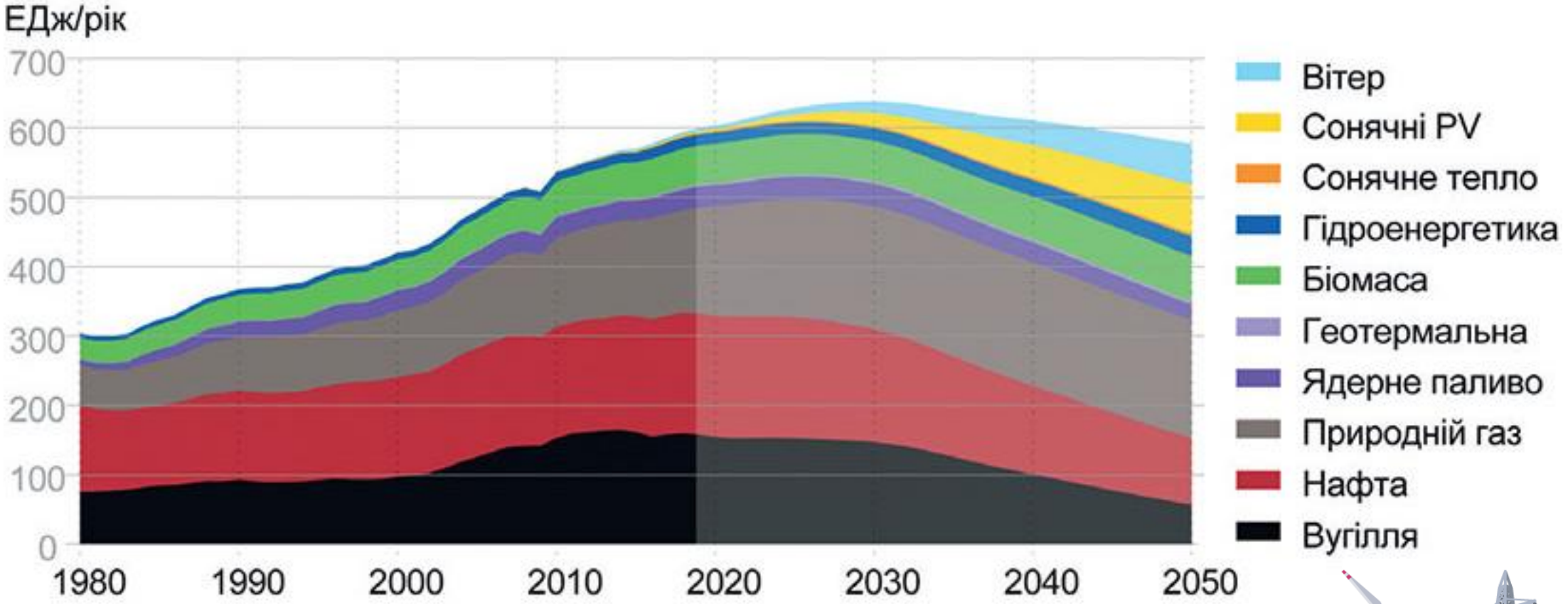
Національний технічний університет
ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА
1899

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ водневої енергетики в Україні та світі

В.І. Бондаренко, д.т.н., професор, завідувач кафедри гірничої інженерії та освіти НТУ «Дніпровська політехніка»



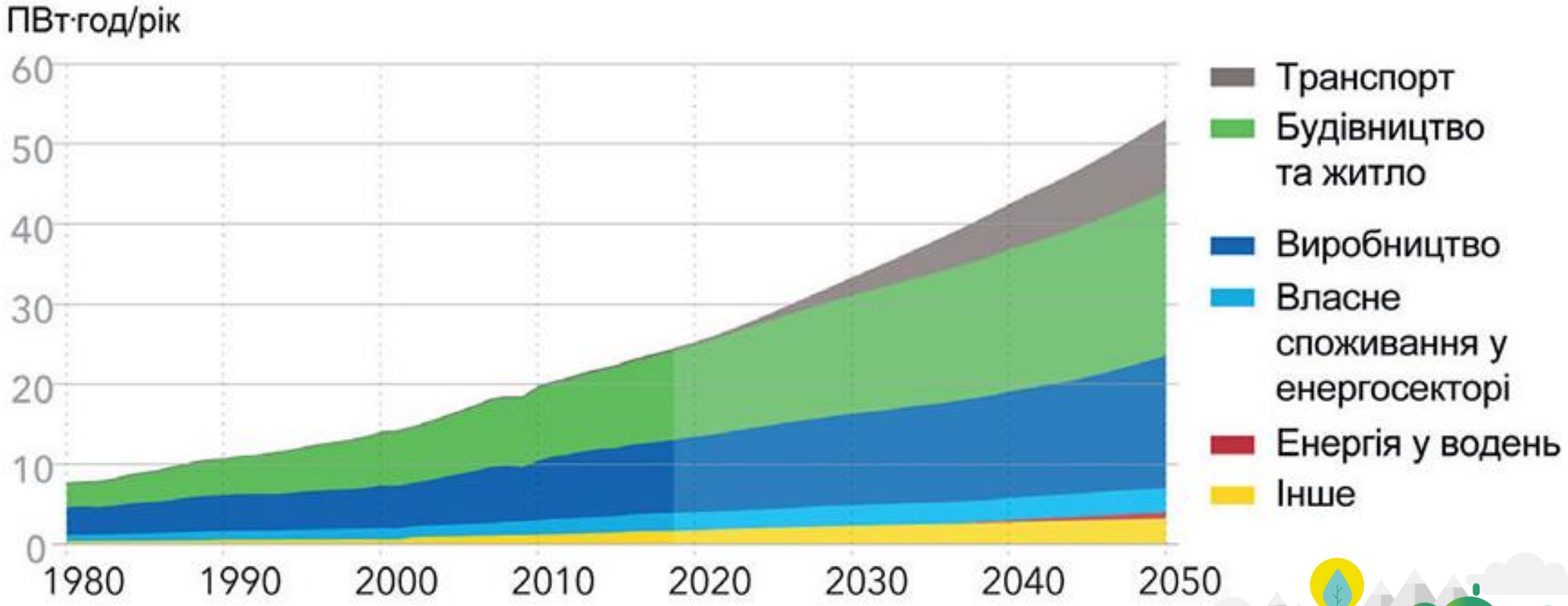
ПРОГНОЗ СВІТОВОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ ДО 2050 РОКУ





