



ЦІЛЬОВА КОМПЛЕКСНА ПРОГРАМА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ

*Розвиток наукових засад отримання,
зберігання та використання водню в системах
автономного енергозабезпечення*

**Розроблення автономних когенераційних водневих
енергоустановок з конверсією твердих органічних відходів**

**проект № 3-20
другий етап**

**Науковий керівник: пров. наук. співр. Дудник О.М.
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України**

Грудень 2020

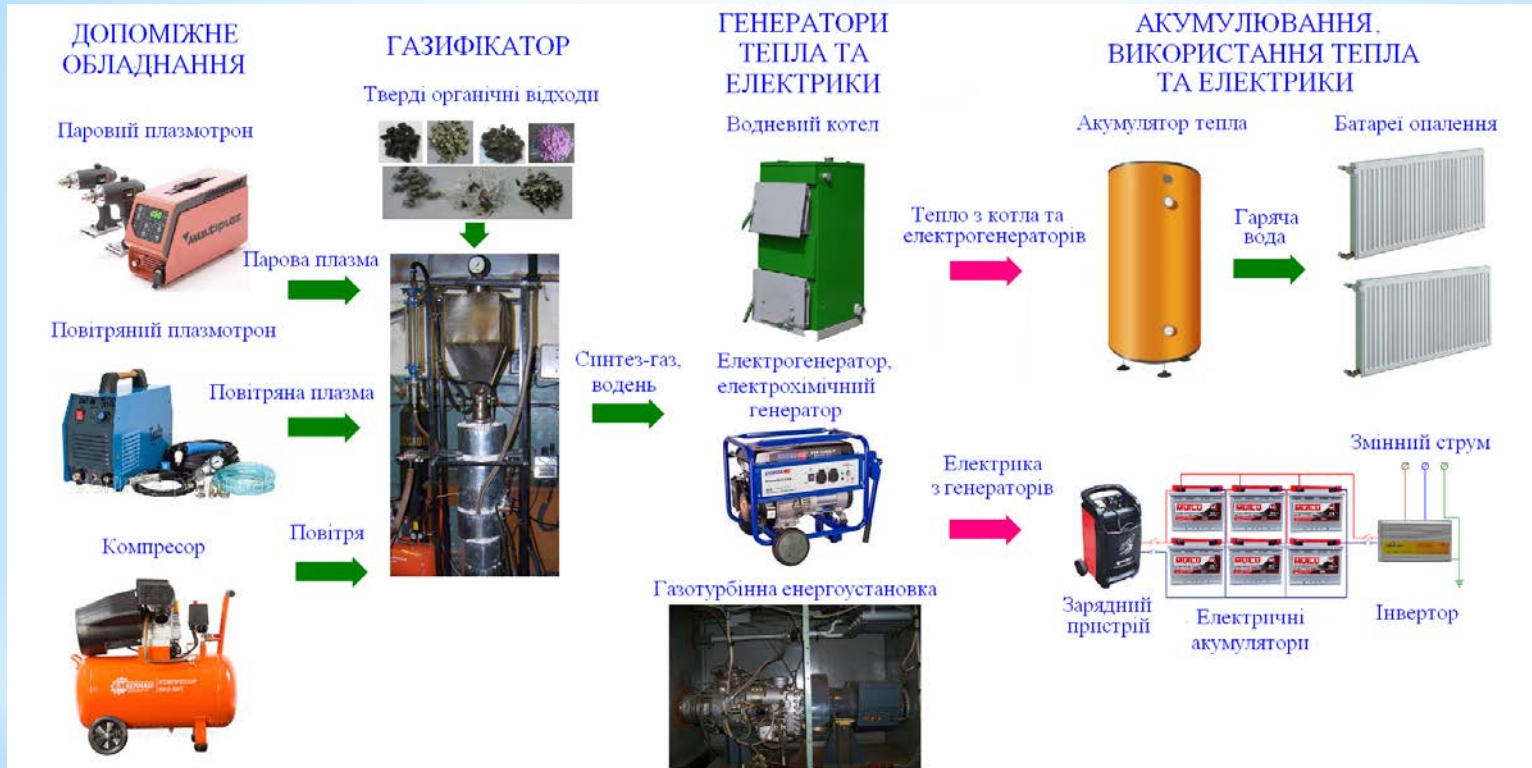
Метою досліджень на другому етапі робіт за проектом було:

- * розроблення екологічно безпечних та науково-обґрунтованих методів термохімічного перероблення твердих органічних відходів для відновлювано-водневої енергетики для створення нових автономних когенераційних водневих енергетичних установок на твердих органічних відходах;
- * експериментальне визначення характеристик конверсії твердих органічних відходів для створення нових ефективних та екологічно чистих гібридних та когенераційних енергетичних установок;
- * розроблення нових принципових схем автономних гібридних та когенераційних водневих енергоустановок з використанням газифікатора-трансформера, електрогенератора з двигуном внутрішнього згоряння, електрохімічного генератора з твердооксидними паливними елементами.

Задачі 2-го етапу:

- * оптимізація схеми роботи основного обладнання автономної когенераційної енергоустановки з урахуванням властивостей твердих органічних відходів;
- * розроблення конструкції установки конверсії твердих органічних в гарячий збагачений воднем синтез-газ для роботи в автономній гібридній установці з урахуванням обраного основного обладнання: газотурбінної енергоустановки та електрохімічного генератора на твердооксидних паливних елементах.

Автономні когенераційні енергоустановки з конверсією твердих органічних відходів з використанням обладнання Інституту вугільних енерготехнологій НАН України



Для побудови когенераційних енергетичних установок на твердих органічних відходах використано паралельно-послідовну схему роботи пристроїв одержання теплової та електричної енергії з використанням теплових та електричних акумуляторів для ефективної роботи в маневреному режимі та збільшення ресурсу роботи основного енергетичного обладнання. В схему роботи енергоустановки можуть бути додані інші альтернативні джерела енергії.

