



Програма управління знаннями для розвитку сталої біоенергетики

# ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ НА ТЕПЛОВІ ПОТРЕБИ ТА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Доктор технічних наук, професор Геннадій Голуб  
(Національний університет біоресурсів і  
природокористування України).

Доктор технічних наук, професор Савелій Кухарець  
(Поліський національний університет)

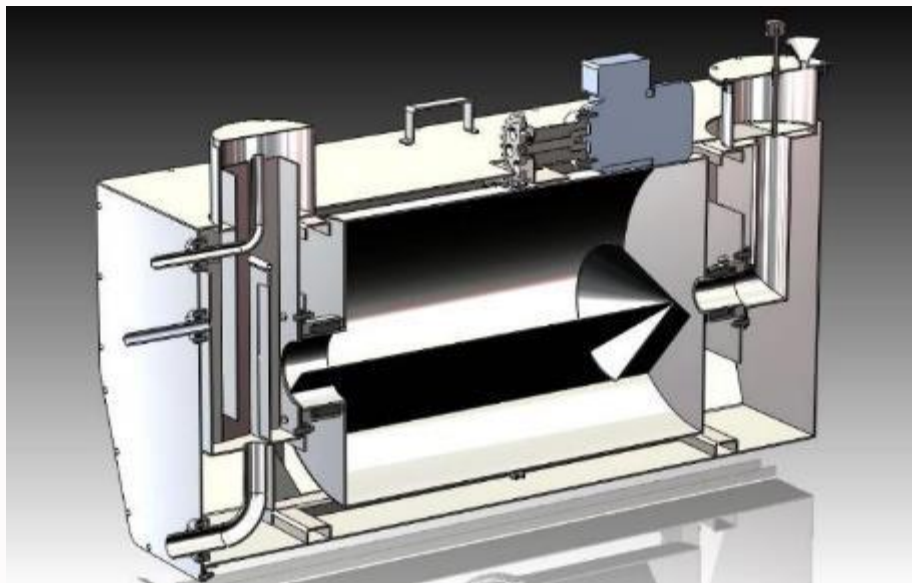
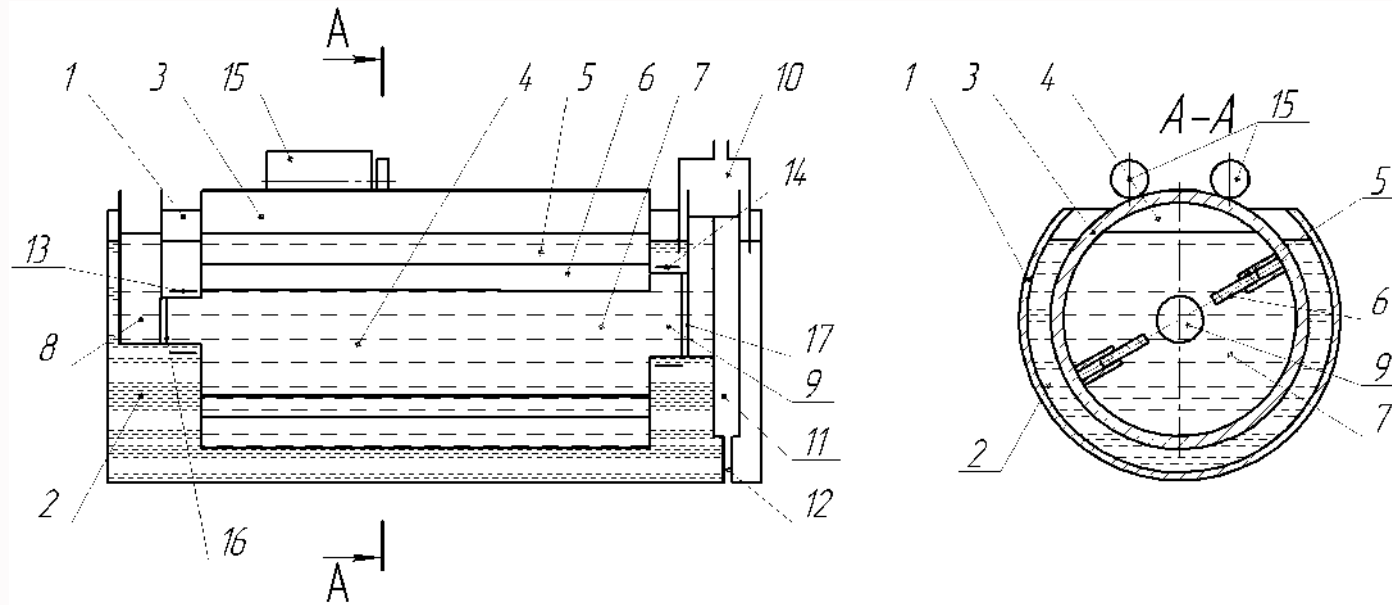
2024



# Лекція 7. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ НА ТЕПЛОВІ ПОТРЕБИ ТА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1. Енергетичні параметри та конструкція біогазової установки з обертовим реактором.
2. Технологічний процес отримання біогазу за допомогою біогазової установки з обертовим біореактором.
3. Отримання теплової енергії на основі біогазу.
4. Собівартість виробництва біометану в аграрному виробництві.
5. Виробництво біометану. Очищення та збагачення біогазу.
6. Когенераційні установки.
7. Виробництво та використання біоводню
8. Техніко-економічна оцінка виробництва електроенергії на основі біометану.

# 1. ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ТА КОНСТРУКЦІЯ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ З ОБЕРТОВИМ РЕАКТОРОМ



Установка біогазова модульного типу:  
1 – горизонтальний зовнішній корпус;  
2 – рідина; 3 – циліндричний реактор;  
4 – камера зброджування; 5 – перегородка;  
6 – рухомі пластини; 7 – органічна маса;  
8, 9, 12 – патрубки; 10 – газозбірник;  
11 – вивантажувальна камера;  
13, 14 – підшипникові вузли; 15 – зовнішній привод; 16, 17 – блок-ущільнення

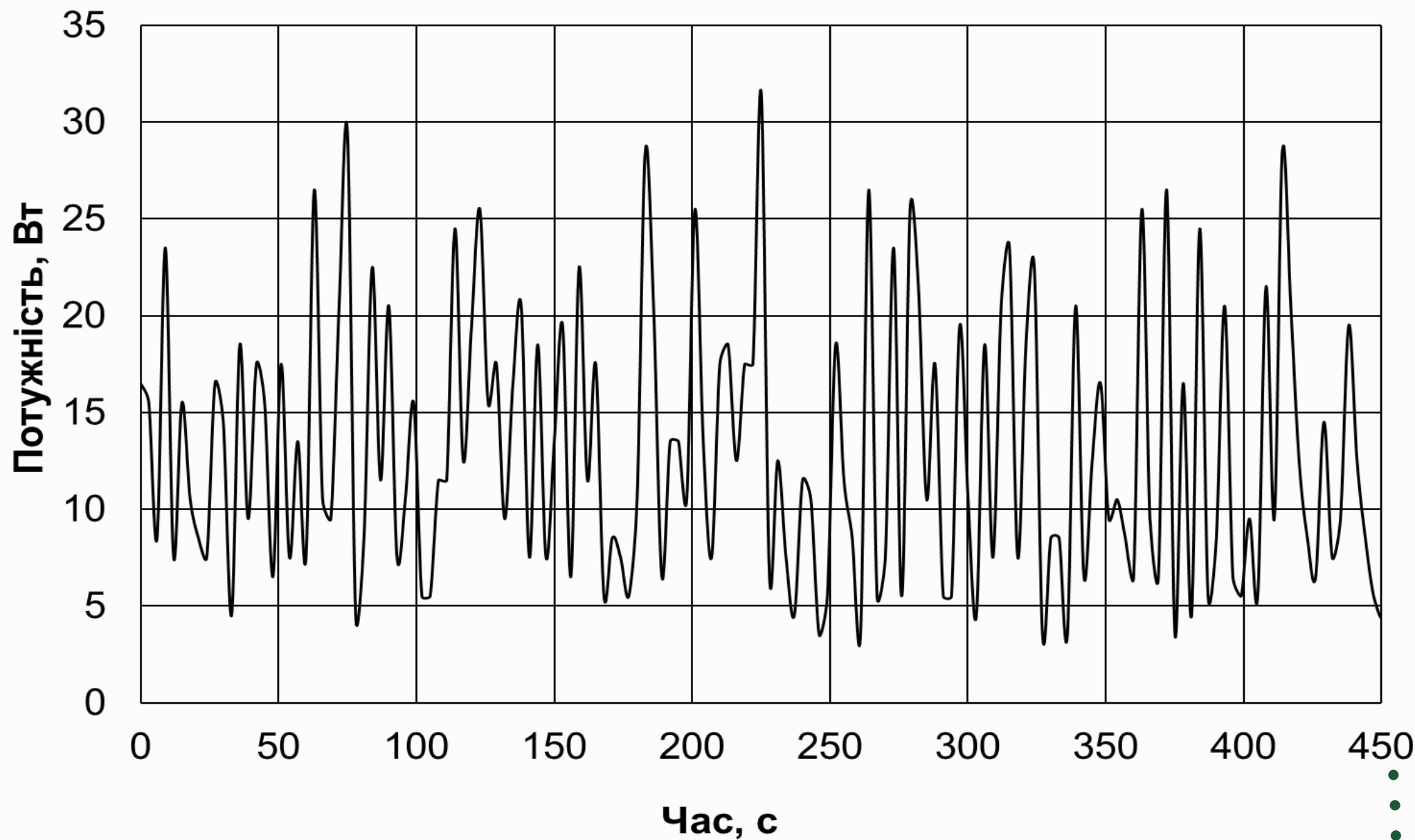
## ПОТУЖНІСТЬ, ЯКА СПОЖИВАЄТЬСЯ ПРИВІДНИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ ОБЕРТОВОГО РЕАКТОРА

$$P = \left( P_{ОП} + P_{ВТЗ} + P_{ВТВ} + P_{ПБ} - P_{ОБ} + J\omega \frac{d\omega}{dt} \right) (\eta_{ЕД} \eta_{П} \cos \varphi)^{-1}$$

