



Funded by
the European Union



EU4Climate

UABIO



Вебінар «Використання альтернативних видів палива в авіаційному та водному транспорті», 22.11.2022

Порівняльний аналіз альтернативних палив в авіації

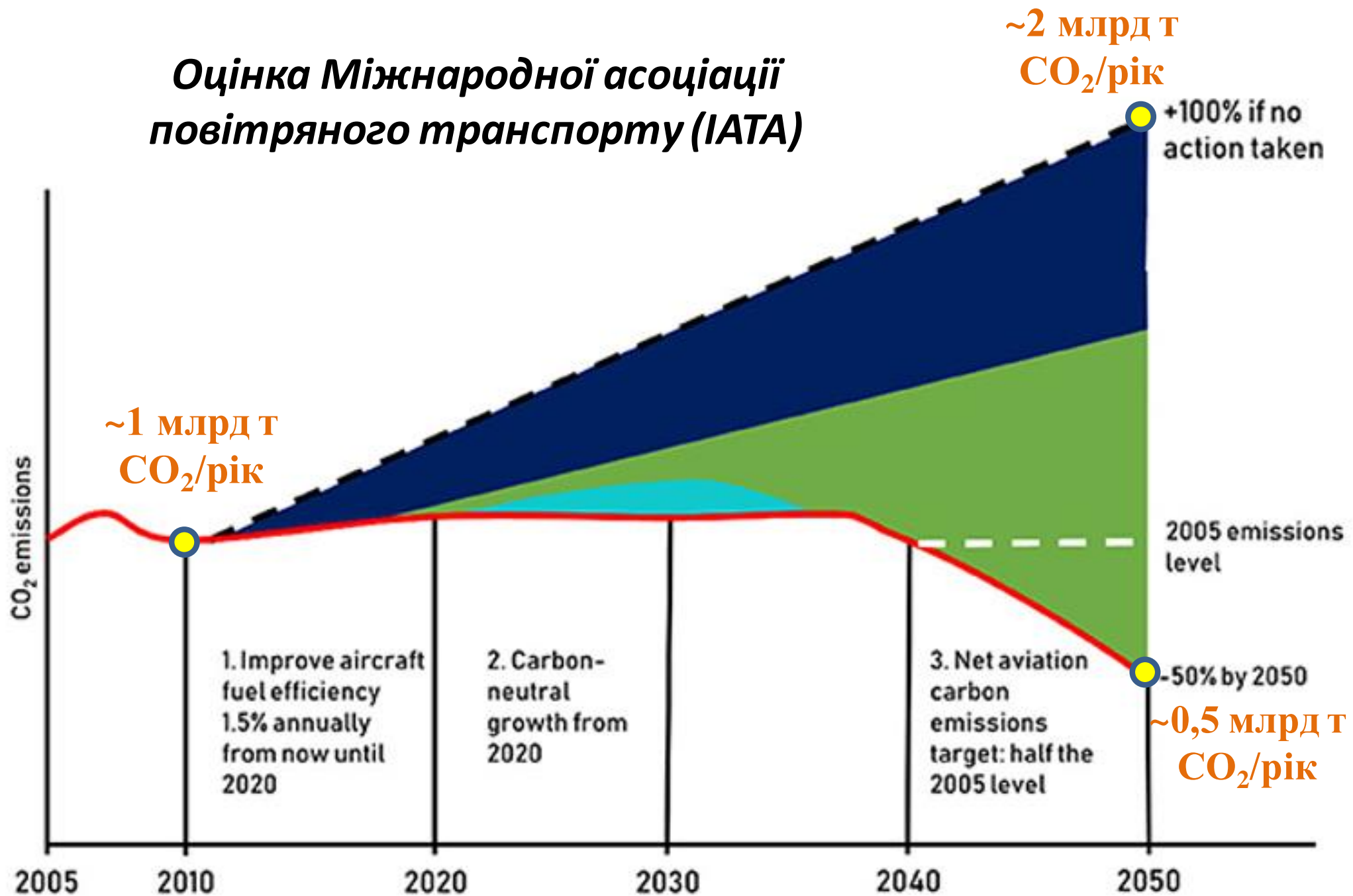
Тетяна Желєзна, к.т.н.

ГО «Агентство з відновлюваної енергетики»



Прогноз динаміки викидів CO₂ світової авіації згідно різних сценаріїв розвитку

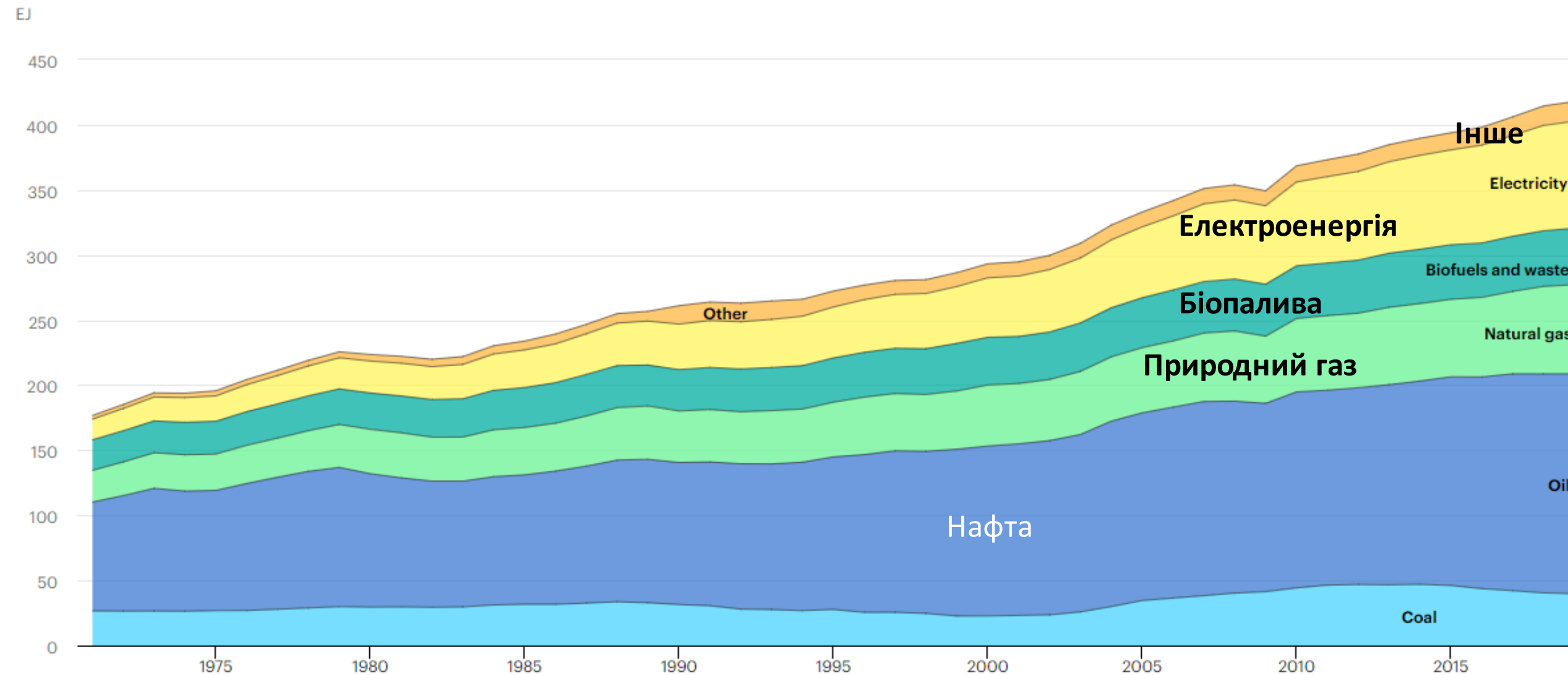
Оцінка Міжнародної асоціації повітряного транспорту (IATA)



- ✓ Внесок світової авіації до глобальних антропогенних викидів CO₂ – 2...2,5% (весь транспорт – 20%).
 - ✓ Частка авіації у загальних викидах CO₂ транспорту – 12% (дорожній транспорт – 75%).
 - ✓ Частка емісії CO₂ перельотів на > 1500 км, для яких практично немає альтернативного виду транспорту – 80% (загальних викидів авіації).
 - ✓ Емісія CO₂ у 2050 р. – 3,1 млрд т/рік (прогноз АТАГ – міжнародної платформи «Група дії повітряного транспорту»).
- <https://www.atag.org/facts-figures.html>

1. Підвищення ефективності використання палива літаками на 1,5%/рік протягом 2010-2020 рр.
2. Вуглецево-нейтральний ріст сектору після 2020 р.
3. Скорочення викидів CO₂ на 50% до 2050 р. порівняно з 2005 р. або **ріст +100%** у разі неприйняття відповідних заходів.