Оптимізація роботи газифікатора - трансформера

Дослідження роботи газифікатора за максимального навантаження та змінення його конструкції

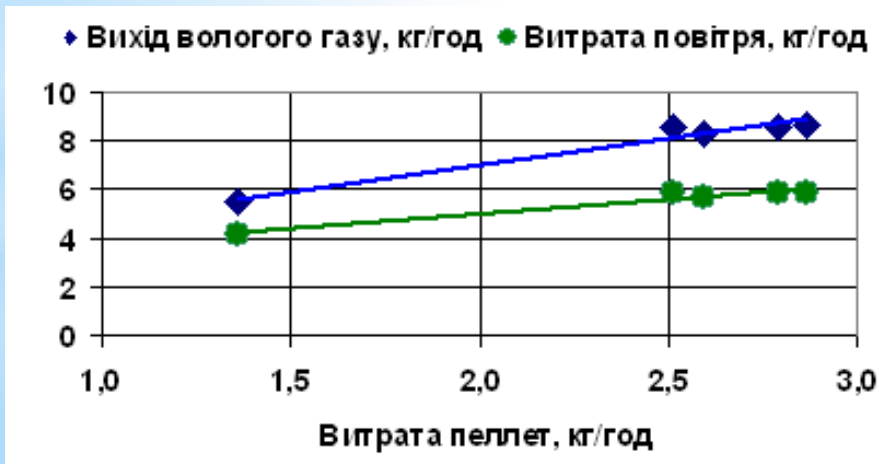
Склад твердих органічних відходів

Вихідна речовина	Вологість (W ^a)	Леткі сполуки (V ^a)	Зола (A ^a)	Фіксований вуглець (C _{fix} ^a)
	мас. %			
Відходи паперу	3,82	67,44	24,31	4,43
Лушпиння соняшника	12,10	81,01	1,67	5,22
Пеллети з відходів деревини	9,21	85,23	0,32	5,25
Поліетилентерефталат	0,70	92,90	0,08	6,32
Відходи деревини	9,79	73,31	0,65	16,25

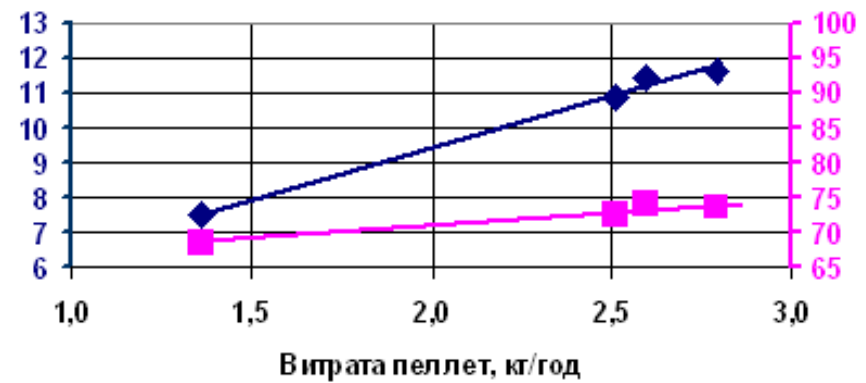
Результати випробувань

Тверді органічні відходи	Витрата палива, кг/год	Вихід сухого газу, нм ³ /год	Теплова потужність установки, кВт	Хімічний ККД, %
Відходи паперу	2,8	4,6	9,0	74,8
Лушпиння соняшника	3,7	7,4	14,5	66,9
Суміш відходів деревини та ПЕТ (26/74 мас. %)	2,7	6,3	8,2	74,6
Пеллети з відходів деревини	2,6	8,2	14,1	65,9

Результати випробувань з подачею 20 % повітря в зону карбонізації



◆ Теплова потужність газифікатора, кВт
 ■ Хімічний ККД газифікації, %



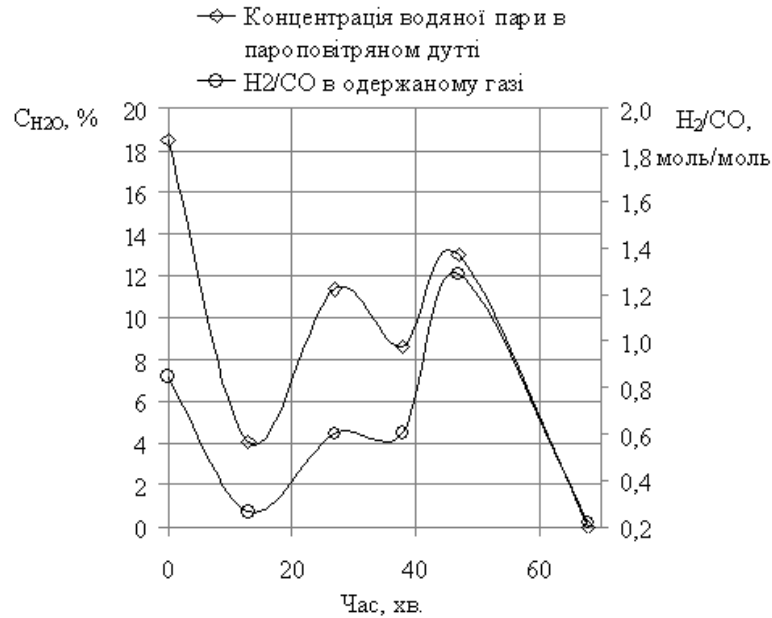
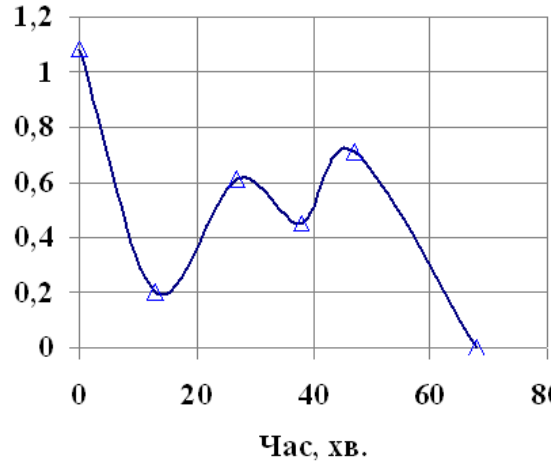
Оптимальний вибір конструкції зони парціального окиснення дозволив досягнути підвищеного хімічного ККД газифікації

Температура газів на виході з зони карбонізації газифікатора повинна становити від 300 до 500 ° С, а на виході з газифікатора - вище 600-650 ° С.