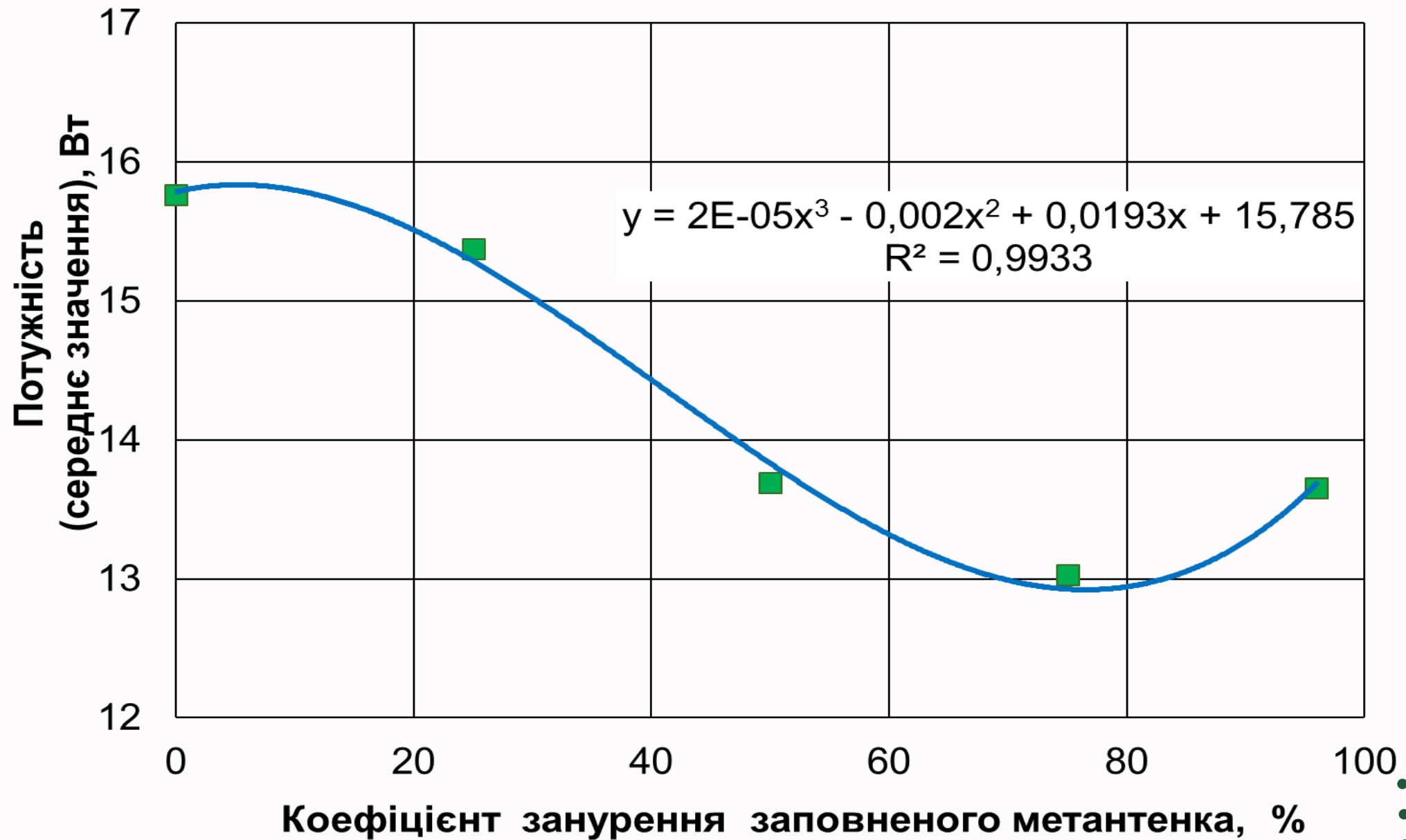
де  $P$  – потужність, яка споживається привідним електродвигуном із електричної мережі, Вт;  $\omega$  – кутова швидкість обертання реактора, рад./с;  $P_{КР}$  – потужність для забезпечення обертання реактора, Вт;  $P_{ОП}$  – потужність опору підшипникових вузлів, Вт;  $P_{ВТЗ}$  – потужність в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об рідину, в яку занурений реактор, Вт;  $P_{ВТВ}$  – потужність в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора об рідку біомасу, яка знаходиться в реакторі, Вт;  $P_{ПБ}$  – потужність для забезпечення підйому біомаси в реакторі під час його обертання, Вт;  $P_{ОБ}$  – потужність, потоків опускання біомаси в реакторі під час його обертання, Вт,  $\eta_{ЕД}$  – коефіцієнт корисної дії електродвигуна, відн. од.;  $\eta_{П}$  – коефіцієнт корисної дії приводу, відн. од.;  $\cos \varphi$  – частка активної потужності у повній потужності електродвигуна, відн. од.



# ЗМІНА СПОЖИВАНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПІД ЧАС РОБОТИ ОБЕРТОВОГО РЕАКТОРА



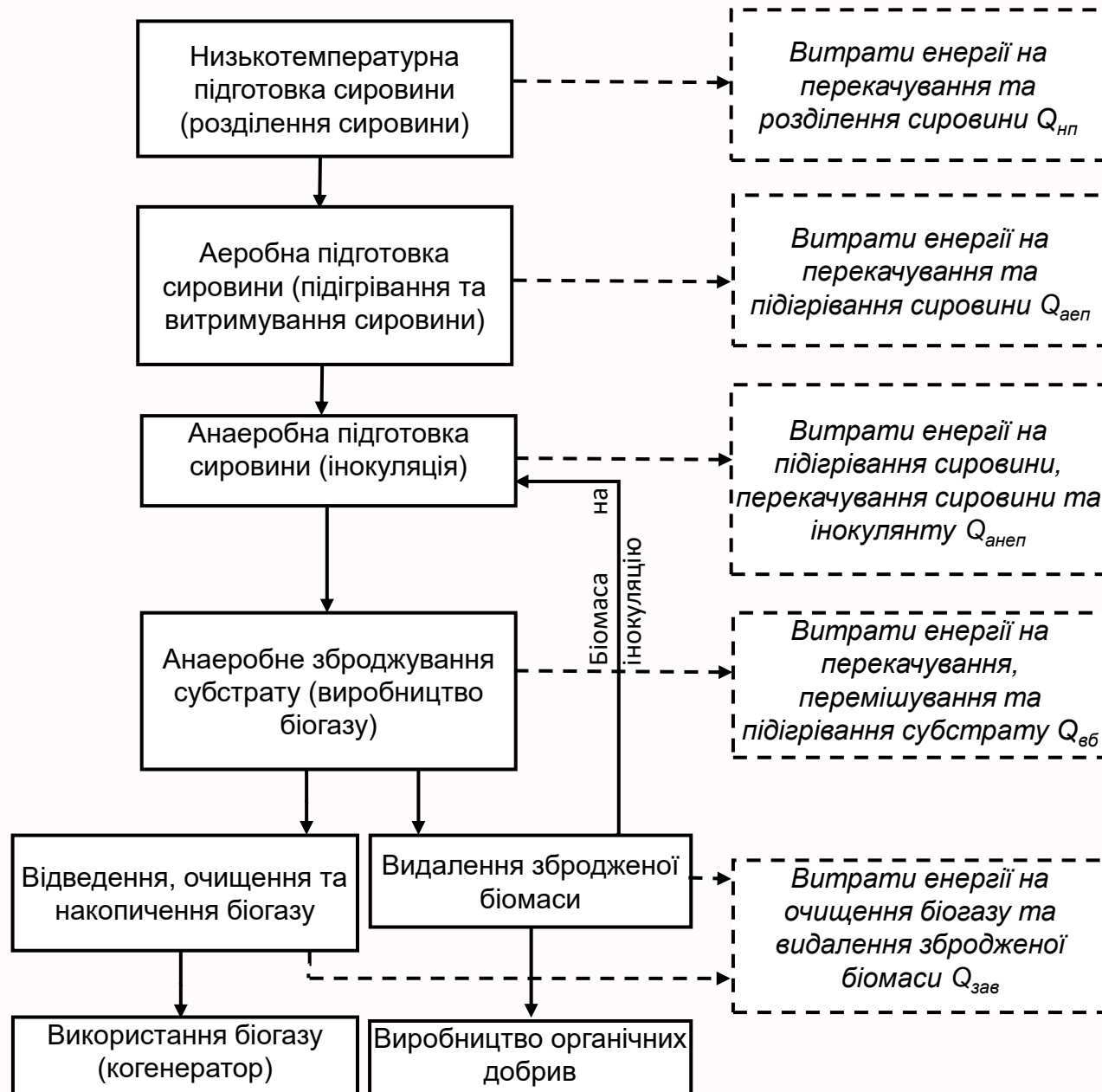
# ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТА ЗАНУРЕННЯ ЗАПОВНЕНОГО ОБЕРТОВОГО МЕТАНТЕНКА НА ПОТУЖНІСТЬ ПРИВОДНОГО МЕХАНІЗМУ



# РАЦІОНАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ БІОГАЗОВИХ ОБЕРТОВИХ РЕАКТОРІВ

Робочий діаметр реактора, $D$ , м	Товщина стінок реактора $S$ , м	Діаметр зовнішнього корпусу $D_3$ , м	Робоча довжина $L$ , м	Вага реактора $m_p$ , кг	Коефіцієнт заповнення біомасою $K_3$	Об'єм завантаженої біомаси (максимальний) $V_B$ , м <sup>3</sup>	Потужність на обертання реактора $N_{кр}$ , Вт
1	0,003	1,2	4	200	0,9	3,0	299
2	0,005	2,4	4	424	0,9	11,5	1197
3	0,005	3,6	4	895	0,9	26,5	2661
4	0,005	4,8	6	1979	0,9	71,0	7114