Джерело: DNV-GL Energy Transition and Outlook 2019

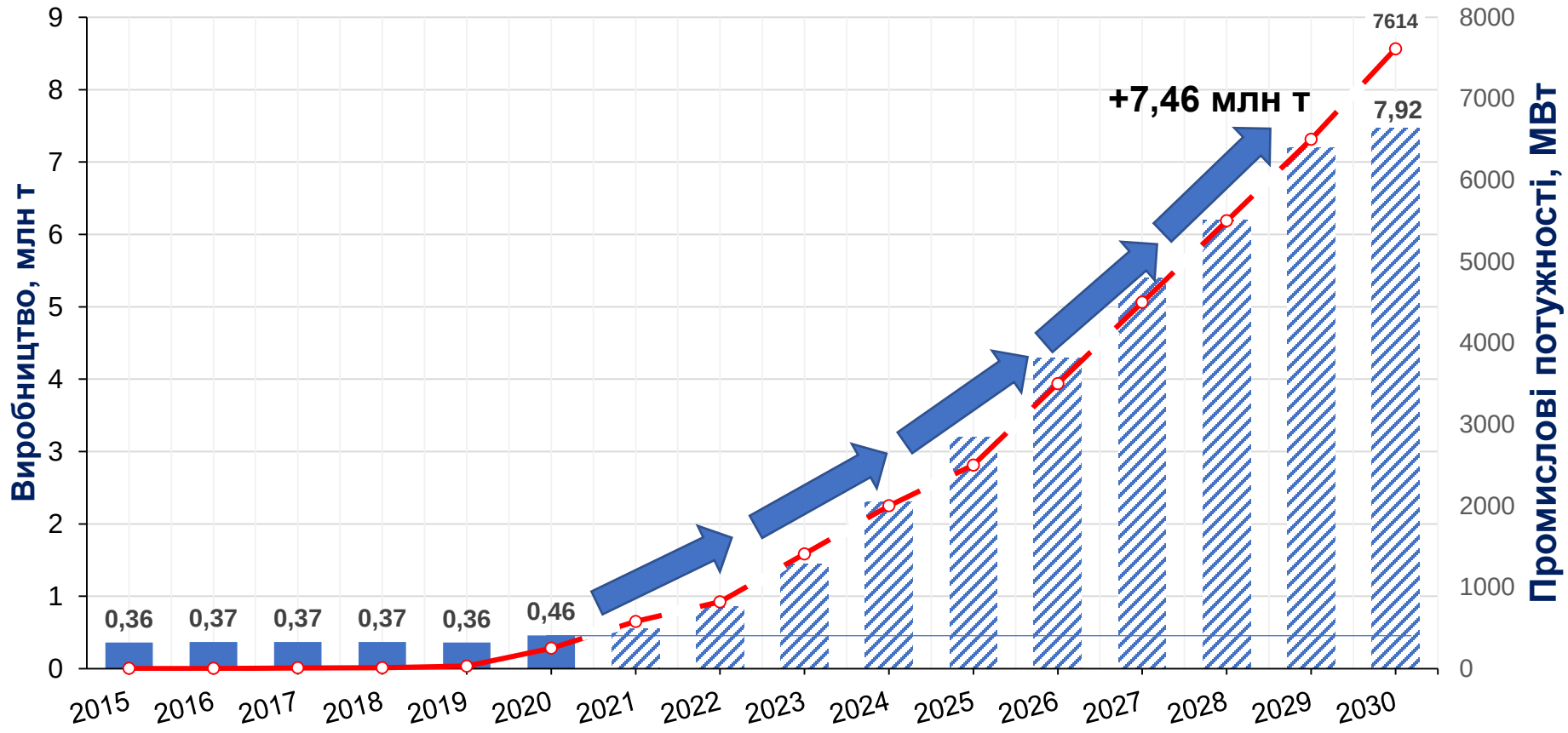
ПРОГНОЗ СВІТОВОГО ПОПИТУ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ ЗА СЕКТОРАМИ ДО 2050 РОКУ





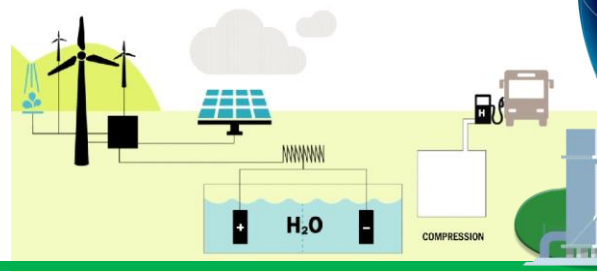
Джерело: DNV-GL Energy Transition and Outlook 2019

ПРОГНОЗ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОГО ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ В СВІТІ ДО 2030 РОКУ



Об'єм низьковуглецевого виробництва водню (ліва вісь)

Приріст потужностей низьковуглецевого виробництва водню за допомогою електролізу (права вісь)

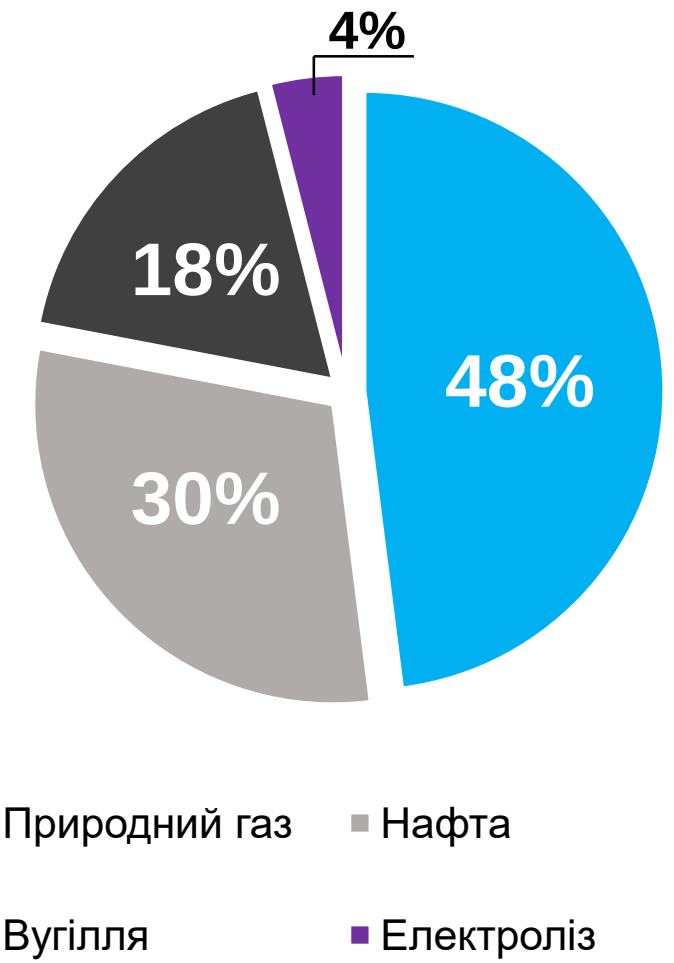




Світовий попит на водень та джерела його виробництва

СЕКТОР ПРОМИСЛОВОСТІ	КЛЮЧОВЕ ВИКОРИСТАННЯ	% ВІД СВІТОВОГО СПОЖИВАННЯ H2
ХІМІЧНА	▪ Амоній ▪ Полімери ▪ Полімери	65%
РИФОРМІНГ	▪ Гідрокрекінг ▪ Гідропереробка	25%
МЕТАЛУРГІЯ	▪ Відпал ▪ Газова подушка ▪ Формувальний газ	
ЗАГАЛЬНА ПРОМИСЛОВІСТЬ	▪ Напівпровідники ▪ Ракетне паливо ▪ Виробництво скла ▪ Гідрування жирів ▪ Охолодження генераторів	10%

ДЖЕРЕЛА ВИРОБНИЦТВА H2



Шляхи виробництва водню

Природний газ
Риформінг

- Виробничі потужності в галузі нафтохімії
- Помірне зниження CO_2



Газифікація біомаси

- Сталий, зменшення залежностей
- CO_2 нейтральний
- Конструкція між різними сферами застосування
- (синтетичне паливо, стаціонарне використання)



Електр. Електроліз

- Багато великих вітряних парків
- Водень – це засіб накопичення надлишку електроенергії
- Хороший баланс CO_2



Ядерний електр. Електроліз

- Хороший баланс CO_2
- Тенденція до розширення потужностей ядерної енергетики
- Дуже несприятливий енергетичний ланцюг



Газифікація вугілля

- Найбільш викопні енергетичні ресурси
- Використовується лише в тому випадку, якщо уловлювання та зберігання CO_2 є технічно та економічно доцільним



Техніко-економічні показники різних процесів виробництва водню

№	Процес	Джерело енергії	Сировина	Капітальна вартість, млн $ США	Вартість водню, $/кг
1	SMR з CCS	Викопне паливо	Природний газ	226,4	2,27
2	SMR без CCS	Викопне паливо	Природний газ	180,7	2,08
3	GS з CCS	Викопне паливо	Вугілля	545,6	1,63
4	GC без CCS	Викопне паливо	Вугілля	435,9	1,34
5	ATR метану з CCS	Викопне паливо	Природний газ	183,8	1,48
6	Метановий піроліз	Внутрішньо-згенерована пара	Природний газ	-	1,7
7	Піроліз біомаси	Внутрішньо-згенерована пара	Дерев'яна біомаса	54,3	2
8	Газифікація біомаси	Внутрішньо-згенерована пара	Дерев'яна біомаса	149,3	2,05
9	Прямий біофотоліз	Сонячна	Вода+водорості	50 $/m²	2,13
10	Непрямий біофотоліз	Сонячна	Вода+водорості	135 $/m²	1,42
11	Темне бродіння	-	Органічна біомаса	-	2,57
12	Фото-бродіння	Сонячна	Органічна біомаса	-	2,83
13	Сонячний електроліз PV	Сонячна	Вода	420	23,2
14	Вітровий електроліз	Вітер	Вода	500	6
15	Ядерний електроліз	Ядерна	Вода	-	7
16	Ядерний електроліз	Ядерна	Вода	2000	2,6
17	Сонячний термоліз	Сонячна	Вода	16	8,4
18	Фотоелектроліз	Сонячна	Вода	-	10,36