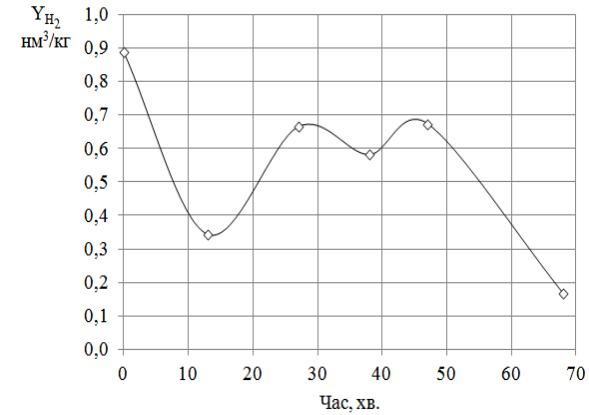
Закономірності збільшення мольного співвідношення сполук H_2/CO в одержаному після газифікації газі завдяки використанню високотемпературної водяної пари

Деревне вугілля

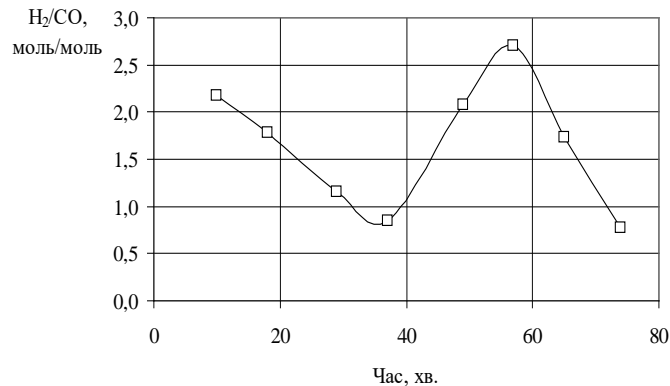
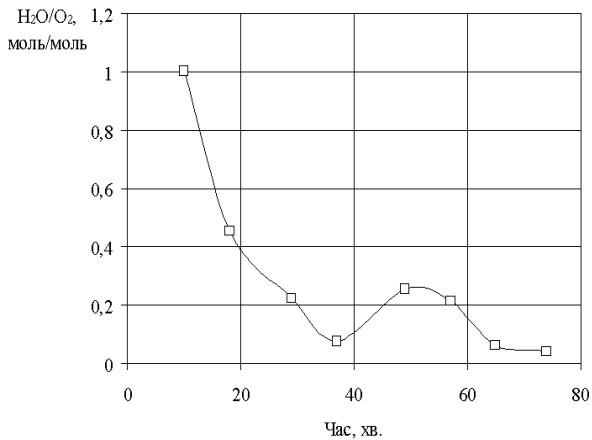
H_2O/O_2 , моль/моль



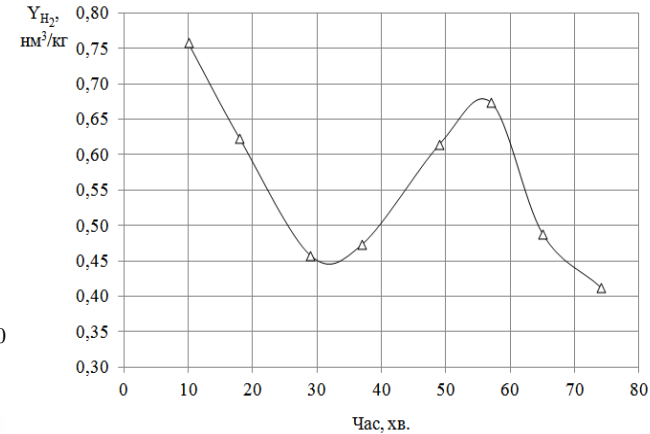
Вихід водню



Донний мул



Вихід водню



Реактор каталітичної конверсії високомолекулярних сполук

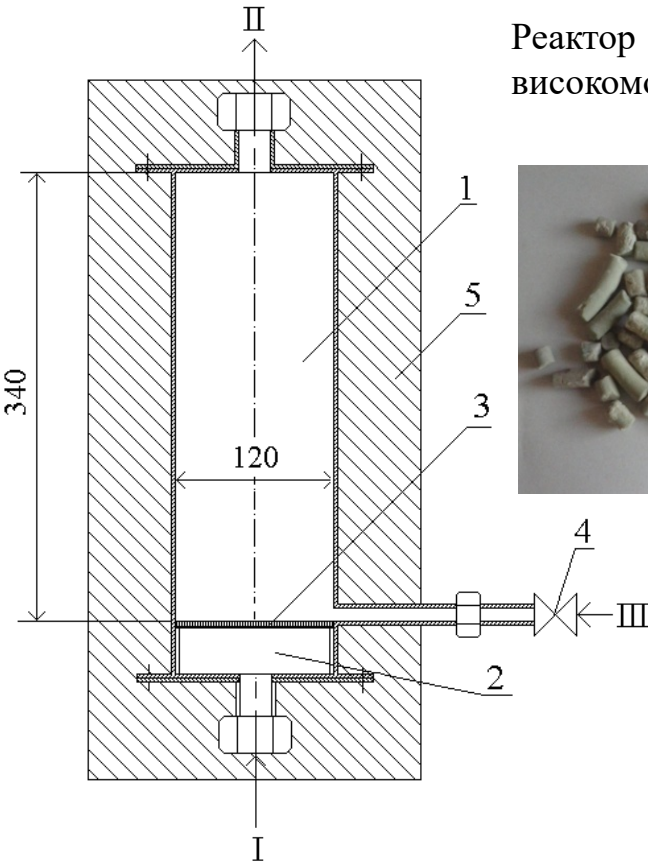
1 – зона конверсії, 2 – короб, 3 – решітка, 4 – повітряний клапан, 5 – футеровка;
I – газ з гарячого циклона, II – газ після конверсії, III – повітря

Реактор розроблявся з розрахунку витрат одержаного газу до $10 \text{ нм}^3/\text{год}$ з вмістом високомолекулярних сполук до $3 \text{ г}/\text{нм}^3$.

