими, ніж поточний європейський шлях виробництва.

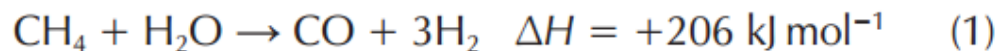
Джерело: <https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2023/11/Ammonia-Roadmap-Fertilizer-Europe-FINAL-Sept-22-2023-merged.pdf>

Основні технологічні процеси виробництва аміаку (NH₃)

Водень на основі метану:

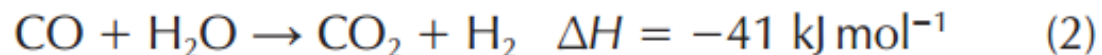
В даний час європейська промисловість добрив виробляє майже весь водень з метану на основі каталітичного парового риформінгу (SMR). Приблизно 65 % природного газу, що використовується в процесі, є основним джерелом водню, необхідного для утворення аміаку. Решта 35 % використовуються для забезпечення нагріву, необхідного для процесу.

Каталітичний паровий риформінг, стадія 1- природний газ, що не містить сірки, надходить у риформер при температурі 400–600 °C і змішується з паром для досягнення 60 % конверсії згідно з рівнянням. (1)

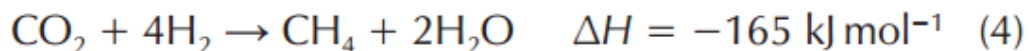


Далі газова суміш надходить у вторинний риформер, куди подається повітря, необхідне для виробництва аміаку. Близько 99 % вуглеводнів перетворюються у вторинному риформері при температурі 500–600 °C. Газова суміш потім пропускається через каталізатори, що містять нікель. Температура газу на виході становить 1000 °C, тому тепло відводиться, а газ охолоджується приблизно до 330–380 °C.

Перетворення монооксиду вуглецю: за допомогою каталізатора на основі міді:

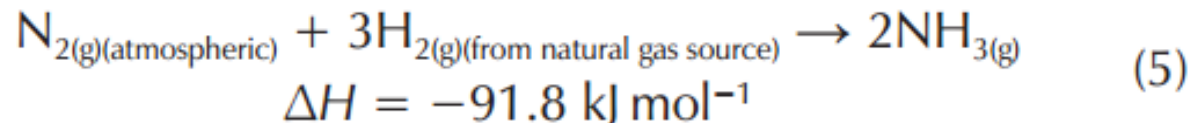


Видалення двоокису вуглецю: фізична та хімічна абсорбція. Залишки CO₂ видаляються метануванням, для цього вони каталітично обробляються воднем відповідно до рівнянь. (3) і (4):

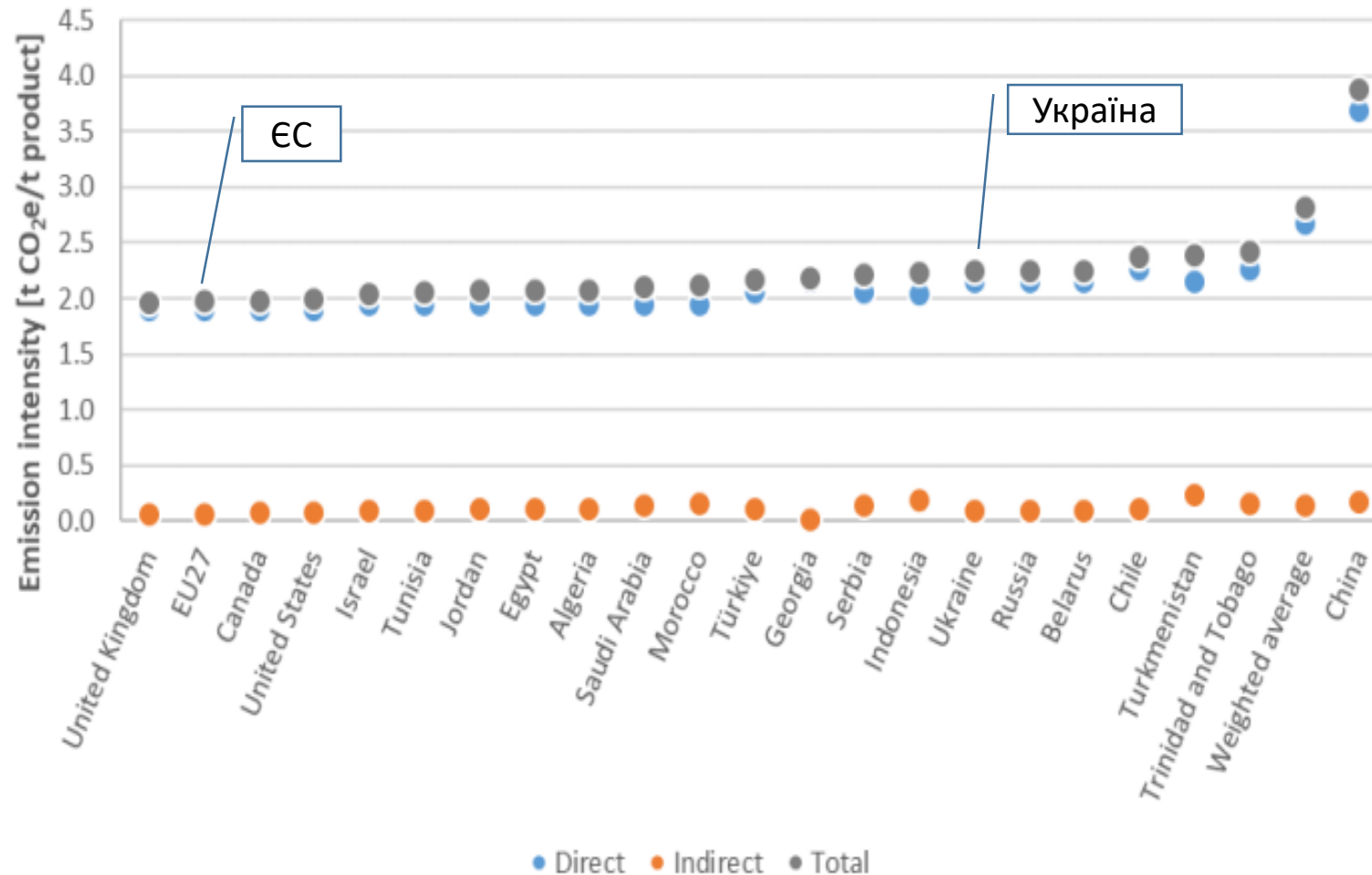


Синтез аміаку: аміак отримують згідно з рівнянням

Хабера-Боша (5).

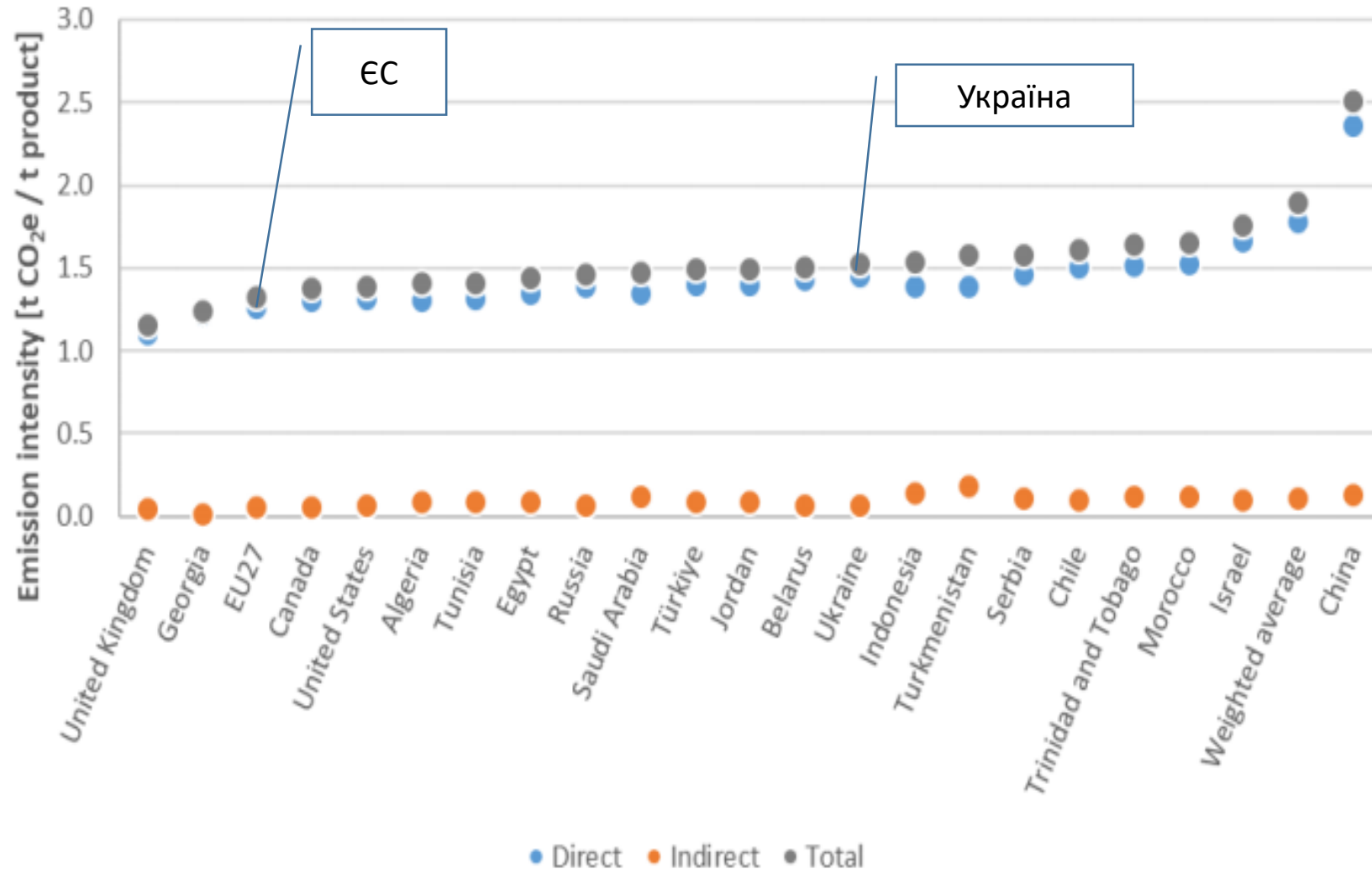


Порівняння рівнів викидів при виробництві аміаку (NH₃)

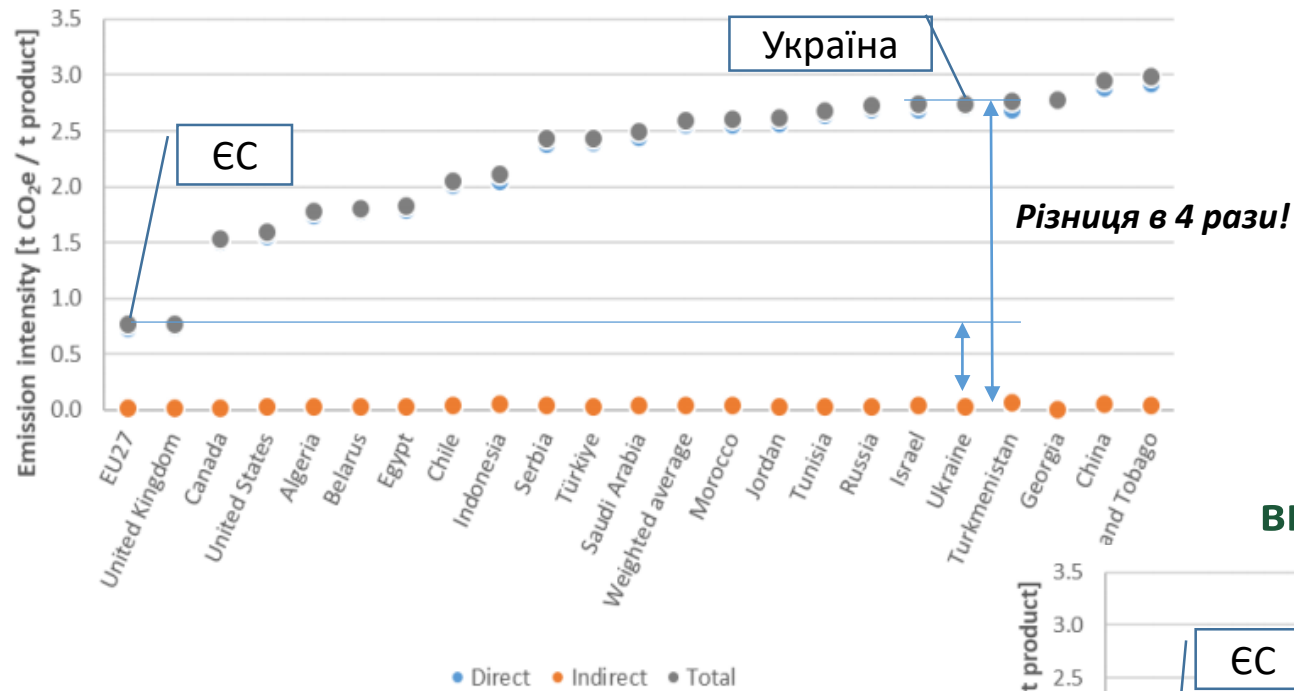


Аміак є найважливішим елементом у виробництві міндобрив. Він входить до сечовини, солей амонію (фосфат амонію, нітрат амонію) та розчинів аміаку. Процес виробництва аміаку є джерелом ПГ: на тонну аміаку припадає майже одна тонна чистого CO₂