Структура кінцевого споживання енергії у світі

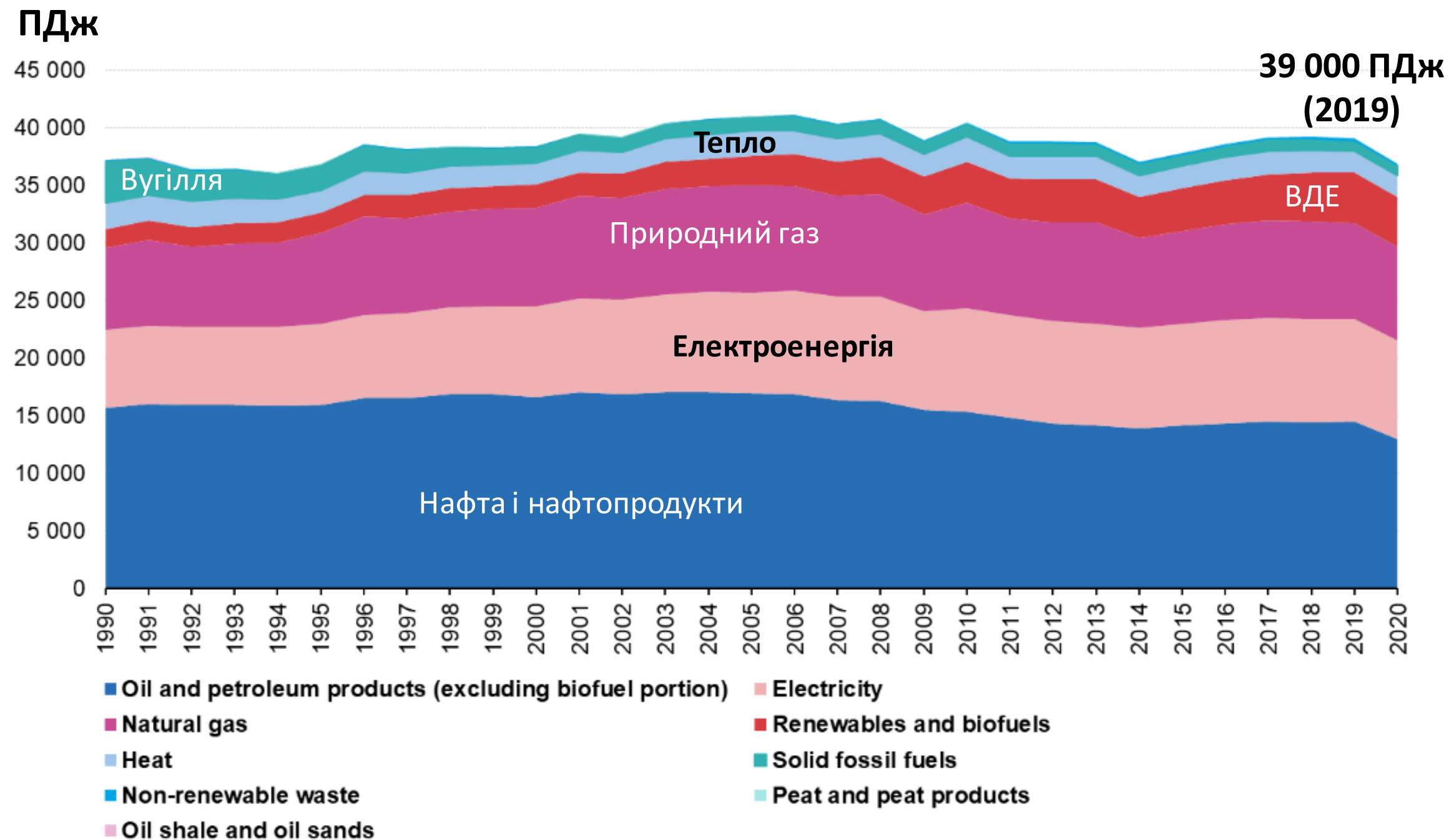


- Споживання енергії на транспорті: **29%** (121 Едж) загального споживання енергії в світі
- Споживання енергії сектором авіації: **10%*** загального споживання на транспорті, або **3%** світового енергоспоживання

* Перерахунок з даних по споживанню палива – 95 млрд галонів (2019) <https://www.statista.com/statistics/655057/fuel-consumption-of-airlines-worldwide/>
95 млрд галонів \approx 360 млрд л; Q керосину \approx 34 МДж/л, Едж – Екса (10^{18}) Дж

<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption>

Структура кінцевого споживання енергії в ЄС



Source: Eurostat (online data code: nrg_bal_c)

eurostat

Споживання енергії на транспорті:
32% загального споживання енергії в ЄС
(12 500 ПДж)

Споживання енергії сектором авіації:
17% загального споживання на
транспорті в ЄС (2 180 ПДж*), або **5,4%**
загального кінцевого енергоспоживання

* Перерахунок з даних по споживанню палива –
1479 тис. барелів/день (2019)

<https://knoema.com/data/consumption-jet-fuel+europe#:~:text=Jet%20fuel%20consumption%20of%20Europe,average%20annual%20rate%20of%201.95%25.>

1479 тис. барелів/день \approx 64 млрд л/рік

Q керосину \approx 34 МДж/л

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption

<https://www.eceee.org/policy-areas/transportation/>

Визначення «сталого авіаційного палива» (САП)

□ **Міжнародна асоціація повітряного транспорту (IATA). САП має три ключові ознаки:**

- його виробництво є сталим, тобто не порушує екологічного балансу і не виснажує природні ресурси;
- воно вироблено з сировини, що є альтернативною сирій нафті;
- воно має властивості реактивного палива (РП), що відповідають технічним і сертифікаційним вимогам для використання у комерційних літаках.

□ **Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO). До САП відносяться «палива для заправки», вироблені з відновлюваної сировини або відходів, що відповідають критеріям сталості CORSIA*:**

- скорочення викидів парникових газів протягом життєвого циклу палива, принаймні, на **10%** порівняно з нафтовим РП;
- не використання для отримання палива біомаси з земель з високим запасом вуглецю як сировини.

* CORSIA – запроваджена ICAO методологія оцінки викидів парникових газів протягом життєвого циклу авіаційних палив, якою користуються країни-члени ICAO.

□ **В ЄС під САП розуміють наступні види «палива для заправки», які відповідають критеріям сталості та вимогам скорочення викидів парникових газів** згідно Директиви ЄС RED II:**

- **синтетичне** авіапаливо, отримане за технологією перетворення електроенергії у рідину – PtL (Power to Liquid);
- **біопаливо II***** покоління, отримане з лігноцелюлозної сировини та певних видів відходів (згідно частині А Додатку IX RED II);
- **біопаливо III***** покоління, отримане з водоростей;
- **біопаливо**, вироблене з сировини з «високим потенціалом сталості» (ВХО та певні види жирів згідно частині В Додатку IX RED II).

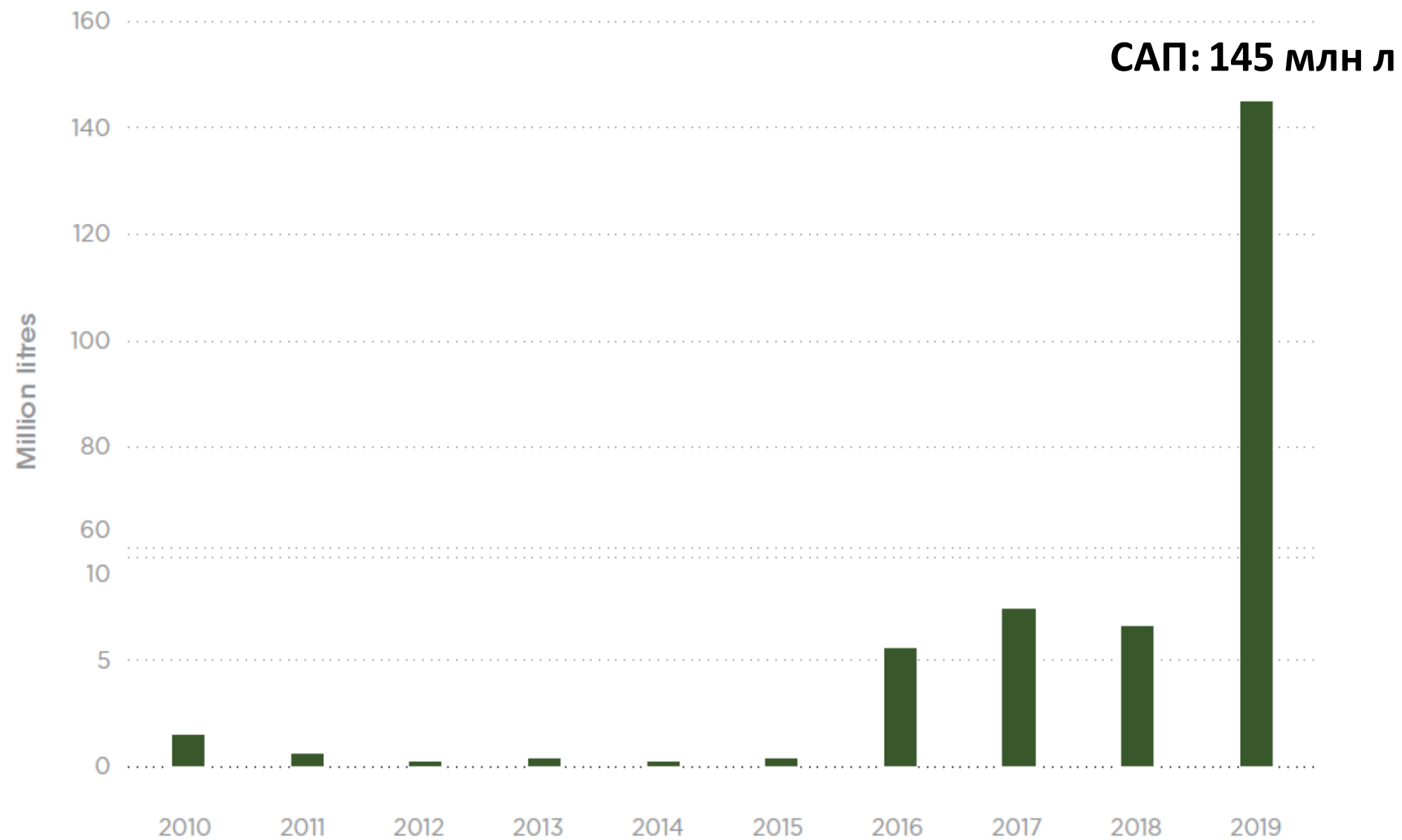
** не менше **50%**, **60%** та **65%** для установок з виробництва транспортних біопалив, що почали роботу, відповідно, до 05.10.2015 включно, у період з 06.10.2015 по 31.12.2020 та з 01.01.2021. *** В RED II називається «**просунуте**» біопаливо

<https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-what-is-saf.pdf>

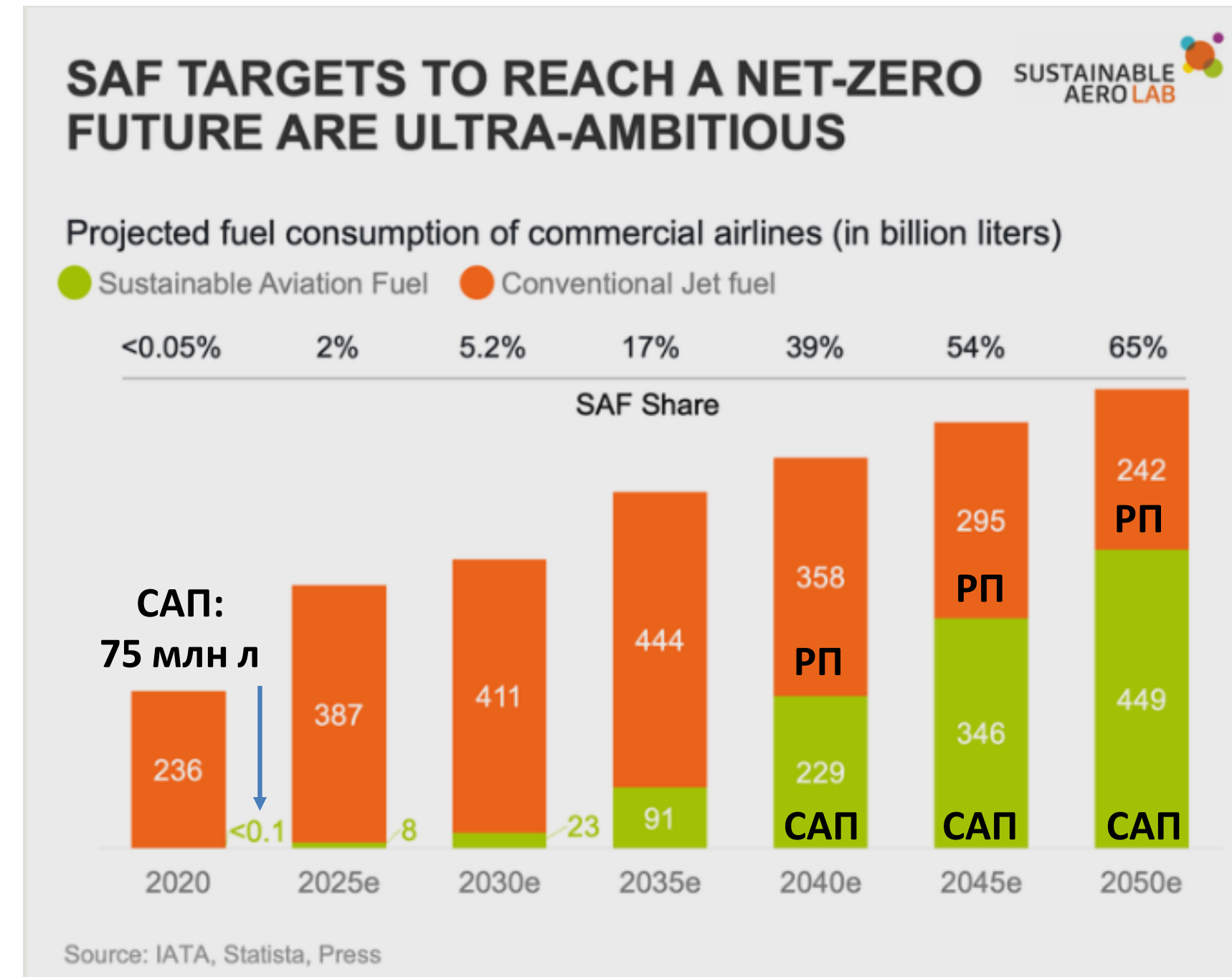
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121006833> [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698900/EPRS_BRI\(2022\)698900_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698900/EPRS_BRI(2022)698900_EN.pdf)