Для роботи каталітичного реактора за температур $650\text{-}720 \text{ }^\circ\text{C}$ та конверсії високомолекулярних сполук в Інституті фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України створено наноструктурований каталізатор зі співвідношенням компонент $\text{CaO}/\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 10/10/90$ мас. %. Насипна щільність каталізатора становить $568 \text{ г}/\text{л}$. Маса каталізатора в реакторі каталітичної конверсії високомолекулярних сполук $2,17 \text{ кг}$.

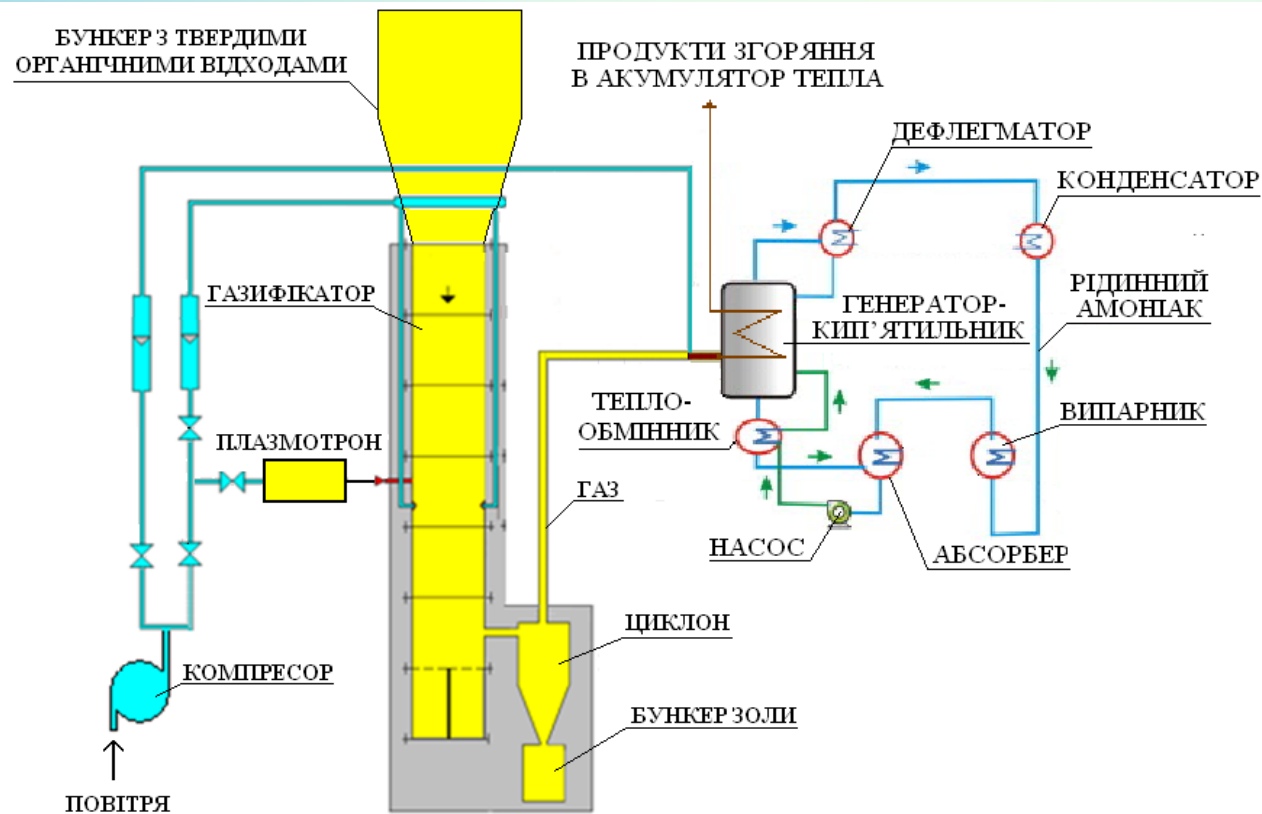
Вміст високомолекулярних сполук після каталітичного реактора під час очищення газів після газифікації різних видів твердих органічних відходів - від $0,030$ до $0,150 \text{ г}/\text{нм}^3$. Реактор каталітичної конверсії призначено для конверсії до 95% високомолекулярних сполук в одержаному газі.

Встановлено, що використання реактора з відновленим Ni-каталізатором є найкращим варіантом для використання в когенераційних установках з метою зниження вмісту високомолекулярних сполук в газі перед електричними генераторами.



Тригенерація.

Принципова схема виробництва холоду з використанням газифікації твердих органічних відходів



В систему автономних когенераційних енергоустановок, в якій використано паралельно-последовну схему роботи пристроїв одержання теплової та електричної енергії для збільшення енергоефективності можна додати пристрої для одержання холоду.

Теплова потужність системи газифікатор твердих органічних відходів – кондиціонер повітря для приміщення площею 40 м², висотою 4,1 м, об'ємом 164 м³, товщиною стінок 75 см за температури навколишнього повітря (на вулиці) 35° С становитиме 4,4 кВт.