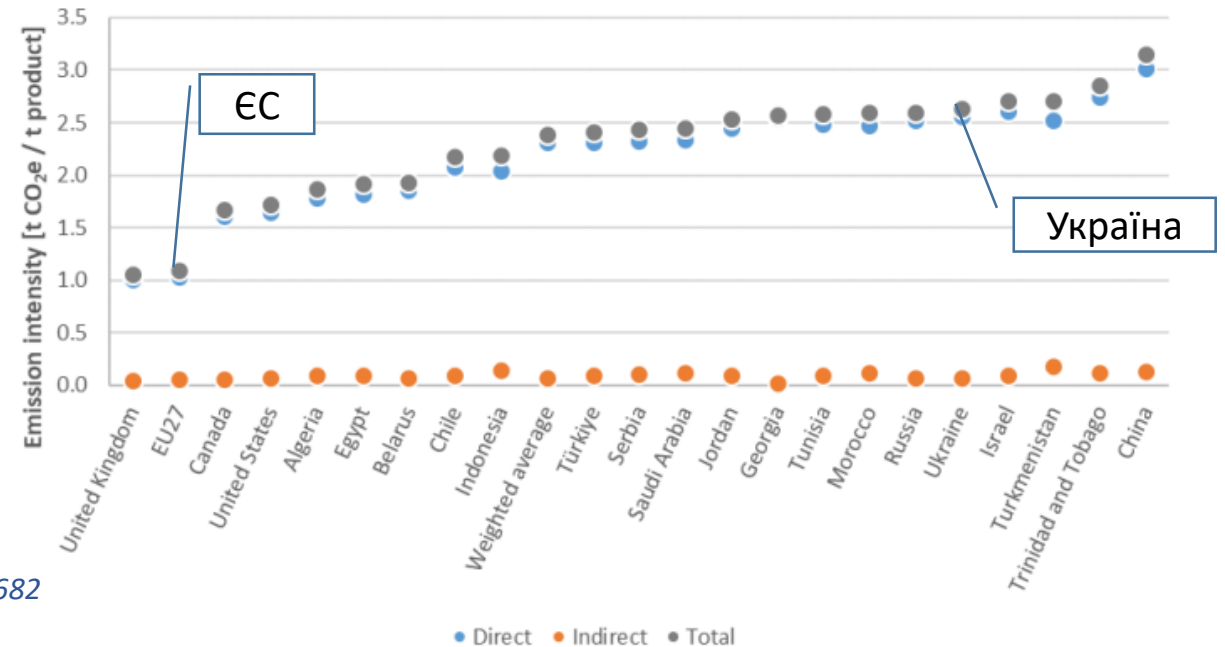
Порівняння рівнів викидів при виробництві сечовини ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)



Порівняння рівнів викидів при виробництві азотної кислоти (HNO₃)



Порівняння рівнів викидів при виробництві нітрату амонію (NH₄NO₃)



Технологічні покращення при виробництві аміаку

Удосконалений звичайний процес

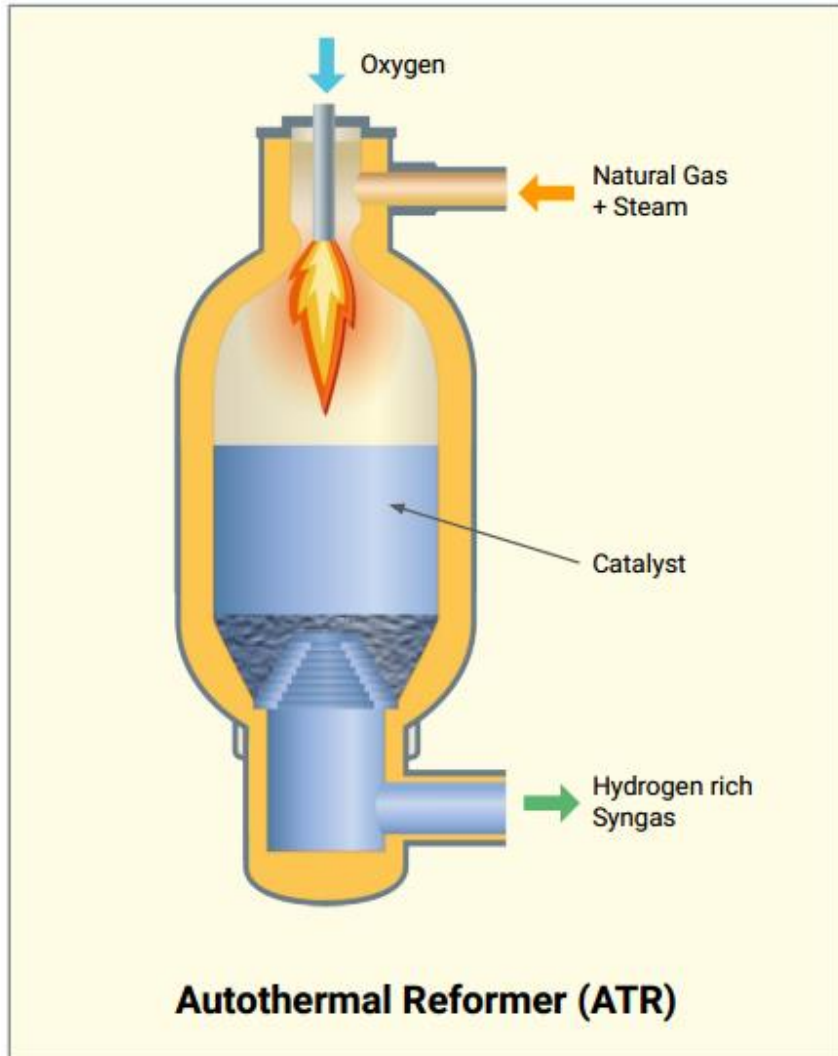
Оскільки аміачна промисловість розвивалася, значне зниження споживання енергії було досягнуто шляхом вдосконалення самого процесу. Сучасні заводи можуть досягти питомого енергоспоживання **27 МДж/тNH₃**.

Реконструкція підприємства шляхом підвищення потужності та енергоефективності шляхом значного попереднього підігріву вхідних компонентів, що надходять у піч, і шляхом встановлення високоефективної газової турбіни призводить до скорочення викидів NO_x і загального споживання енергії майже на 5 ГДж/тNH₃.

Покращена інтеграція процесів може заощадити 3 ГДж/тNH₃:

- Покращене видалення CO₂**: 0,9-1,1 ГДж/тNH₃.
- Непряме охолодження реактора синтезу аміаку;**
- Збільшення попереднього нагріву повітря** за допомогою відхідного тепла (0,9 ГДж/тNH₃).
- Використання тепла реакції синтезу аміаку** (до 0,6 ГДж/тNH₃);
- Відновлення водню** – виділення за допомогою різних технологій, економія до 0,8 ГДж/тNH₃.
- Процес зі зниженим первинним риформінгом і збільшенням подачі технологічного повітря;**
- Теплообмінний автотермічний риформінг;**
- Попередній риформінг**
- Покращений контроль процесів**
- Каталізатор низького тиску для синтезу аміаку**- новий каталізатор, дозволяє скоротити енергію до 1,2 ГДж/тNH₃
- Використання стійких до сірки каталізаторів для синтезгазу часткового окислення**
- Удосконалення ділянки риформінгу** – результати залежать від поточного стану заводу.

Автоматичний термічний риформінг (ATR) для виробництва аміаку



У процесі ATR природний газ (тобто метан) перетворюється за допомогою кисню та пари на молекули синтез-газу за високої температури. Реакція часткового окислення забезпечує тепло, необхідне для реакції риформінгу для «розриву» молекул метану. На наступній стадії простої реакції перетворення отримують водень і вуглекислий газ.

У поєднанні з уловлюванням вуглецю ATR дозволяє промислово виробляти водень з низькими викидами вуглецю, забезпечуючи ключові переваги:

- високий рівень уловлювання вуглецю до 99%,
- висока енергоефективність,
- економічне рішення та простота експлуатації.

Обидві технології (ATR і SMR) перетворюють вуглеводні на водень, але: ATR перетворює метан з паром та чистим киснем на синтетичний газ. Додавання кисню в реактор забезпечує необхідну енергію для перетворення без зовнішнього спалювання.

SMR перетворює метан на синтетичний газ лише за допомогою пари, але вимагає зовнішнього нагріву.

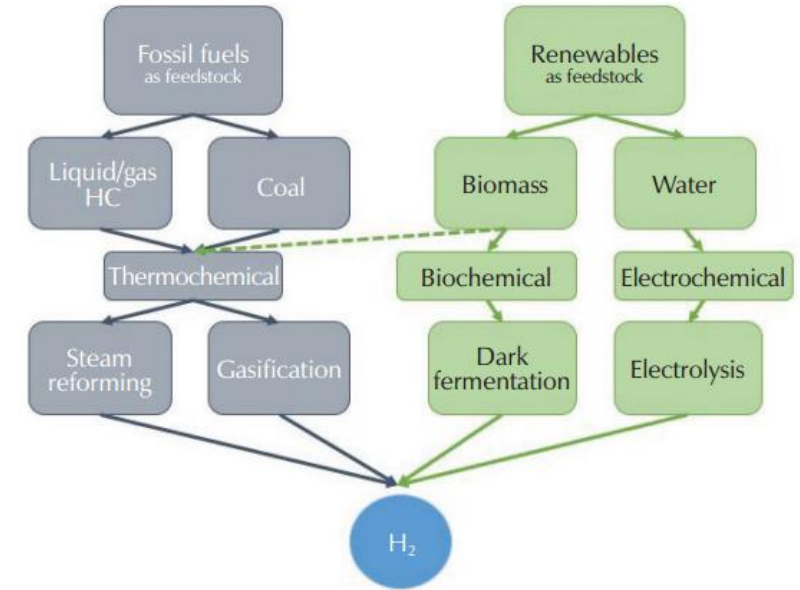
ATR особливо підходить для великої потужності, тоді як менша потужність, як правило, надає перевагу SMR.

Альтернативні виробничі технології на основі ВДЕ

Технологічні шляхи декарбонізації зосереджені на **декарбонізації виробництва водню**, на який припадає більшість викидів від виробництва аміаку:

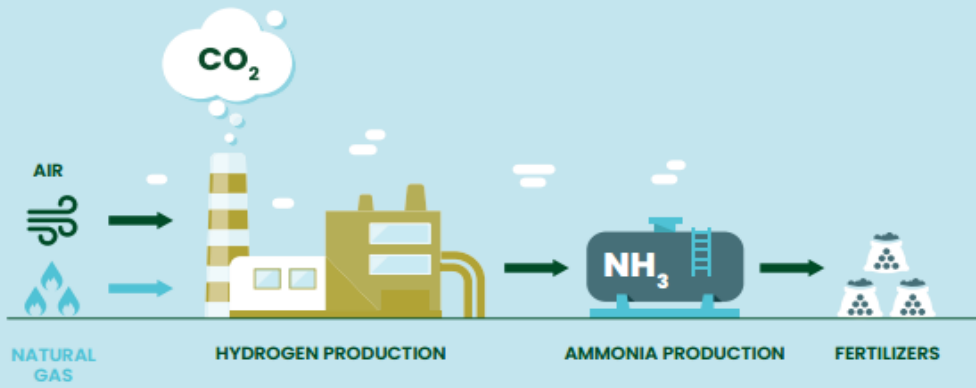
1. Заміна викопного природного газу відновлюваним і вторинним природним газом із відходів (**біометаном або біогазом**).
2. Заміна викопного водню відновлюваним воднем що виробляється в результаті **електролізу на основі відновлюваної електроенергії**.
3. Уловлювання та поглинання викидів від виробництва водню на основі природного газу (**уловлювання та зберігання CO₂, що утворюється у виробничих процесах**).

Ці технології є зрілими, хоча й знаходяться на різних етапах розгортання, і мають вищу вартість порівняно зі звичайним виробництвом викопного палива.



