



European Bank
for Reconstruction and Development



IBBK
BIOGAS

Програма управління знаннями для розвитку сталої біоенергетики

Процес анаеробного зброджування:

*теоретичні основи, технологічні
режими, матеріальні баланси*

Кучерук П.П.

Біоенергетична асоціація України
член Експертної ради, к.т.н.

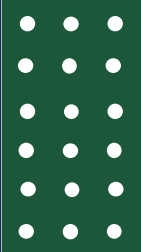
07/11/2023



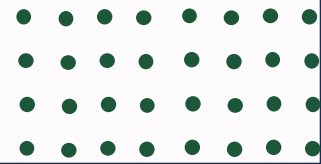
Зміст

- 01** Теоретичні основи метанового бродіння
- 02** Технологічні режими роботи біогазових установок
- 03** Матеріальні баланси у системі сировина-біогаз-дигестат





Теоретичні основи метанового бродіння



Що таке бродіння?

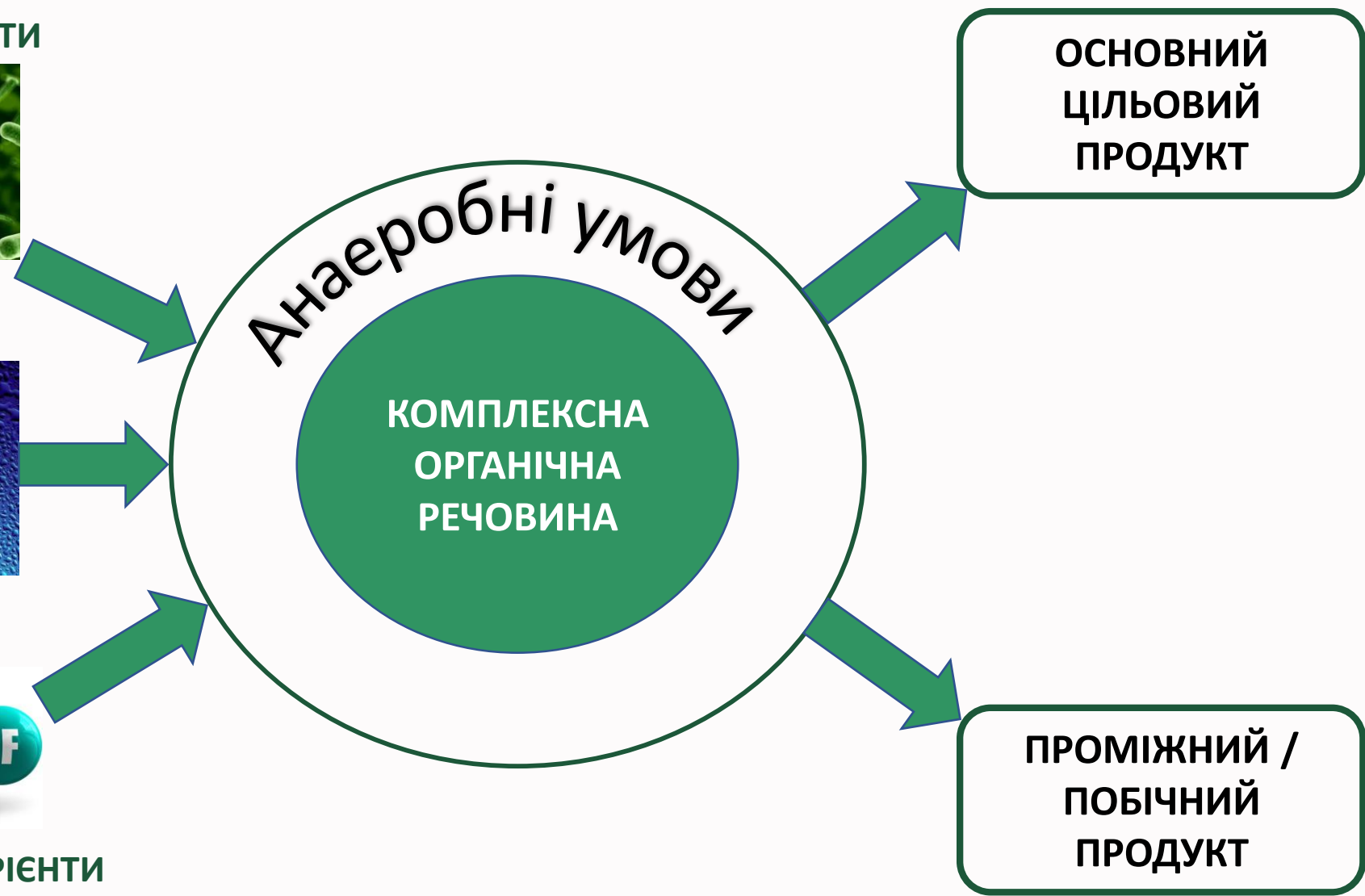
БАКТЕРІЇ + ФЕРМЕНТИ



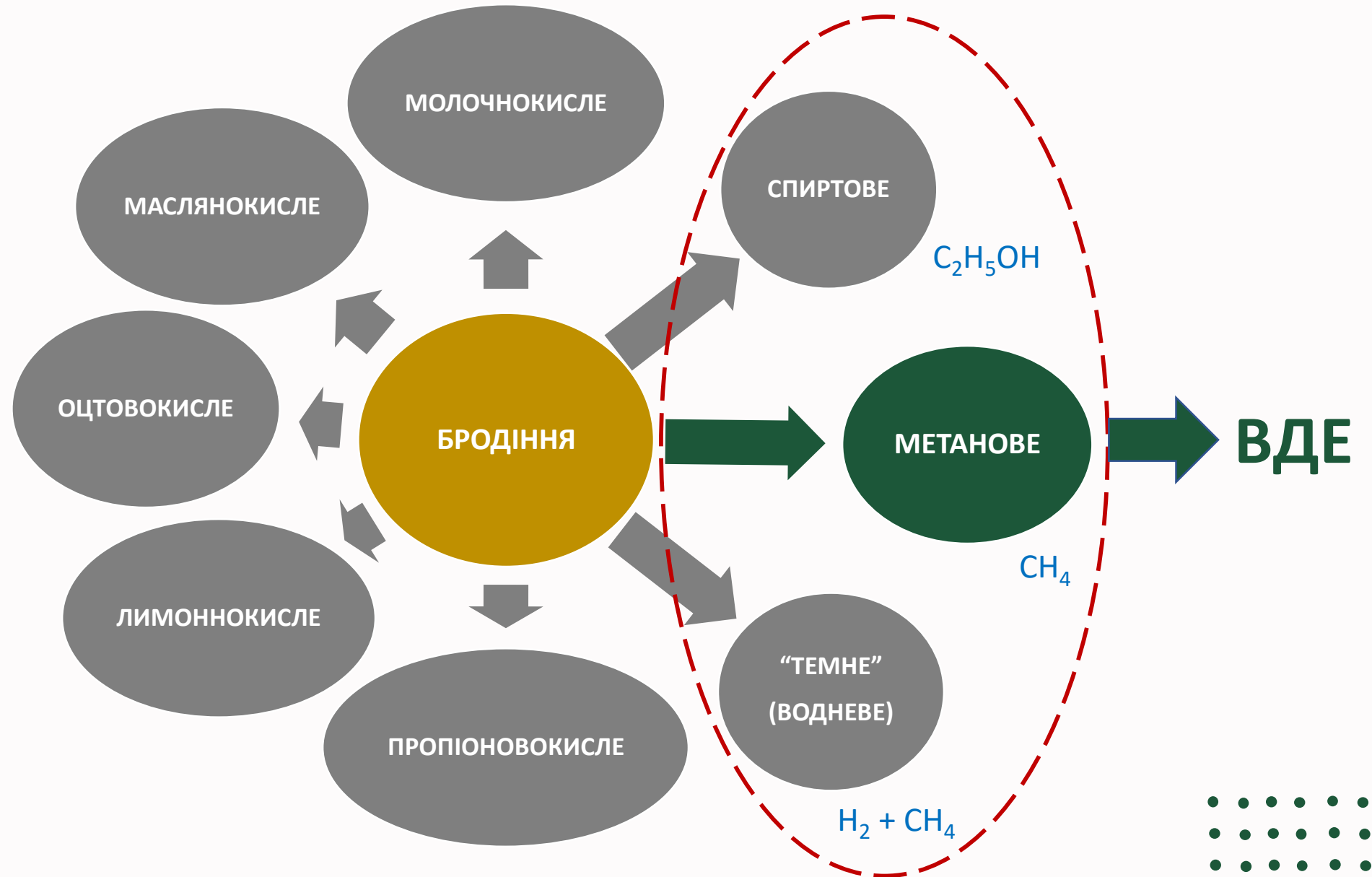
ВОЛОГА



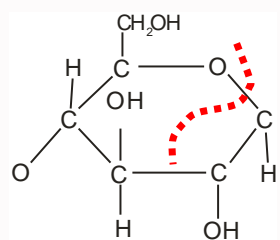
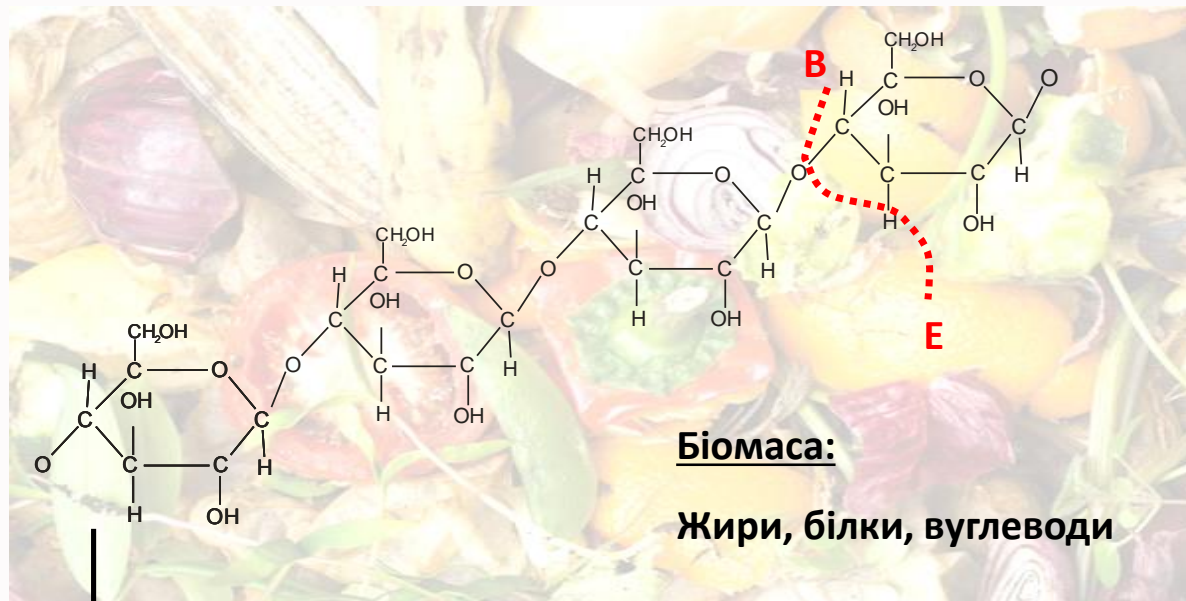
МАКРО- та МІКРОНУТРИЄНТИ



Основні види бродіння

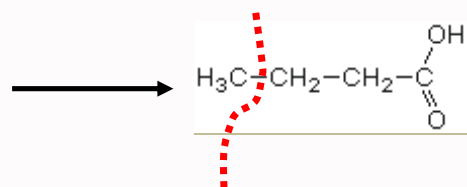


Послідовний процес розпаду комплексної органічної речовини в процесі метанового бродіння