Виробництво та споживання сталих авіаційних палив (САП) у світі

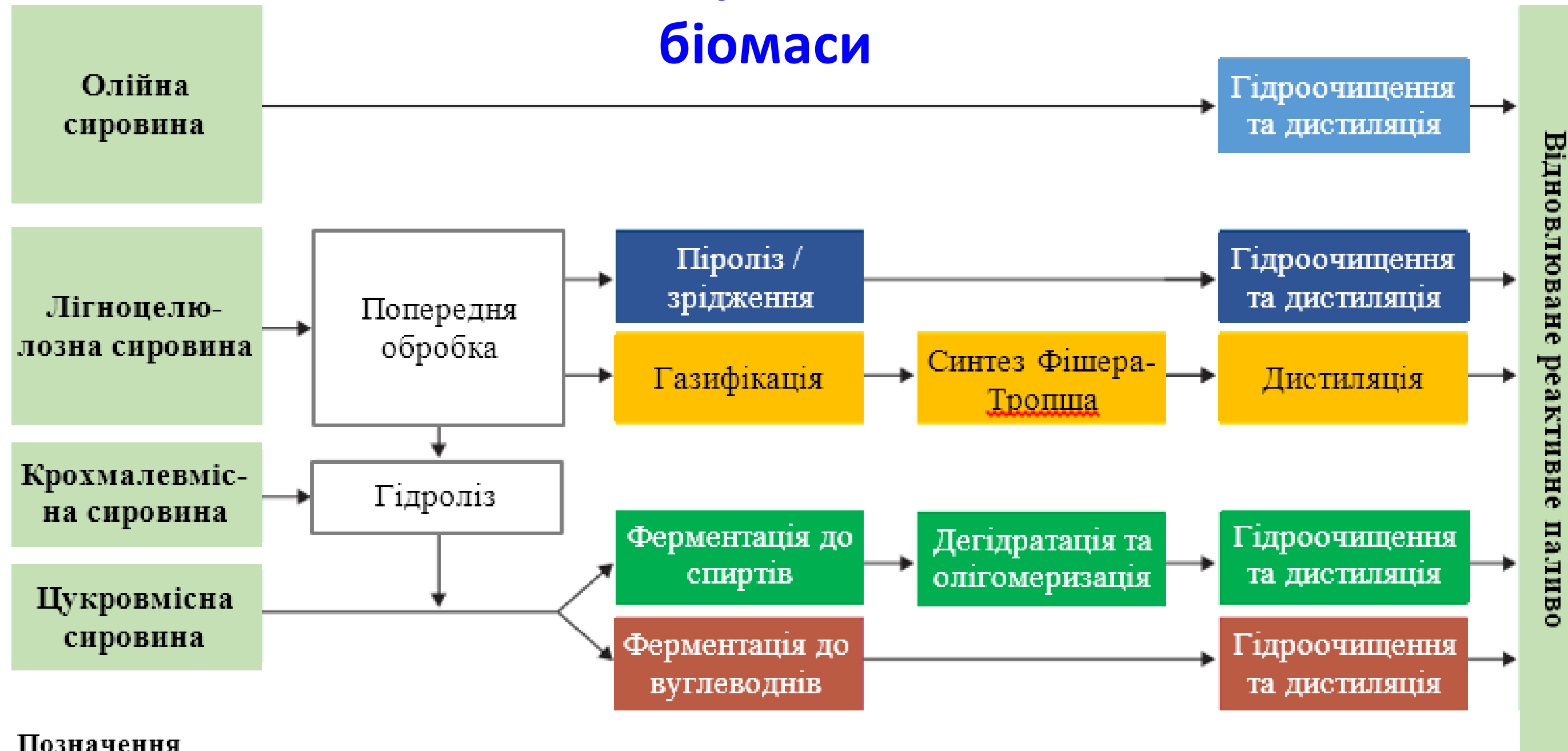
Виробництво САП (факт), млн л



Споживання САП та традиційного реактивного палива (РП) комерційними авіалініями (прогноз), млрд л



Технології виробництва САП з біомаси



Позначення

1) Гідроочищені етери та жирні кислоти (HEFA)

2) Фішер-Тропш (FT)

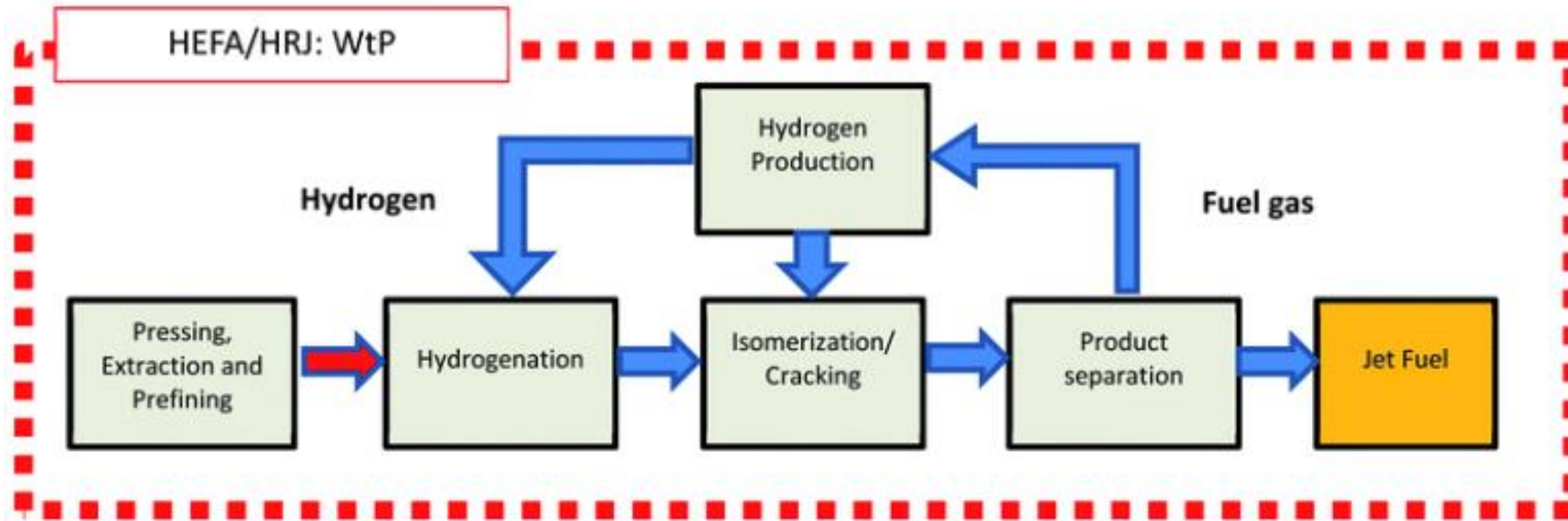
3) Пряме перетворення цукрів у вуглеводні (DSHC) (сучасна назва – синтез парафінів з гідрооброблених ферментованих цукрів)

2) Гідроочищене деполімерізоване целюзне РП (HDCJ)

3) Спирти у реактивне паливо (ATJ)

Конверсія: 1) Олеохімічна, 2) Термохімічна, 3) Біохімічна

Основні технологічні кроки різних технологій виробництва САП



Олеохімічна конверсія

← Гідроочищення етерів та жирних кислот

- Гідрогенізація (видалення кисню в присутності водню) та ізомерізація молекул сировини для отримання довголанцюгових вуглеводнів в межах бажаної довжини.
- Супутні кінцеві продукти: дизель, лігроїн, газ.