Порівняльна характеристика діючих водневих стратегій країн світу

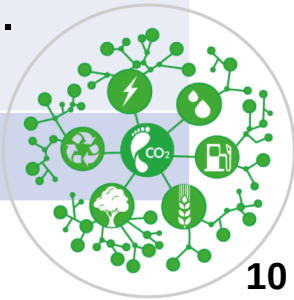
№	Країна	Орієнтири	Фінансування
1	**Японія**	**Базова водородна стратегія 2017 року** • Досягнення «суспільства водню» для підвищення енергобезпеки та декарбонізації • Орієнтація на імпорт водню (з акцентом на «зелений» водень після 2040 року) • Основне застосування в електроенергетиці • Розробка експорту автомобілей на паливних елементах (наприклад, Toyota)	**664 млн дол. США** **на 2020 р.**
2	**Республіка Корея**	**Дорожня карта водневої економіки 2019 року і Національна дорожня карта розвитку водневих технологій 2019 року** • Лідерство у виробництві паливних елементів для автомобілів та для електростанцій • Орієнтація на імпорт водню • Розвиток експорту автомобілів на паливних елементах (наприклад, Hyundai) та паливних елементах для електростанцій	**2,2 млрд дол. США** на промислову екосистему для водневих автомобілів
3	**Австралія**	**Національна воднева стратегія 2019 року** • Розвиток експортного напряму (у т.ч. ініціатива «H2 менше ніж за 2 австр. дол. (1,4 дол. США)/кг» – оцінка виходу на конкурентоспроможність) • Створення ланцюжків енергетичних поставок водню на основі енергії сонця, вітру і води та великомасштабної експортно орієнтованої виробничої інфраструктури з використанням CCS для отримання низьковуглецевого водню із викопних ресурсів (вугілля та природного газу)	**297 млн дол. США** на різних рівнях уряду у 2015-2019 роках з акцентом на R & D, демонстраційні та пілотні проекти
4	**Європа**	**Воднева стратегія для кліматично нейтральної Європи 2020 року** • Досягнення кліматичної нейтральності та відсутності забруднення	**170 млрд дол. США** до 2030 року на гранти і субсидії

Порівняльна характеристика діючих водневих стратегій країн світу

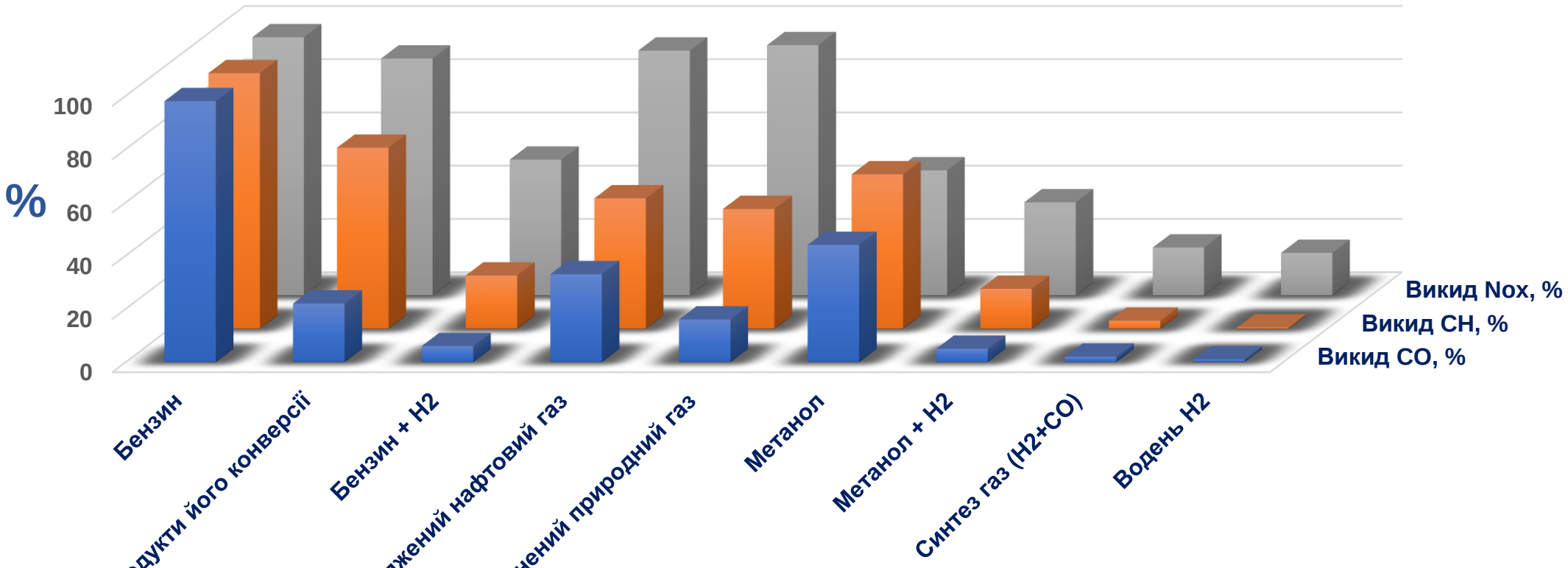
№	Країна	Орієнтири	Фінансування
5	**Франція**	**Національна стратегія розвитку «чистого» водню 2020 року** • Досягнення кліматичної нейтральності • Розширення потужностей електролізу та внутрішнє виробництво «зеленого» водню • Основне використання на транспорті та у промисловості	**8,5 млрд дол. США** до 2030 року - План відновлення
6	**Нідерланди**	**Державна стратегія водню 2020 року** • Досягнення кліматичної нейтральності • Розширення потужностей електролізу та внутрішнє виробництво «зеленого» водню, у т.ч. з використанням CCS • Зміцнення ролі енергетичного хаба	**41 млн дол. США** щорічно з 2021 року для «зеленого» водню
7	**Португалія**	**Національна воднева стратегія 2020 року** • Досягнення кліматичної нейтральності	**8,3 млрд дол. США** до 2030 року
8	**Норвегія**	**Воднева стратегія 2020 року** • Досягнення кліматичної нейтральності • Розширення потужностей електролізу та внутрішнє виробництво «зеленого» водню, у т.ч. з використанням CCS • Основне використання на транспорті та у промисловості	**13 млрд дол. США** план відновлення

Приклади заявлених національних цілей зі скорочення викидів та збільшення абсорбції парникових газів

Країни	Декларовані вклади в пом'якшення зміни клімату
США	до 2025 р. знизити викиди ПГ на **26-28%** від рівня 2005 р.
Канада	2030 – на **30%** від рівня 2005
Німеччина	2030 – на **40-45%** від рівня 1990
Франція	2030 – на **40%** від рівня 1990
Норвегія	2030 – на **40%** від рівня 1990
Бразилія	2025 – на **37%** від рівня 2005
Мексика	2030 – на **22-36%** від рівня 2005
Китай	До 2035 знизити питомі викиди ПГ на 1 дол. ВВП на **65%** з виходом на пік за абсолютною величиною викидів ПГ не пізніше 2030 р.
Австралія	2030 – на **26-28%** від рівня 2005



Порівняльна оцінка впливу альтернативних видів палива на екологічні показники автомобільного двигуна