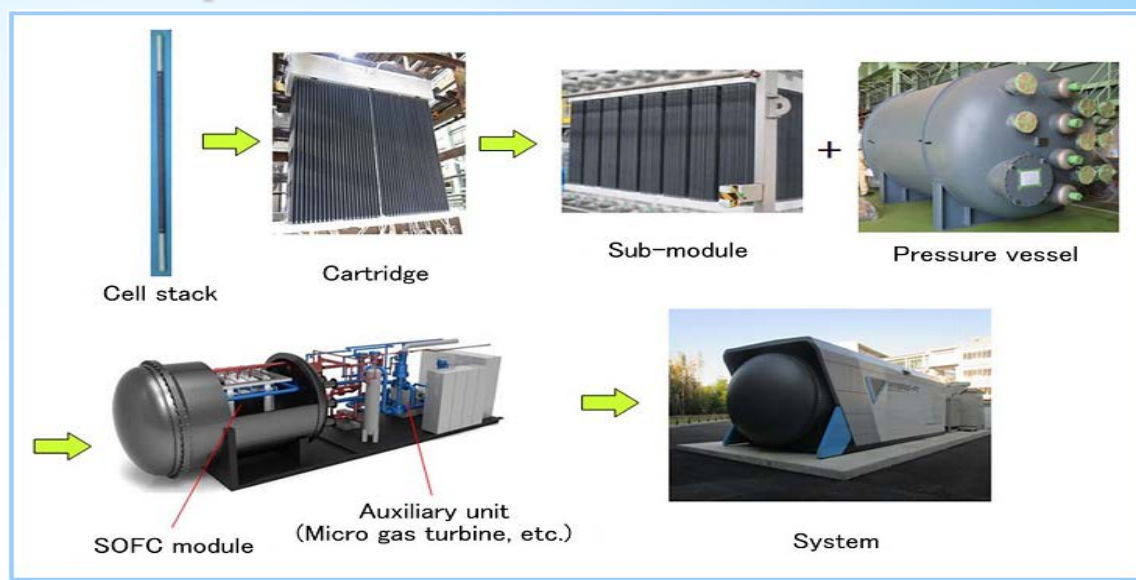
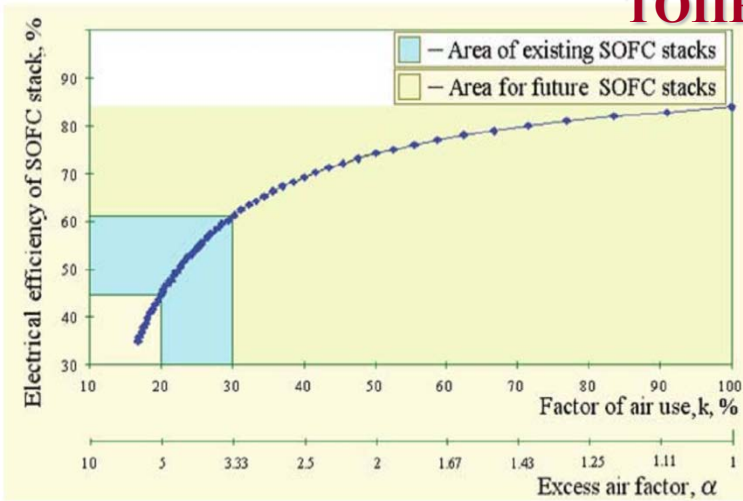
Залишкове тепло використовується для гарячого водопостачання з використанням теплового акумулятора.

Для порівняння: в разі опалення приміщення з використанням котла взимку за його потужності 18 кВт достатньо 12 год. роботи зі збереженням залишкової енергії в теплому акумуляторі

Для забезпечення повного клімат-контролю в приміщеннях, які одержують енергію з енергоустановок, для збільшення ефективності використання енергії твердих органічних відходів необхідно використовувати принцип тригенерації (з виробництвом електрики, тепла та холоду). Використання принципу тригенерації забезпечує найбільший коефіцієнт використання палива в різні пори року.

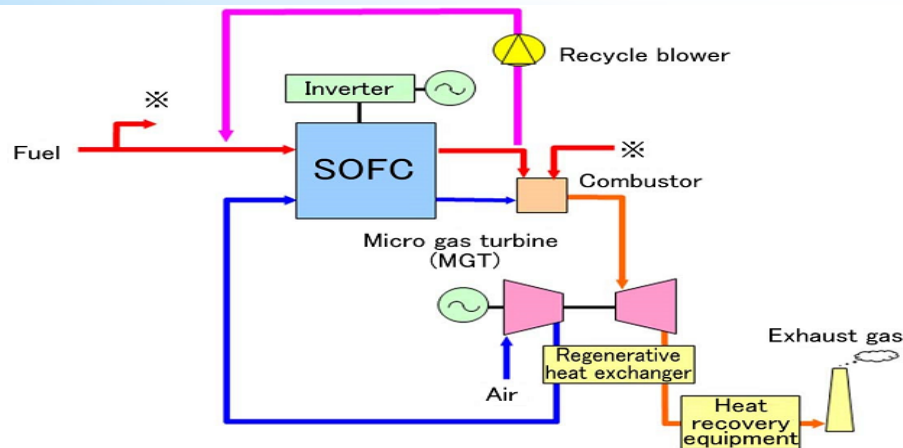
* Електричний ККД ЕХГ на ТОПЕ

* Нові гібридні енергетичні установки на твердооксидних паливних елементах в Японії