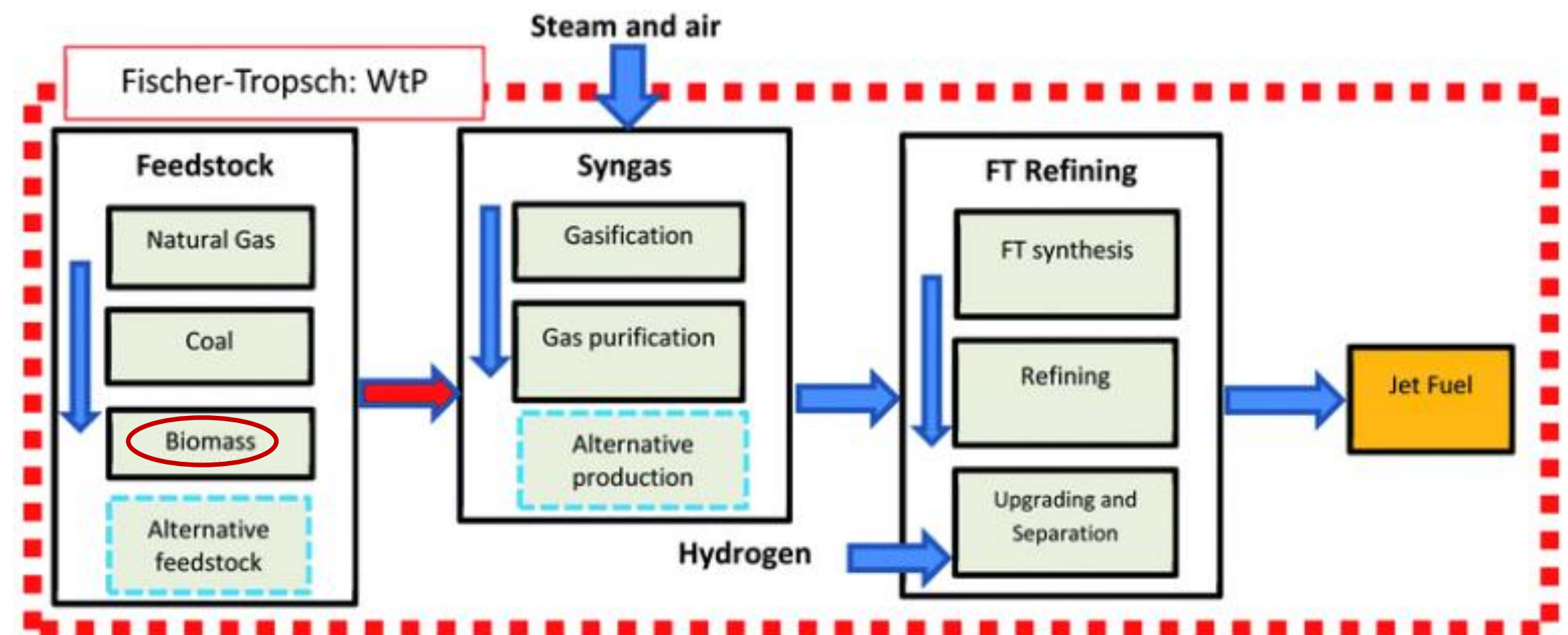
Термохімічна конверсія

Газифікація із синтезом Фішера-Тропша →

- Газифікація сировини, очищення газу (ключовий елемент), конверсія синтез-газу в реакторі Фішера-Тропша (синтез Ф-Т).
- Супутні продукти: дизель, газолін (бензин), газ.

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/se/c9se00788a>

<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf>



Основні технологічні кроки різних технологій виробництва САП (2)

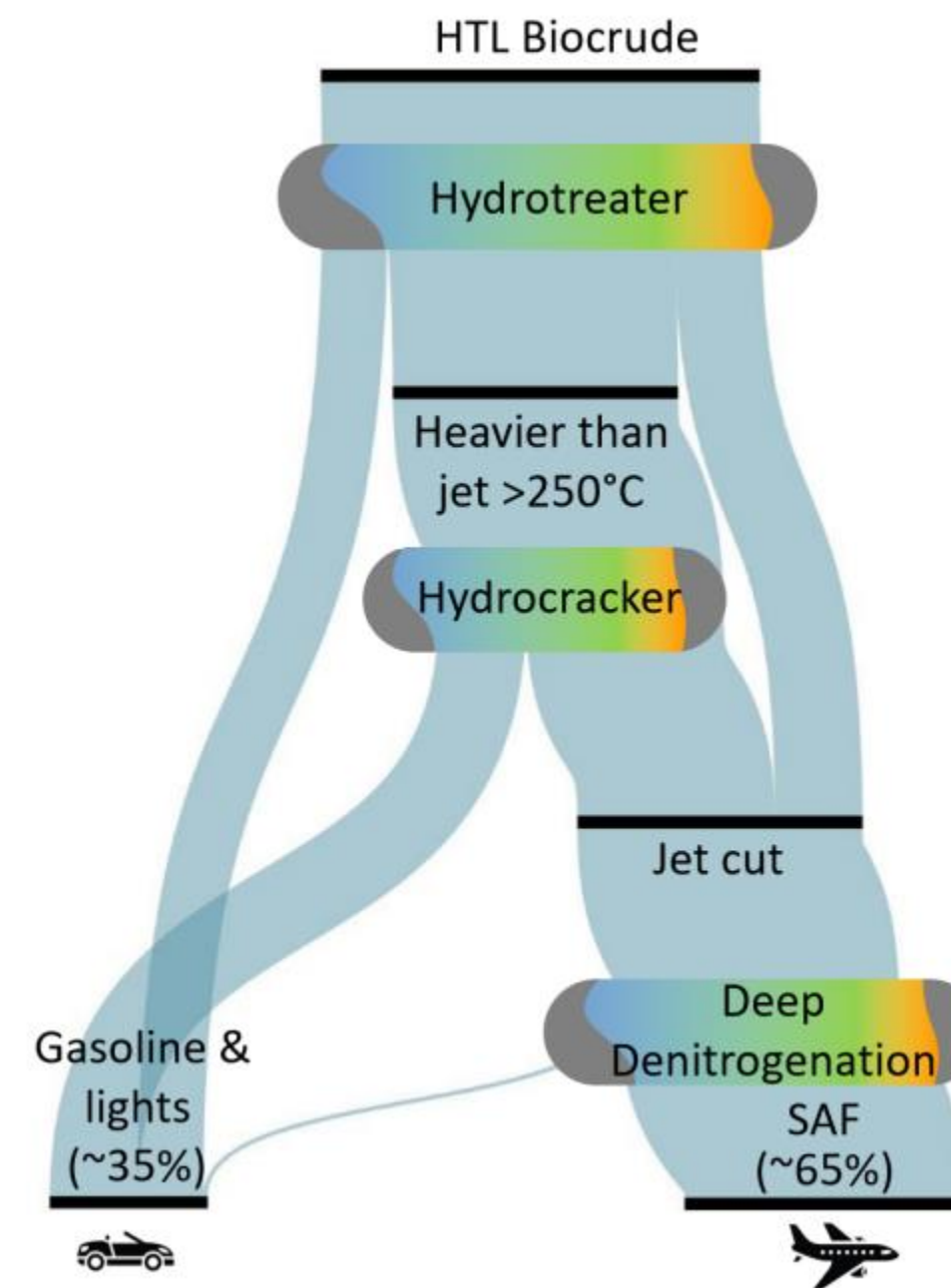
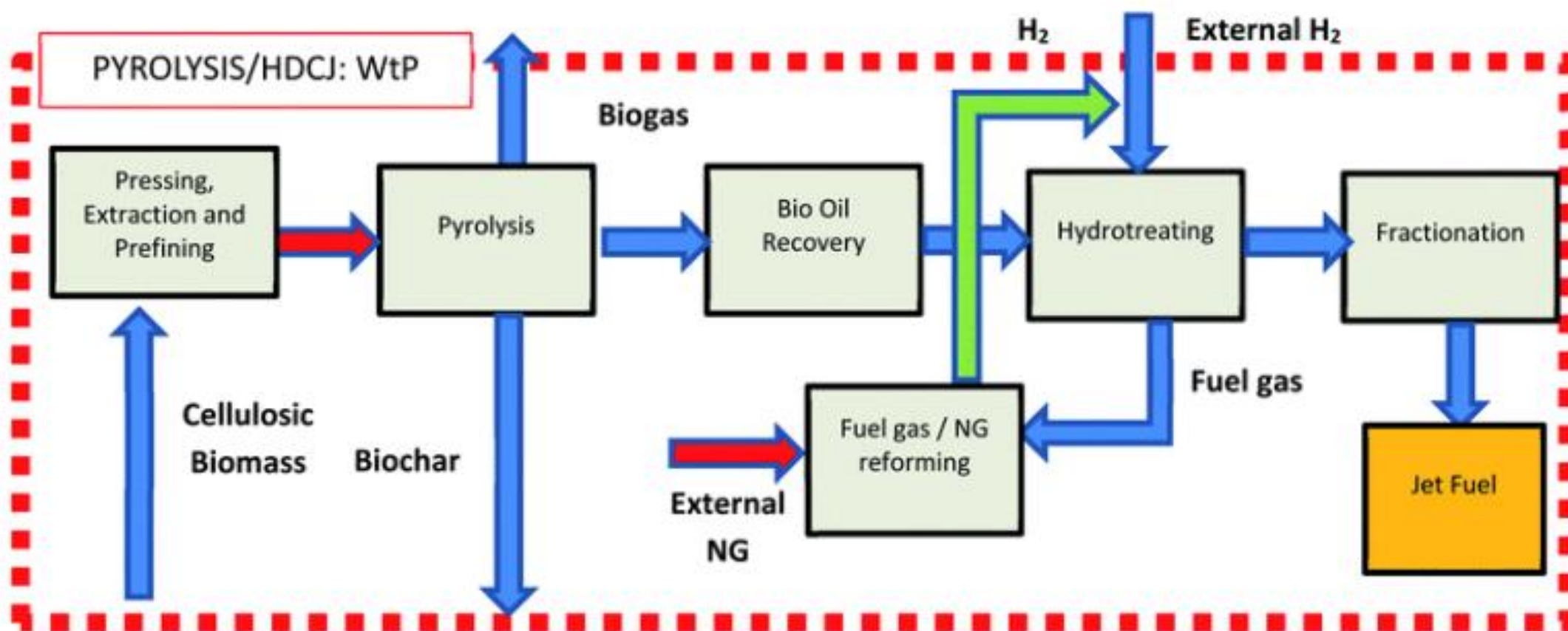
Термохімічна конверсія

Піроліз біомаси (отримання гідроочищеного деполімеризованого целюлозного реактивного палива)

- Швидкий піроліз біомаси.
- Гідрогенізація піролізної рідини (біонафти).
- Фракціонування (поділ на фракції)
- Супутні кінцеві продукти: газолін (бензин), легкі фракції.

Гідротермічне зрідження

- Термічна деполімерізація вологої біомаси (мікроводорості, гній та ін.) за помірної t° та високого тиску (зрідження шляхом розчину) з отриманням необробленої рідини («біонафти-сирця»).
- Підвищення якості (гідроочищення) для отримання реактивного палива.
- Супутні кінцеві продукти: газолін (бензин), легкі фракції.



<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/se/c9se00788a>

<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf>

<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/4/1306/pdf>

Основні технологічні кроки різних технологій виробництва САП (3)

Біохімічна конверсія

← Пряма конверсія цукрів у вуглеводні

- Ферментативний гідроліз біомаси з метою створення цукрів C5 і C6.
- Подача очищеного гідролізату в реактори риформінгу, де в присутності водню вуглеводи перетворюються на багатоатомні спирти шляхом **гідрогенізації**.
- Конверсія в реакторі APR – **риформінг (обробка) водної фази** (реакція з водою в присутності каталізатора).