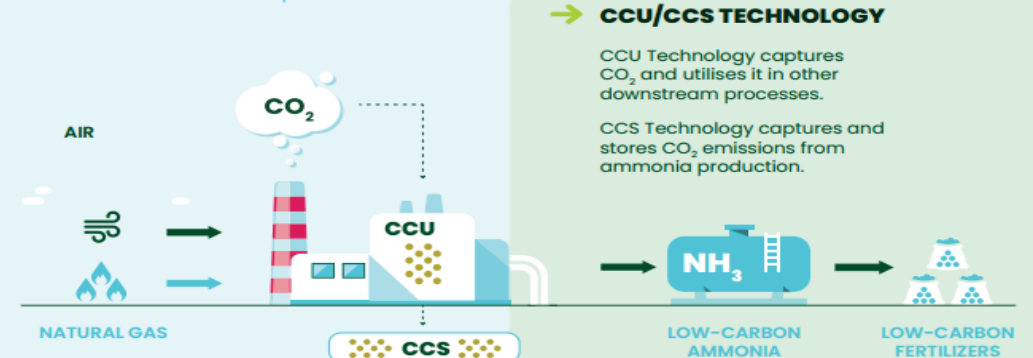
Джерело: <https://doi.org/10.15255/KUI.2021.066>

Traditional fertilizer production



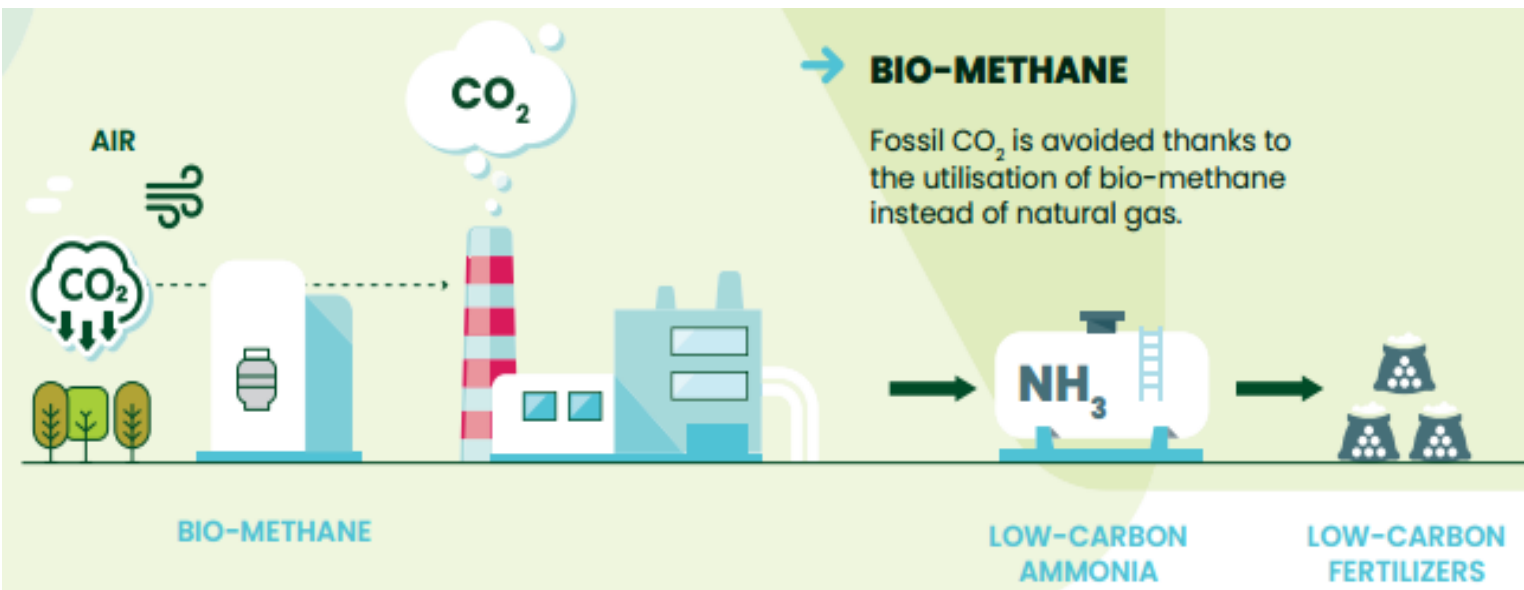
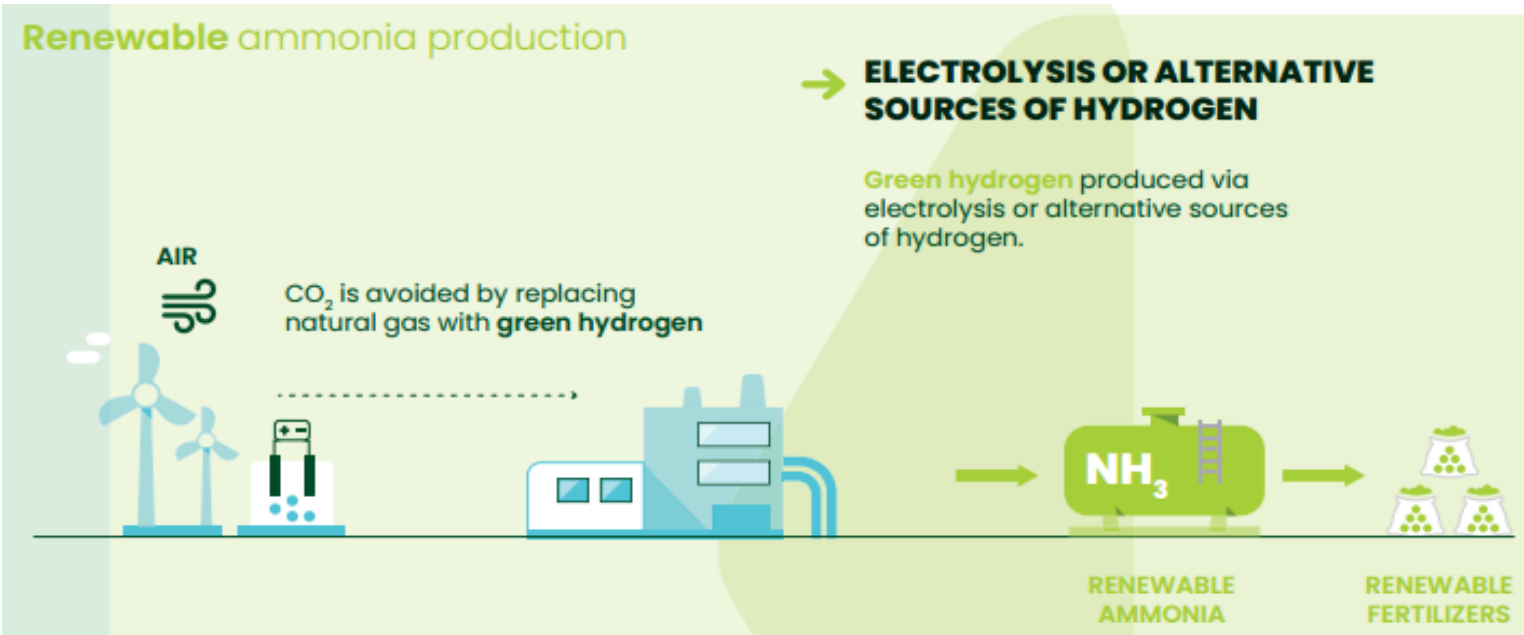
Low-carbon and renewable ammonia production technologies

Low-carbon ammonia production



Джерело: https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2023/11/DEF_2023_Decarbonisation_Roadmap_digital.pdf

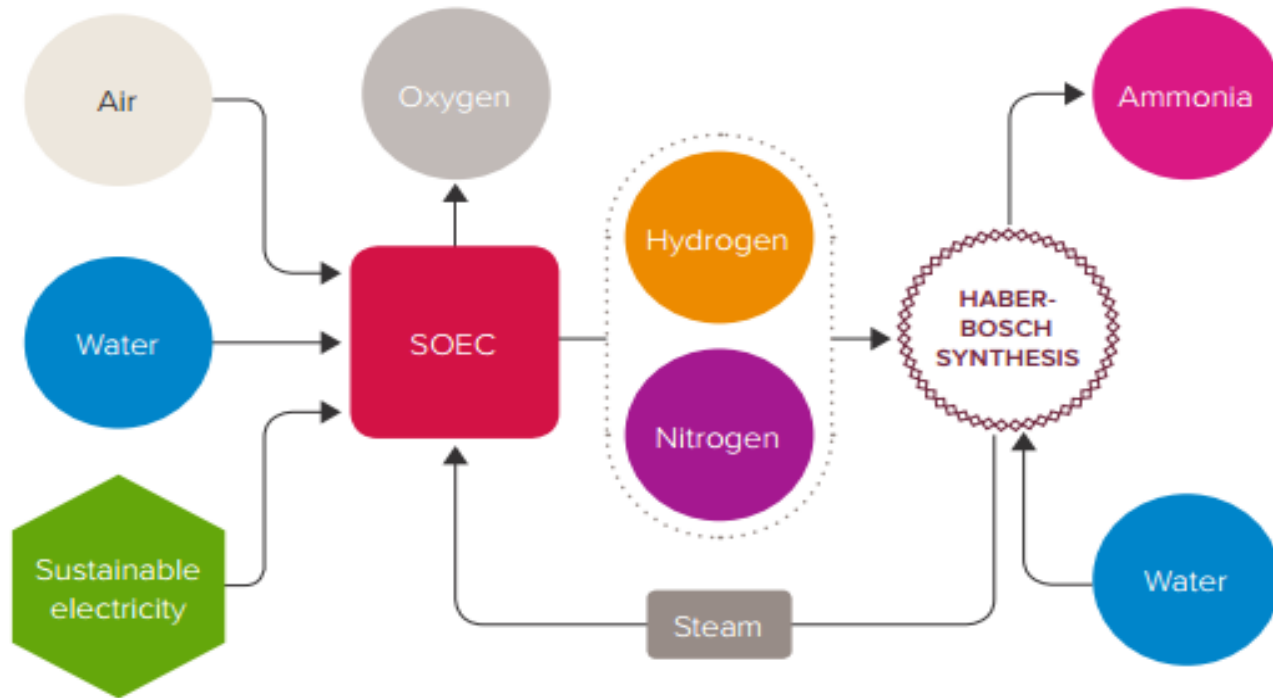
Альтернативні виробничі технології на основі ВДЕ



Джерело:

https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2023/11/DEF_2023_Decarbonisation_Roadmap_digital.pdf

Інноваційні технології виробництва аміаку (дослідний та демонстраційний рівень впровадження)



Haldor Topsoe розробляє демонстраційний проєкт на базі твердооксидної електролізної комірки (Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC), що інтегрує SOEC для виробництва синтез-газу аміаку ($H_2:N_2 = 3:1$), який потім перетворюється на аміак за допомогою традиційного процесу Габера-Боша. Процес працює при високих температурах і може відокремлювати кисень від повітря без використання блоку поділу повітря (ASU).

Очікуване споживання енергії на тонну аміаку на 5-10% нижче, ніж у звичайному процесі на основі SMR, і навіть менше, ніж у процесі на основі SMR з уловлюванням і зберіганням вуглецю.

Відпрацьоване тепло корисно використовується в процесі. Демонстраційна установка матиме потужністю 50 кВт, очікується комерційний рівень доступності в 2030 році.

Інноваційні технології виробництва аміаку (дослідний та демонстраційний рівень впровадження)

Усі описані вище технології досягли високого рівня технологічної готовності, хоча подальші інноваційні розробки, ймовірно, підвищать їх ефективність і зменшать вартість.

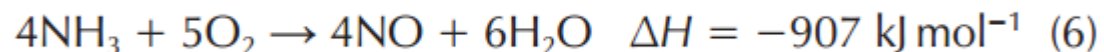
Інші технології в даний час все ще винаходяться та досліджуються, включаючи такі інновації, як:

- ❑ **Піроліз метану з використанням електричної плазми** для розщеплення метану на твердий вуглець (C) і H₂.
- ❑ **Фотокаталітичне виробництво водню**, пряме перетворення води за допомогою сонячного світла.
- ❑ **Електрифікований SMR**, який виробляє водень з використанням електроенергії для забезпечення теплом.
- ❑ **Виробництво водню з біомаси** шляхом інтеграції анаеробного зброджування та сухого риформінгу біогазу.
- ❑ **Виробництво водню з біогазу з одночасним уловлюванням CO₂**.
- ❑ **Газифікація біомаси**, при якій різні джерела біомаси (або відходів) газифікуються з утворенням синтез-газу.
- ❑ **Біологічні ферменти**: такі процеси замінюють процес Габера-Боша біологічними ферментними каталізаторами
- ❑ **Електрохімічне виробництво**: для синтезу аміаку безпосередньо з води та атмосферного азоту.
- ❑ **Хімічний цикл**: аміак як побічний продукт хімічних і електрохімічних реакцій, із заміною або доповненням процесу Габера-Боша.
- ❑ **Низькотемпературний каталітичний синтез**: інноваційні каталізатори при низьких температурах (близько 50°C) для стимулювання синтезу аміаку, збільшення виходу та зменшення потреби в енергії процесу порівняно зі звичайним високотемпературним процесом Габера-Боша із використанням залізного каталізатора.

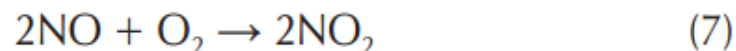
Декарбонізація виробництва азотної кислоти (HNO₃)

Азотна кислота майже повністю утворюється високотемпературним каталітичним окисленням аміаку та абсорбцією продуктів окислення водою з утворенням азотної кислоти та оксиду азоту. Співвідношення подачі аміаку та виробленої азотної кислоти становить 0,27 т NH₃/т HNO₃ і ефективність процесу від аміаку до азотної кислоти становить близько 94 %. **Усі реакції виробництва азотної кислоти є екзотермічними**-в результаті виділяється близько 6,3 ГДж/т HNO₃. Ця енергія може повертатися в систему або використовуватися в інших процесах.

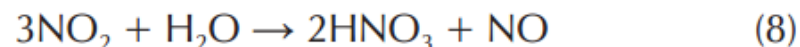
Першою реакцією виробництва азотної кислоти є окислення аміаку, рівн. (6). Аміак окислюють у суміші аміаку з повітрям (9—11 %) і пропускають через платиноводієві тонкі шари при 750—800 °С; рівняння (6).



Після окислення аміаку до закису азоту діоксид азоту утворюється шляхом окислення закису азоту, рівняння (7).



Останнім етапом є процес поглинання NO₂ сумішшю димерів в абсорбційній колоні, за рівнянням (8). Суміш потрапляє в нижню частину абсорбційної башти, а вода надходить у верхню частину колони. Наведену нижче реакцію проводять між тарілками через колонку та отримують азотну кислоту. Нарешті, якщо потрібна азотна кислота високої концентрації (концентрація до 90 % відсотків), слабку кислоту можна сконцентрувати за допомогою екстракційної дистиляції.



Овною проблемою у виробництві азотної кислоти є викиди закису азоту.

CO₂- еквівалент оксидів азоту, що утворюються в результаті реакцій окислення, становить 310 т CO₂ на 1 т утвореної азотної кислоти.