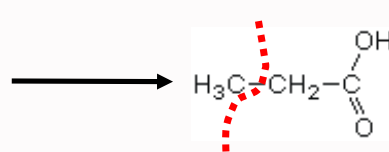
Проміжні продукти:

Цукри, жирні
кислоти,
амінокислоти

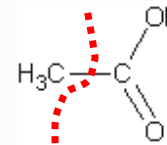


**Формування жирних
кислот:**

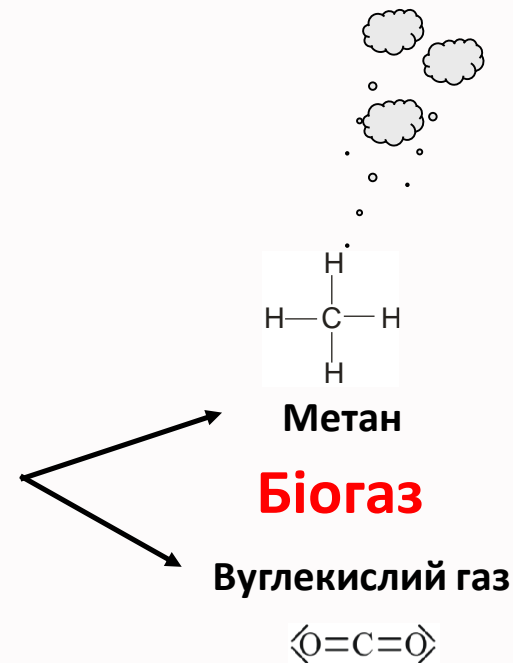
Масляна (етилоцтова)
кислота



**Метилоцтова
(пропіонова)
кислота**



**Метанкарбонова
(оцтова) кислота**



Теорія метанового бродіння

Стадії процесу

ГІДРОЛІЗ

КИСЛОТОГЕНЕЗ

АЦЕТОГЕНЕЗ

МЕТАНОГЕНЕЗ

$$\mu_4 < \mu_3 < \mu_2$$

$$\rho_{\Sigma} = \rho_{\text{lim}}(\rho_1; \rho_2; \rho_3; \rho_4)$$

$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ – швидкість процесу, $гСОР \cdot л^{-1} \cdot доба^{-1}$
 $k_{hyd}, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ – константа швидкості, $гСОР \cdot г_{к.м.}^{-1} \cdot доба^{-1}$
 S_1, S_2, S_3 – концентрація проміжних продуктів, $гСОР \cdot л^{-1}$
 X_1, X_2, X_3, X_4 – концентрація бактерій, $г_{к.м.}^{-1} \cdot л^{-1}$
 I_2, I_3, I_4 – коефіцієнт інгібування, ч.о.
 СОР – суха органічна речовина