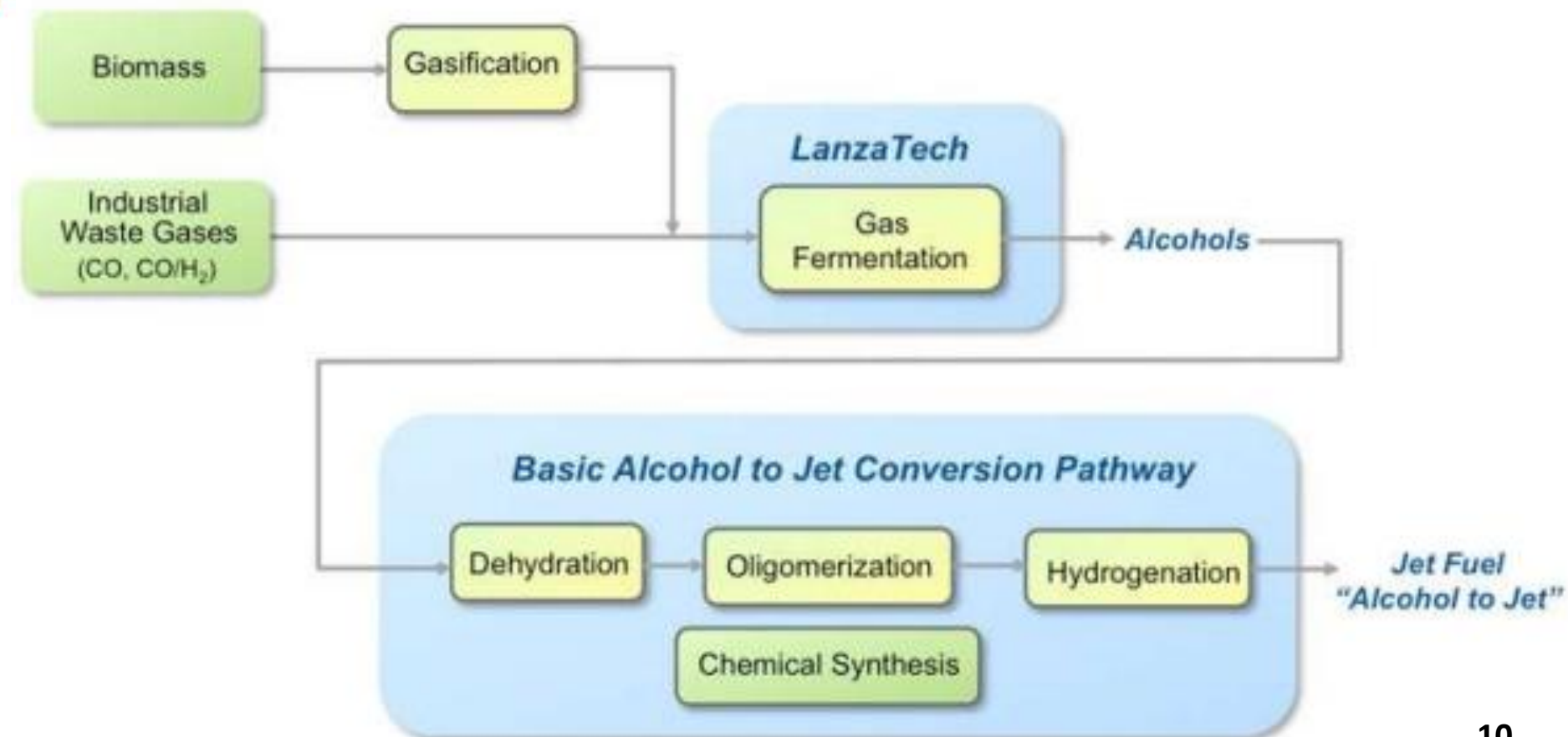
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/se/c9se00788a>

Біохімічна конверсія

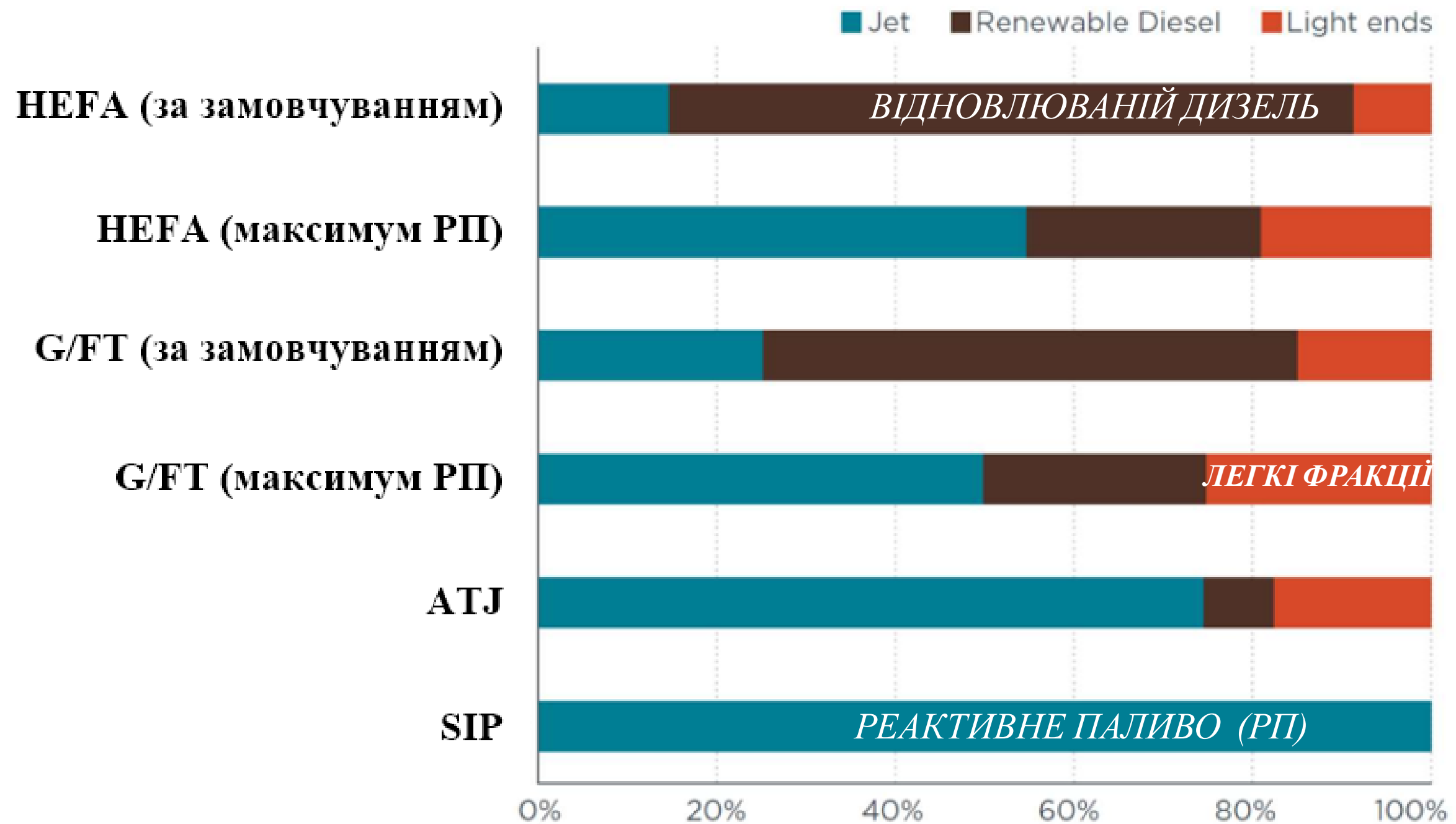
Конверсія спиртів у реактивне паливо →

- Два **основні кроки** технології: отримання спиртів та їхня конверсія.
- Спирт (етанол) може бути вироблений шляхом ферментації **біомаси** (BE I чи II покоління). Альтернатива (зображено на рисунку) – ферментація **генераторного газу** (від газифікації біомаси) або **відпрацьованих газів** промислових процесів.
- **Конверсія спирту**: дегідратація (зневоднювання), олігомеризація, гідрогенізація.