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ ЗА ДОПОМОГОЮ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ З ОБЕРТОВИМ БІОРЕАКТОРОМ



Блок-схема технологічних етапів отримання біогазу за допомогою модульних біогазових установок



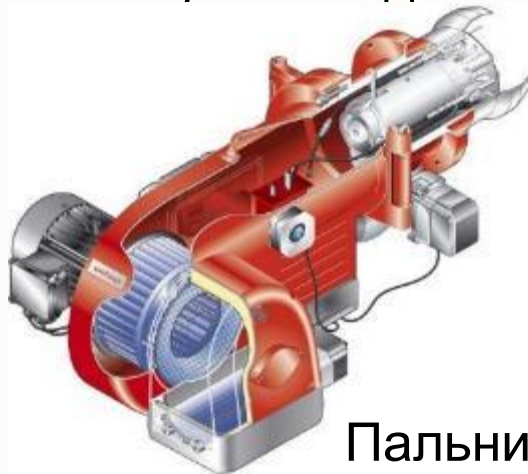
### 3. ОТРИМАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ БІОГАЗУ



Побутовий газовий котел  
потужністю до 100 кВт



Промисловий газовий котел потужністю  
до 40 МВт

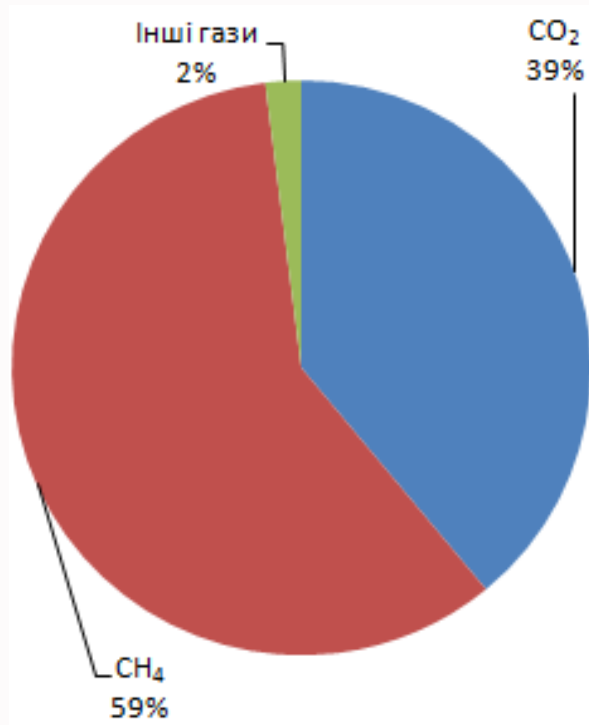


Пальник  
промислового  
газового котла

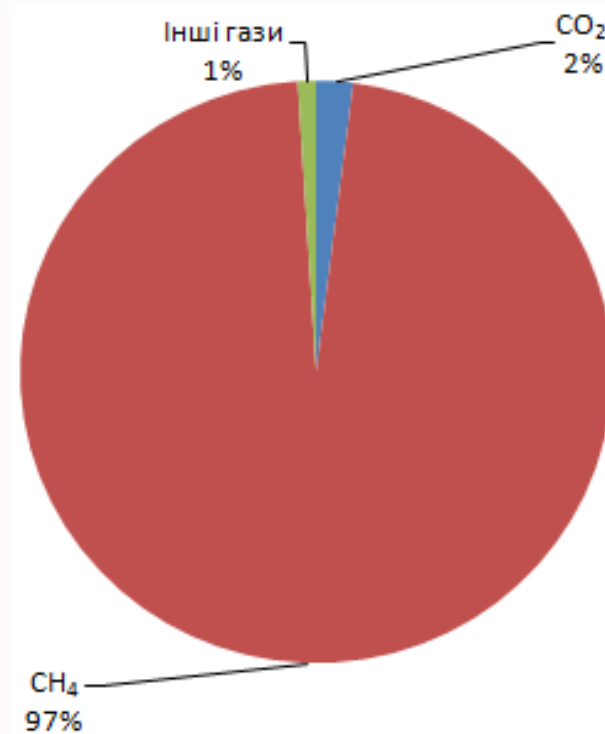


Зернова сушарка із  
використанням біогазу

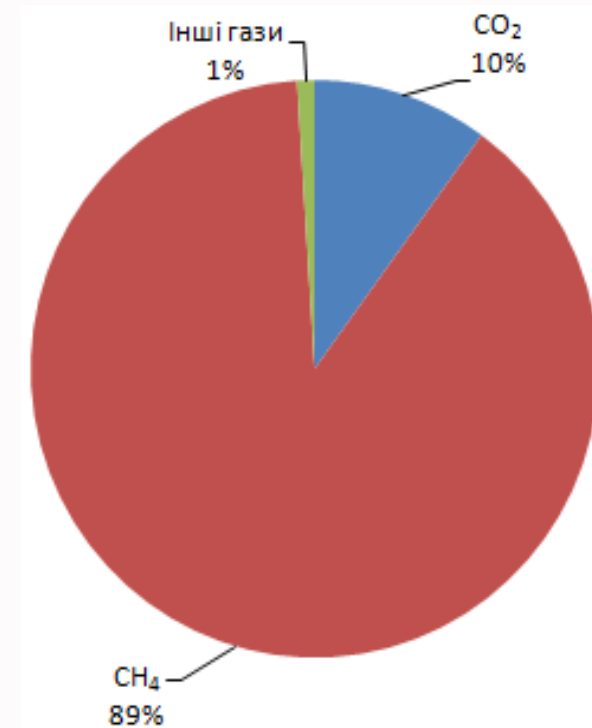
# СПІВВІДНОШЕННЯ КОМПОНЕНТІВ БІОМЕТАНУ ТА ПРИРОДНОГО ГАЗУ



Біогаз



Після очищення та видалення CO<sub>2</sub>  
біометан ≈ природному газу



#### 4. СОБІВАРТІСТЬ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

$$B_{\text{БМ}} = V_{\text{БМ}} C_{\text{БМ}} = m_{\text{ГН}} \Pi_{\text{ГН}} - m_{\text{ОД}} \Pi_{\text{ОД}} + E_{\text{БМ}},$$

$$\begin{aligned} C_{\text{БМ}} &= \frac{m_{\text{ПБ}}}{V_{\text{БМ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{БМ}} = \frac{V_{\text{ПБ}} \rho_{\text{ПБ}}}{V_{\text{БМ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{БМ}} = \\ &= 365 \frac{V_{\text{Р}} \rho_{\text{ПБ}}}{V_{\text{БМ}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{БМ}} = \frac{\rho_{\text{ПБ}}}{k_{\text{БМ}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + E_{\text{БМ}}, \end{aligned}$$

$$\Pi_{\text{ОД}} - \Pi_{\text{ГН}} = \frac{E_{\text{БМ}} k_{\text{БМ}} \tau_{\text{ЗБ}}}{\rho_{\text{ПБ}}}, \quad \Pi_{\text{ОД}} - \Pi_{\text{ГН}} = \frac{(E_{\text{БМ}} + A_{\text{БМ}}) k_{\text{БМ}} \tau_{\text{ЗБ}}}{\rho_{\text{ПБ}}},$$

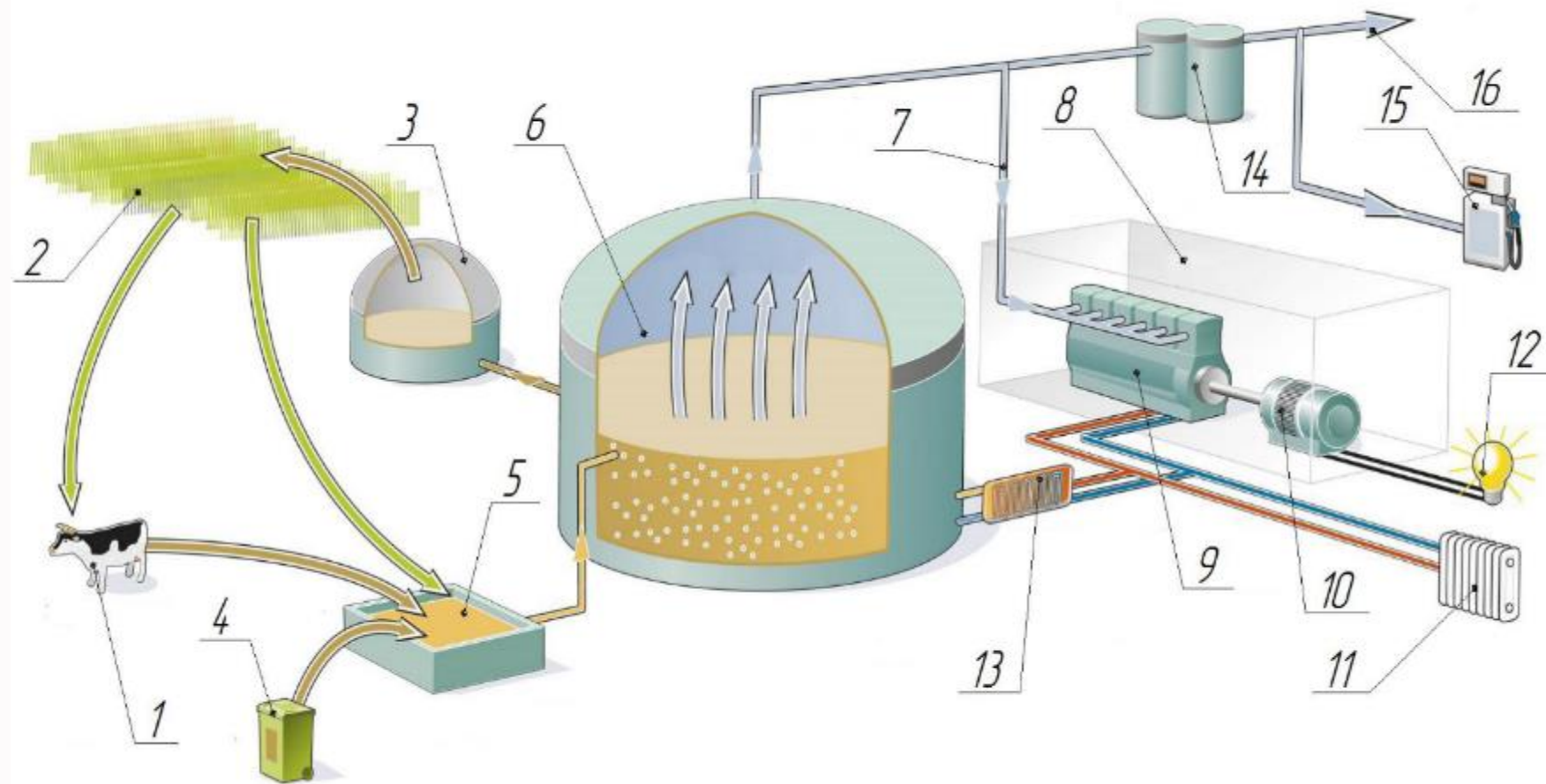
$$C_{\text{БМ}} = \frac{\rho_{\text{ПБ}}}{k_{\text{БМ}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\Pi_{\text{ГН}} - \Pi_{\text{ОД}}) + (1 + k_{\text{ЗБ}} + k_{\text{ЗГ}}) (TOP_{\text{БМ}} + EJ_{\text{БМ}} + 3\Pi_{\text{БМ}}),$$