Швидкість

$$\rho_1 = k_{hyd} \cdot X_1$$

$$\rho_2 = \mu_2 \cdot \frac{S_1}{K_2 + S_1} \cdot X_2 \cdot I_2$$

$$\rho_3 = \mu_3 \cdot \frac{S_2}{K_3 + S_2} \cdot X_3 \cdot I_3$$

$$\rho_4 = \mu_4 \cdot \frac{S_3}{K_4 + S_3} \cdot X_4 \cdot I_4$$

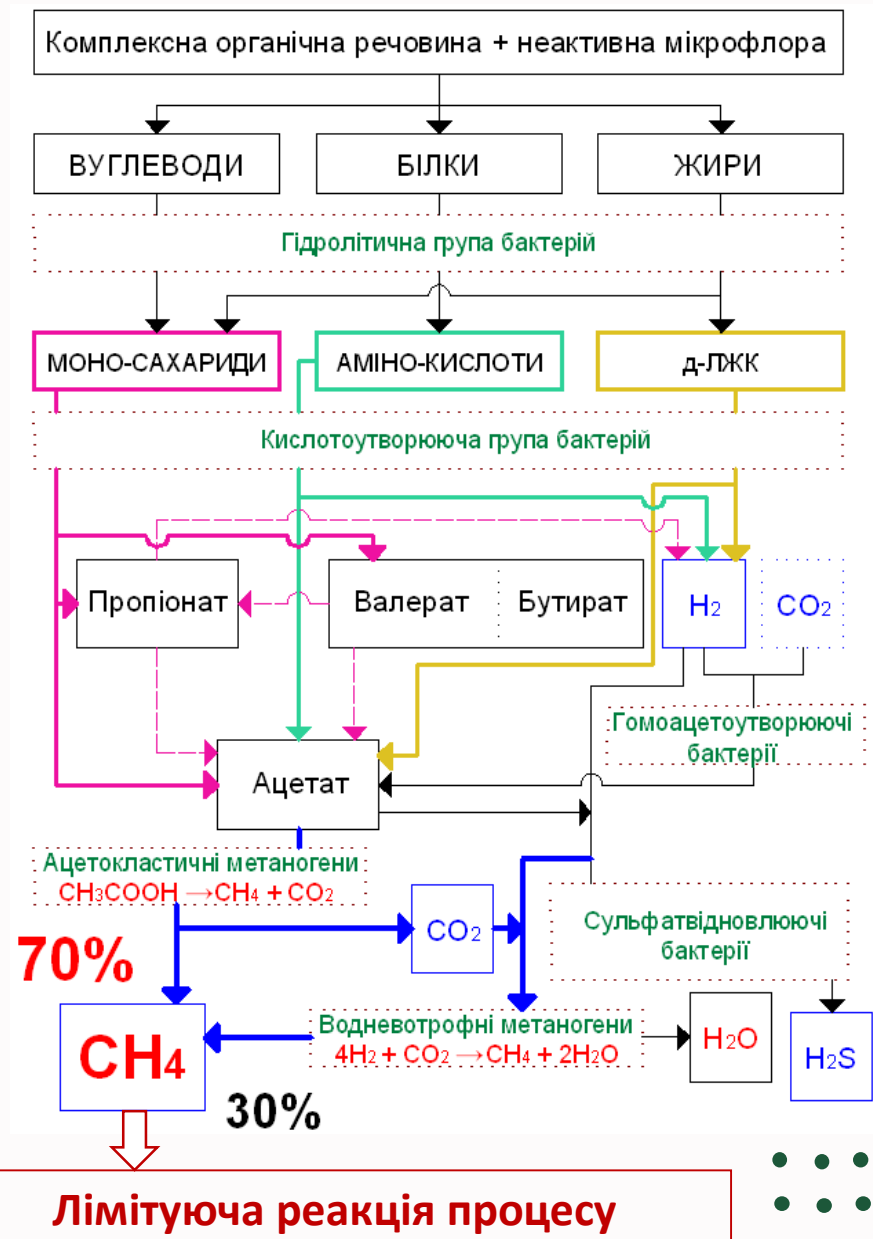


Схема процесу

4 фази ферментації в одностадійному процесі

➤ ... перебігають одночасно

У ферментерах для збродження продуктів сільського господарства, розмежування стадій розкладання не є надважливим

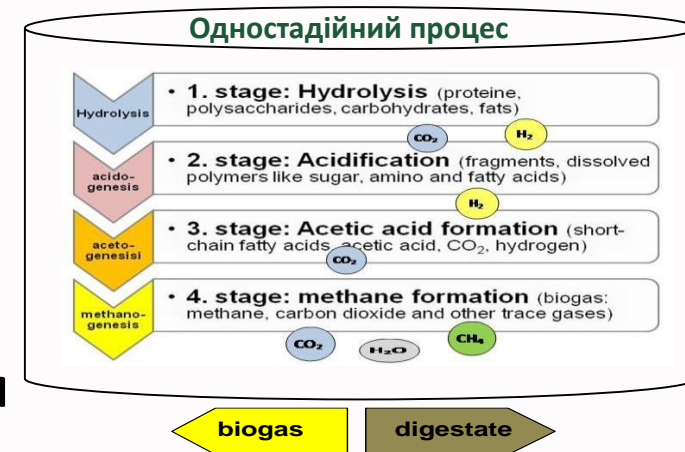
➤ ... сильно залежать одне від одного

Проміжні продукти реакцій є компонентами наступних реакцій




➤ ... можуть пригнічувати активність одне одного

- Проміжні продукти реакцій можуть не утворюватися
- Інгібування продуктами реакції

➤ ... чим ближче до кінцевої стадії, тим повільніше розвиваються
Гідроліз перебігає найшвидше, метаноутворення - найповільніше

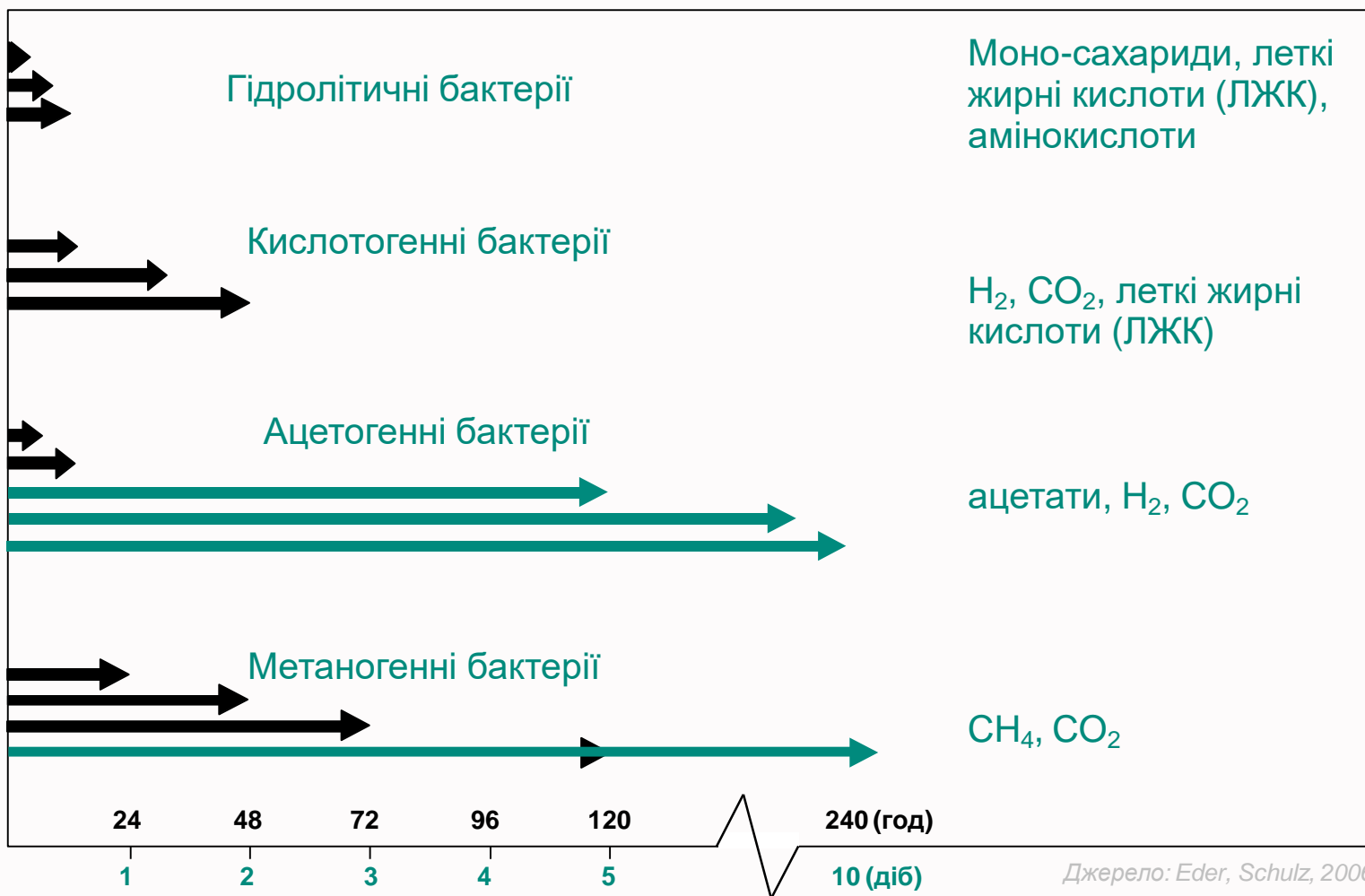


Групи бактерій за їх чутливістю до O₂

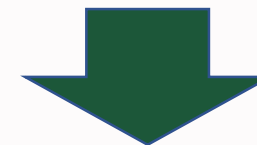
1. Суворі аероби:  O₂ є необхідним
2. Факультативні аероби:  толерують присутність O₂
3. Суворі анаероби:  O₂ є токсичним

Стадія процесу	Види бактерій	Environmental requirements
1. гідроліз	<i>Cellulomonas, Bacillus, Mycobacterium</i>	факультативні аероби, pH 4 - 6
2. кислотогенез	<i>Synthrophobacter, Clostridium, Enterococcus, Bacteroides</i>	суворі анаероби, pH 4 - 6
3. ацетогенез	<i>Acetobacterium, Synthrophomonas</i>	суворі анаероби, pH 4 - 6
4. метаногенез	„Архебактерії“, <i>Methanobacterium, - sarcina, -microbium a.o.</i>	суворі анаероби, pH 7.4 - 8

Швидкість росту бактерій



Анаеробні бактерії

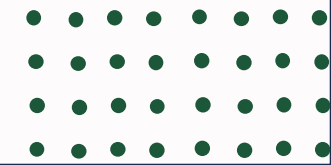


Бактерії-сапрофіти < 24 год
Клостридії 24 - 36 год

Ацетогенні бактерії 80 - 90 год

Methanococcus близько 10 діб
Methanosarcina barkeri 5 - 15 діб !