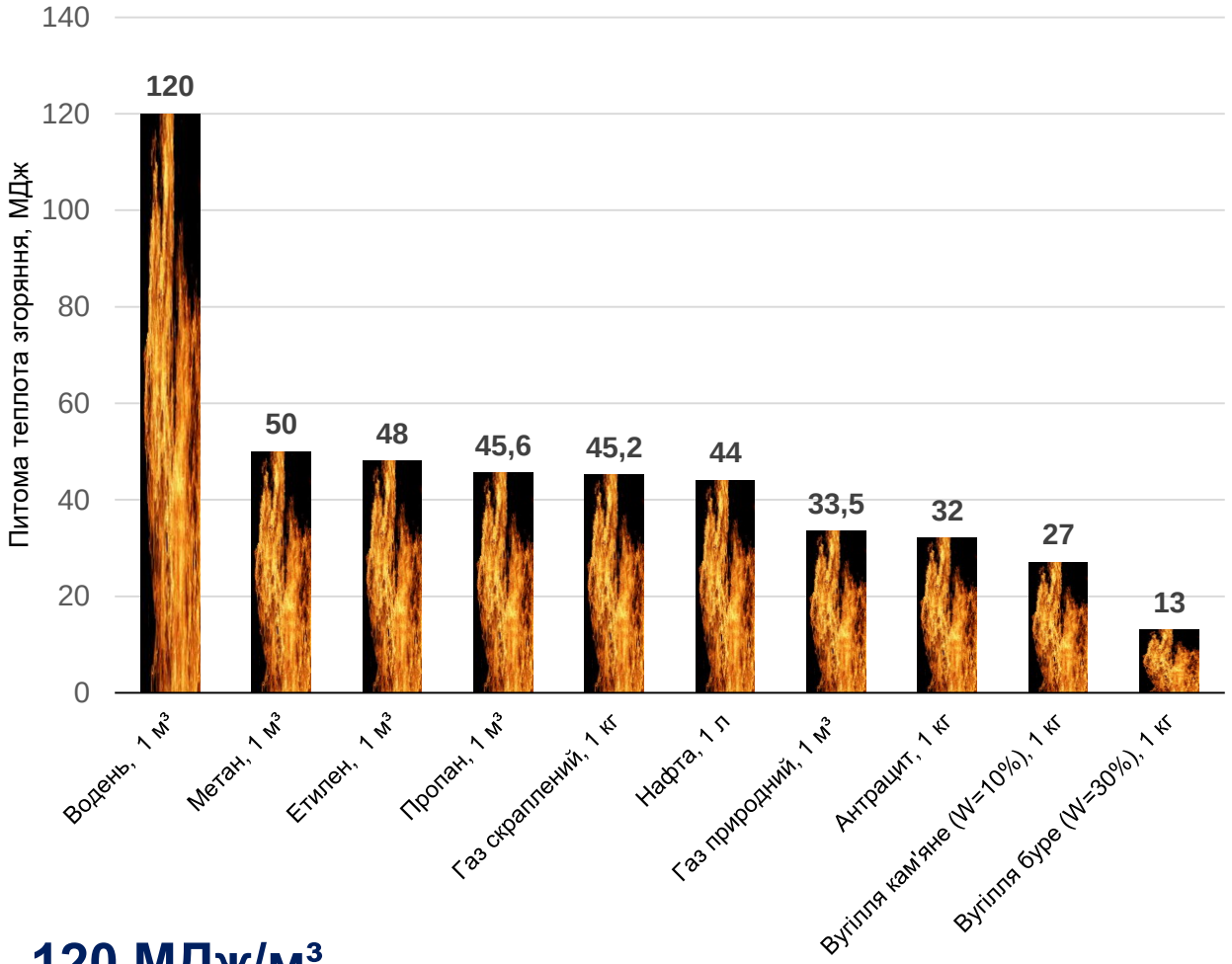




Основні характеристики водню

Характеристика	Одиниця	Значення
Густина	Kg/m3	0,0838
Вища теплота згоряння/ Рідкий водень	MJ/kg	141,90-119,90
Вища теплота згоряння/ Стиснутий водень	MJ/m3	11,89-10,05
Точка кипіння	K	20,4
Точка замерзання	K	13,97
Густина рідкого водню	Kg/m3	70,8
Коефіцієнт дифузії	cm2/c	0,61
Питома теплоємність	KJ/kgK	14,89
Температура запалювання	K	585
Температура полум'я у повітрі	K	2318
Енергія видобутку	kJ/g TNT	58,8
Швидкість горіння	см/с	2,75

Порівняння теплотворності водню з іншими видами палива



Водень має вищу питому теплоту згоряння серед усіх видів палива – **120 МДж/м³**

Перспективи розвитку водневої енергетики України



Україна є частиною великої

глобальної боротьби зі змінами клімату

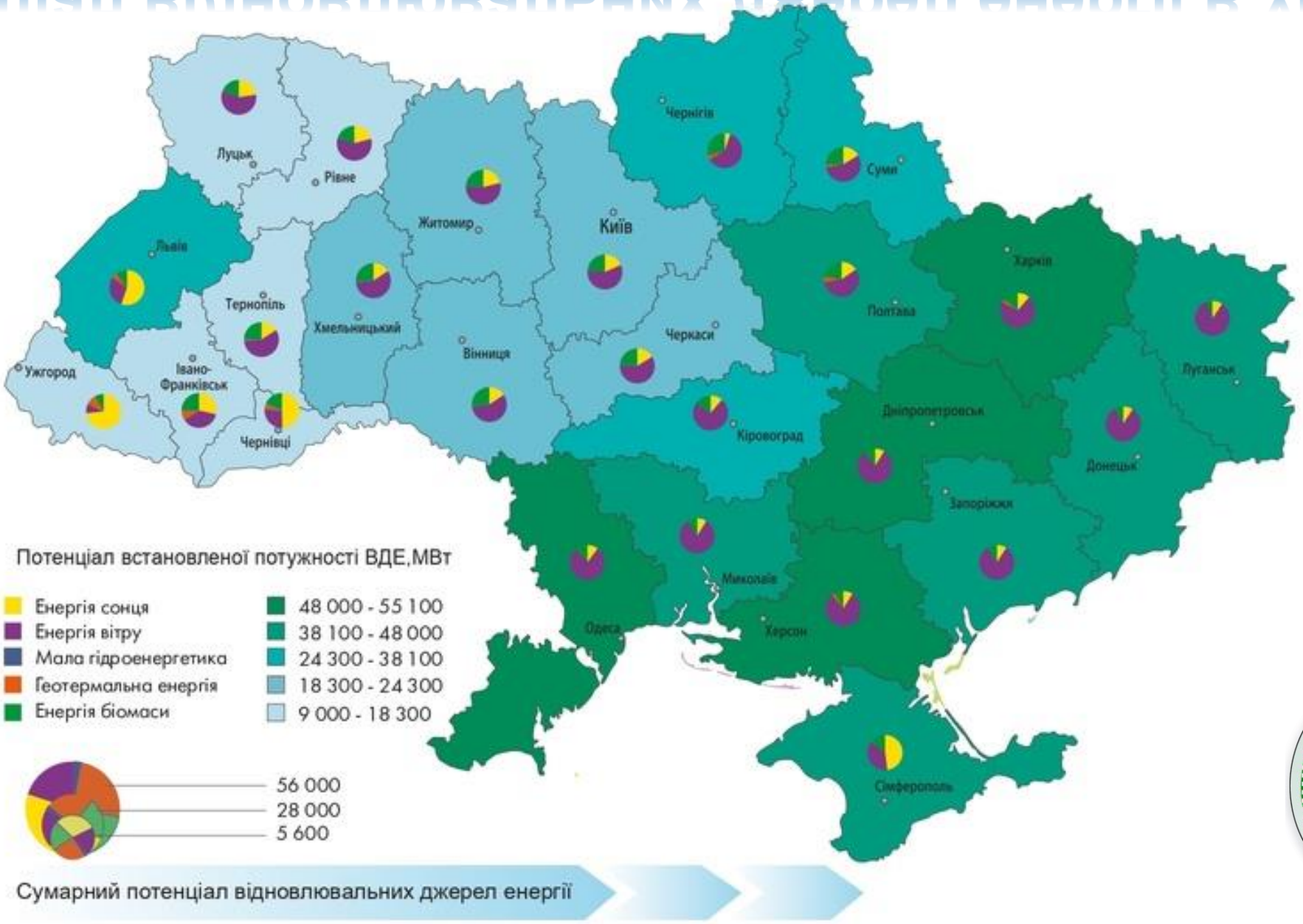


Україна є учасницею **Рамкової конвенції ООН про зміну клімату** (1992 р.), **Кіотского протоколу** (1997 р.) та ратифікувала **Паризьку угоду з клімату** (14 липня 2016 р.), згідно яких зобов'язується:

1. **Зменшити загальний обсяг викидів парникових газів на 20% до 2020 року, на 40% до 2030 року;**
2. **Збільшити частку відновлюваної енергії до 25% у виробництві енергії до 2035 року**
3. **Стати кліматично нейтральною до 2050 року відповідно до довгострокових амбіцій членів ЄС**

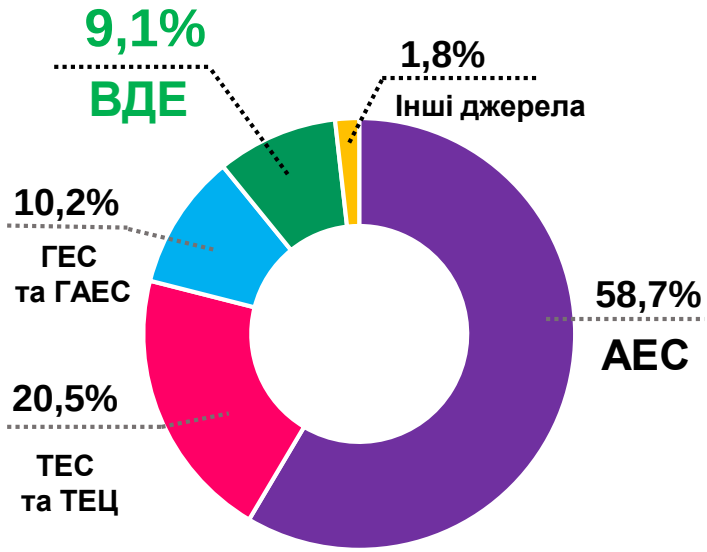
Для досягнення цих цілей Україна має намір застосувати інновації та стати регіональним лідером у технологіях чистої енергетики.

Потенціал відновлювальних джерел енергії в Україні

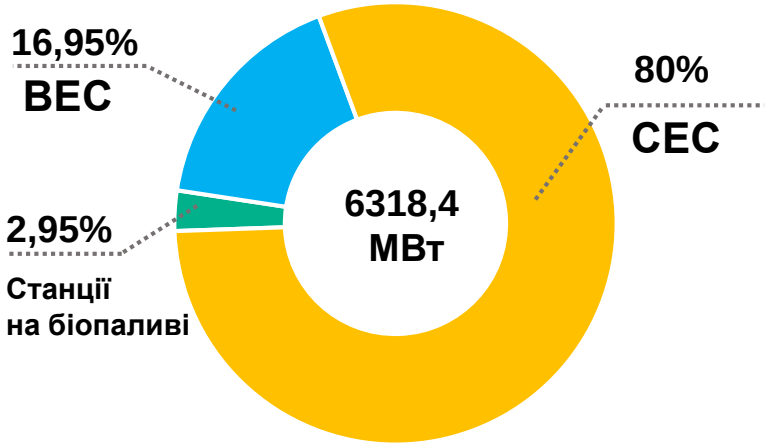


Потужність зеленої енергетики України

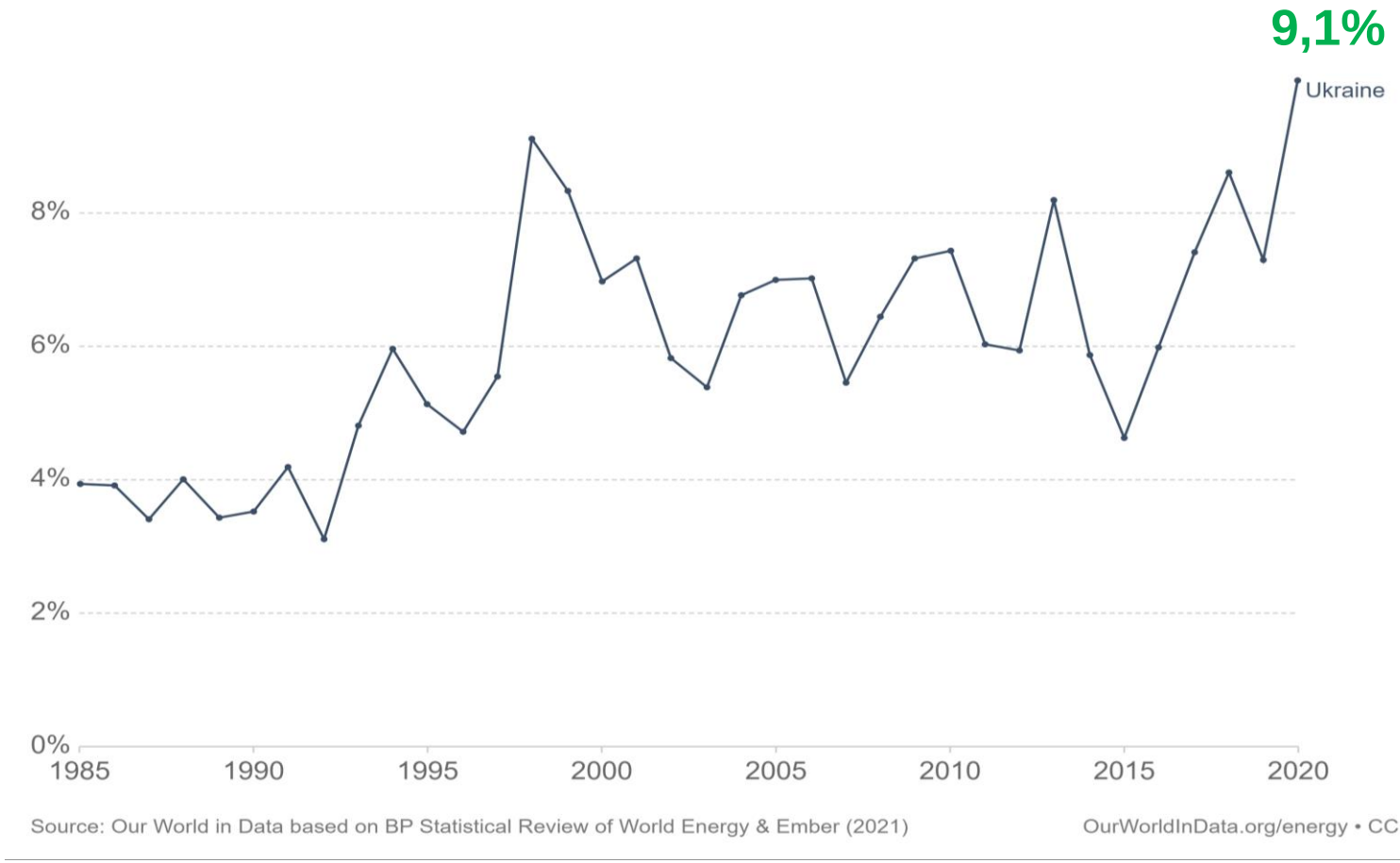
Структура генерації електроенергії в Україні