$$C_{\text{БМ}} = a_{\text{БМ}} \delta \Pi_{\text{ОД}} + b E_{\text{БМ}},$$

## СОБІВАРТІСТЬ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

де  $V_{БМ}$  – витрати на виробництво біометану, грн;  $V_{БМ}$  – об'єм одержаного біометану,  $m^3$ ;  $C_{БМ}$  – виробнича собівартість біометану, грн/ $m^3$ ;  $m_{ГН}$  – маса рідкого гною, що надходить на зброджування, т;  $m_{Од}$  – маса органічних добрив, отриманих після зброджування, т;  $m_{ПБ}$  – маса переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т;  $C_{ГН}$  – ціна рідкого гною, грн/т;  $C_{Од}$  – ціна органічних добрив, грн/т;  $E_{ВБМ}$  – виробничі витрати на виробництво біометану без урахування вартості рідкого гною та органічних добрив, грн;  $E_{БМ}$  – питомі виробничі витрати на виробництво біометану, грн/ $m^3$ ;  $V_{ПБ}$  – об'єм переробленої в біогазовому реакторі біомаси,  $m^3$ ;  $\rho_{ПБ}$  – густина переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т/ $m^3$ ;  $V_P$  – об'єм біомаси в біогазовому реакторі,  $m^3$ ;  $\tau_{ЗБ}$  – час утримання біомаси в реакторі під час зброджування, діб;  $k_{БМ}$  – вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора,  $m^3/m^3$  добу;  $A_{БМ}$  – амортизаційні витрати на виробництво біометану, грн/ $m^3$ ;  $k_{ЗВ}$  – коефіцієнт, що враховує загальновиробничі витрати, відносних од.;  $k_{ЗГ}$  – коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати, відносних од.;  $ТОР_{БМ}$  – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки з виробництва біометану, грн/ $m^3$ ;  $ЕЛ_{БМ}$  – вартість витраченої електричної енергії при виробництві біометану, грн/ $m^3$ ;  $ЗП_{БМ}$  – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві біометану, грн/ $m^3$

## 4. ВИРОБНИЦТВО БІОМЕТАНУ. ОЧИЩЕННЯ ТА ЗБАГАЧЕННЯ БІОГАЗУ

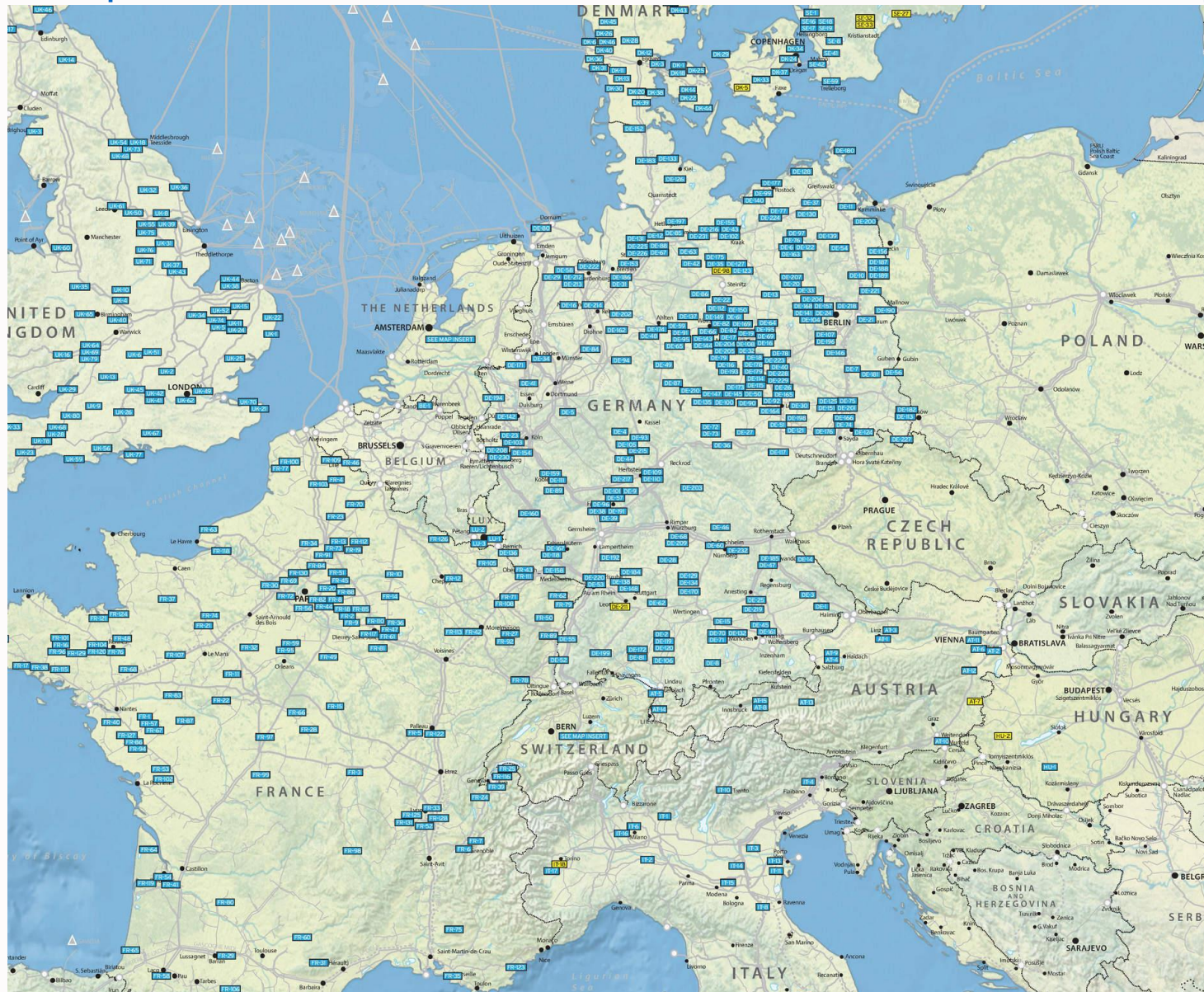


- 1 – сільськогосподарські тварини та птиця, 2 – сільськогосподарські посіви,  
3 – зберігання відпрацьованого субстрату, 4 – органічні відходи,  
5 – накопичувач субстрату, 6 – біогазова установка оснащена газгольдером,  
7 – біогазова мережа, 8 – когенератор, 9 – двигун внутрішнього згоряння,  
10 – електрогенератор, 11 – використання теплової енергії для опалення приміщень,  
12 – використання електричної енергії, 13 – підігрівання біогазового реактора,  
14 – установка для збагачення і очищення біогазу,  
15 – заправна станція, 16 – транспортна мережа природного біогазу