Для порівняння: Escherichia coli 20 хв
Аеробні бактерії Бактерії, що містяться в активному мулі 2 год



Температурні режими метанового бродіння

Термофільний (50–60 °C)

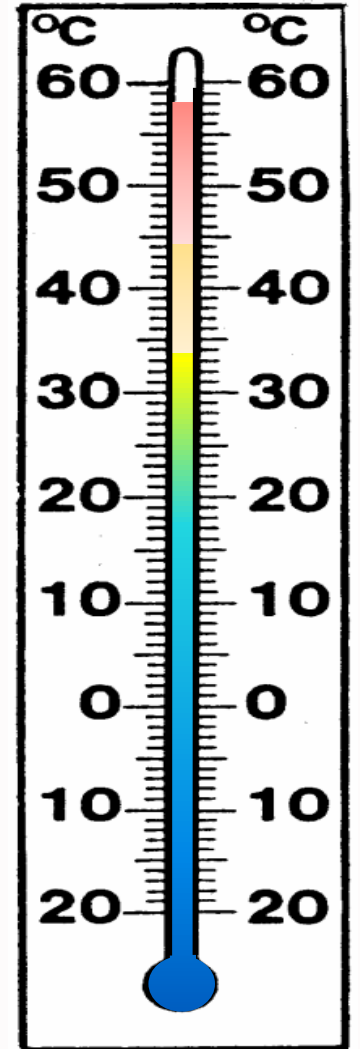
- Високий вихід біогазу після короткого часу утримання
- Чутливий біоценоз (колонії мікроорганізмів)
- Необхідно бути обережним з додаванням субстрату з високою швидкістю розкладання (етап гідролізу розвивається занадто швидко)

Мезофільний - Термотолерантний (32–45 °C)

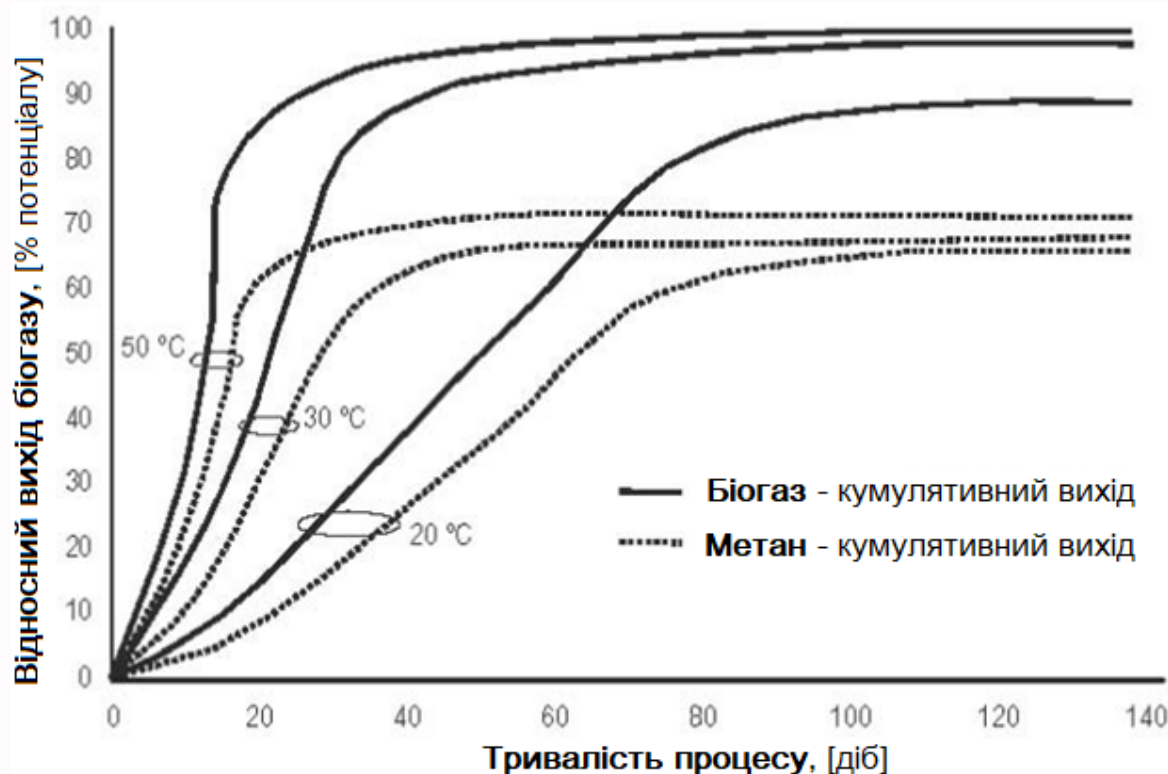
- Стабільний біоценоз → цілком задовільний рівень виходу біогазу з прийнятним часом утримання субстрату
- Поширений, особливо при «вологій» ферментації

Психрофільний (< 25 °C)

- Низька швидкість розмноження біоценозу
- Високий час утримування
- Неефективний для промислового виробництва біогазу
- Наразі не використовується в Європі



Вплив температури на швидкість виходу біогазу



Інтерпретація рівняння ван-Хоффа для визначення зміни швидкості реакції з K_1 до K_2 при зміні температури від T_1 до T_2

$$K_2 = K_1 \exp(\theta \cdot (T_2 - T_1))$$

$$\theta = \frac{\Delta H^0}{RT_1^2}$$

ΔH^0 - теплота реакції

R - універсальна газова стала

- Підвищення T = прискорює процеси деструкції
- Термофільний режим є найбільш чутливим до змін в реакційному середовищі, таких як T , pH , NH_4-N