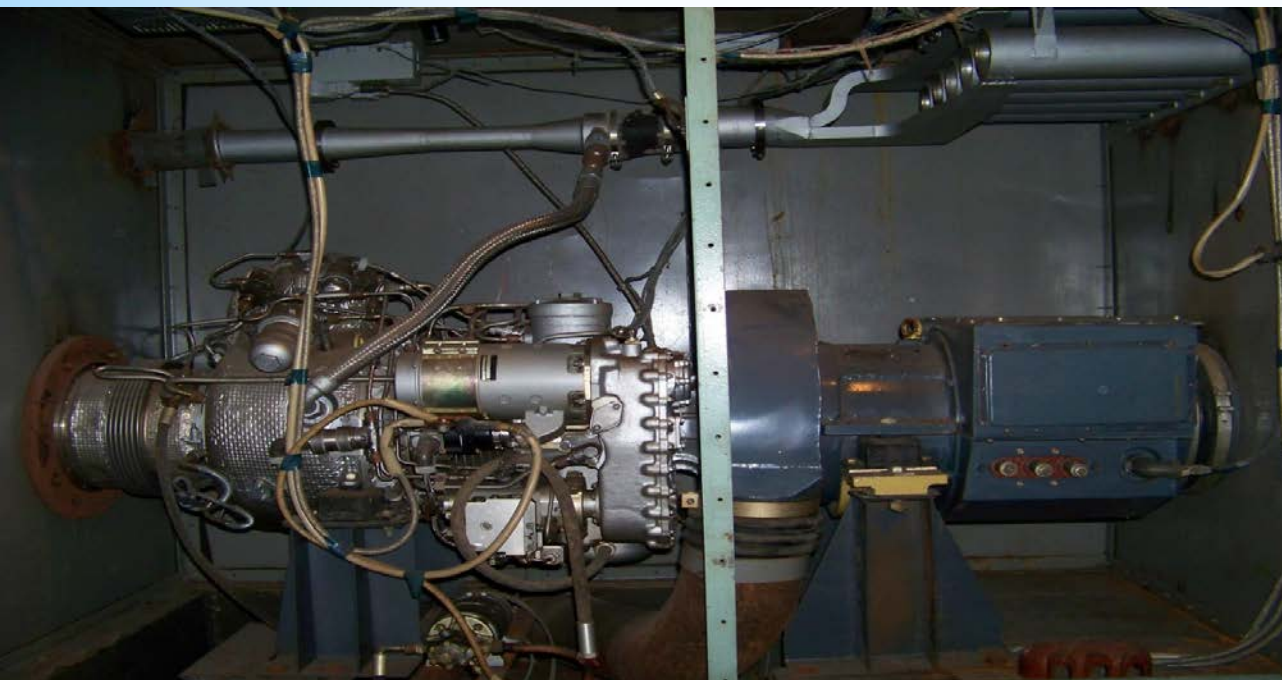
Type	HYBRID-FC power generation system
Rated output (kW)	250
Net efficiency (%-LHV)	55
Dimension of the unit (m)	3.4 (W) × 11.5 (L) × 3.5 (H)
Fuel	City gas: 13A

Проекти ЕХГ на ВПЕ з мікро-ГТУ компанії Мітсубісі Хітачі Пауе Системс Лтд - на заводі Мотомачі корпорації Тойота Мотор, заводі Комакі корпорації НЖК Спарк Плаг, станції Сенджу Техно компанії Токио Газ та в технологічному центрі корпорації Тайсей



Для роботи газифікатора-трансформера ІВЕТ НАНУ під тиском запропоновано застосування газотурбінної установки (ГТУ) 9І120, яку можна випробувати в складі гібридної енергоустановки (ГЕУ) з електрохімічним генератором на твердооксидних паливних елементах (ЕХГ на ТОПЕ) зі застосуванням збагаченого воднем синтез-газу.

Газотурбінна установка в Інституті вугільних енерготехнологій НАН України



ГТУ: 9І120

Паливо:
дизельне, гас, природний газ.

Компресор – відцентровий, одноступеневий.

Турбіна – осева, одноступенева.

Частота обертів газової турбіни - 38 000 об/хв.

Частота обертів електрогенератора (після редуктора) - 8 000 об/хв.

Вага ГТУ – 150 кг.

Вага електрогенератора – 178 кг.

Тиск паливного газу перед газовою турбіною 5,5 бар.

Температура продуктів згорання – 915 °С.

Електричний ККД в разі роботи на гасі -11 %.