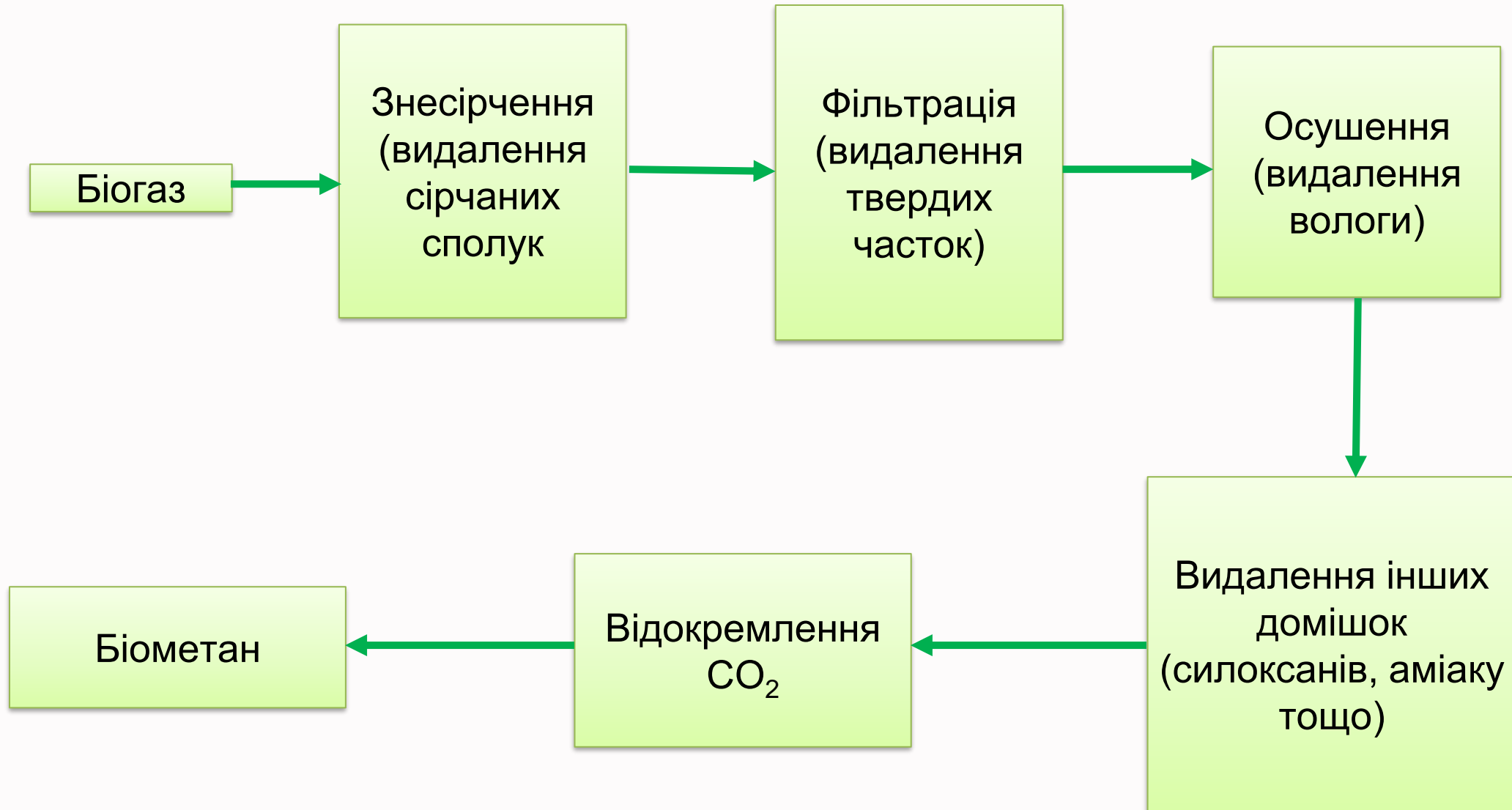
# ЕВРОПЕЙСКА КАРТА БИОМЕТАНУ

[https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/06/GIE\\_EBA\\_BIO\\_2020\\_A0\\_FULL\\_FINAL.pdf](https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/06/GIE_EBA_BIO_2020_A0_FULL_FINAL.pdf)





# ЕТАПИ ОЧИЩЕННЯ ТА ЗБАГАЧЕННЯ БІОГАЗУ



## ВМІСТ ДОМІШОК В БІОГАЗІ

Назва сполуки (домішки)	Формула сполуки (домішки)	Можлива концентрація, млн <sup>-1</sup>	Допустима концентрація, млн <sup>-1</sup>
Сірководень	H <sub>2</sub> S	50000	10
Толуол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	210	100
Ксілол	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	120	100
Етилбензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	55	100
Тетрахлоретилен	Cl <sub>2</sub> C-CCl <sub>2</sub>	35	35
Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	30	100
Ізопропілбензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>	30	50
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	25	10
Діхлорметан	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	15	200
Нонан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	15	-
Хлорбензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	12	75
Трихлоретан	Cl <sub>2</sub> HC-CH <sub>2</sub> Cl	10	10
1,1-Діхлоретан	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	10	10
1,2-Діхлоретан	ClCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> Cl	8	50
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	7	600
Ізооктан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	5	300
Індол	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> N	5	-
1,1-Діхлоретілен	C <sub>12</sub> C <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub>	2	10
Нафталін	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	0,2	10
Трихлоретилен	C <sub>12</sub> C-CHCl	0,2	35

# УСТАНОВКА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ТА ЗБАГАЧЕННЯ БІОГАЗУ В ШВАНДОРФІ, НІМЕЧЧИНА



## 5. КОГЕНЕРАЦІЙНІ УСТАНОВКИ

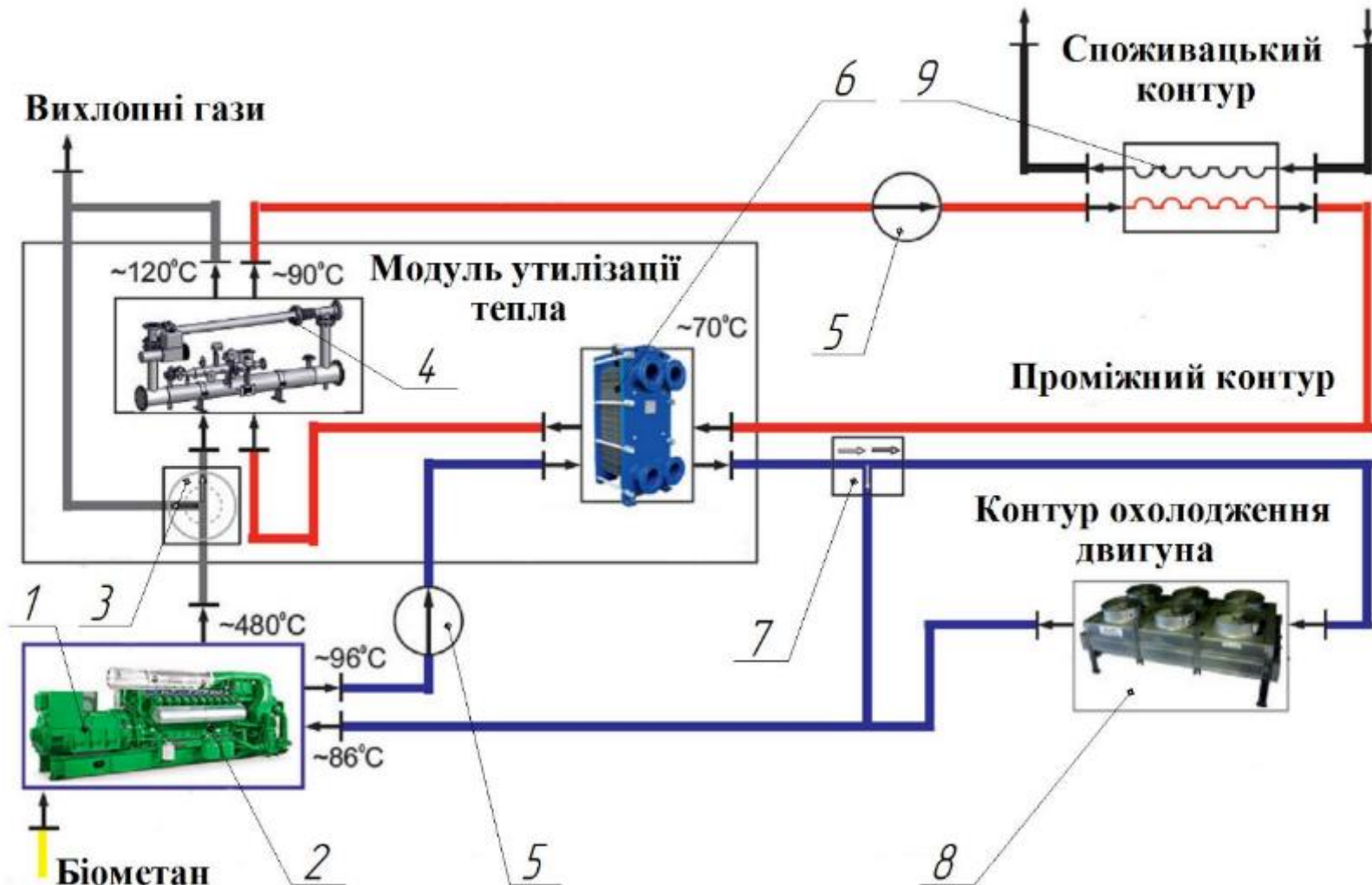


Схема виробництва тепла когенераційною установкою:

- 1 – електрогенератор, 2 – двигун, 3 – байпас, 4 – утилізатор вихлопних газів, 5 – насос, 6 – теплообмінник контуру охолодження двигуна, 7 – термостат, 8 – радіатор, 9 – теплообмінник системи тепlopостачання (споживацького контуру)