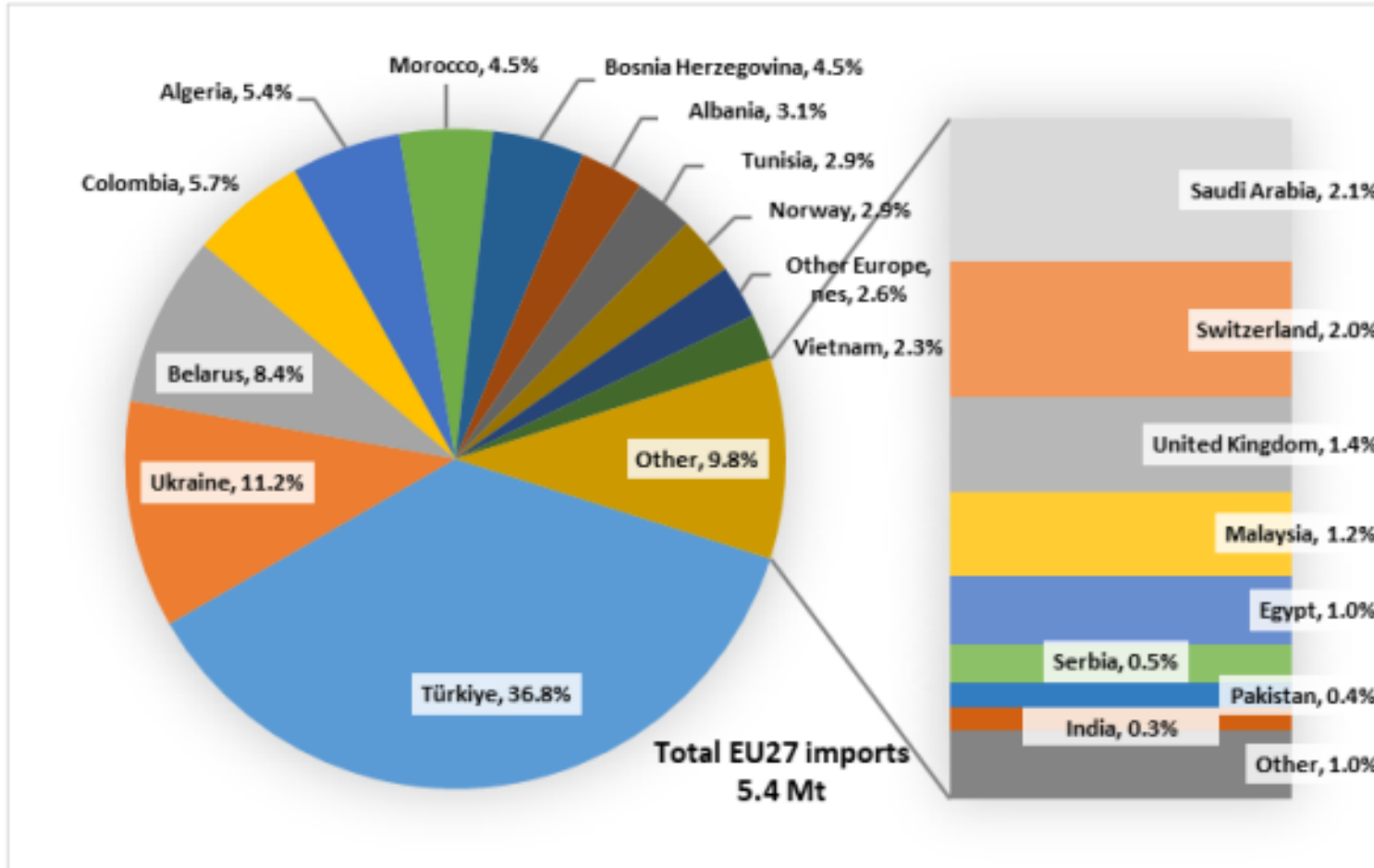
Декарбонізація виробництва азотної кислоти (HNO₃)

Існує три типи контролю над N₂O на заводах з виробництва азотної кислоти залежно від місця контролю в процесі виробництва азотної кислоти (IPCC, 2006b):

- ❑ **Первинні заходи щодо зменшення викидів** – запобігання утворенню N₂O на етапі окислення аміаку. Вони включають модифікацію процесу окислення аміаку або каталізатора. Параметрами процесу, важливими для оптимізації окислення, є співвідношення аміак/повітря, тиск і температура. Також доступно декілька нових каталізаторів. Покращені платинові каталізатори зі змінами складу та геометрії можуть призвести до підвищення ефективності перетворення аміаку, зменшення викидів N₂O та подовження тривалості кампанії. Альтернативою можуть бути каталізатори на основі Co₃O₄ або двостадійні каталізатори, платинова сітка на першому етапі та каталізатори без оксиду платини на другому етапі.
- ❑ **Вторинні заходи щодо зменшення викидів** – спрямовані на видалення N₂O в пальнику після сіток окислення аміаку. Існує дві методики зменшення викидів: гомогенне розкладання та каталітичне розкладання. Перший спосіб передбачає розширення об'єму технологічного пальника для досягнення гомогенного розкладання N₂O. Розширення камери реактора призводить до збільшення часу перебування реакційної суміші при високих температурах (850-950oC), і тому зменшує виробництво N₂O. Другий метод полягає в установці селективного каталізатора de-N₂O (вторинного каталізатора) під аміачні окислювальні сітки.
- ❑ **Третинні заходи щодо зменшення викидів** – базуються на зменшенні викидів N₂O у відпрацьованих газах. Методами можуть бути комбіноване зменшення викидів NO_x і N₂O у відпрацьованих газах або неселективне каталітичне відновлення (NSCR). NSCR забезпечує реакцію відновника (палива) з оксидами азоту з утворенням N₂ і води. Ефективність зменшення викидів N₂O за допомогою цієї технології становить 80-95 %, а викиди NO_x також знижуються до 100-150 частин на мільйон (ЕС, 2007b). Найбільш часто застосовуються вторинні та третинні засоби контролю.
- ❑ **Рекуперація енергії у виробництві азотної кислоти** є дуже важливою, оскільки це процес, який вимагає великих витрат енергії. Споживання палива можна зменшити шляхом рециркуляції втраченого тепла назад у систему. Є дві екзотермічні реакції, окислення та абсорбція, які виробляють більше енергії, ніж споживає загальний процес виробництва. **Тому дуже важливо, щоб вироблене тут тепло поверталось в систему.**

Виробництво цементу

Figure 42. Total EU cement imports in 2019.

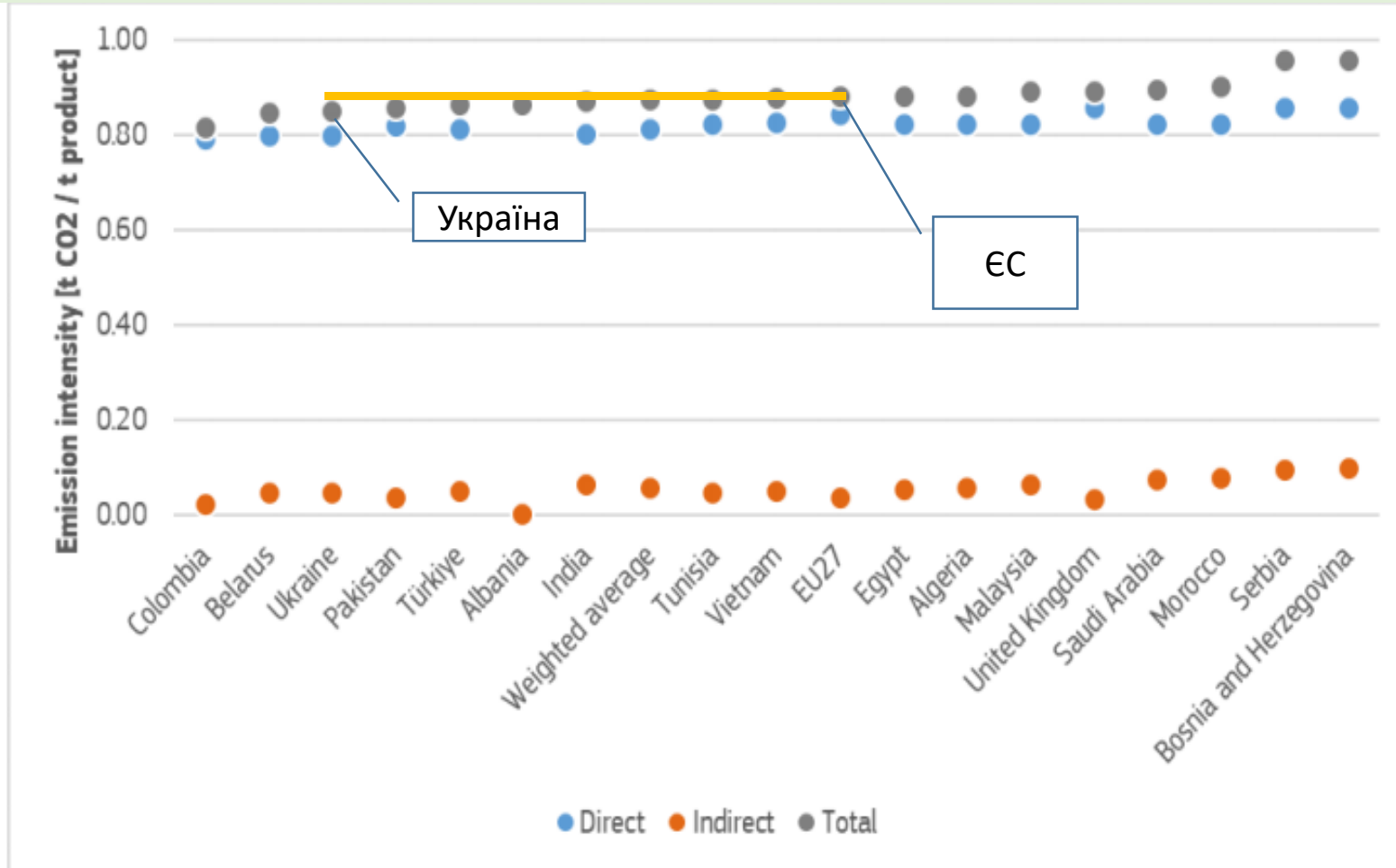


Source: JRC, 2023 based on (UN Comtrade, 2022).

Підпозиція 2523 29
інші портланд-цементи -94 %
від суми експорту в 2021 р.

Викиди ПГ при виробництві цементу

Порівняння рівнів викидів при виробництві сірого портландцементу
(CN код 2523 29)

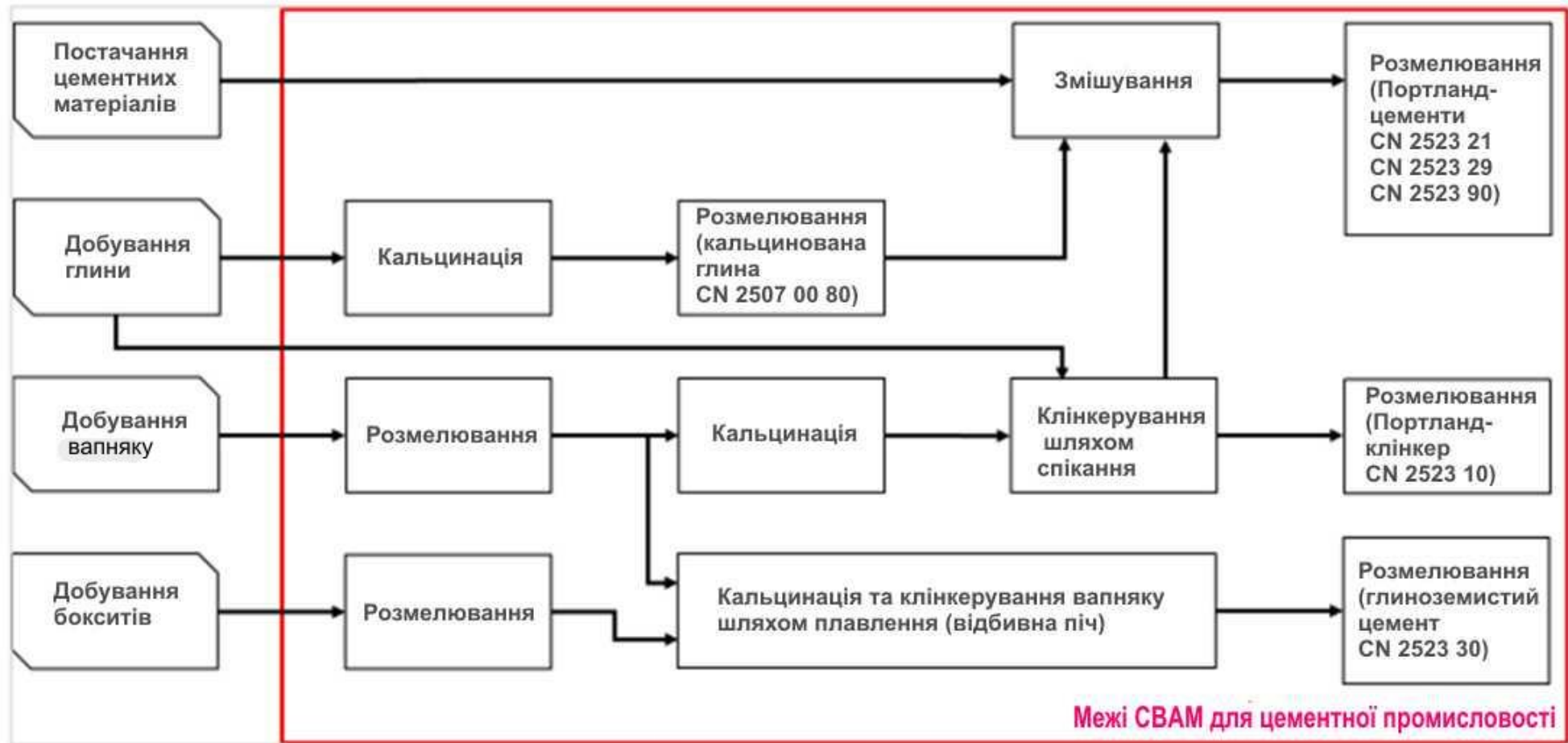


Цементна промисловість викидає приблизно 7% світового обсягу CO₂. Більшість цих викидів походить від випалу вапняку для виробництва клінкеру, найбільш поширеного компонента портландцементу (який сам по собі є основним сполучним агентом у бетоні).