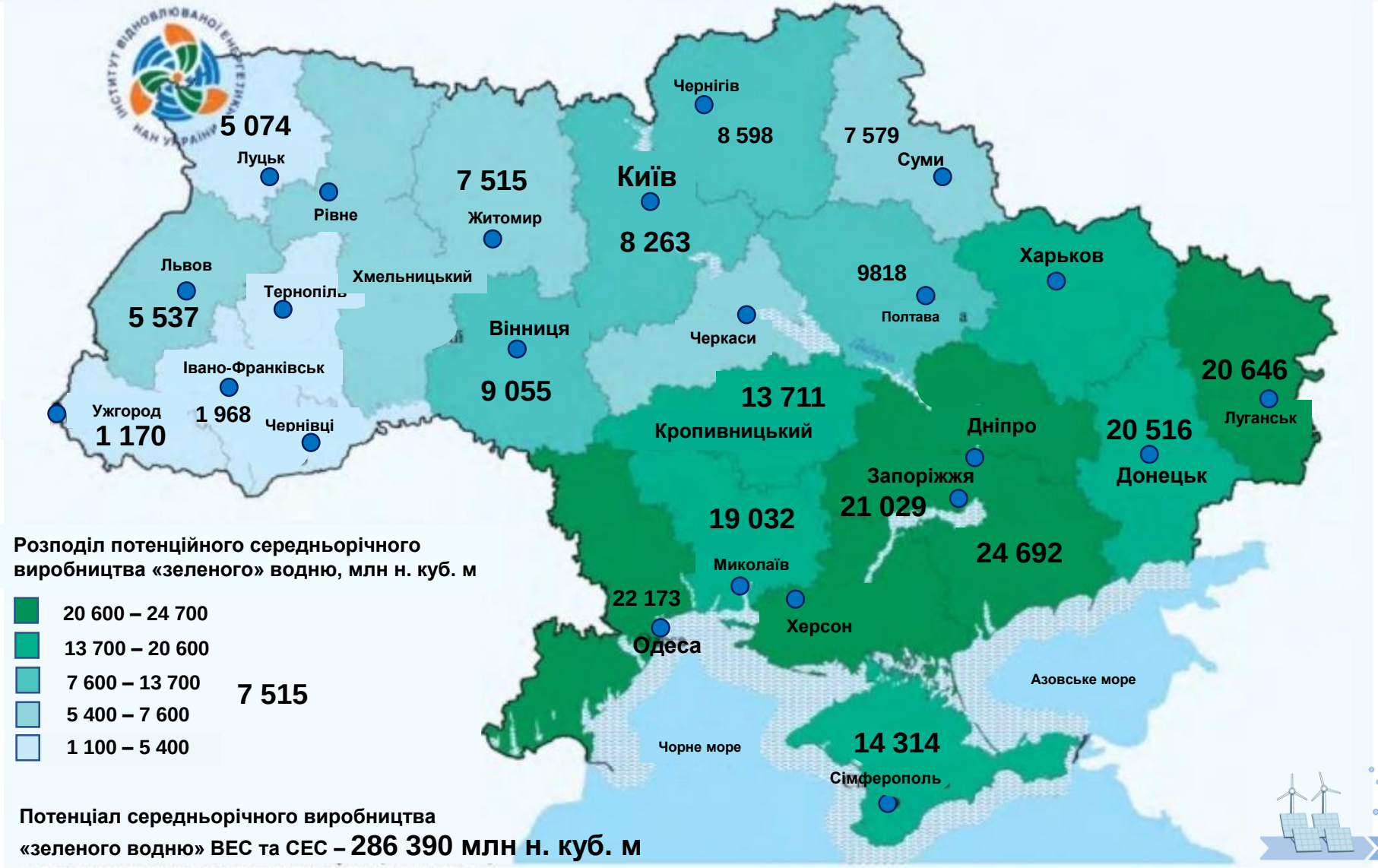
Потужність обладнання ВДЕ



Динаміка виробництва електроенергії з відновлювальних джерел енергії ВДЕ України



Потенціал України у виробництві «зеленого» водню H_2



Загальний потенціал середньорічного виробництва «зеленого» водню – близько **505 млрд куб. м**

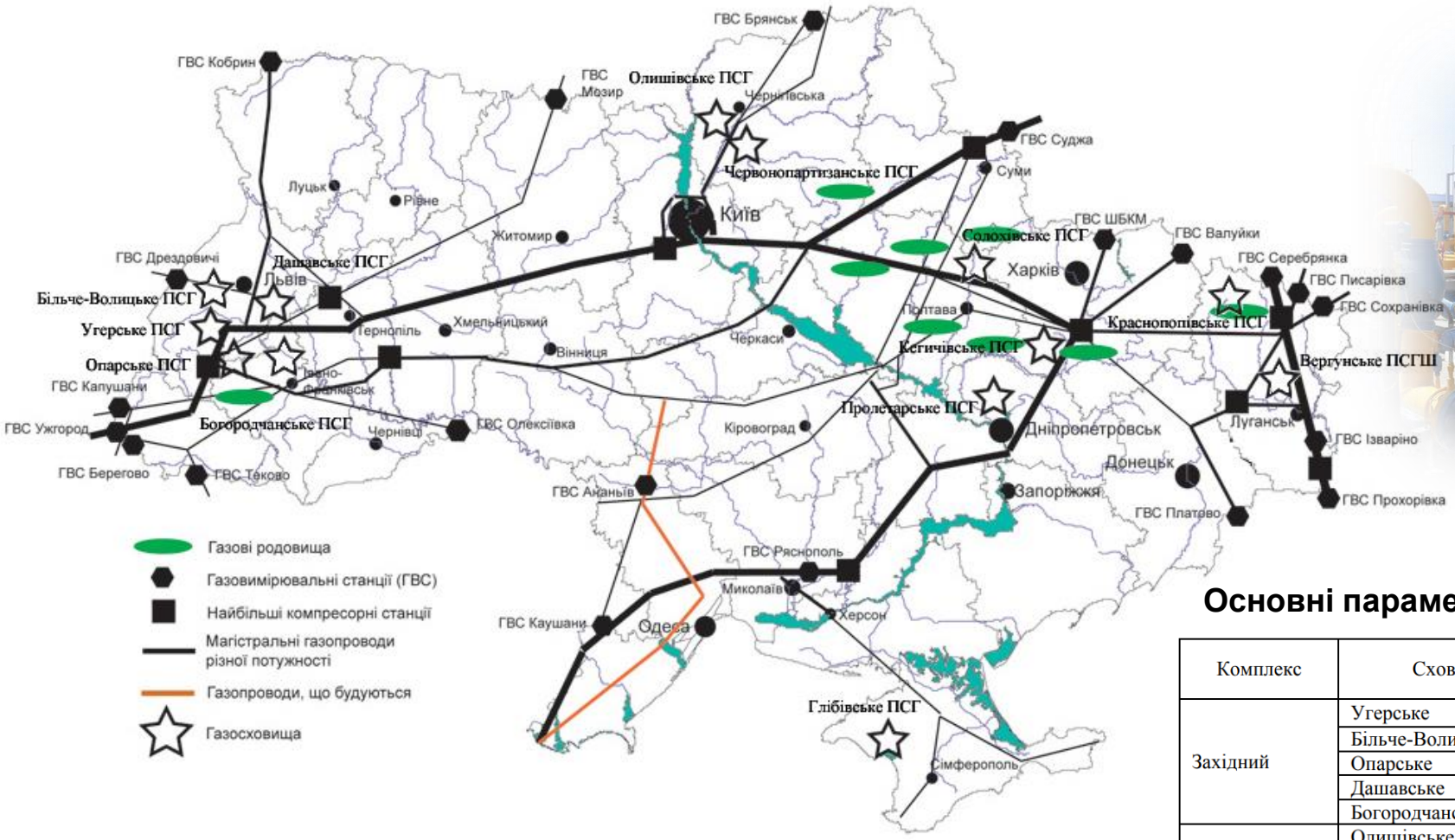
Потенційні можливості України
у зберіганні та транспортуванні водню



Основні параметри газотранспортної системи України

Довжина газопроводів	**38,9 тис км**
Довжина магістральних трубопроводів	22,2 тис км
Пропускна здатність на вході	288 млрд куб. м на рік
Пропускна здатність на виході	178,5 млрд куб. м на рік
Пропускна спроможність на виході до ЄС	146 млрд куб. м на рік
Кількість газотранспортних одиниць	702 шт
Кількість компресорних станцій	72 шт
Електрична потужність компресорних станцій	5448,0 МВт