<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf>

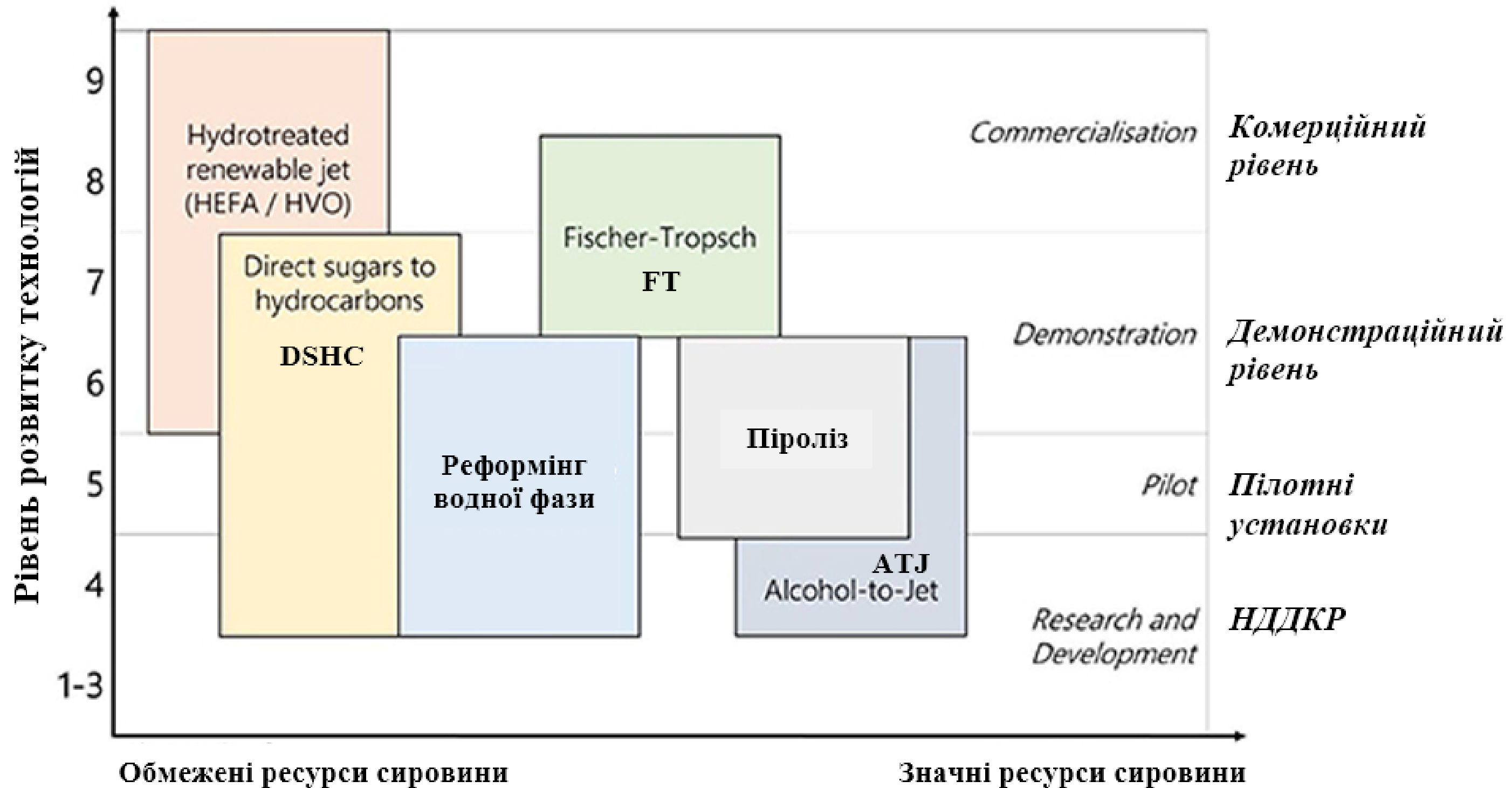


Вихід САП та супутніх продуктів для різних технологій конверсії



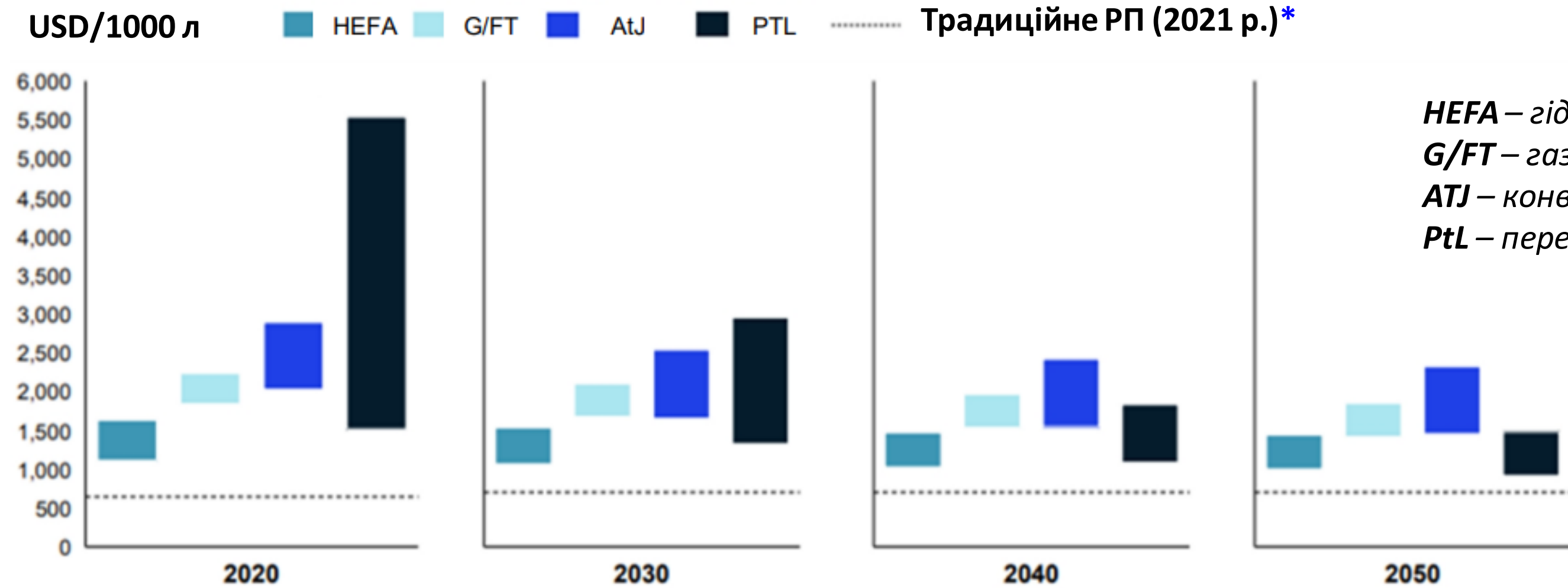
HEFA – гідроочищення етерів та жирних кислот; *G/FT* – газифікація + синтез Фішера-Тропша; *ATJ* – конверсія спиртів; *SIP* – синтетичні ізопарафіни, отримані з гідроочищених ферментованих цукрів

Рівень та потенціал розвитку різних технологій виробництва САП залежно від ступеня відпрацьованості технології та наявності сировини



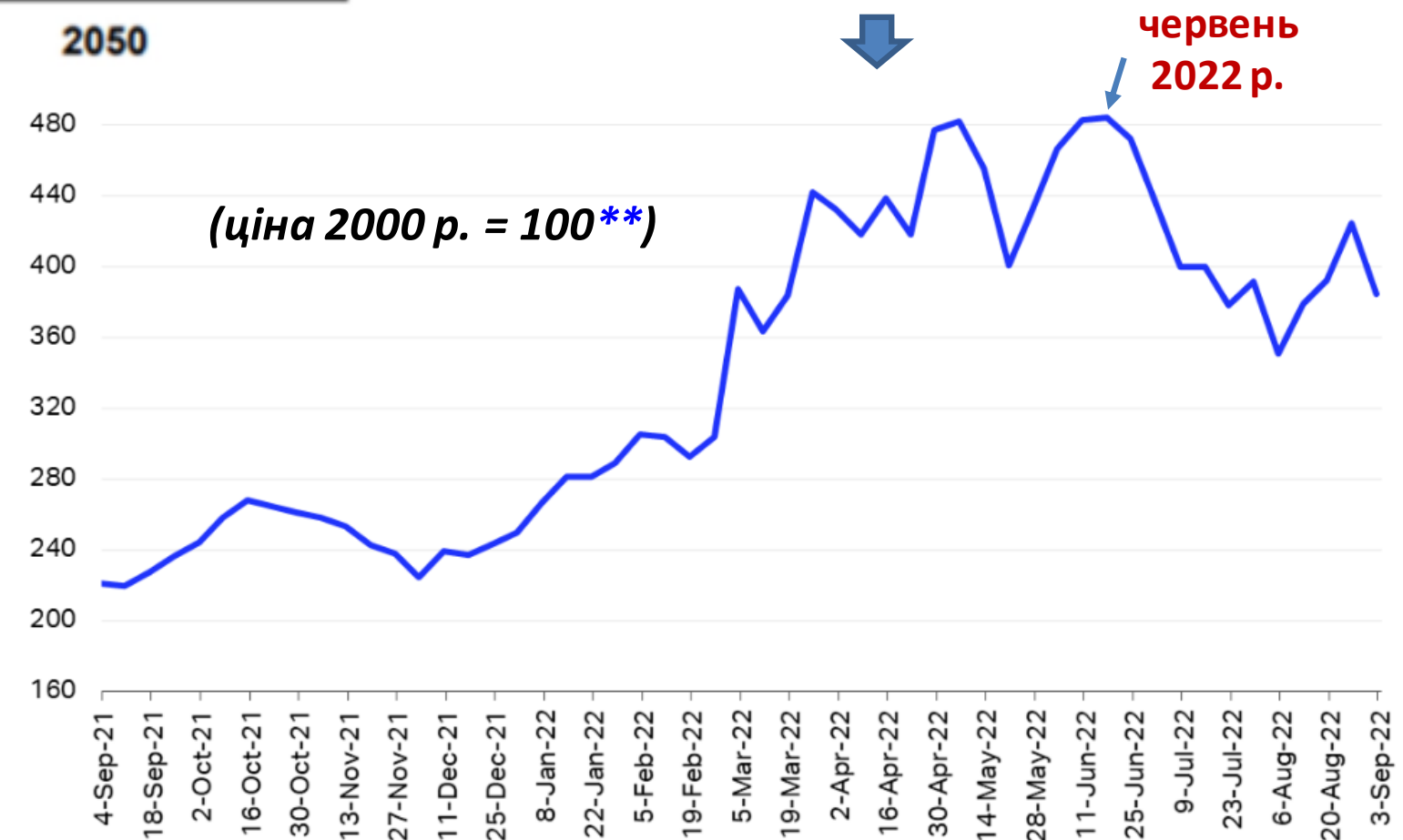
HEFA – гідроочищення етерів та жирних кислот; **DSHC** – пряма конверсія цукрів у вуглеводні; **FT** – синтез Фішера-Тропша; **ATJ** – конверсія спиртів у реактивне паливо

Порівняння вартості традиційного реактивного палива та САП



*HEFA – гідроочищення етерів та жирних кислот;
G/FT – газифікація із синтезом Фішера-Тропша;
AtJ – конверсія спиртів у реактивне паливо;
PtL – перетворення електроенергії у рідину*

Індекс цін на РП за останній рік



*** Ціна коливається в залежності від вартості нафти**
Наприклад, середня ціна на РП Jet A1:
червень 2022 р. – 1120 USD/1000 л, вересень 2022 р. – 870 USD/1000 л
**** До 2000 р. ціна РП була відносно стабільною (200 USD/1000 л).**
Пізніше спостерігається значний ріст і коливання.

Затверджені стандартом ASTM D7566 технології виробництва САП і такі, що розглядаються

Вид сталого авіаційного палива	Мах частка (об.) у суміші з РП	Типова сировина	Рік затвердження
Синтетичний парафіновий керосин (СПК) , отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша (FT-SPK)	50%	Лігноцелюлозні рослини, відходи та залишки	2009 р.
СПК, отриманий з гідроочищених етерів та жирних кислот (HEFA-SPK)	50%	Рослинна олія, жирові та олійні відходи	2011 р.
Синтетичні ізопарафіни, отримані з гідроочищених ферментованих цукрів (HFS-SIP)	10%	Цукровмісні рослини	2014 р.
Синтетичний парафіновий керосин з ароматичними складовими, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша (FT-SPK/A)	50%	Лігноцелюлозні рослини, відходи та залишки	2015 р.
СПК, отриманий за технологією конверсії спиртів (ізобутанол та етанол) (ATJ-SPK)	50%	Цукро-/крохмаловмісні рослини; лігноцелюлозні рослини, відходи та залишки	2016 р.
Паливо, отримане шляхом сумісної гідро-обробки етерів та жирних кислот при традиційній переробці нафти (при обсязі етерів та жирних кислот <5% об'ємних).	---	Рослинна олія, жирові та олійні відходи	2018 р.
Синтетичний керосин, отриманий каталітичним гідротермолізом (CH-SK, або CHJ)	50%	Рослинна олія, жирові та олійні відходи	2020 р.
Синтетичний парафіновий керосин, отриманий з гідроочищених етерів та жирних кислот з попередньою обробкою вуглеводневої сировини (HC-HEFA-SPK)	10%	Мікроводорості	2020 р.
Паливо, отримане шляхом сумісної гідро-обробки вуглеводнів Фішера-Тропша при традиційній переробці нафти (при обсязі вуглеводнів Фішера-Тропша <5% об.).	---	Лігноцелюлозні рослини, відходи та залишки	2020 р.
Синтетичний керосин, отриманий з гідроочищених етерів та жирних кислот за високої температури кристалізації (HFP HEFA-SPK, або HEFA+)	10%	Рослинна олія, жирові та олійні відходи	<i>В процесі розгляду</i>
Гідро-деоксигенований синтетичний ароматичний керосин (HDO-SAK)	10%	Цукро-/крохмаловмісні рослини; лігноцелюлозні рослини, відходи, та залишки	<i>В процесі розгляду</i>
Синтетичний керосин з ароматичними складовими, отриманий за технологією конверсії спиртів (ATJ-SKA)	немає даних	Цукро-/крохмаловмісні рослини; лігноцелюлозні рослини, відходи та залишки	<i>В процесі розгляду</i>