Source: JRC, 2023.

Джерело: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC134682>

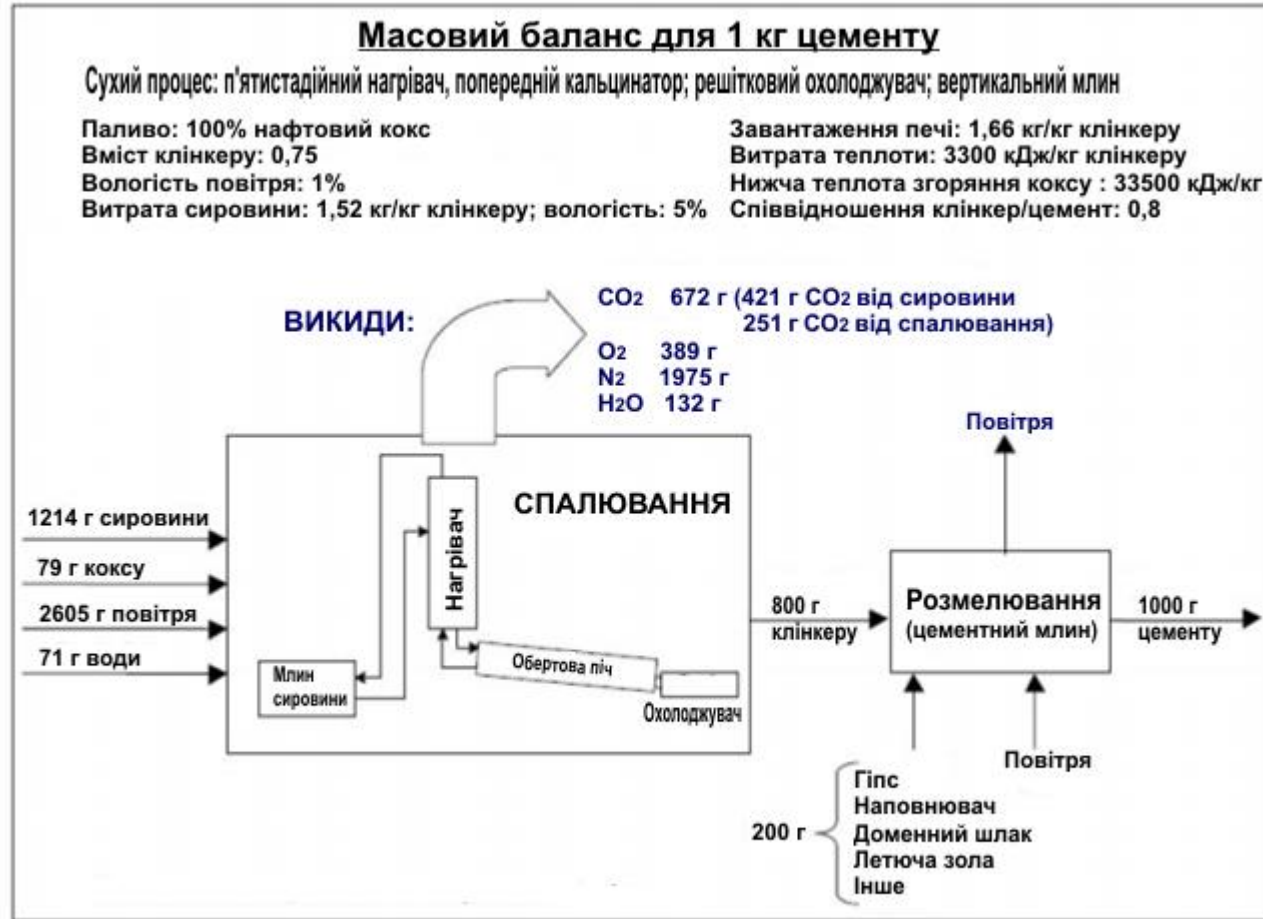
Вибрані процеси з маршрутів виробництва цементу в рамках СВМ.



Source: JRC, 2023.

Джерело: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC134682>

Джерела викидів ПГ при виробництві цементу



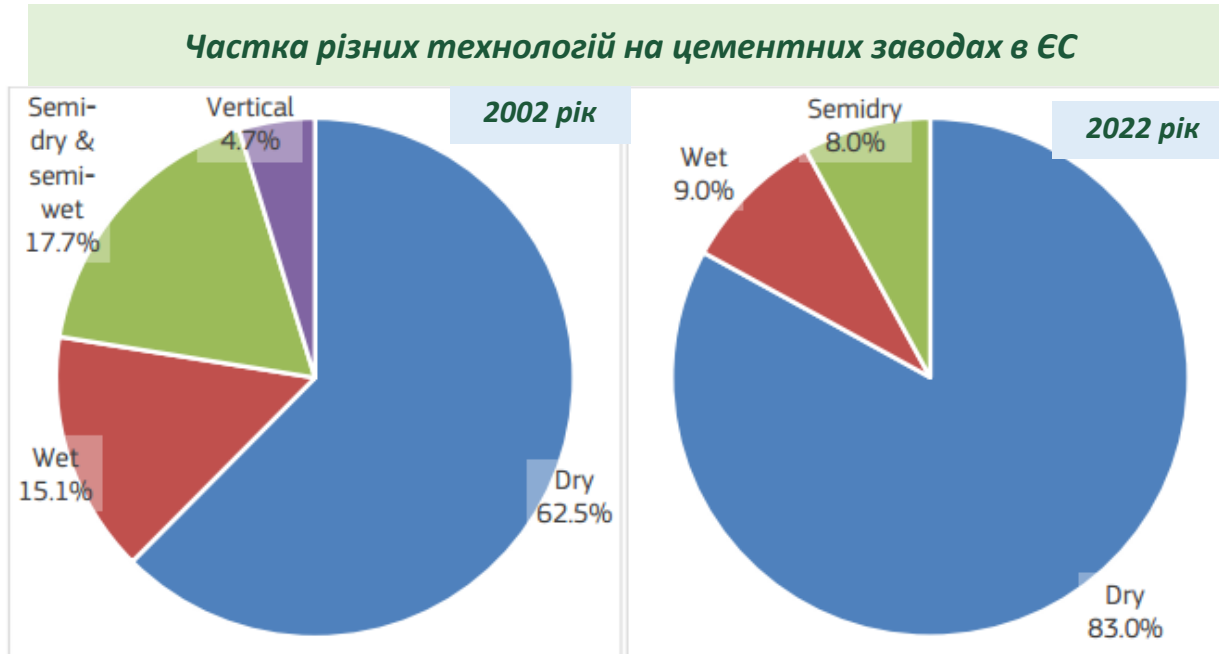
Source: [European Commission, 2013b]

Загалом CO₂-інтенсивність сірого та білого цементу в Європі коливається від менше 500 до понад 800 кгCO₂/т цементу.

Джерело: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC131246/JRC131246_01.pdf

- ❑ — **Викиди CO₂, що вивільняються під час розкладання карбонату кальцію в оксид кальцію** (526 кгCO₂/кг клінкеру, і викиди від спалювання палива для термічних процесів виробництва клінкеру (що залежить від виробничого процесу і типу палива, теоретично коливаються від 0 кг CO₂/кг клінкеру (для заводів, що працюють на біомасі) до 685 кг CO₂/кг клінкеру (для мокрого процесу, що потребує 6,4 ГДж/т клінкеру, що працює на горючих сланцях з інтенсивністю CO₂ 107 кгCO₂/ГДж);
- ❑ — **Викиди CO₂, що вивільняється при виробництві електроенергії**, яка споживається при виробництві цементу (електрика в основному споживається на подрібнення сировини, клінкеру та добавок і в незначній мірі на роботу печі та допоміжних пристроїв). У 2019 році кожна тонна сірого та білого цементу потребувала 113,5 кВт-год, коливаючись в діапазоні від 90 до 150 кВт-год/т цементу. Виходячи з середньої інтенсивності CO₂ електроенергії в ЄС-27 (255 гCO₂/кВт-год, електроенергія дає додаткові 29 кгCO₂/кг цементу;
- ❑ Вміст клінкеру в цементі (що називається співвідношенням клінкер-цемент) може змінюватися залежно від типу виробленого цементу. Це означає, що викиди CO₂ клінкеру «розбавляються», коли клінкер частково замінюється іншими матеріалами з низьким або навіть нульовим викидом вуглецю.

Зменшення викидів ПГ при виробництві цементу



- Теоретичний мінімальний попит на теплову енергію для виробництва цементного клінкеру становить від 1,59 до 1,84 ГДж/т клінкеру, у той час як середні показники ЄС-27 і глобальне споживання становлять 3,52-3,81 ГДж/т клінкеру станоом на 2019 рік.
- Таким чином, є місце для економії споживання палива та викидів.

Найкращою доступною технологією виробництва клінкеру є піч сухого способу з багатоступеневим попереднім нагріванням і попереднім кальцинуванням. У такій установці відхідне тепло попередньо нагріває та кальцинує вихідну сировину перед надходженням у піч, забезпечуючи до 10% зниження споживання енергії.

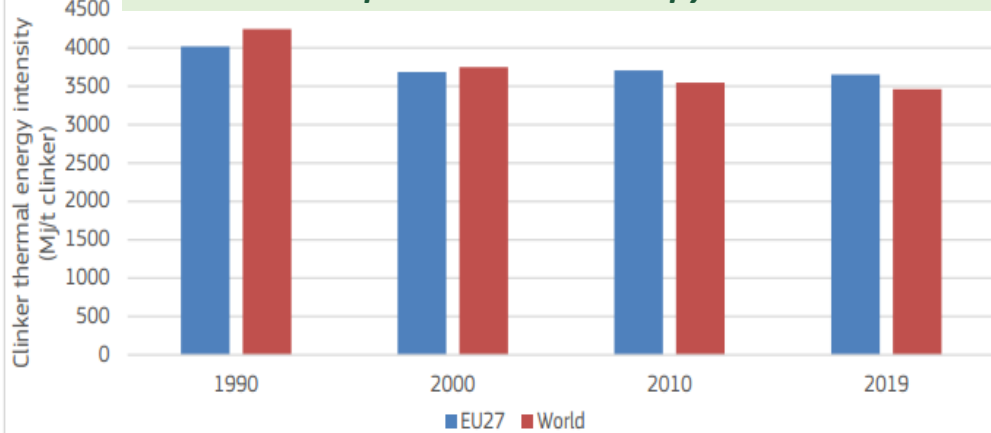
Питома потреба в теплоті для технологій

Технологія	Питома потреба в теплоті	
	МДж/т клінкеру	Те ж, середньозважене
Суха піч з попереднім нагрівом та попередньою кальцинацією	3000 < 4000	3515
Суха піч з попереднім нагрівом без попередньої кальцинації	3100 - 4200	3700
Напіввологий/напівсухий процес	3300 - 5400	3918
Суха піч без попереднього нагріву (довга суха піч)	До 5000	3570
Вологий процес	5000 - 6400	5512
Шахтні печі	3100 – 6500 та вище	-

Джерело: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC131246/JRC131246_01.pdf

Зменшення викидів ПГ при виробництві цементу

Зміна енергоємності клінкеру в ЄС та світі



Notes: Data in GCCA Getting the Numbers Right initiative are reported voluntarily. This implies that data coverage is not homogeneous across world regions: For instance, the data set relies on data for 90% of the EU27 cement production and 22% for the global cement production.

Source: JRC based on [GCCA, 2019]



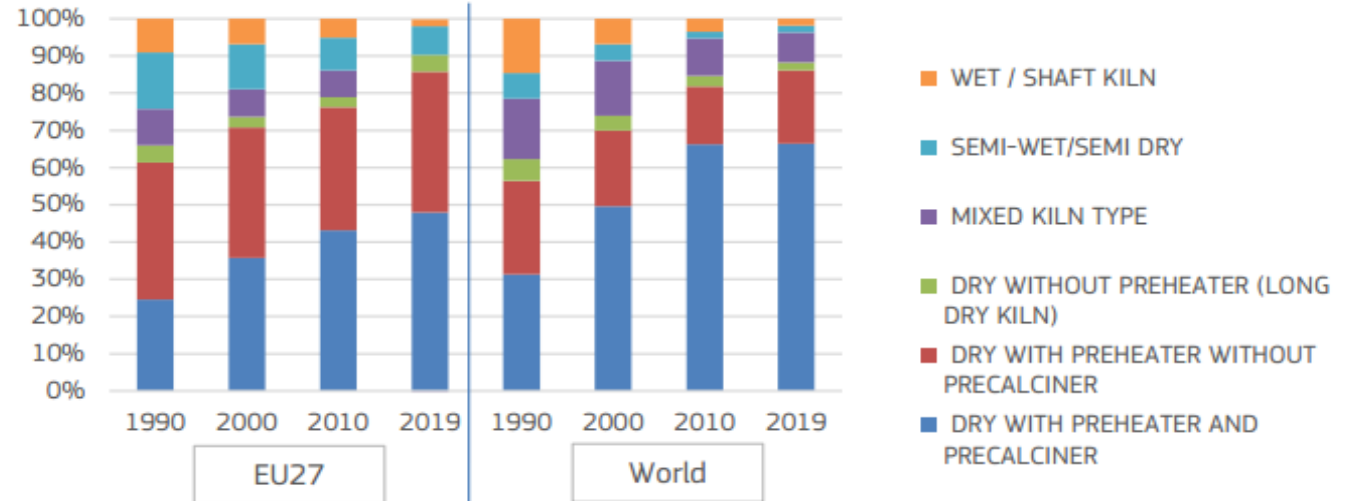
Модернізація призвела до зменшення на 18% глобальної енергоємності клінкеру між 1990 і 2019 роками. У випадку з ЄС зниження було незначним між 1990 і 2019 роками (9%) і майже нульовим з 2000 року (рис. 18). Це можна співвіднести з еволюцією виробничого процесу протягом періоду

Еволюція технології

У 2019 році найефективніший процес (тобто сухий з підігрівачем і попереднім кальцинатором) вимагав 3,51 ГДж/т клінкеру (у середньому по всьому світу та для виробництва сірого клінкеру), тоді як менш ефективні процеси, такі як мокрі або шахтні печі вимагали 5,51 ГДж/т клінкеру. Для білого цементу, незалежно від використовуваного процесу, значення досягає 6,38 ГДж/т цементу, що означає навіть вищу інтенсивність для білого клінкеру [GCCA, 2019].