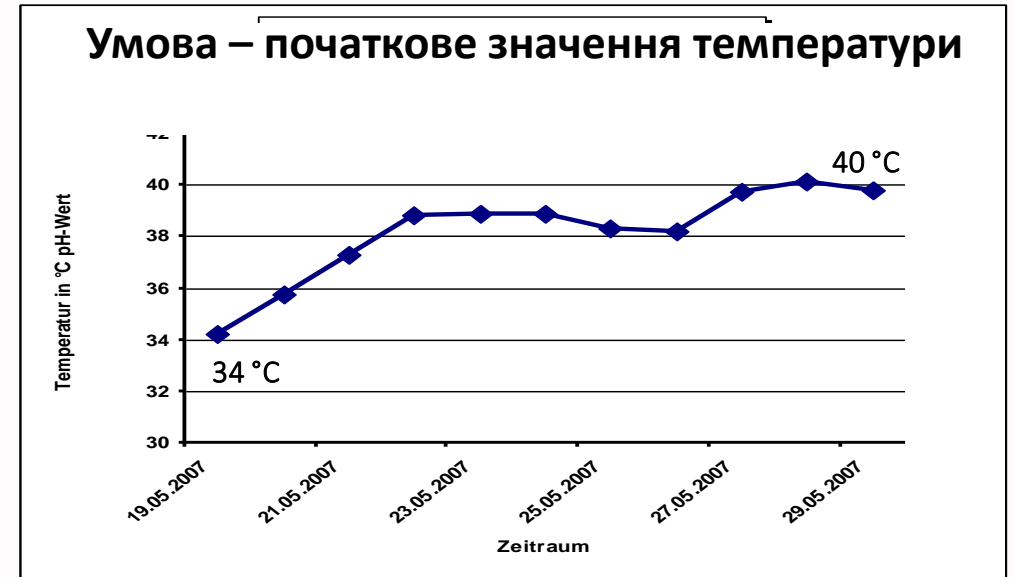
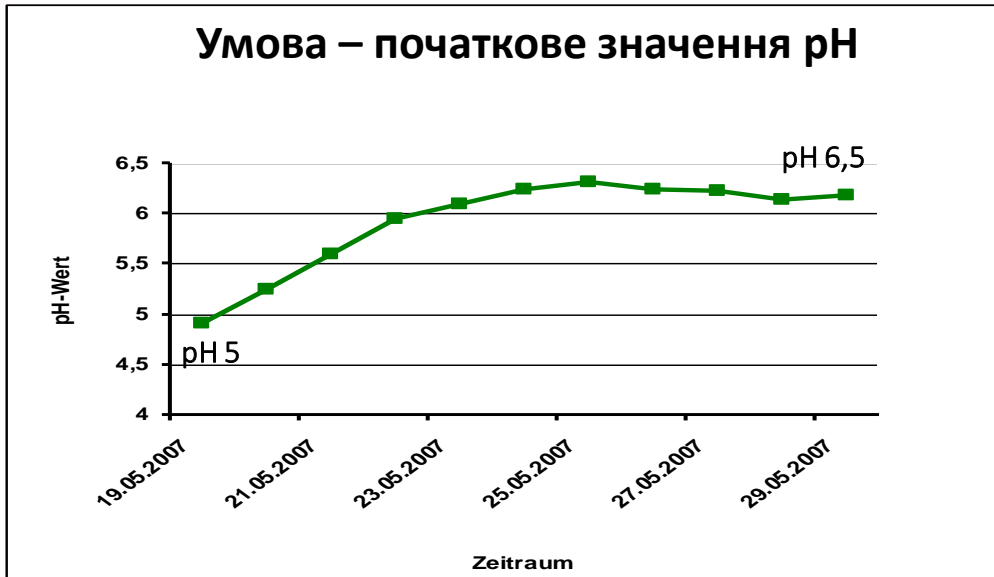
Температурний режим	Температура (Т)	Час гідравлічного утримання
психрофільний	< 20 °C	80 - 120 діб
мезофільний	39 – 43 °C	30 – 50 діб
термофільний	50 – 52 °C	10 – 20 діб

Параметри середовища при анаеробній ферментації

Вимірюваний параметр	Гідроліз/окислення	Метаноутворення
Температура	25 – 35 °C	Мезофільний: 32 – 42 °C Термофільний: 50 – 58 °C
Рівень рН	5,2 – 6,3	6,7 – 7,5
Відношення C:N	10 - 45	20 - 30
Вміст твердої речовини	< 40 % CP	< 30 % CP
Редокс (окисно-відновний) потенціал	+400 – 300 мВ	< -250 мВ
Потреба в C:N:P:S	500 : 15 : 5 : 3	600 : 15 : 5 : 3
Мікроелементи	Конкретні вимоги відсутні	Ключові: Ni, Co, Mo, Se

FAL – TB	Environmental requirements for the fermentation of raw – and residual substrates	W0104124CDR
----------	--	-------------

За яких умов починається анаеробна ферментація



параметр	Гідроліз	Метаногенез
Температура	25 – 35 °C	Метаноутворення: 32-42 °C Термофільний: 50-58 °C
рН	5,2 – 6,3	6,7 – 7,5

Джерело: Novatech GmbH Support program



Найбільш важливі вимоги в процесі ферментації висуваються до:

1. Температури
2. Рівня рН
3. Солевмісту
4. Мікроелементів

Рівень рН

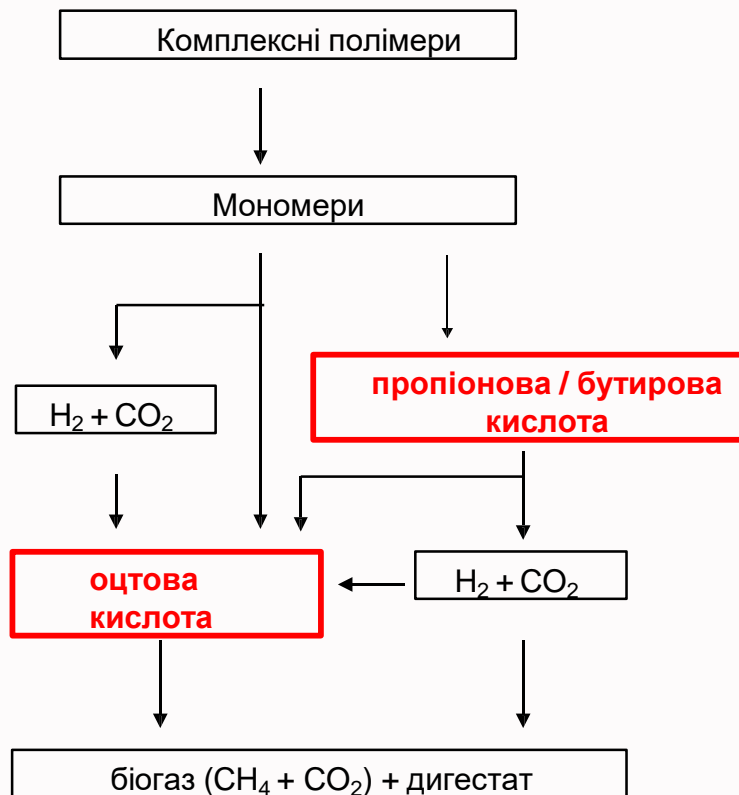
Концентрація іонів гідрогену (H^+)

Важливо: $\text{H}^+ \neq \text{H}_2$

- Метаболіти (проміжні продукти обміну речовин) знижують рівень рН, проте:
 - Біогазові реактори, в яких здійснюється ферментація посліду тварин, в нормальному стані містять ефективні буферні розчини:
Карбонатний буфер, аміачний буфер, ...
- Рівень рН не може слугувати одиничним визначальним параметром, за яким оцінюється увесь процес ферментації

Буферна здатність – визначальний фактор

Леткі жирні кислоти (ЛЖК) - рН



леткі жирні кислоти (ЛЖК):

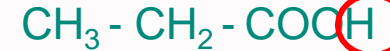
C5 валеріанова к-та



C4 бутирова к-та



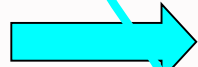
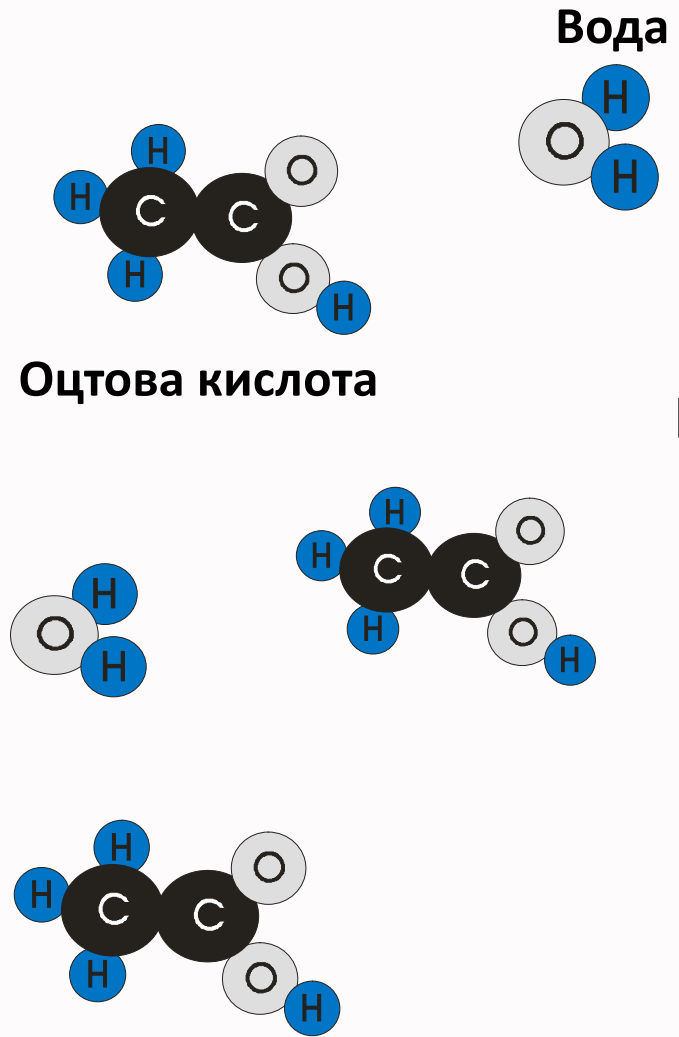
C3 пропіонова к-та