Потенційні можливості України у зберіганні та транспортуванні водню





Основні параметри підземних газосховищ України

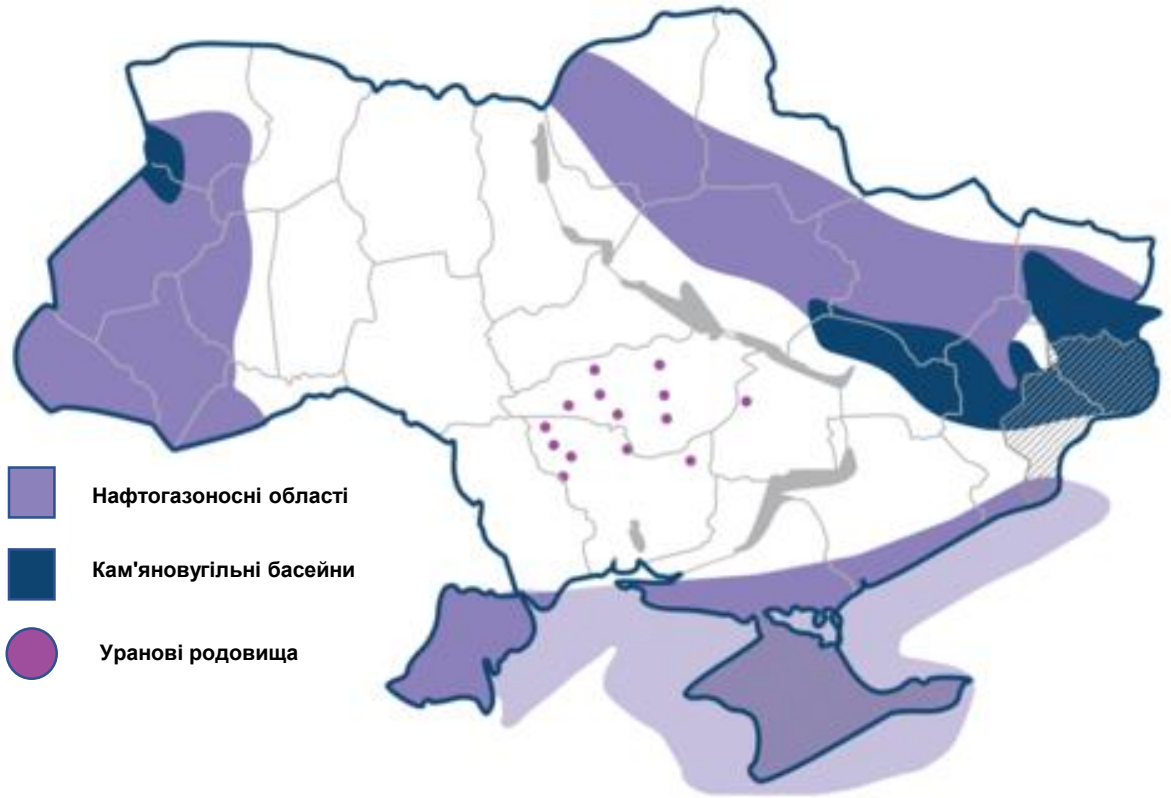
Комплекс	Сховище газу	Об'єм, млн м^3		
		активний	загальний	буферний
Західний	Угерське	1900	3850	1950
	Більче-Волицько-Угерське	17050	33450	16400
	Опарське	3100	5800	2700
	Дашавське	2150	5265	3115
	Богородчанське	2300	3420	1120
Київський	Олишівське	315	660	345
	Червонопартизанське	1200	2700	1500
	Солохівське	1200	2000	800
	Кегичівське	700	1315	615
Південний	Пролетарське	2650	4800	2150
	Глібівське	167,15	1507,15	1340
Східний	Краснопопівське	420	800	380
	Вергунське	400	920	520

Україна забезпечена багатими запасами енергетичних ресурсів для водневої енергетики

Балансові запаси енергоресурсів

	Балансові запаси	З них запаси, що розробляються	Ступінь розвіданості запасів	Кількість років, на які вистачить балансових запасів
Газ	829 млрд куб. м	87%	16%	40
Нафта	110 млн т	78%	38%	72
Газовий конденсат	43 млн т	89%	26%	64
Вугілля	44 млрд т	20%	—	1 769
Уран	251 тис т	—	39%	259

Родовища енергетичних ресурсів України



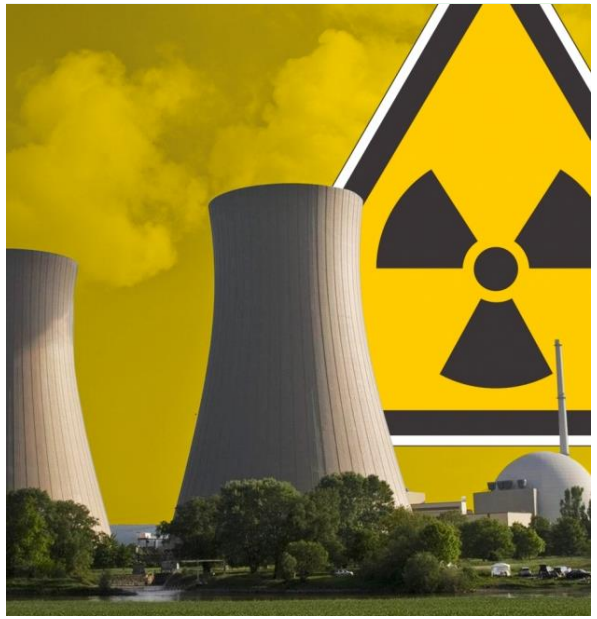
Газифікація вугілля





Електроліз води

Ядерний електроліз вод





Газифікація біомаси

Кінець «епохи вугілля»?



Динаміка видобутку вугілля державними та приватними шахтами, млн т



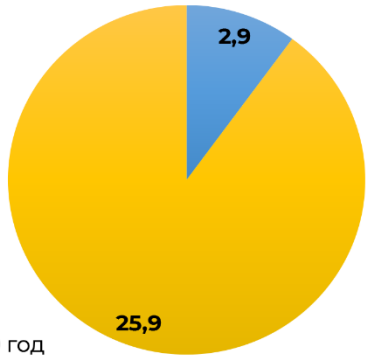
Обсяг дотацій у вугільну галузь



Кількість шахт

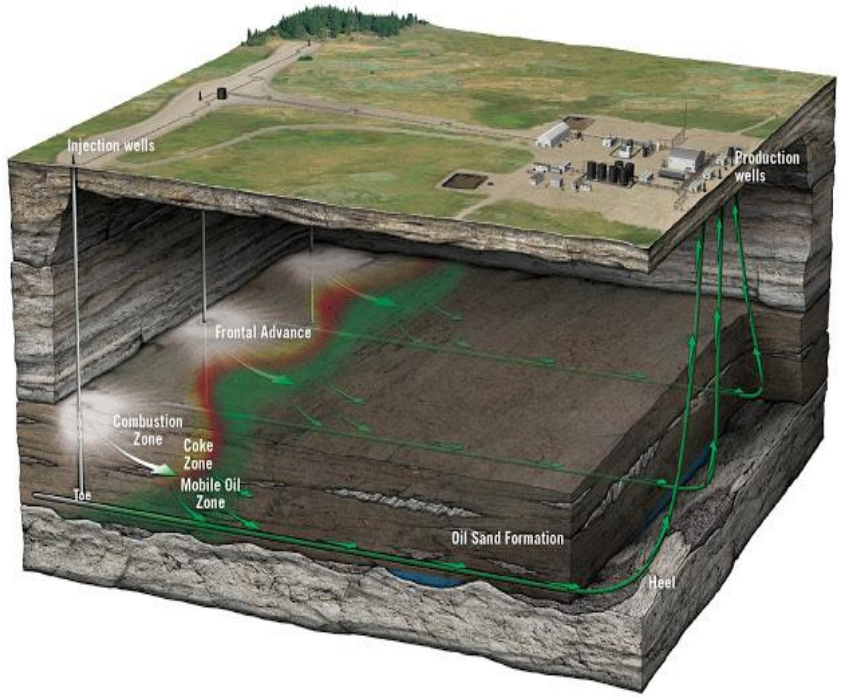


Об'єм видобутку вугілля, млн т



З 1 липня 2007 р по 30 червня 2010 року успішно реалізований спільний міжнародний проєкт HUGE - **Водно орієнтована підземна газифікація вугілля для Європи** (контракт № CT-2007-00006). Споруджена дослідно-промислова установка СПГУ на шахті «Барбара» (м Миколув, Польща). Загальна вартість проєкту 3,6 млн. Євро. Фінансування проєкту здійснювалося європейким фондом «Вугілля і сталі».