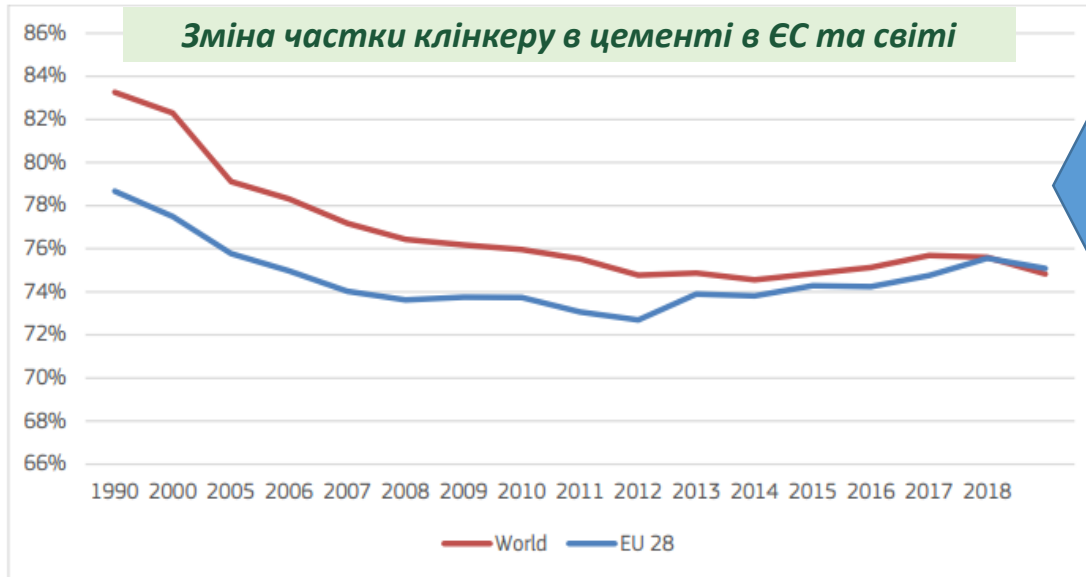
Частка технологій вир-ва сірого цементу в ЄС та світі



Notes: Low data coverage for specific regions in GCCA Getting the Numbers Right initiative may alter the accuracy of the results: One can for instance expect that new plants (with higher thermal efficiency) are more accurately represented than older plants (with lower thermal efficiency).

Source: JRC based on [GCCA, 2019]

Зменшення викидів ПГ при виробництві цементу



Source: [GCCA, 2019]

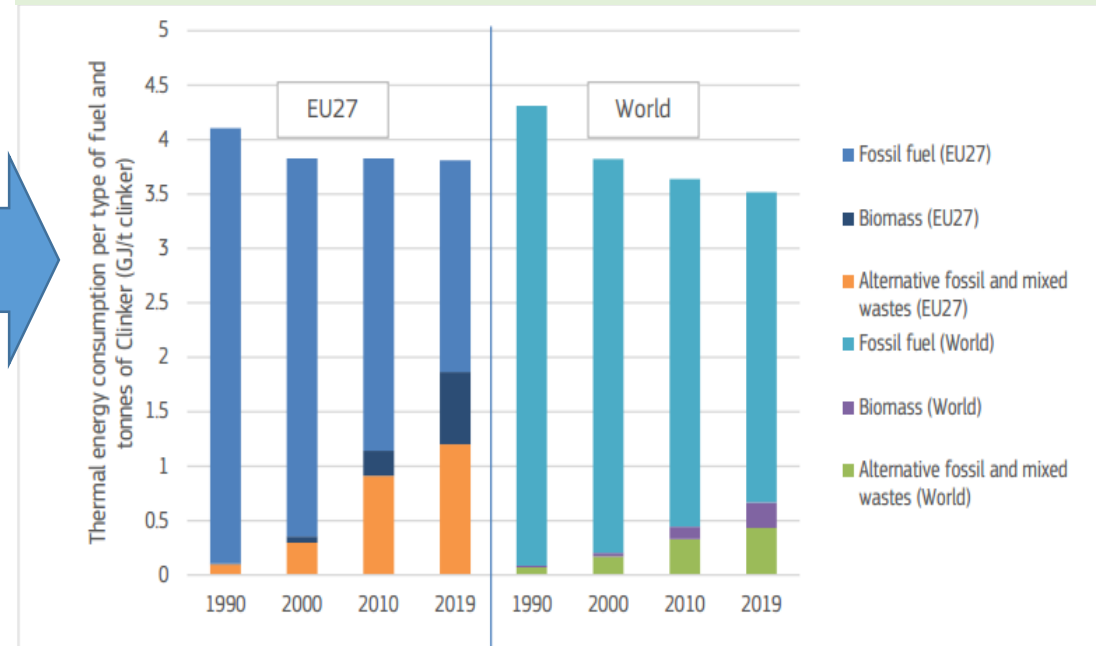
Біомаса

Якщо дивитися на паливо, яке забезпечує теплові процеси, біомаса вважається вуглецево-нейтральною відповідно до ETS: тобто, збільшуючи частку біомаси зменшуємо викиди CO₂. Перехід Європи до альтернативних видів палива та відходів може бути зумовлений економікою (покладаючись на дешеві місцеві ресурси). Оскільки альтернативне викопне паливо та відходи мають нижчу інтенсивність CO₂, ніж нафтовий кокс, вважається, що обидва типи палива зменшують викиди у виробництві цементу.

Співвідношення клінкеру до цементу

Співвідношення клінкеру до цементу показує, скільки клінкеру потрібно на тону цементу. Хоча співвідношення клінкеру до цементу в ЄС знизилося в першому десятилітті 21 століття, з тих пір воно відновилося. Це може бути пов'язано із надлишковими потужностями заводів в ЄС, що зменшує прагнення до заміни клінкеру в цементі [ETH, 2018].

Споживання теплової енергії за видами палива в ЄС та світі



Source: JRC based on [GCCA, 2019].

Варіанти декарбонізації: технології

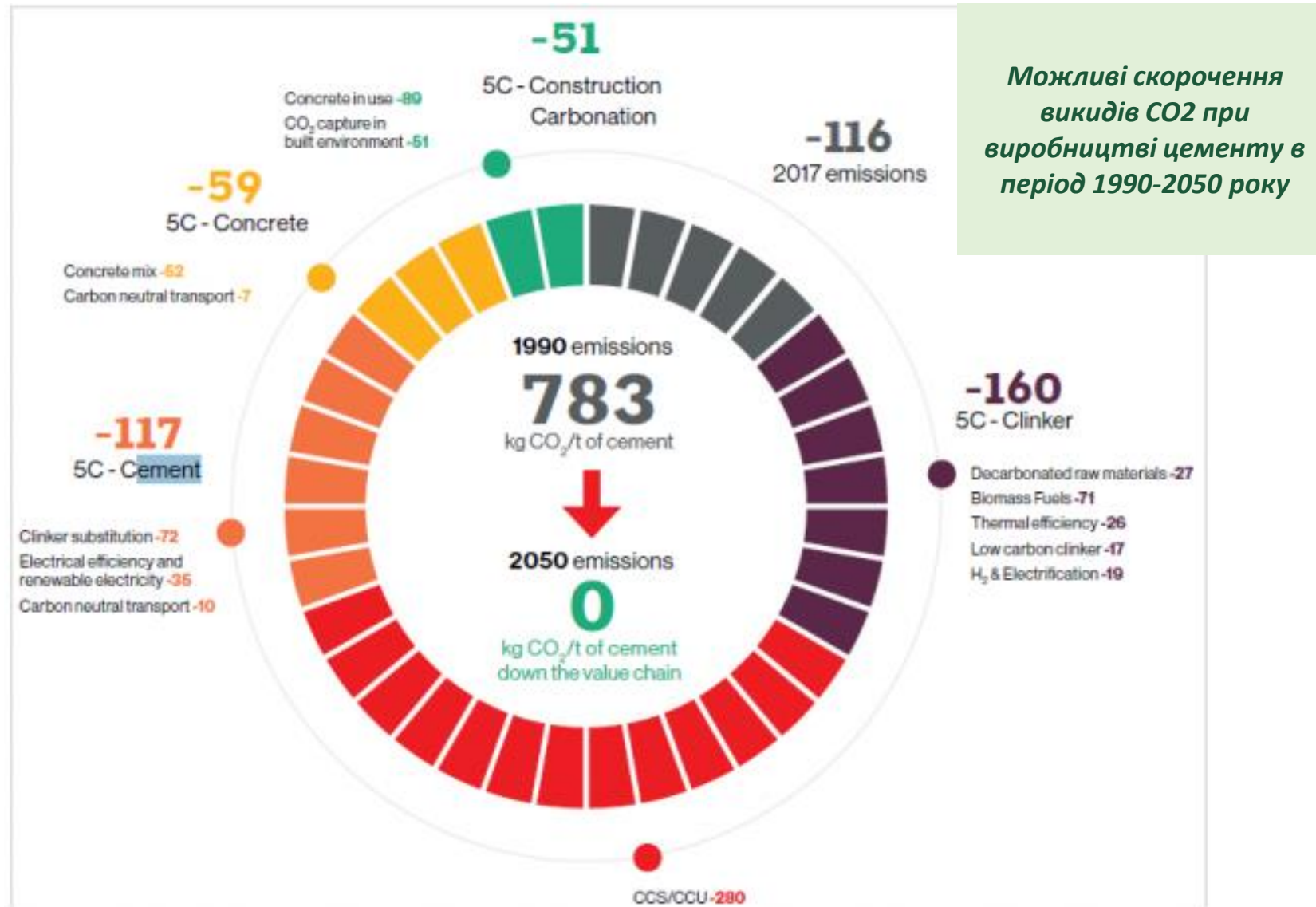
Цементний сектор зараз вивчає різні стратегії зменшення викидів CO₂. Поточні модифікації процесу і перехід від викопного палива до джерел енергії з низьким вмістом CO₂ вже дозволяють зменшити викиди CO₂. У поєднанні з технологіями CCUS потенційно можна досягти глибшого скорочення викидів.

- ❑ **Розробка нових складів цементу** з меншою кількістю клінкеру та/або інших матеріалів, уникаючи випалу карбонатів.
- ❑ **Уловлювання та використання CO₂**, що виділяється при виробництві цементу, у виробництві основних хімічних речовин і синтетичного палива, а також через карбонізацію цементу під час твердіння або в кінці терміну служби.
- ❑ Враховуючи надзвичайну кліматичну ситуацію та складність справжньої декарбонізації економіки, **цементи з негативним вмістом вуглецю** також можуть зробити цінний внесок;

Ефективні варіанти декарбонізації стосуються джерел викидів від найбільшого до найменшого. Найбільшим джерелом викидів є:

- ❑ **Технологічні викиди від випалу карбонату кальцію**, які мають бути усунені за допомогою CCUS або зменшені за допомогою альтернативних цементних композицій, включаючи принципи циркулярної економіки;
- ❑ **Технологічні викиди від згоряння палива для інших термічних процесів**, які мають бути усунені шляхом електрифікації печі або зменшені за рахунок ефективності використання палива;
- ❑ **Непрямі викиди від споживання електроенергії** будуть усунені через декарбонізацію системи електропостачання.

Варіанти декарбонізації: технології



Source: [Cembureau, 2020c].

Джерело: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC131246/JRC131246_01.pdf

Варіанти декарбонізації: технології

Відпрацьоване тепло можна використовувати для «інтегрованого використання» (тобто для сушіння палива, необхідного для цементного заводу або для зовнішнього використання, включаючи опалення та виробництво електроенергії).

Відпрацьоване тепло цементних заводів використовується для опалення в різних місцях по всьому ЄС: завод Кірхдорфера в Кірхдорфі (Австрія); Завод Cementir в Ольборзі (Данія); Заводи CRH у Лаппеенранті та Парайнені (Фінляндія); Завод HeidelbergCement у Бургленгенфельді (Німеччина) та завод Schwenk у Карлштадті (Німеччина).

Для підвищення теплової ефективності досліджуються та/або впроваджуються такі заходи:

- Модернізація процесу та печі;
- Утилізація відпрацьованого тепла;
- Загальна ефективність

Можна також розглянути досвід вапняного сектору, який, окрім вищезазначених підходів, шукає **ефективну ізоляційну обшивку для мінімізації тепловтрат оболонки; покращений контроль процесів і вхідних ресурсів**, а також **технічне обслуговування**.