Скорочення викидів парникових газів протягом життєвого циклу САП, отриманих за різними технологіями, порівняно з традиційним реактивним паливом

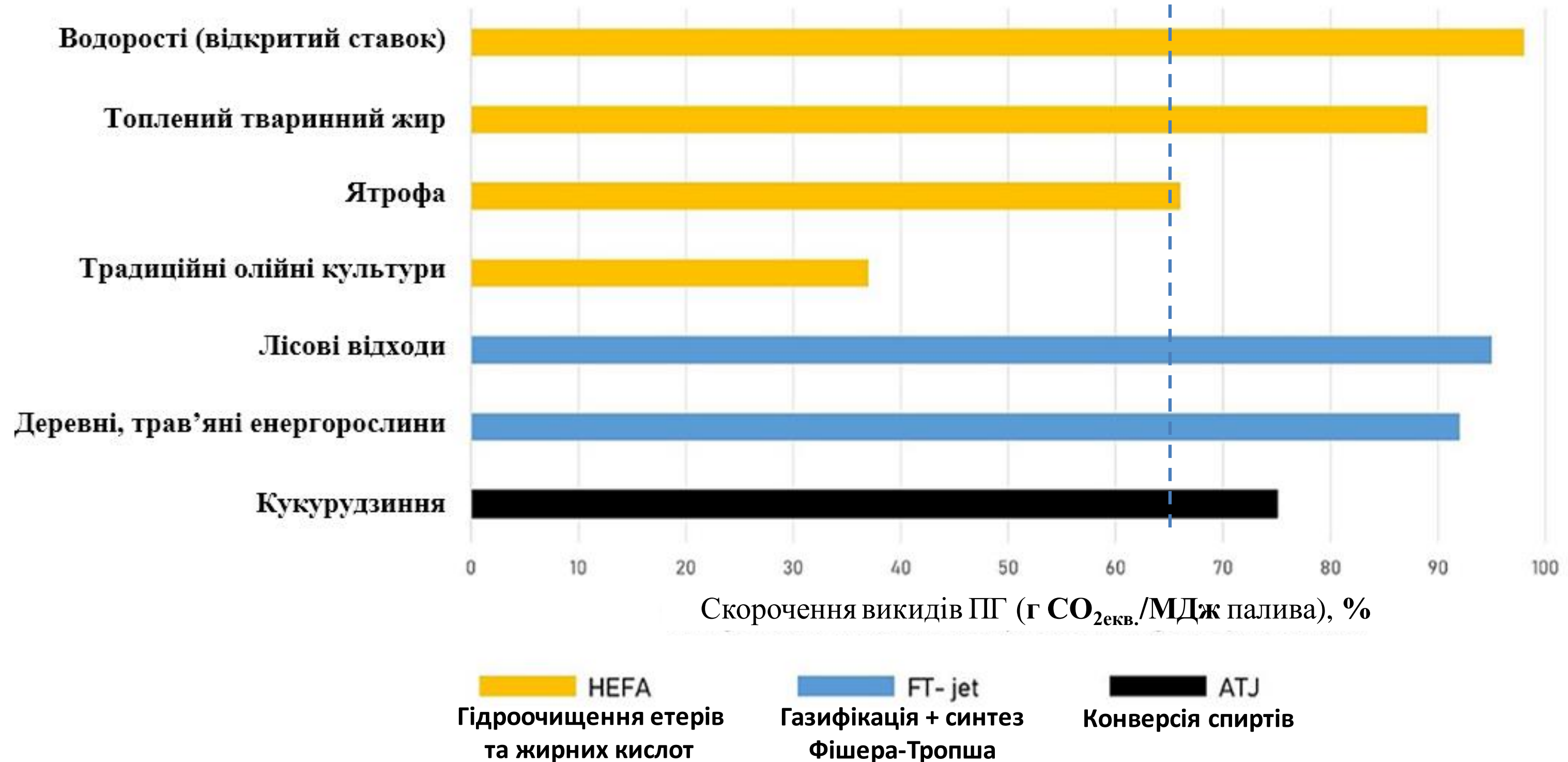
Технологія виробництва САП	Скорочення викидів парникових газів порівняно з традиційним РП	
	Sierk de Jong et al. (2017) https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s13068-017-0739-7.pdf	Doliente S.S. et al. (2020) https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00110
Газифікація із синтезом Фішера-Тропша	86...104% Найбільші значення: лісові залишки Найменші значення: кукурудзиння	92...95% Найбільші значення: лісові залишки Найменші значення: деревні/трав'яні енергорослини
Гідротермічне зрідження (HTL)	77...80% (лісові залишки) Найбільші значення: in situ*. Найменші значення: ex situ**	--- (інші автори: 69% , in situ*)
Конверсія спиртів (ATJ)	71...75% (цукрова тростина); 60...75% (кукурудзиння)	75% (стебла кукурудзи)
Гідроочищення етерів та жирних кислот (HEFA)	~50...60% (рижій) ~70% (використана харчова олія)	~37...98% Найбільші значення: водорості з відкритого ставка (98%) і топлений тваринний жир (89%) Найменші значення: традиційні олійні культури
Піроліз	~50...75% (лісові залишки) Найбільші значення: in situ*. Найменші значення: ex situ**	--- (інші автори: 61% , in situ*)
Пряма конверсія цукрів у вуглеводні (DSHC)	~50% (цукрова тростина, 10% САП у суміші)	---

* *In situ* – виробництво необхідного водню «на місці» шляхом парового метанового реформінгу (ПМР) газів, що утворюються в процесі конверсії. Для технології HTL водень додатково може отримуватися шляхом ПМР біогазу, виробленого з технологічних стічних вод.

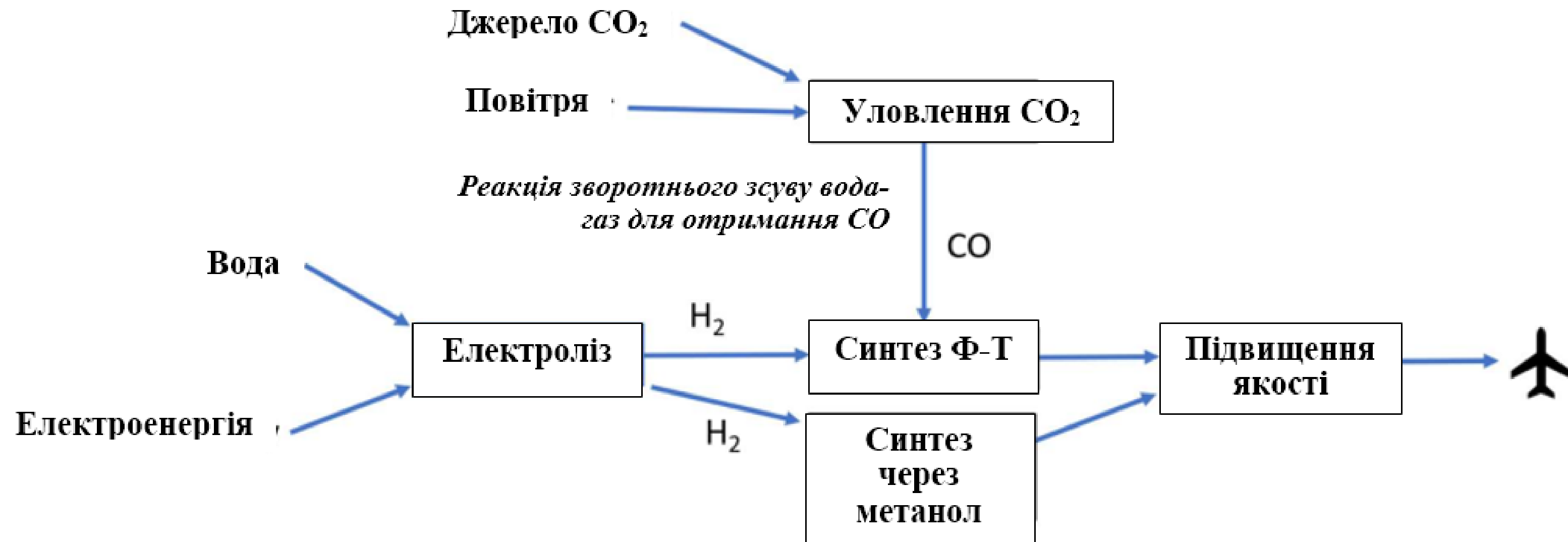
** *Ex situ* – виробництво необхідного водню шляхом ПМР природного газу (для порівняння).

Скорочення викидів парникових газів протягом життєвого циклу САП, отриманих за різними технологіями, порівняно з традиційним реактивним паливом (2)

65% - вимога Директиви RED II щодо скорочення викидів CO₂ для установок, уведених в дію з 01.01.2021



Отримання САП за технологією перетворення електроенергії у рідину (PtL)