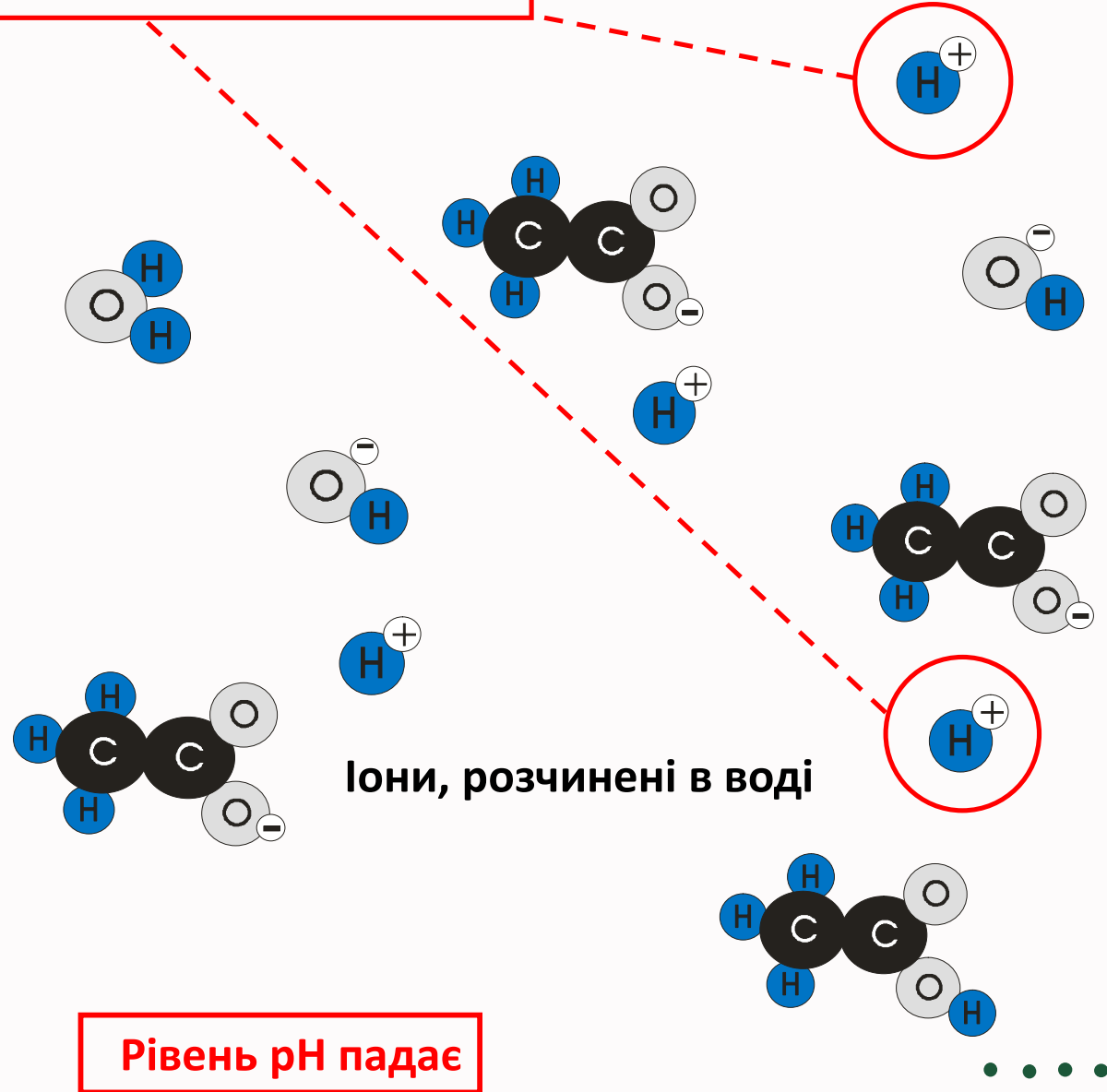
C2 оцтова кислота



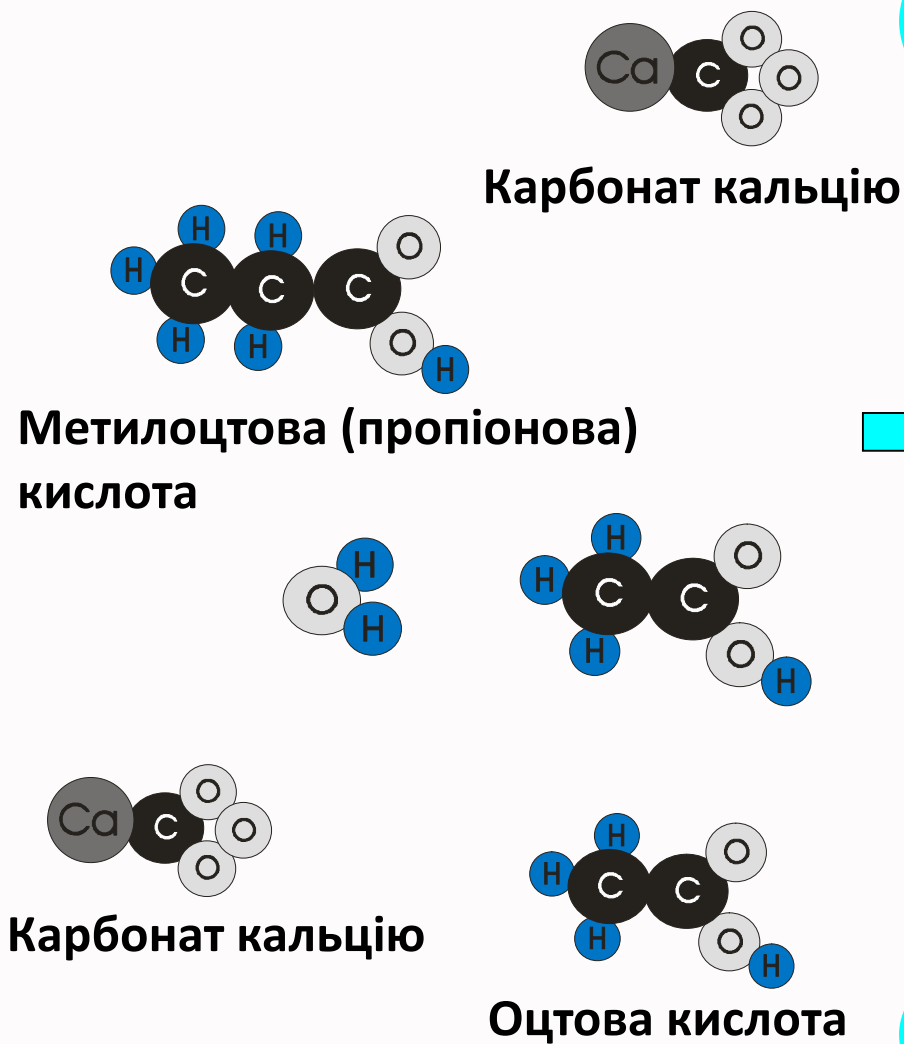
Без буферу:



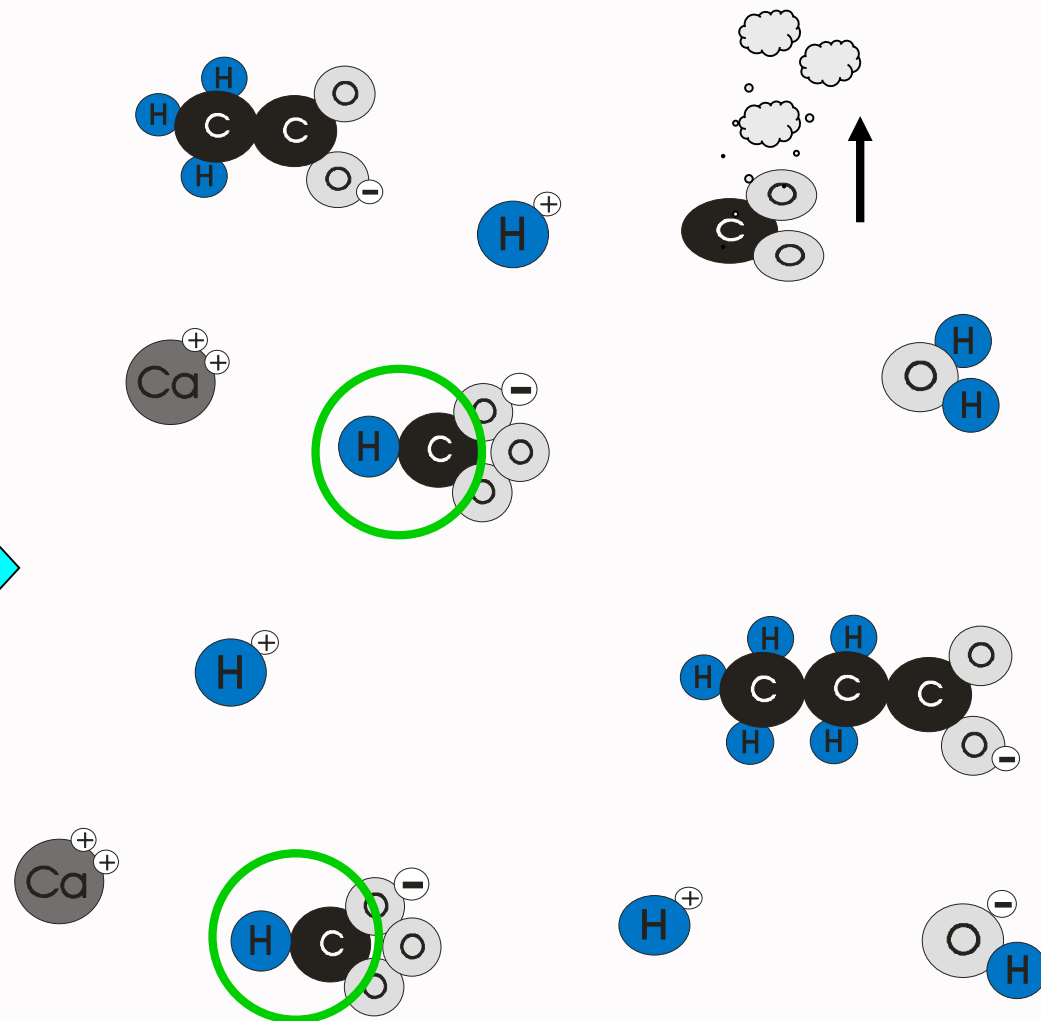
Окислення іонами H⁺



З буфером:

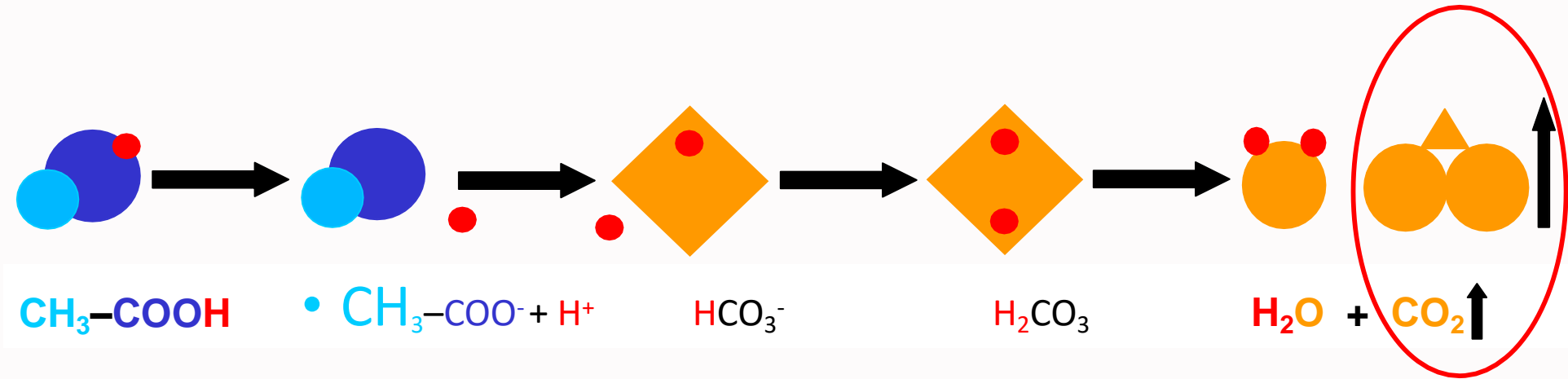


Надлишок іонів H⁺ зв'язується



Рівень рН залишається стабільним

Принцип регуляції рН з допомогою буферної карбонатної лужності

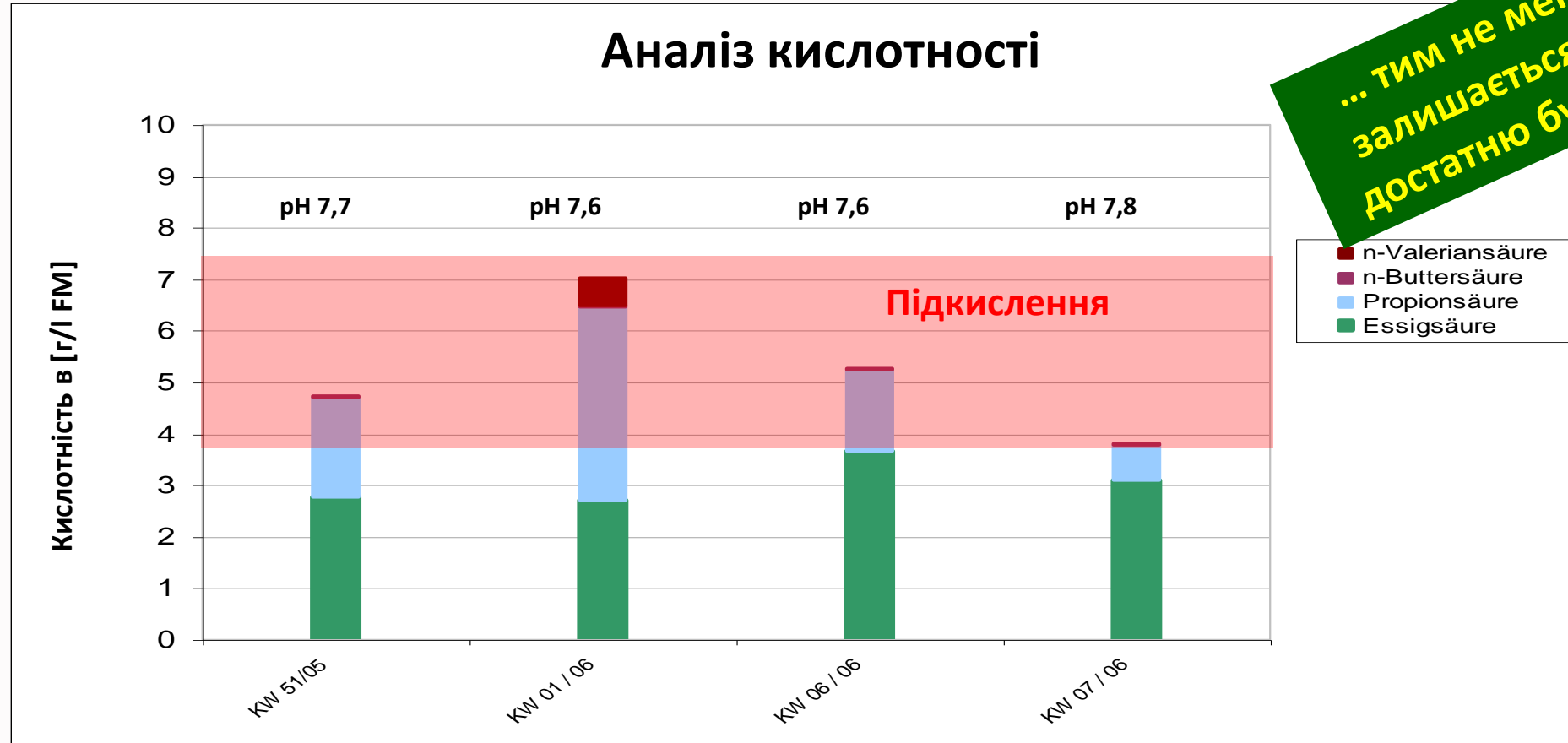


- Карбонатна лужність (= гідрокарбонат/ HCO_3^-) нейтралізує (= буферизує) кислоти (H^+) стабілізує рН
- Підтримує стабільність процесу в біореакторі

➔ Карбонатна лужність втрачається разом з виділенням CO_2 в біогаз!!!