Крім термічної ефективності та ефективного використання виробничих потужностей, **підвищення електричної ефективності** є ще одним напрямком зниження викидів CO₂.

Електроенергія потрібна для подрібнення сировини, цементу та добавок, а також для роботи печі та її допоміжного обладнання. На частку електроенергії припадає 13% світового кінцевого споживання енергії для виробництва цементу.

Система рекуперації відпрацьованого тепла (WHR) використовує частину середньотемпературного (200-400°C) відпрацьованого тепла димових газів печі для виробництва електроенергії. Хоча це не зменшує кількість електроенергії, що використовується на цементному заводі, воно використовує надлишок тепла, який інакше був би витрачений, щоб генерувати електроенергію для використання на місці або для експорту в мережу.

Опції включають: **теплові насоси; паровий цикл; Органічний цикл Ренкіна (ORC); Цикл Каліни або надкритичні системи CO₂**;

Інше зовнішнє використання відпрацьованого тепла включає **CCUS, постачання тепла для інших галузей промисловості та централізованого тепlopостачання**.

Відповідно до державної політики та регулювання, Китай став і залишається лідером у технологіях WHR, який у Європі широко не застосовується.

Альтернативи та інновації

Використання альтернативних видів палива

Галузь диверсифікує свою паливну суміш для термічних процесів: використання відходів і біомаси вже набуває поширення. **Сонячне опалення, водень і електрифікація є іншими напрямками, які досліджуються.**

Альтернативні види палива та відходи

Цементні печі можуть спалювати до 100% відходів або палива з біомаси. Деякі заводи вже працюють в Аллмендінгені (DE) і Retznei (AT) або модернізуються для роботи в таких умовах (Mannersdorf (AT); Otterbein, (DE), а інші заводи досліджують можливість працювати (MontalieuVercieu; Mergelstetten) без споживання викопного палива. Така еволюція пов'язана з доступністю та вартістю такого палива: вартість біомаси може коливатися від понад 20 дол. США/ГДж (для олійних культур) до 1-2 дол. А спалювання муніципальних відходів може навіть бути джерелом доходу.

Однак використання муніципальних відходів передбачає вирішення проблеми хлору, що вже має місце на кількох європейських заводах.

Біомаса

Для біомаси з економічних і екологічних міркувань увага зосереджена на відходах, а не біопаливі. Очікується, що «стала» біомаса становитиме від 539 до 915 мільйонів сухих тонн у 2050 році.

Комунальні та промислові відходи

Спільна обробка відходів і промислових побічних продуктів на цементному заводі максимізує їхній потенціал, тобто шляхом вилучення енергетичного потенціалу та використання того, що залишається, як сировини.

У 2019 році європейська цементна промисловість переробила понад 14 мільйонів тонн шлаку; понад 3 млн тонн золи-винесення; і **отримала 32% своєї енергії з альтернативних викопних і змішаних відходів**, таких як пластик, промислові відходи або шини. Серед різноманітних видів відходів варто звернути увагу на пластик. **Пластик є другим найбільш використовуваним паливом у цементній промисловості ЄС у 2019 році**, на нього припадає понад 16% споживаної теплової енергії.

Альтернативи та інновації

Альтернативні цементи та/або матеріали. Зола як заміник сировини при виробництві цементу

У 2018 році 96 мільйонів тонн відходів, оброблених на заводах з переробки відходів у енергію в Європі, призвели до виробництва приблизно 19 мільйонів тонн золи. Така зола містить близько 80-85% мінеральних речовин і вже використовується як заміник цементу. Дослідження стосуються розробки нового цементу на основі переробленої золи від спалювання муніципальних відходів: обробка 90 кт золи з 450 кт міських відходів дає 30 кт сировини для клінкеру.

Крім заміни викопного палива, до 5% первинної сировини в клінкері можна замінити мінеральною золою, що міститься у відходах. Також розглядаються низьковуглецеві цементи на основі таких компонентів як: **силікатні породи кальцію замість карбонатів кальцію; доменний шлак, зола-винесення та кремнезем, осади стічних вод, відходи термічних процесів; геополімери як результат реакції між твердими алюмосилікатними матеріалами і лужним розчином; відходи целюлозної промисловості.**

Електрифікація

Завдяки електроенергії без викидів парникових газів електричні печі можуть скоротити викиди у секторі цементу та вапна приблизно на одну третину. Вважається, що електрична піч є найбільш енергоефективною з питомою енергоємністю $-2,68$ ГДж/т клінкеру, що нижче, ніж у найбільш ефективної сухої печі. Завдяки зменшенню обсягу викидів і покращенню якості вихлопних газів порівняно зі спалюванням (викопного) палива можна зменшити уловлювання вуглецю.

Технології високих температур на основі електрики включають **плазму; електричні проточні нагрівачі; мікрохвильовий нагрів; резистивний електронагрів; індукційне нагрівання**, але вони все ще знаходяться в розробці та потребують подальшого дослідження.

Розширення електрифікації займе більше часу, досягнувши рівня технологічної готовності (TRL) 9 у 2035 р. і, можливо, зіграє свою роль до 2040 р. Технічні проблеми полягають у необхідних змінах у промисловому обладнанні. Це призводить до витрат, які можуть бути вищими на модернізацію існуючих заводів, ніж на будівництво нових потужностей у разі збільшення попиту. Це спонукає до установки потужностей з відновлюваних джерел енергії, підключених до цементних виробництв, переважно сонячної електроенергії, хоча вітрова електрика також актуальна.

Альтернативи та інновації

Нова технологія спікання клінкеру включає динамічний нагрівач Coolbrook Roto (передбачається встановлення в Мексиці та Індії та комерційне використання в промислових масштабах у 2024 році і електричний плазмовий нагрівання SaltX (процес, який був випробуваний на пілотній установці).

Завдяки проекту LEILAC ринкова готовність **уловлювання CO₂** у поєднанні з електрифікацією високотемпературного тепла в кальцинаторі може бути досягнута вже у 2025 році.

Вуглець-негативні цементи

Більшість викидів у поточному виробництві цементу виникає внаслідок випалу вапняку (карбонату кальцію) в оксиді кальцію для виробництва клінкеру: зменшення частки вапняку як сировини для виробництва клінкеру дійсно зменшує викиди CO₂. Крім того, затвердіння цементу через процеси карбонізації служить поглиначем CO₂ протягом усього терміну служби матеріалу. Завдяки покращенню та поєднанню двох підходів (розробка альтернатив портленд- клінкеру, які можуть поглинати CO₂), уловлювання вуглецю може перевищувати викиди CO₂ протягом усього терміну служби цементу, таким чином визначаючи вуглецевий цемент. Такі цементи можуть внести значний внесок у боротьбу зі зміною клімату. Незважаючи на перспективу, ці цементи ще не готові до комерціалізації та потребують подальших досліджень

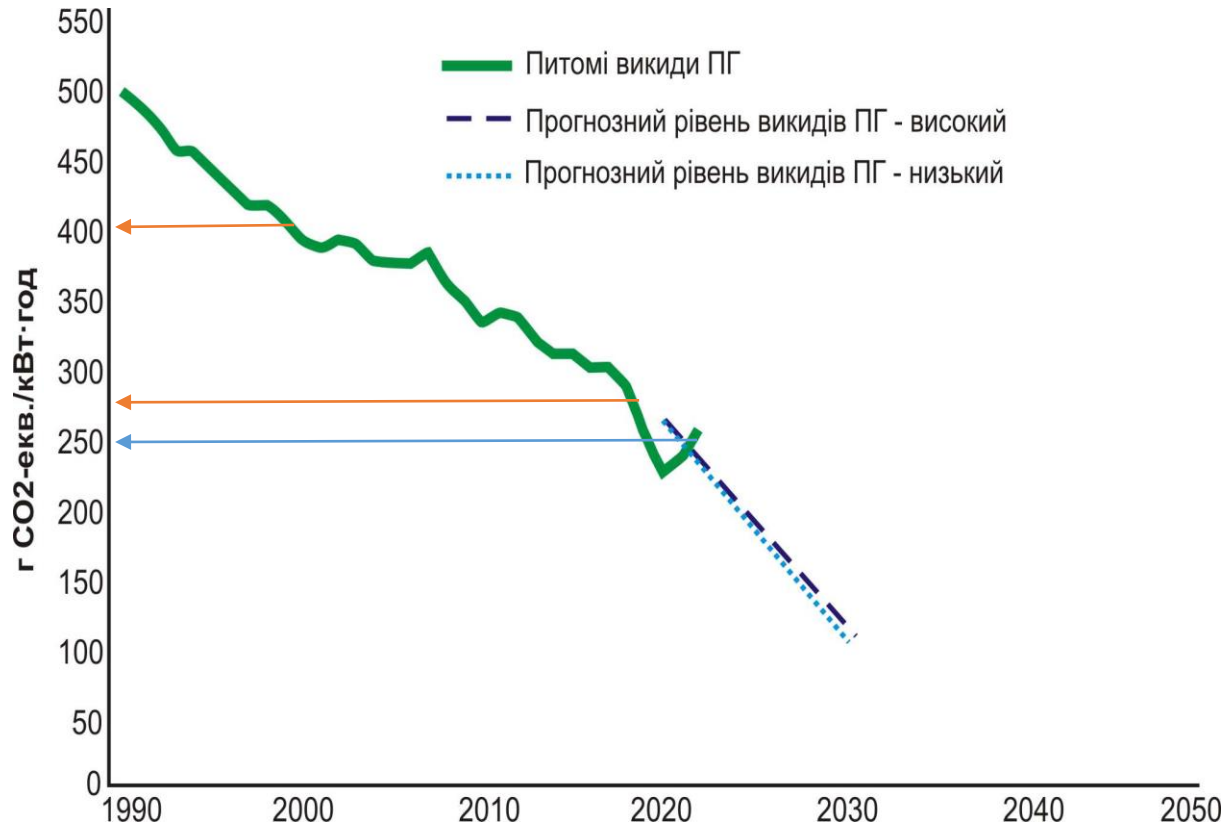
Уловлювання, використання та зберігання вуглецю

CCUS розглядається як багатообіцяюче рішення для вирішення проблеми викидів CO₂ від виробництва цементу.

Введення чистого кисню замість повітря в піч покращує згоряння та – за рахунок видалення азоту – збільшує концентрацію CO₂ у вихлопних газах. Чистий кисень можна отримати різними способами, хоча потрібні великі кількості. Цей підхід, який називається кисневим паливом або кисневим спалюванням, наразі перевіряється на різних цементних підприємствах.

Виробництво електричної енергії

Інтенсивність викидів парникових газів при виробництві електроенергії, рівень ЄС



Джерело: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1#ref-zF_FD

Який рівень викидів ПГ електромережі України?

COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2022/996: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2022/996/oj

Україна, виробництво – 407 г CO2-екв./кВт·год;
споживання:
при високій напрузі 419 г CO2-екв./кВт·год;
при середній напрузі 423 г CO2-екв./кВт·год;
при низькій напрузі 439 г CO2-екв./кВт·год

Наукова стаття: DOI 10.20535/1813-5420.4.2023.290937
Україна, виробництво – 272 г CO2-екв./кВт·год (2021 р.)

<https://lowcarbonpower.org/region/Ukraine>

Україна, виробництво – 226,5 г CO2-екв./кВт·год (2022 р.)

25 квітня 2024 р. відбулась експертна дискусія “СВАМ та Україна: Вплив на електроенергетичний сектор України та роль системи торгівлі викидами і вуглецевого ціноутворення”. Андрій Кітура, директор розвитку DiXi Group та керівник Офісу зеленого переходу при Мінекономіки України презентував перші результати Офісу щодо розрахунку коефіцієнту викидів від виробництва електроенергії в рамках СВАМ для України. <https://dixigroup.org/ofis-zelenogo-perehodu-prezentuvav-pidhid-shhodo-rozrahunku-koeficziyentu-vykydiv-vid-vyrobnyctva-elektroenergiyi-v-ramkah-svam-dlya-ukrayiny/>

Виробництво електричної енергії

5. CONDITIONS FOR APPLYING ACTUAL EMBEDDED EMISSIONS IN IMPORTED ELECTRICITY

An authorised CBAM declarant may apply actual embedded emissions instead of default values for the calculation referred to in Article 7(3) if the following cumulative criteria are met:

- (a) the amount of electricity for which the use of actual embedded emissions is claimed is covered by a power purchase agreement between the authorised CBAM declarant and a producer of electricity located in a third country;
- (b) the installation producing electricity is either directly connected to the Union transmission system or it can be demonstrated that at the time of export there was no physical network congestion at any point in the network between the installation and the Union transmission system;
- (c) the installation producing electricity does not emit more than 550 grammes of CO₂ of fossil fuel origin per kilowatt-hour of electricity;
- (d) the amount of electricity for which the use of actual embedded emissions is claimed has been firmly nominated to the allocated interconnection capacity by all responsible transmission system operators in the country of origin, the country of destination and, if relevant, each country of transit, and the nominated capacity and the production of electricity by the installation refer to the same period of time, which shall not be longer than one hour;
- (e) the fulfilment of the above criteria is certified by an accredited verifier, who shall receive at least monthly interim reports demonstrating how those criteria are fulfilled.