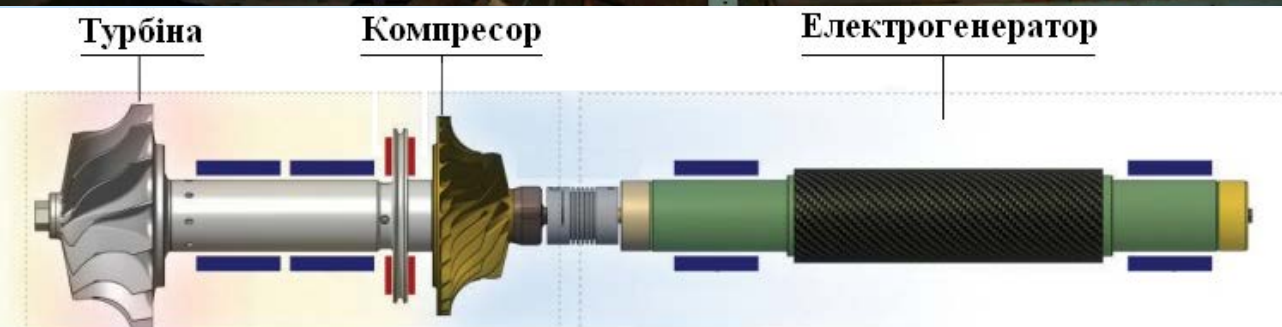
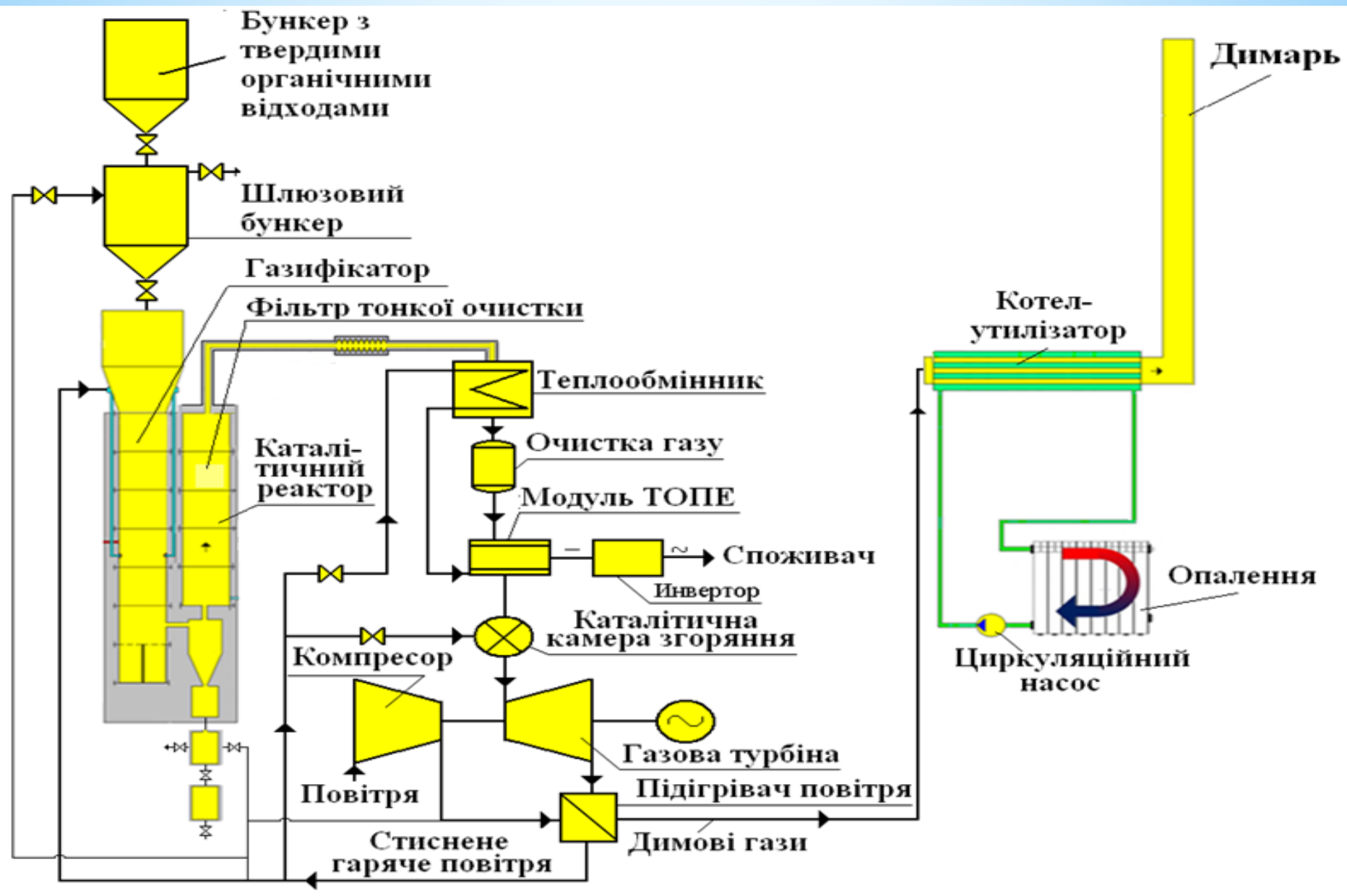


Схема гібридної енергоустановки на основі ЕХГ на ТОВЕ та ГТУ з газифікатором-трансформером Інституту вугільних енерготехнологій НАНУ



Розрахункові показники гібридної енергоустановки на основі ЕХГ на ТОПЕ та ГТУ з газифікатором-трансформером Інституту вугільних енерготехнологій НАНУ

Витрата відходів деревини	150 кг/год
Нижча теплота згоряння відходів деревини	13,9 МДж/кг
Теплова потужність установки щодо витрати відходів деревини	579 кВт
Витрата повітря в газифікатор	208 нм ³ /год
Тиск газу на виході з газифікатора	5,6 МПа
Склад газу після газифікатора:	
Н ₂	16,5 об. %
СО	19,3 об. %
СО ₂	8,3 об. %
Н ₂ О	14,5 об. %
N ₂	41,4 об. %
Нижча теплота згоряння газу	4,2 МДж/нм ³

Вихід газу з газифікатора	396 нм ³ /год
Теплова потужність установки щодо виходу газу	462 кВт
Хімічний ККД газифікації	79,8 %
Електрична потужність ЕХГ на ТОПЕ	210 кВт
Електрична потужність ГТУ	40 кВт
Електрична потужність гібридної установки	250 кВт
Електричний ККД ЕХГ	36,3 %
Електричний ККД ГТУ	6,9 %
Електричний ККД гібридної установки	43,2 %
Загальний термічний ККД гібридної установки	84,1 %

Завдяки надбудові над камерою згоряння ГТУ – електрохімічного генератора на твердооксидних паливних елементах – можна збільшити електричну потужність енергоустановки з 40 до 250 кВт зі збільшенням електричного ККД з 11 до 43 %.

Аналіз можливості використання побічного продукту конверсії (CO_2) для роботи полігенераційних водневих енергоустановок

ОДЕРЖАННЯ CO_2

Після стандартних котлів

Після котлів, що працюють на суміші O_2/CO_2

З газу після газифікатора, риформера чи ферментатора

ПРОМИСЛОВЕ ВИКОРИСТАННЯ CO_2

Для збільшення продуктивності нафтогазових свердловин

Робоче тіло в сучасних енергоустановках

Вироблення продуктів з доданою вартістю

ВИДІЛЕННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ CO_2

Адсорбція зі зміненням тиску (PSI)

Очищення в водяних скруберах

Фізичне поглинання в органічних розчинниках

Хімічне поглинання в органічних розчинниках

Мембранне розділення

Розділення за низької температури

ТЕХНОЛОГІЇ КОНВЕРСІЇ CO_2 ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ПРОДУКТІВ З ДОДАНОЮ ВАРТІСТЮ

Електрохімічна

Фото-каталітична

Фото-термічна каталітична

Каталітична

Біологічна

Сополімеризаційна

Мінерально-карбонізаційна

В світі більшість технологій одержання, очищення та утилізації вуглекислого газу вже перевірено в різних галузях промисловості в комерційному масштабі. Подальше впровадження цих технологій в новітніх енергохімічних комбінованих комплексах для виробництва енергії та хімічних продуктів з урахуванням властивостей вихідних органічних палив дозволить значно знизити вплив вуглекислого газу на навколишнє середовище та змінення клімату на Землі. Огляд технологій та пропозиції щодо одержання, виділення, очищення та використання вуглекислого газу наведено в спільній роботі Інституту вугільних енерготехнологій та Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАНУ