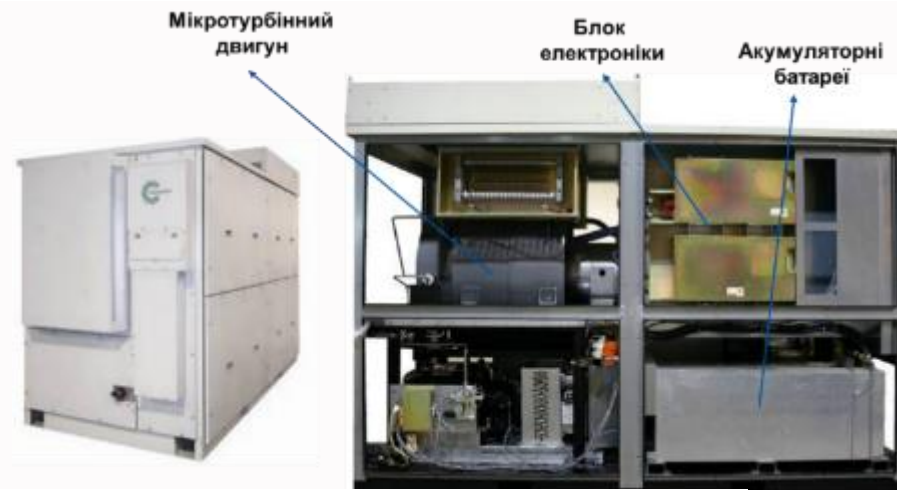


## КОГЕНЕРАЦІЙНІ УСТАНОВКИ



Газова турбіна SGT-800 виробництва Siemens потужністю 47 МВт

Мікротурбінна установка Capstone C200 з електричною потужністю 200 кВт

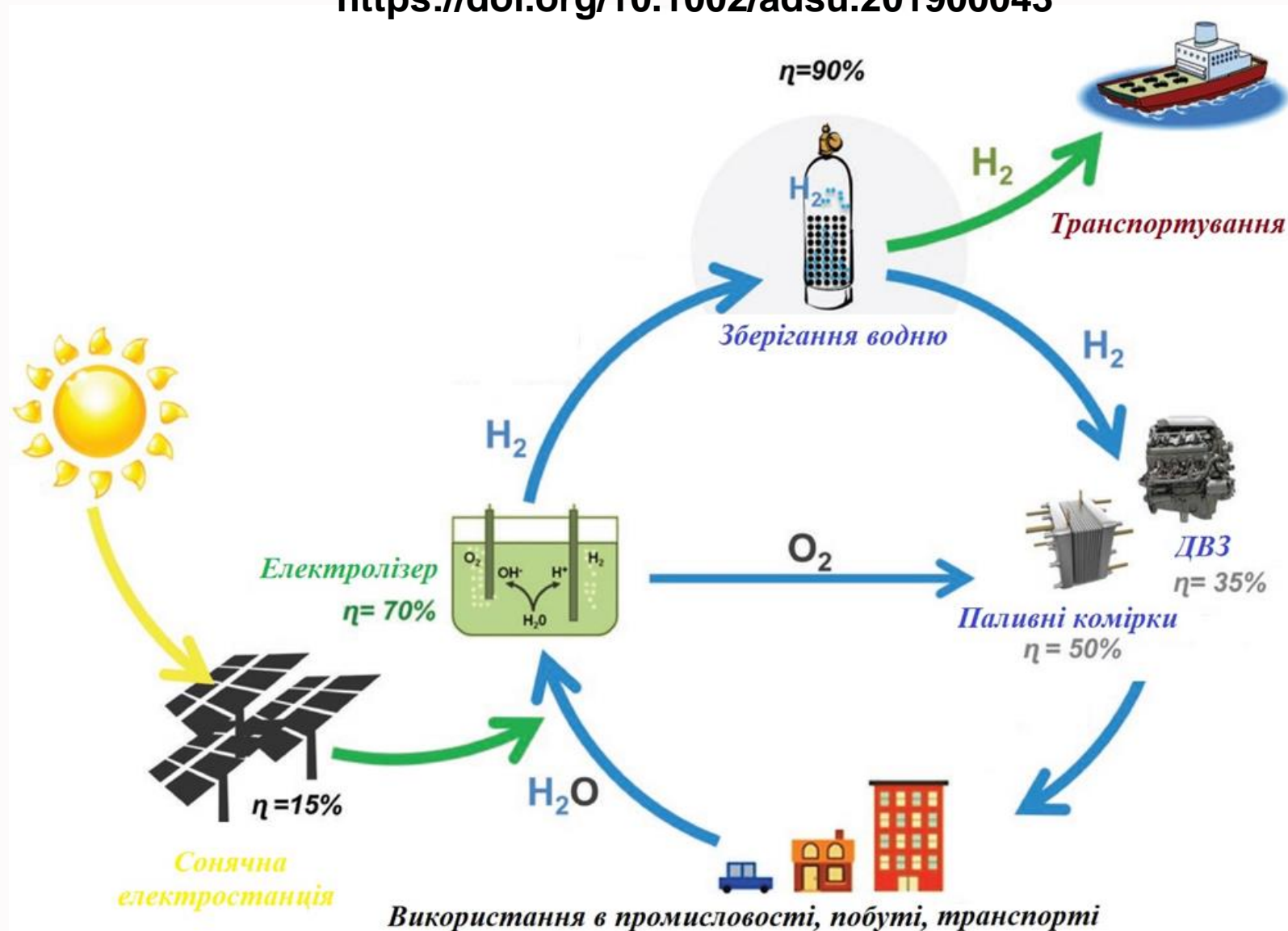


Газопоршнева установка Perkins TRS1 з електричною потужністю 310 кВт



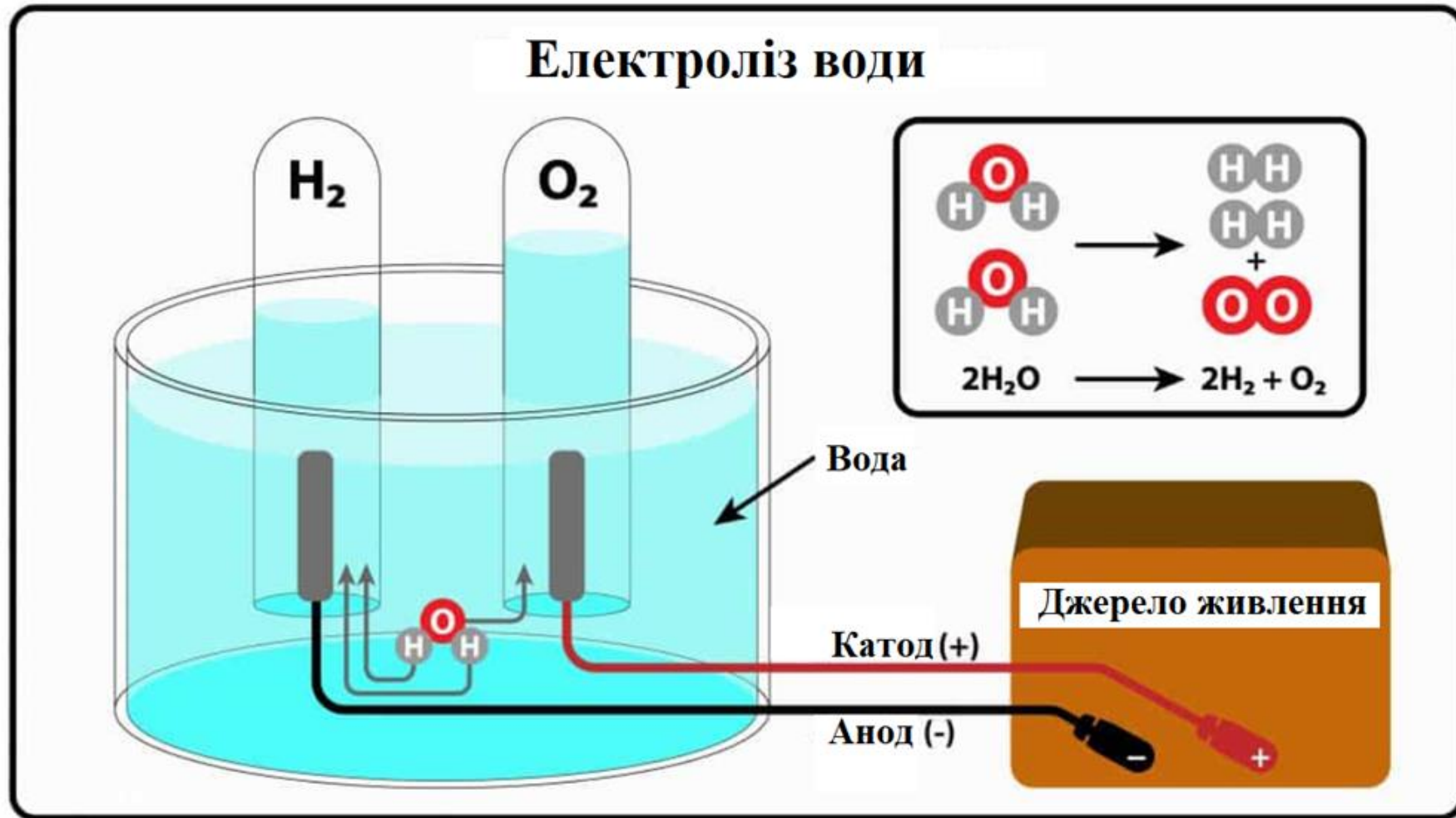
## 6. ВИРОБНИЦТВО ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОВОДНЮ ПРИКЛАД ЛАНЦЮГА ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ

<https://doi.org/10.1002/adsu.201900043>

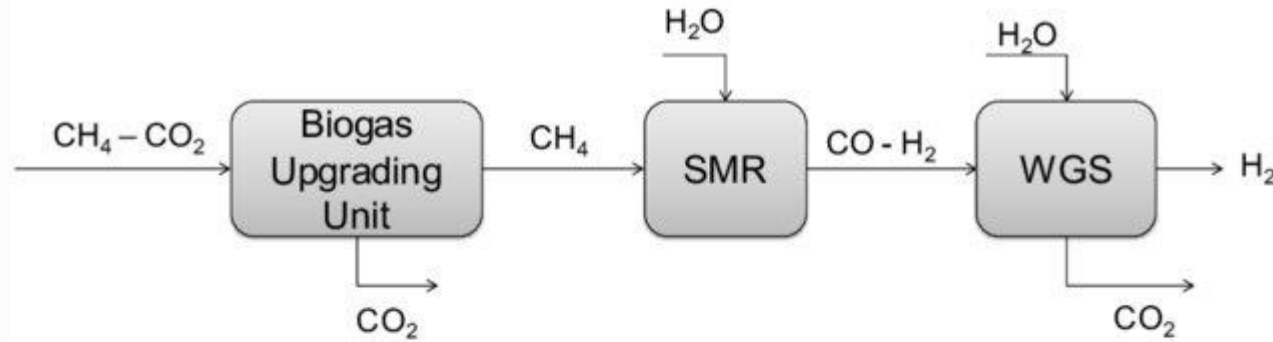




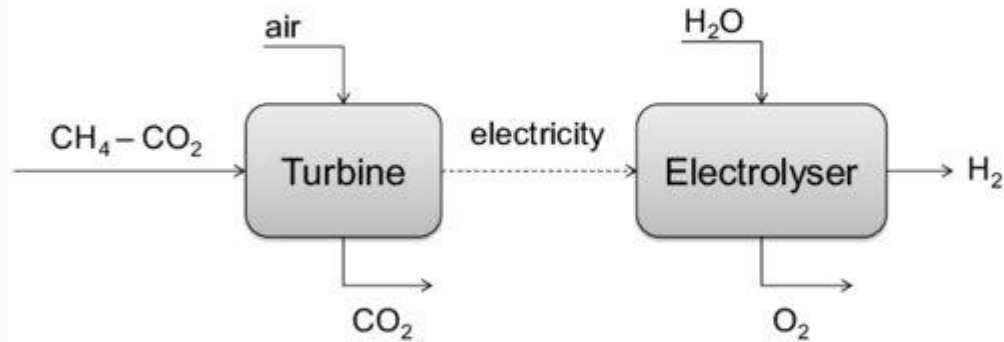
# ОТРИМАННЯ ВОДНЮ ТА КИСНЮ В РЕЗУЛЬТАТІ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ЧИСТОЇ ВОДИ



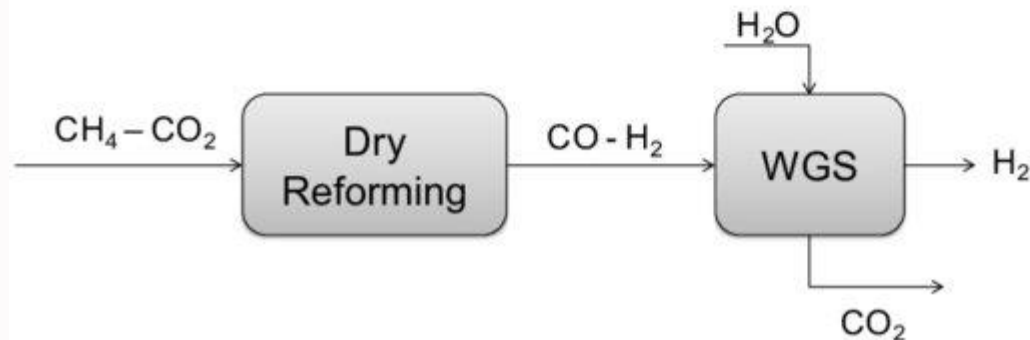
### Upgrading of biogas coupled with steam methane reforming



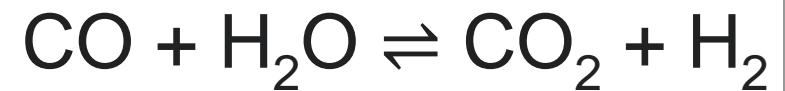
### Biogas combustion coupled with a turbine and an electrolyser



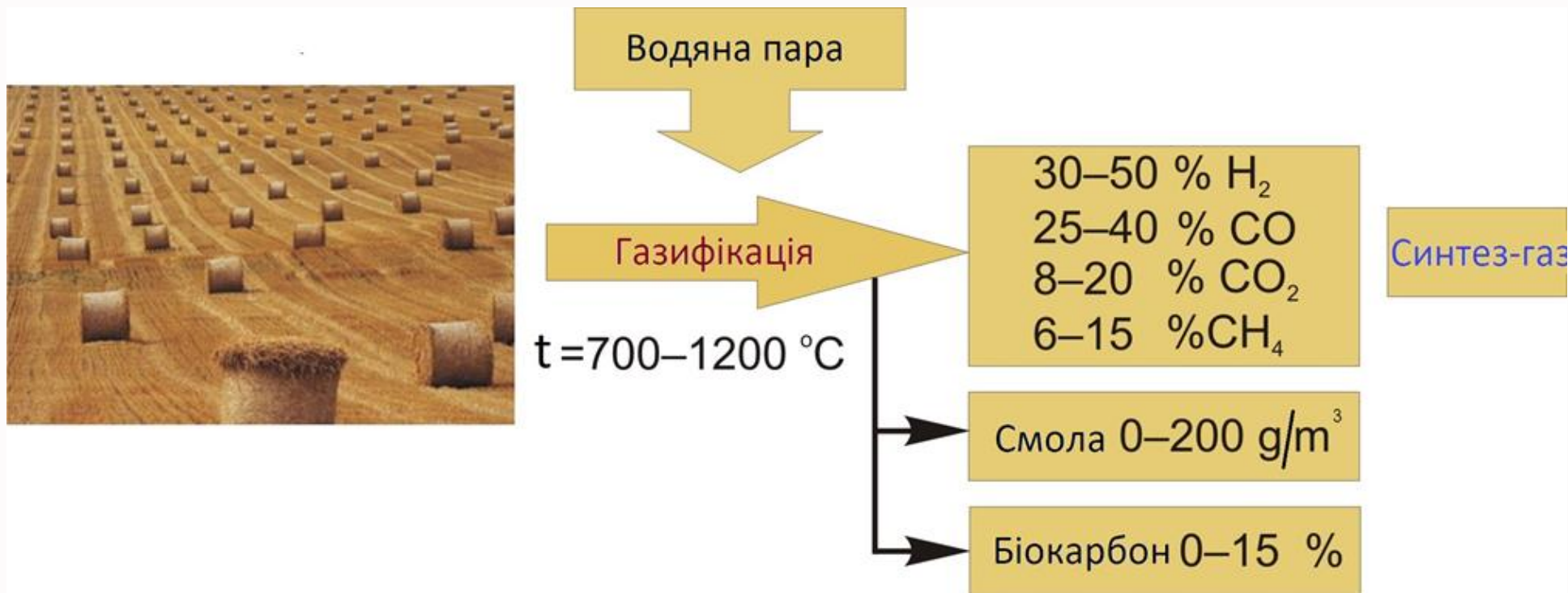
### Direct dry reforming of biogas



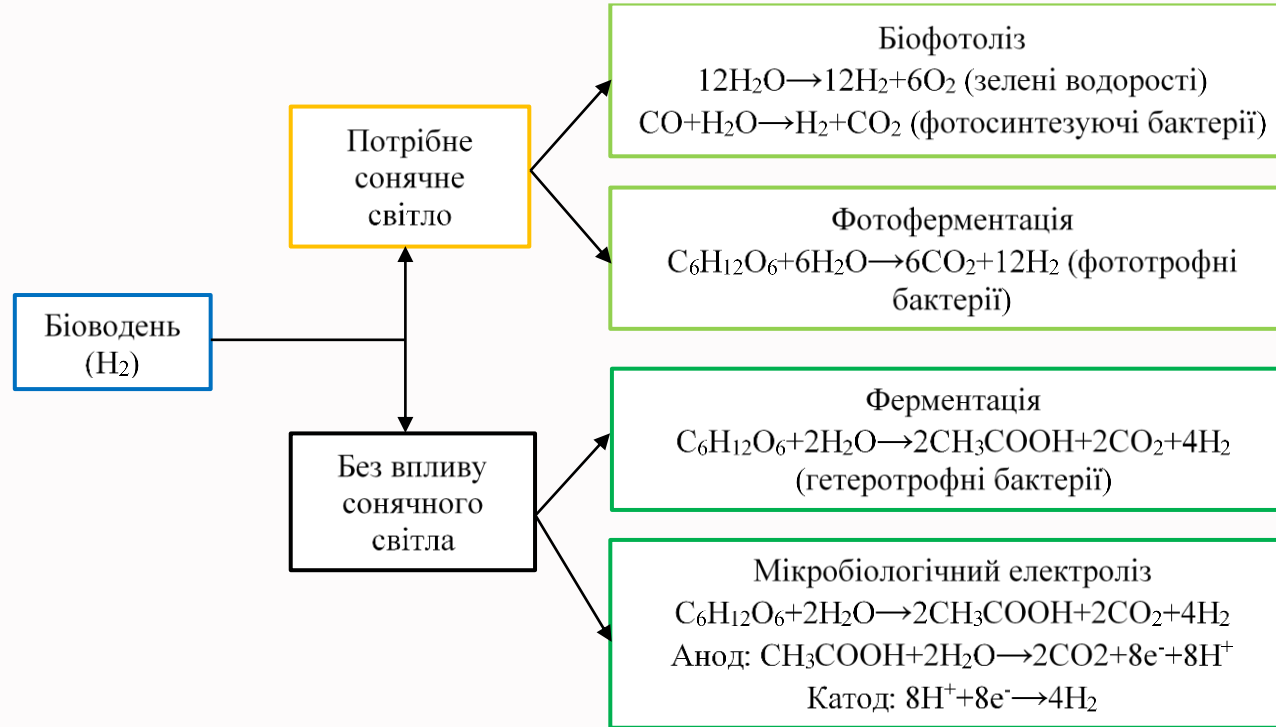
Реакція конверсії вода-газ water-gas shift reaction (WGSR) описує реакцію монооксиду вуглецю та водяної пари з утворенням діоксиду вуглецю та водню:



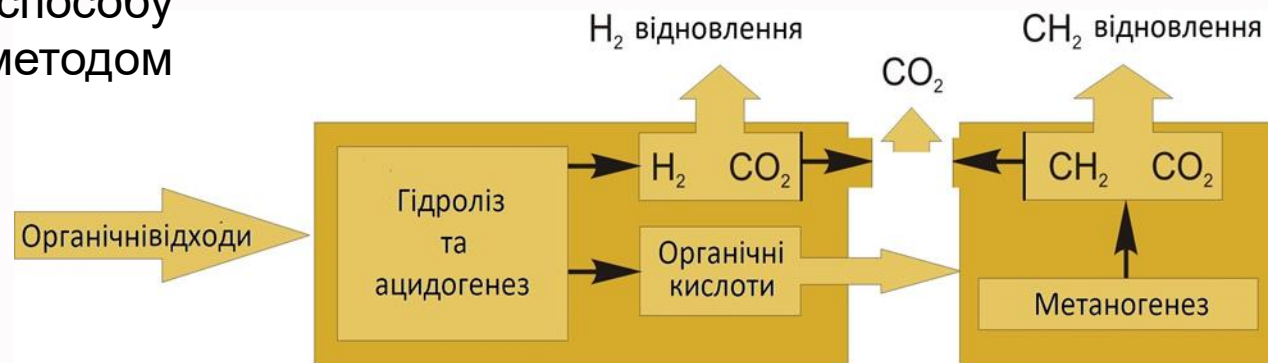
## ВИРОБНИЦТВО БІОВОДНЮ ТЕРМОХІМІЧНИМ СПОСОБОМ



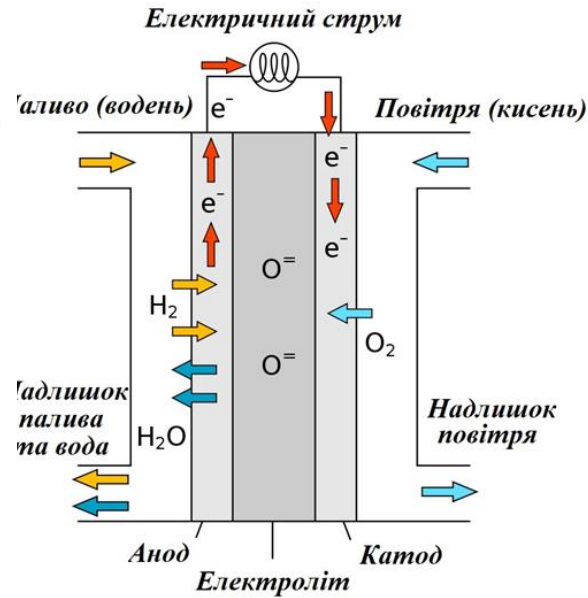
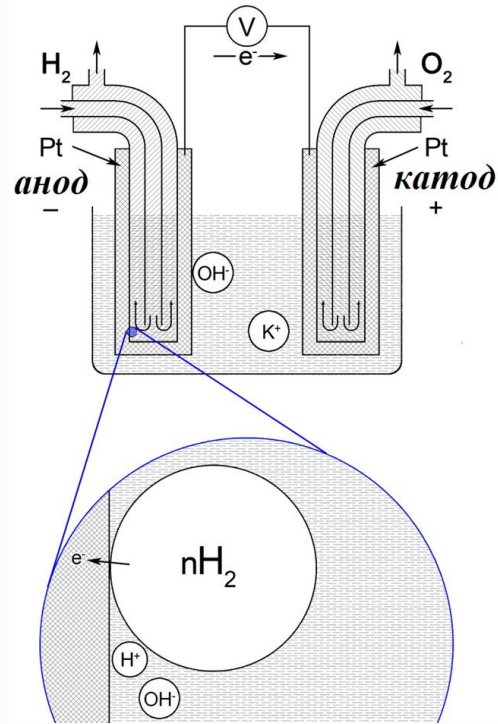
# БІОЛОГІЧНІ СПОСОБИ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ



Схематичне зображення способу виробництва біоводню методом двостадійної ферментації



# Схема воднево-кисневого паливного елемента (електрохімічний генератор)



Ефективність сучасних паливних елементів на рівні 1,80 кг/кВт

На аноді воднево-кисневого паливного елемента окислюється водень, протони, які утворюються, з'єднуються з групами  $\text{OH}^-$ :  

$$2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- = 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$$

На катоді воднево-кисневого паливного елемента, відновлюється кисень відповідно до реакції:  

$$\text{O}_2 + 4\text{e}^- + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{OH}^-$$
  
 Реакцію окиснення в паливному елементі іноді називають **холодне горіння**.





## 8. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ БІОМЕТАНУ

$$B_{\text{ЕЛ}} = W_{\text{ЕЛ}} C_{\text{ЕЛ}} = m_{\text{ГН}} \zeta_{\text{ГН}} - m_{\text{ОД}} \zeta_{\text{ОД}} + E_{\text{ВЕЛ}},$$

$$C_{\text{ЕЛ}} = \frac{m_{\text{ПБ}}}{W_{\text{ЕЛ}}} (\zeta_{\text{ГН}} - \zeta_{\text{ОД}}) + E_{\text{ЕЛ}} = \frac{V_{\text{ПБ}} \rho_{\text{ПБ}}}{W_{\text{ЕЛ}}} (\zeta_{\text{ГН}} - \zeta_{\text{ОД}}) + E_{\text{ЕЛ}} =$$

$$= 365 \frac{V_{\text{Р}} \rho_{\text{ПБ}}}{W_{\text{ЕЛ}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\zeta_{\text{ГН}} - \zeta_{\text{ОД}}) + E_{\text{ЕЛ}},$$

$$W_{\text{ЕЛ}} = \frac{V_{\text{БМ}} q_{\text{БМ}} \eta_{\text{Г}}}{3,6},$$

$$C_{\text{ЕЛ}} = 365 \frac{3,6 V_{\text{Р}} \rho_{\text{ПБ}}}{V_{\text{БМ}} q_{\text{БМ}} \eta_{\text{Г}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\zeta_{\text{ГН}} - \zeta_{\text{ОД}}) + E_{\text{ЕЛ}} = \frac{3,6 \rho_{\text{ПБ}}}{k_{\text{БМ}} q_{\text{БМ}} \eta_{\text{Г}} \tau_{\text{ЗБ}}} (\zeta_{\text{ГН}} - \zeta_{\text{ОД}}) + E_{\text{ЕЛ}},$$

$$\zeta_{\text{ОД}} - \zeta_{\text{ГН}} = \frac{E_{\text{ЕЛ}} k_{\text{БМ}} q_{\text{БМ}} \eta_{\text{Г}} \tau_{\text{ЗБ}}}{3,6 \rho_{\text{ПБ}}}, \quad \zeta_{\text{ОД}} - \zeta_{\text{ГН}} = \frac{(E_{\text{ЕЛ}} + A_{\text{ЕЛ}}) k_{\text{БМ}} q_{\text{БМ}} \eta_{\text{Г}} \tau_{\text{ЗБ}}}{3,6 \rho_{\text{ПБ}}},$$



## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ БІОМЕТАНУ

де  $V_{ЕЛ}$  – витрати на виробництво електроенергії на основі біометану, грн;  $W_{ЕЛ}$  – кількість виробленої електроенергії, кВт год.;  $C_{ЕЛ}$  – виробнича собівартість електроенергії, грн/кВт год.;  $E_{ВЕЛ}$  – виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі біометану без урахування вартості рідкого гною та органічних добрив, грн;  $E_{ЕЛ}$  – питомі виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.;  $q_{БМ}$  – теплотворна здатність біометану, МДж/м<sup>3</sup>;  $\eta_{Г}$  – коефіцієнт корисної дії дизель-генератора при отриманні електроенергії, відн. од.; 3,6 – коефіцієнт перерахунку, МДж/кВт год.;  $A_{ЕЛ}$  – амортизаційні витрати на виробництво електроенергії на основі біометану, грн/кВт год,  $m_{ГН}$  – маса рідкого гною, що надходить на зброджування, т;  $m_{ОД}$  – маса органічних добрив, отриманих після зброджування, т;  $m_{ПБ}$  – маса переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т;

# ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ БІОМЕТАНУ

$$C_{ЕЛ} = \frac{3,6\rho_{ПБ}}{k_{БМ}q_{БМ}\eta_{Г}\tau_{ЗБ}} (\zeta_{ГН} - \zeta_{ОД}) + (1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ})(ТОР_{ЕЛ} + ЕЛ_{ЕЛ} + ЗП_{ЕЛ}),$$

де  $ТОР_{ЕЛ}$  – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки з виробництвом електроенергії, грн/кВт год.;  $ЕЛ_{ЕЛ}$  – вартість витраченої електричної енергії при виробництві електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.;  $ЗП_{ЕЛ}$  – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.

$$C_{ЕЛ} = a_{ЕЛ} \delta \zeta_{ОД} + b E_{ЕЛ},$$

$a_{ЕЛ} = \frac{3,6\rho_{ПБ}}{k_{БМ}q_{БМ}\eta_{Г}\tau_{ЗБ}}$  – потреба в біомасі для отримання 1 кВт год. електроенергії за час зброджування, т/кВт год.

$E_{ЕЛ} = ТОР_{ЕЛ} + ЕЛ_{ЕЛ} + ЗП_{ЕЛ}$  – питомі виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі біометану без урахування вартості органічних добрив, грн/кВт год.

## ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ СОБІВАРТОСТІ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЙОГО ОСНОВІ

Показник	Позначення	Значення
Потреба в біомасі для отримання 1 м <sup>3</sup> біометану за час зброджування, т/м <sup>3</sup>	$a_{\text{БМ}}$	53,2
Потреба в біомасі для отримання 1 кВт год. електроенергії за час зброджування, т/кВт год.	$a_{\text{ЕЛ}}$	13,6
Коефіцієнт, що враховує загальновиробничі та загальногосподарські витрати, відн. од.	$b$	1,15



Програма управління знаннями для розвитку сталої біоенергетики

# Дякуємо!

**Геннадій Голуб**

[gagolub@ukr.net](mailto:gagolub@ukr.net)



**Савелій Кухарець**

[kikharets@gmail.com](mailto:kikharets@gmail.com)