Джерело: Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R0956&print=true>

Ефективність та рівень викидів ПГ паливних технологій виробництва електроенергії

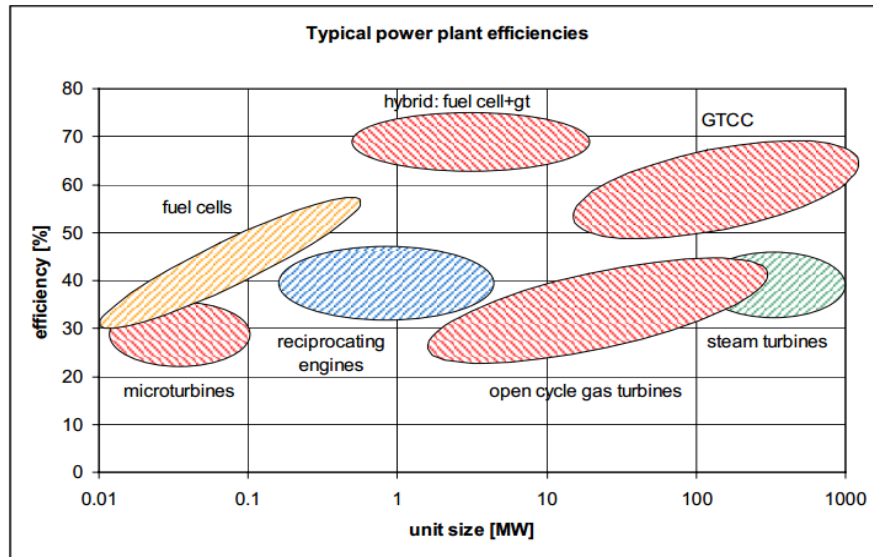
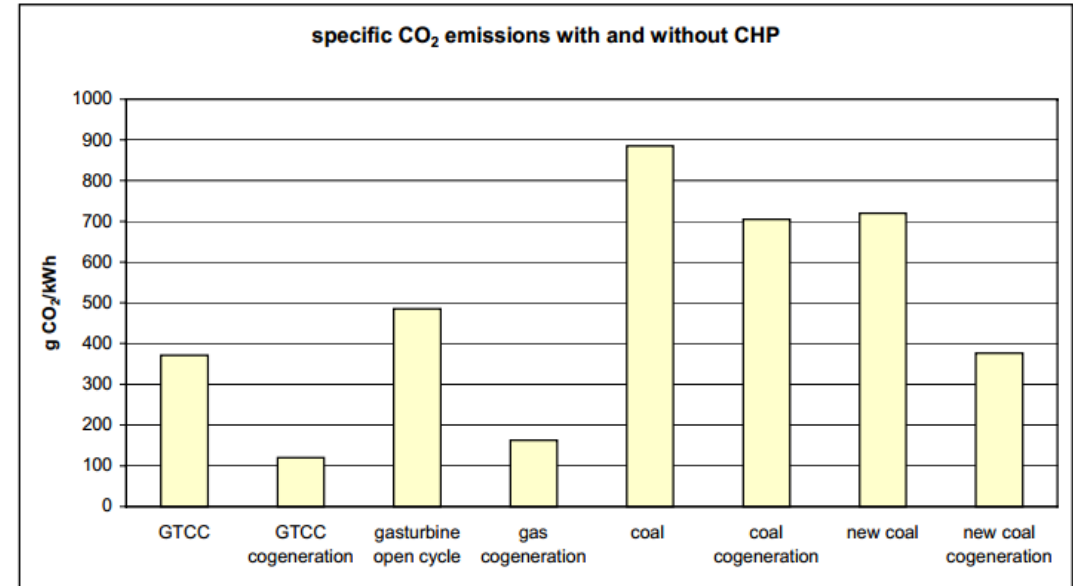
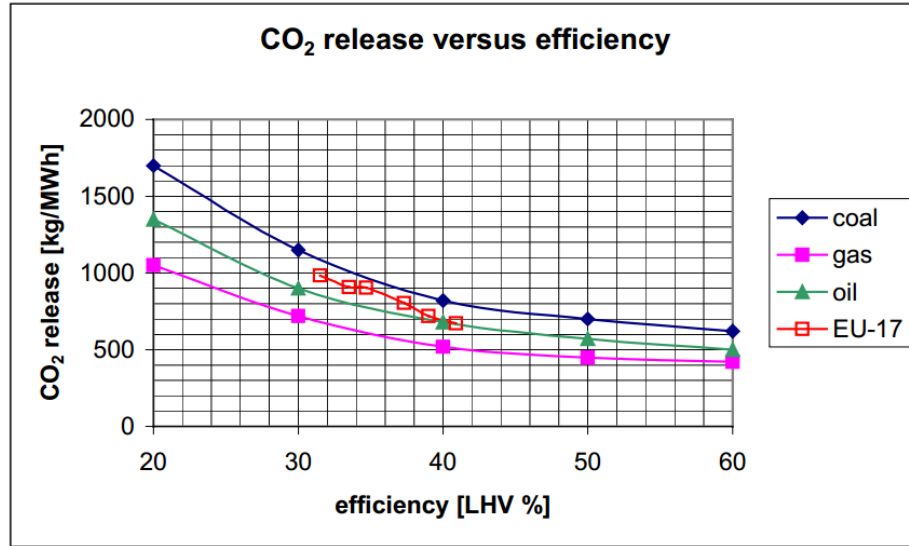
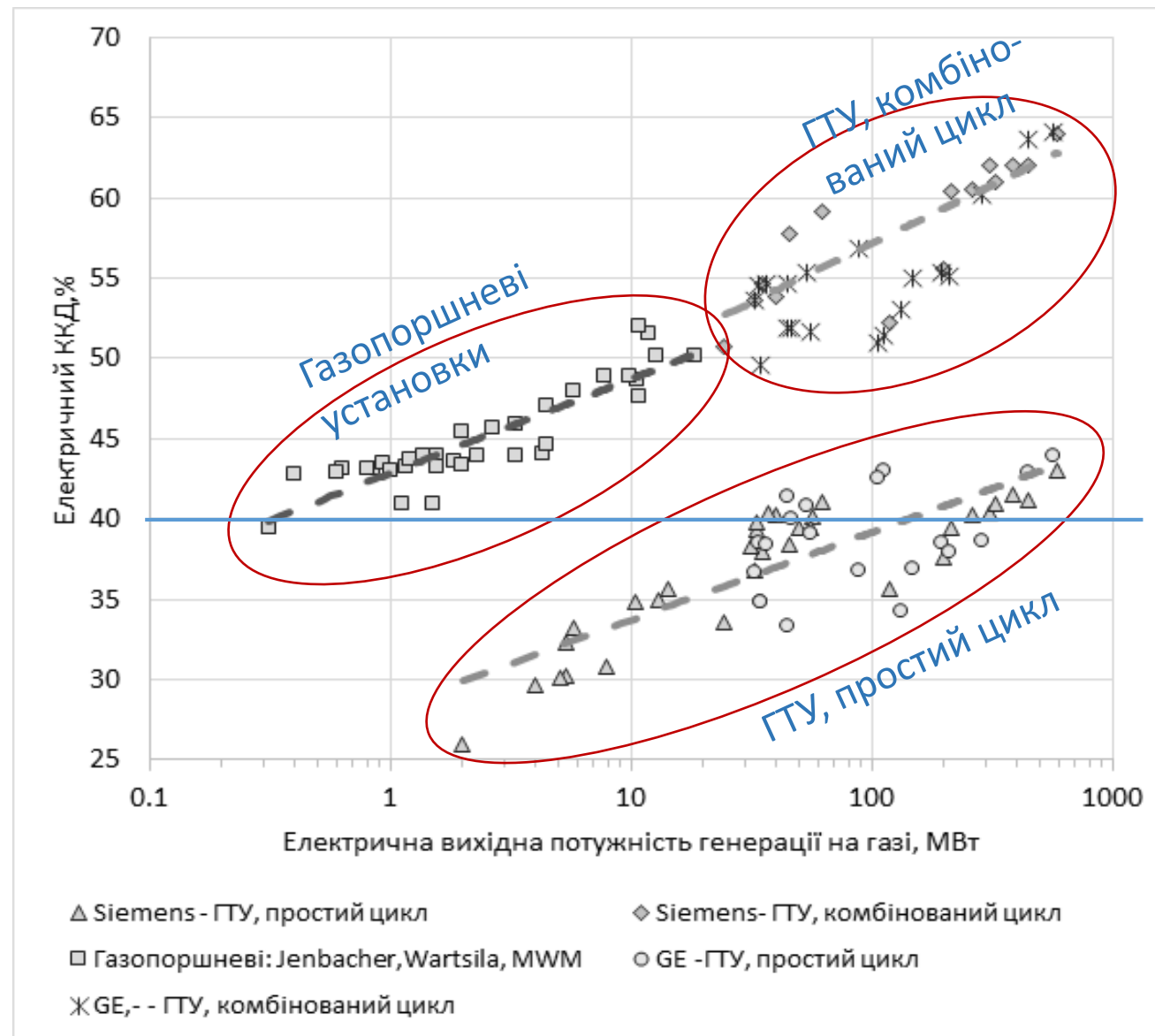


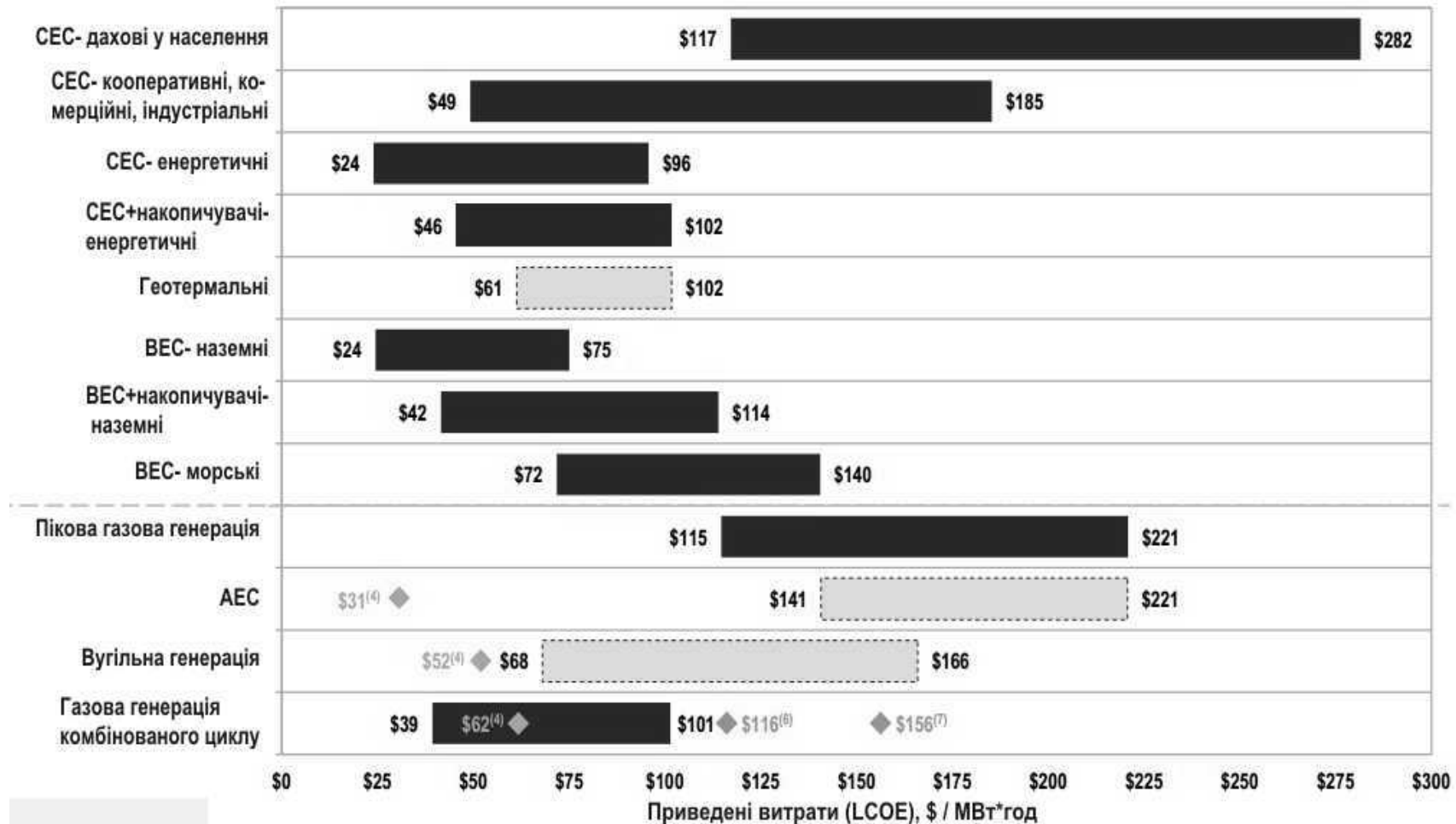
Table 5.1: Current Gas Turbine Technology Status

	Efficiency (%)	greenhouse gas emissions (g CO ₂ /kWh)	ref.
Gas turbine open cycle	30-40 (size dep.)	-	45
	32	557	18
	43	418	18
	32	547	19
	43	413	19
Natural gas combined cycle (NGCC) Gas turbine combined cycle (GTCC)	55	-	28, p. 164
	55	370	49
	55	-	17
	49	367	18
	51-55 (size dep.)	-	45
	55	300	19
	54	334	18
	55	370	20
	54	328	19
	49	414	19
52	400	1	

Ефективність та рівень викидів ПГ паливних технологій виробництва електроенергії



LCOE для різних технологій виробництва електроенергії (Lazard)





Government of the Netherlands

UABIO

Тренінг з питань скорочення викидів парникових газів

Дякую!



Володимир Крамар, к.т.н.,
ГО «Агентство з відновлюваної енергетики» (ABE)
kramar@rea.org.ua
<https://rea.org.ua/>
[https://www.facebook.com/
AgencyREA](https://www.facebook.com/AgencyREA)