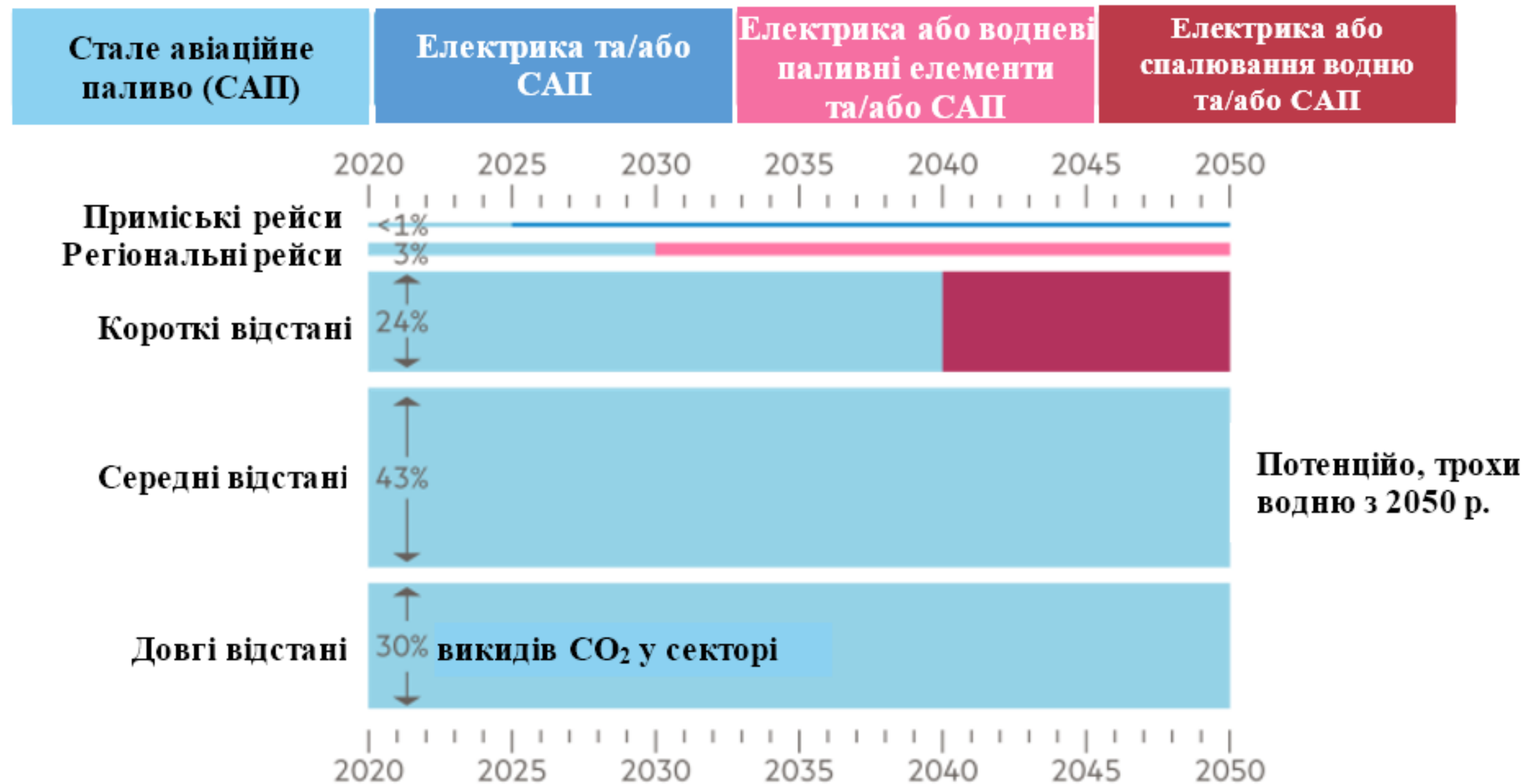
- ✓ Доступ до необхідної кількості «зеленої» електроенергії вважається одним з ключових питань сталості технології PtL (Power to Liquid).
- ✓ Отримання вуглеводнів відбувається шляхом **синтезу Фішера-Тропша** (сертифіковано стандартом ASTM D7566) або синтезу з проміжним продуктом – метанолом (ще не сертифіковано).
- ✓ Концентрованими **джерелами CO₂** можуть бути відпрацьовані гази виробничих процесів (виробничого походження), геотермальні ресурси, біогаз, а також CO₂ як побічний продукт виробництва етанолу. Альтернатива – уловлення CO₂ безпосередньо з повітря.

Порівняний аналіз використання САП, електроенергії та водню в авіації

Вид рейсів / кількість пасажирів	САП: біопалива, PtL	Електричні акумулятори	Водень
Приміські / < 19	Без обмежень	Макс. відстань – до 500-1000 км через низьку щільність акумуляторів	Без обмежень
Регіональні / 20-80		Не застосовуються	При розробці принципово нової конструкції літака можливе ефективне використання на відстані > 10 тис. км
Короткі відстані/ 81-165			
Середні відстані/ 166-250			
Великі відстані / > 250			
Основні переваги	Палива для змішування; не потребують змін паливної системи літака та інфраструктури аеропорту	Відсутність негативного впливу на клімат протягом польоту	Значне скорочення сукупного* негативного впливу на клімат протягом польоту
Основні недоліки	Обмежене скорочення викидів інших, ніж CO ₂ (NO _x , водяна пара).	Необхідність зміни інфраструктури аеропорту через впровадження системи швидкої підзарядки або заміни акумулятора	Необхідність зміни паливної системи літака та інфраструктури аеропорту

* Викиди CO₂, NO_x, водяної пари, конденсаційний слід

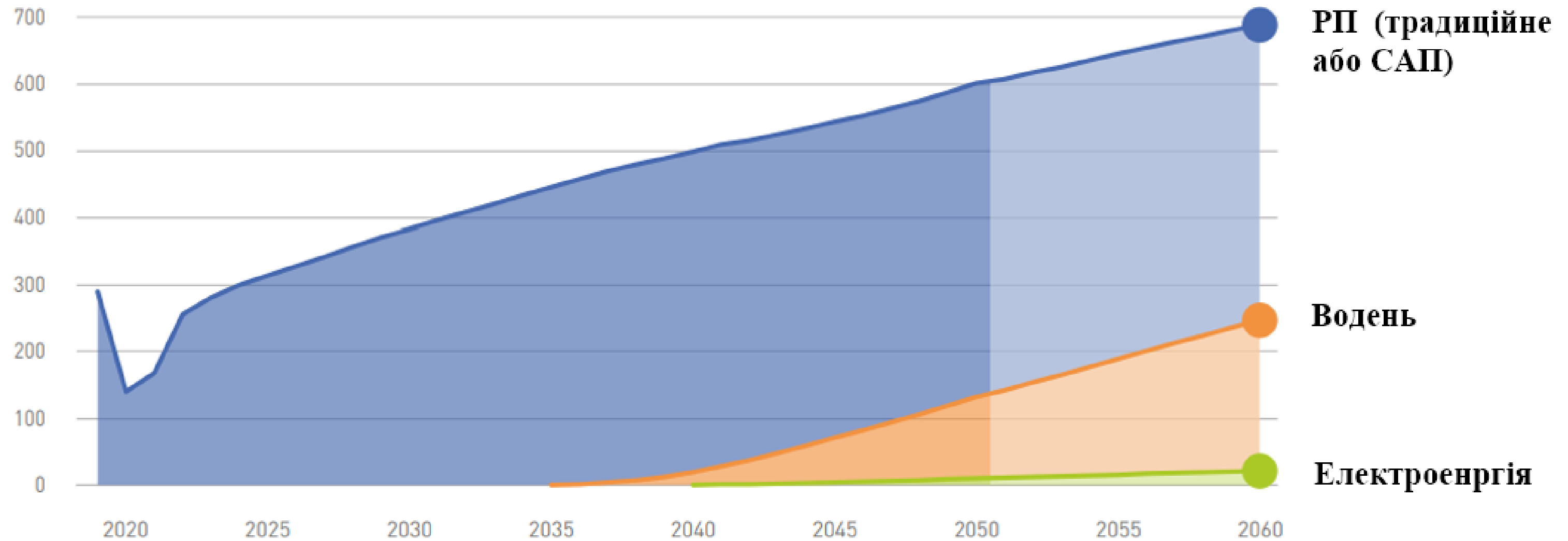
Прогноз використання САП, водню і електроенергії в авіації



Використання *САП* (зокрема, *біопалив*) як заміника традиційного реактивного палива вважається експертами в середньостроковій перспективі найбільш реальним з технічної та економічної точок зору заходом для скорочення емісії парникових газів в секторі авіації

Прогноз структури загального споживання енергії світовою авіацією

МЛН Т Н.е.



Частка H_2 в загальному обсязі споживання енергії в авіації: **20%** (2050) **33%** (2060)

https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf

Порівняльний аналіз та рейтинг САП, електроенергії та водню для використання в авіації (резюме)

Паливо	Критерії оцінки палив (технологій)							Рейтинг (max 10)
	Досягнення комерційного рівня / досвід в Україні	Сертифікація	% змішування з нафтовим РП / Вихід РП порівняно з супутніми продуктами	Конкурентоздатність за вартістю	Достатньо високе скорочення емісії ПГ	Наявність / доступність сталої сировинної та ресурсної бази	Відсутність змін у паливній системі літака та інфраструктурі аеропорту	
Синтетичний парафіновий керосин (СПК): гідроочищення етерів та жирних кислот (HEFA-SPK)	+ / +	+	+ / ±	+	±	±	+	<u>9</u>
СПК: конверсія спиртів (ATJ-SPK)	- / -	+	+ / +	+	+	+	+	<u>8</u>
СПК: газифікація БМ + синтез Ф-Т (FT-SPK)	± / -	+	+ / ±	+	+	+	+	<u>7</u>
СПК з аромо-складовими: газифікація БМ + синтез Фішера-Тропша (FT-SPK/A)	- / -	+	+ / ±	-	+	+	+	<u>7</u>
Синтетичний керосин: каталітичний гідротермоліз (CH-SK, або CHJ)	- / -	+	+ / -	-	-	-	+	<u>6</u>
СПК: гідроочищення етерів та жирних кислот з попередньою обробкою вуглеводневої сировини (HC-HEFA-SPK)	- / -	+	- / -	-	-	+	+	<u>6</u>
Паливо: сумісна гідрообробка етерів та жирних кислот при традиційній переробці нафти	- / -	+	-	-	-	±	+	<u>5</u>
Паливо: сумісна гідрообробка вуглеводнів Ф-Т при традиційній переробці нафти	- / -	+	-	-	-	+	+	<u>5</u>
Гідроочищене деполімерізоване целюлозне реактивне паливо (піроліз/зрідження) (HDCJ)	- / ±	-	-	+	+	+	+	<u>4</u>
Синтетичне паливо: ел. енергія у рідину (PtL)	- / -	±	-	-	+	±	+	<u>4</u>
Водень	- / -	-	-	-	+	±	-	<u>4</u>
Синтетичні ізопарафіни з гідроочищених ферментованих цукрів (HFS-SIP)	- / -	+	- / +	-	-	+	-	<u>3</u>
Електроенергія	- / -	-	-	±	+	±	-	<u>2</u>

Висновки

- ❑ Використання **альтернативних палив в авіації** є перспективним напрямком загальної декарбонізації та підвищення екологічності транспортного сектору.
- ❑ Використання **САП** (зокрема, **біопалив**) як заміника традиційного реактивного палива вважається експертами в середньостроковій перспективі найбільш реальним з технічної та економічної точок зору заходом для скорочення емісії парникових газів в секторі авіації
- ❑ За результатами порівняльного аналізу та оцінки, **найбільш перспективними для України вбачаються наступні САП як альтернативні палива для авіації:**
 - Синтетичний парафіновий керосин, отриманий з гідроочищених етерів та жирних кислот (**HEFA-SPK**).
 - Синтетичний парафіновий керосин, отриманий за технологією конверсії спиртів (наразі тільки етанолу) (**ATJ-SPK**).
 - Синтетичний парафіновий керосин, отриманий за технологією газифікації з синтезом Фішера-Тропша (**FT-SPK**).
- ❑ Для виробництва кожного з цих біопалив в Україні є необхідна сировинна база. Для прийняття остаточного рішення щодо запровадження виробництва певного виду САП необхідно виконання повноцінного **ТЕО** та оцінки **скорочення викидів CO₂** протягом життєвого циклу для різних видів сировини для умов України.

Дякую за увагу!

Тетяна Желєзна

zhelyezna@rea.org.ua

<https://rea.org.ua/>