<https://doi.org/10.48126/conf2020#page=47>

Грудень 2020

В И С Н О В К И

1. Роботу газифікатора-трансформера (ГТР) ІВЕ НАНУ перевірено на різних видах твердих органічних відходах (ТОВ). Встановлено оптимальні параметри газифікації різних ТОВ в залежності від їх складу та витрат окислювачів (повітря та водяної пари) з метою використання одержаного газу для роботи когенераційних та тригенераційних енергоустановок (ЕУ).
2. Оптимальний вибір конструкції зони парціального окиснення (ЗПО) дозволив досягнути підвищеного хімічного та термічного ККД газифікації. В ГТР, в якому відбувається обернена газифікація ТОВ, для збільшення ефективності використано тангенційну подачу повітря в ЗПО для створення всередині ГТР вихрового потоку газів та в зону карбонізації (від 5 до 20 % від витрати всього повітря в залежності від виду ТОВ).
3. Визначено закономірності збільшення мольного співвідношення сполук H_2/CO в одержаному після газифікації газі завдяки використанню високотемпературної водяної пари.
4. Визначено, що температура газів на виході з зони карбонізації ГТР залежить від типу ТОВ і для ефективної їхньої конверсії повинна становити від 300 до 500 °С, а температура газів на виході з газифікатора – вище 600-650 °С.
5. Встановлено, що використання реактора з відновленим Ni-катализатором є найкращим варіантом для використання в когенераційних установках з метою зниження вмісту високомолекулярних сполук в газі перед електричними генераторами.
6. Для роботи ГТР під тиском запропоновано застосування газотурбінної установки (ГТУ) 9I120, яку можна випробувати в складі гібридної енергоустановки (ГЕУ) з електрохімічним генератором на твердооксидних паливних елементах (ЕХГ на ТОПЕ) зі застосуванням збагаченого воднем синтез-газу.

В И С Н О В К И

7. В результаті проведених розрахунків конструкції установки конверсії ТОВ у гарячий збагачений воднем синтез-газ для роботи в автономній комбінованій когенераційній установці з ЕХГ на ТОПЕ встановлено, що завдяки надбудові над камерою згоряння ГТУ – ЕХГ на ТОПЕ – можна збільшити електричну потужність ГЕУ з 40 до 250 кВт зі збільшенням електричного ККД з 11 до 43 %.

8. Для забезпечення автономної роботи, зменшення навантаження на основне обладнання (газифікатор, плазмотрони, котел, електрогенератори, паливні елементи) та збільшення ресурсу роботи в схемах когенераційних ЕУ використано як періодично діюче обладнання, так і акумулятори з безперервним постачанням з акумуляторів споживачу електроенергії та тепла.

9. Встановлено, що для забезпечення повного клімат-контролю в приміщеннях, які одержують енергію з енергоустановок, та збільшення ефективності використання енергії ТОВ необхідно використовувати принцип тригенерації (з виробництвом електрики, тепла та холоду). Використання принципу тригенерації забезпечує найбільший коефіцієнт використання палива в різні пори року.

10. Використання ТОВ як палива в когенераційних та тригенераційних енергоустановках зменшує вартість одержаних продуктів у порівнянні зі застосуванням традиційних видів палива в 1,5-2,0 рази.

11. Спільно зі співробітниками Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАНУ проведено аналіз та підготовлено пропозиції щодо можливості використання побічного продукту конверсії ТОВ – вуглекислого газу для роботи полігенераційних когенераційних водневих енергоустановок з метою виробництва електроенергії, добрив, пластику, біопалив третього покоління, будівельних матеріалів, нановуглецю та ін.

ПУБЛІКАЦІ ЗА ПРОЕКТОМ 2020 р.

1. Дудник О.М., Дунаєвська Н.І., Соколовська І.С., Розвиток світового ринку енергоустановок на паливних елементах. Створення нормативної бази водневої енергетики. **Проблеми загальної енергетики**. 2020. Вип. 1 (60), С. 66-73. DOI: [10.15407/pge2020.01.066](https://doi.org/10.15407/pge2020.01.066)
2. Дудник О.М., Соколовська І.С., Борисевич В.Г. Оптимізація схем роботи когенераційних та тригенераційних енергоустановок з газифікацією твердих органічних відходів. Збірка наукових праць XVI Міжнародної науково-практичної конференції «**Вугільна теплоенергетика: Шляхи реконструкції та розвитку**», Листопад 2020 р., Київ: Гнозіс. 2020. С. 110-115. <https://doi.org/10.48126/conf2020#page=111>
3. Дудник О.М., Дунаєвська Н.І., Соколовська І.С., Трипольський А.І., Стрижак П.Е. Одержання, очищення та утилізація вуглекислого газу в процесах виробництва енергії та хімічних продуктів. Збірка наукових праць XVI Міжнародної науково-практичної конференції «**Вугільна теплоенергетика: Шляхи реконструкції та розвитку**», Листопад 2020 р., Київ: Гнозіс. 2020. С. 46-55. <https://doi.org/10.48126/conf2020#page=47>
4. Дудник О.М., Соколовська І.С. Оптимізація роботи автономної когенераційної водневої установки. Розроблення конструкції установки конверсії твердих органічних відходів у гарячий збагачений воднем синтез-газ для роботи в автономній комбінованій когенераційній установці з електрохімічним генератором на твердооксидних паливних елементах. Тези доповідей наукової звітної сесії «**Розвиток наукових засад отримання, зберігання та використання водню в системах автономного енергозабезпечення**», Грудень 2020 р., Київ: ІПМ НАНУ. 2020. 1 с.

**Інститут вугільних
енерготехнологій
НАН України**

Дякуємо за увагу

**Coal Energy Technology
Institute , NASU,
19, Andriyvska Str.,
04070 Kyiv,
Ukraine**

Thank you for attention