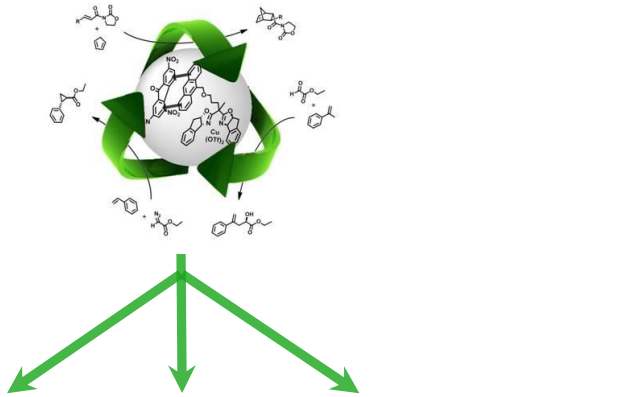
Принципова схема підземного газогенератора



Фізико-хімічні основи підземної газифікації

$(C_mH_m) + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$

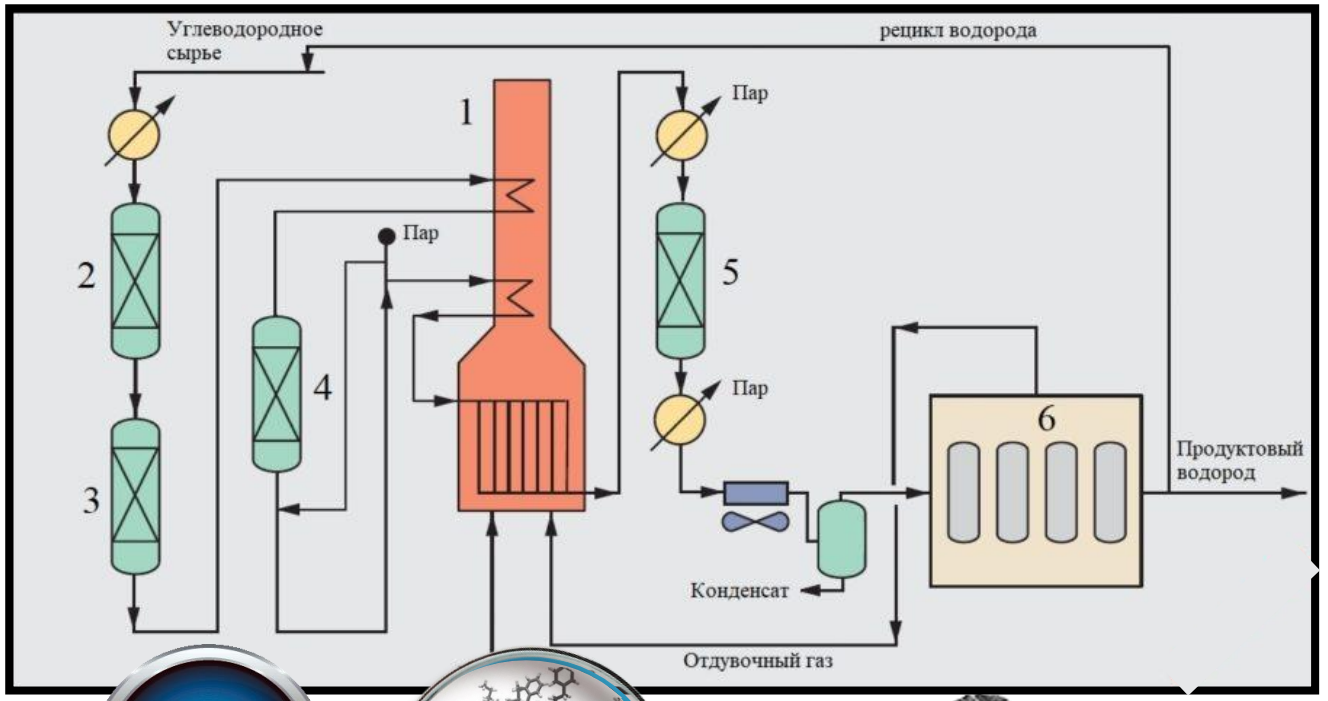
$(C_mH_m) + 1/2O_2 \rightarrow CO + \mathbf{H_2}$



Хімічні продукти | Теплова енергія | Енергетичні продукти

Розробка і впровадження проєкту з газифікації енергетичного вугілля з отриманням водню і уловлюванням CO2





- **Вугілля - сировина для отримання водневої енергії та хімічних продуктів**
- Економічна ефективність газифікації може бути істотно підвищена за умови раціонального використання не тільки газоподібних продуктів переробки вугілля, а й твердого залишку. Наприклад, можливість його застосування в якості наповнювача для гумотехнічних виробів, адсорбенту для очищення питної води або отримання на його основі таких цінних матеріалів, як феросиліцій, карбосиліцій, технічний кремній і ін.
- Собівартість процесу в даний час $ **2-2,5 за кілограм водн**ю.
- У майбутньому можливе зниження ціни до **$ 1,50**, включаючи доставку і зберігання.



Хімічні продукти

Створення енергетичного блоку на базі модульних когенераційних установок з використанням синтез-газу з підвищеним вмістом H_2



Вартість комбінованого енергетичного блоку, що складається з 2-х когенераційних модульних установок по 2 МВт і сонячної електростанції на 1МВт, складе не більше **5 млн. дол.США**

Висновки

1. Загальний обсяг виробництва водню в світі в даний час оцінюється різними джерелами в **55-65 млн т.**
2. Більше **20 держав** і понад **50 корпорацій** прийняли довгострокові програми розвитку водневих технологій, підтриманих пільгами, фінансуванням з бюджетів різних рівнів і міжнародної технологічної кооперації.
3. Сьогодні в якості сировини для виробництва водню домінують вуглеводні. Близько **48%** водню отримують з природного газу, **30% –** з нафти, **18%** - з вугілля і **4%** - з води за допомогою електролізу. Це пояснюється відносною дешевизною виробництва з вуглеводнів.
4. За різними оцінками, собівартість водню з природного газу в **2-5 разів нижче**, ніж при електролізі.
5. **Більше 90%** водню виробляють на місці його споживання (як так званий кептивний продукт), і менш **10%** постачають спеціалізовані компанії, що працюють на ринку промислових газів (Air Liquide, Linde, Praxair Inc. і ін.).
6. Наявність значних запасів вуглеводнів в Україні і величезний потенціал у сфері зеленої енергетики дозволяють розвивати виробництво водню в нашій країні різними методами.

Висновки

7. **Україна має добре розвинену мережу магістральних газопроводів**. Частину існуючої газової мережі можна використовувати для транспортування водню у вигляді домішки. Фізично вже можливо додавати до 2% водню, роблячи незначні регулювання. А завдяки більш складним регулюванням відсоткове відношення поступово можна підняти приблизно до 10–20 %. Нині, досі тривають дослідження з визначення оптимальної частки водню в газотранспортній системі України.
8. **Існуюча газотранспортна інфраструктура** в Україні, наявність величезних підземних газосховищ, створюють передумови для розвитку виробництва водню і експорту його по трубопроводах в країни Європи.
9. **Вугільні підприємства** при переводі їх на газифікацію вугілля можуть стати **водневими заводами**, а наявність вже готової інфраструктури (лінії електропередач, промислові майданчики, автомобільні та залізничні під'їзні шляхи), а також кваліфікаційна і досвідчена робоча сила, яка готова створювати, експлуатувати і оптимізувати складні системи, є великою перевагою.
10. **Водень** – енергія майбутнього для України та шлях для трансформації вугільних регіонів і мономіст.



Дякуємо за увагу!

Бондаренко Володимир Ілліч

д.т.н., професор, завідувач кафедри гірничої інженерії та освіти

НТУ «Дніпровська політехніка»

Тел: +38(067) 562-70-07

E-mail: v_domna@yahoo.com