Стабільність рівня рН при достатній буферній здатності

Аналіз кислотності



... тим не менш, рівень рН залишається сталим через достатню буферну здатність

Джерело: Novatech GmbH Support program

Солевміст або електропровідна здатність

- **Спрощений аналіз солевмісту**
 - *Повинен завжди проводитись у випадку незрозумілих змін процесу*
- **Високий вміст солей зневоднює бактерії**
 - *Осмотичний (дифузний) тиск*
- **Одиниця виміру: мСім/см**
 - *значення > 60 мСім/см є критичними*
 - *Коригування на температуру 25°C*
- **Якщо солевміст досяг граничного рівня: додати води**

При ферментації енергетичних культур зазвичай не виникає проблем з даним параметром,

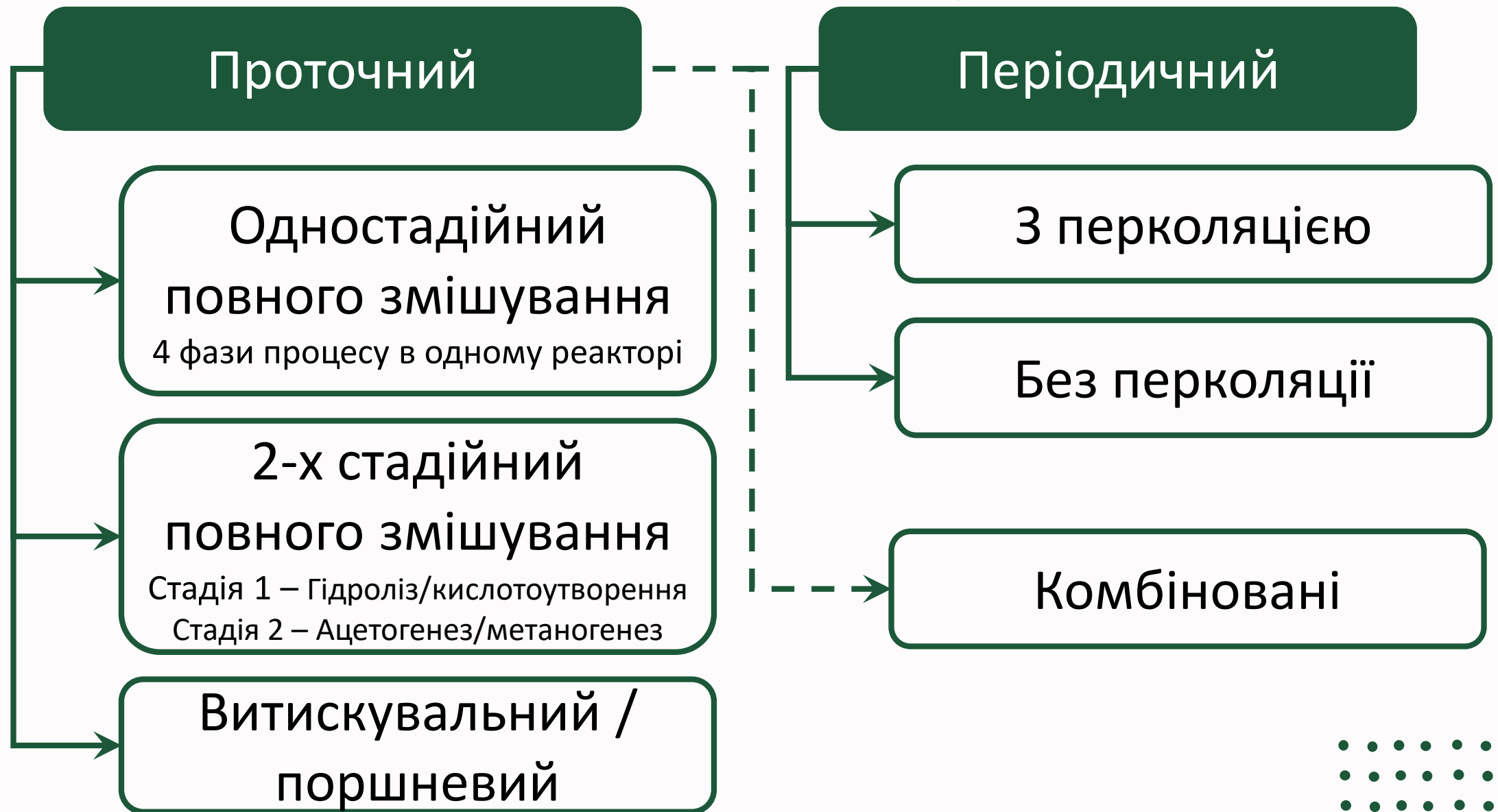
ПРОТЕ

Аналіз солевмісту необхідний при зброджуванні харчових відходів (з їдалень, жировловлювачів, підсолених решток)



Технологічні режими роботи біогазових установок

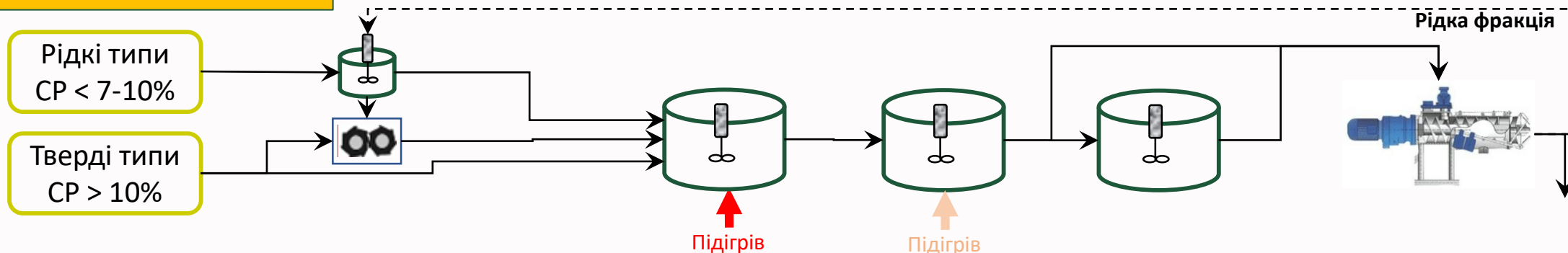
Основні види технологічних режимів анаеробного зброджування



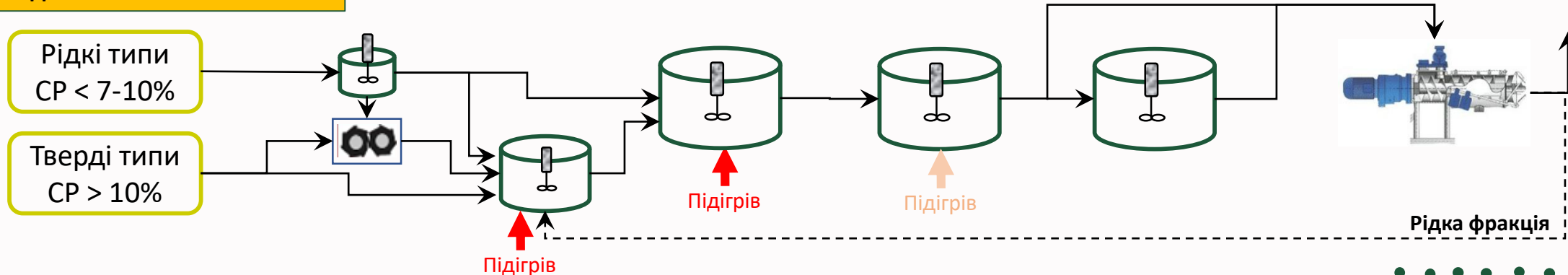
Приклади технологічних схем проточного режиму анаеробного зброджування

Сировина → Подача сировини → Гідроліз → Основний ферментатор → Доброджувач → Накопичувач → Сепарація дигестату

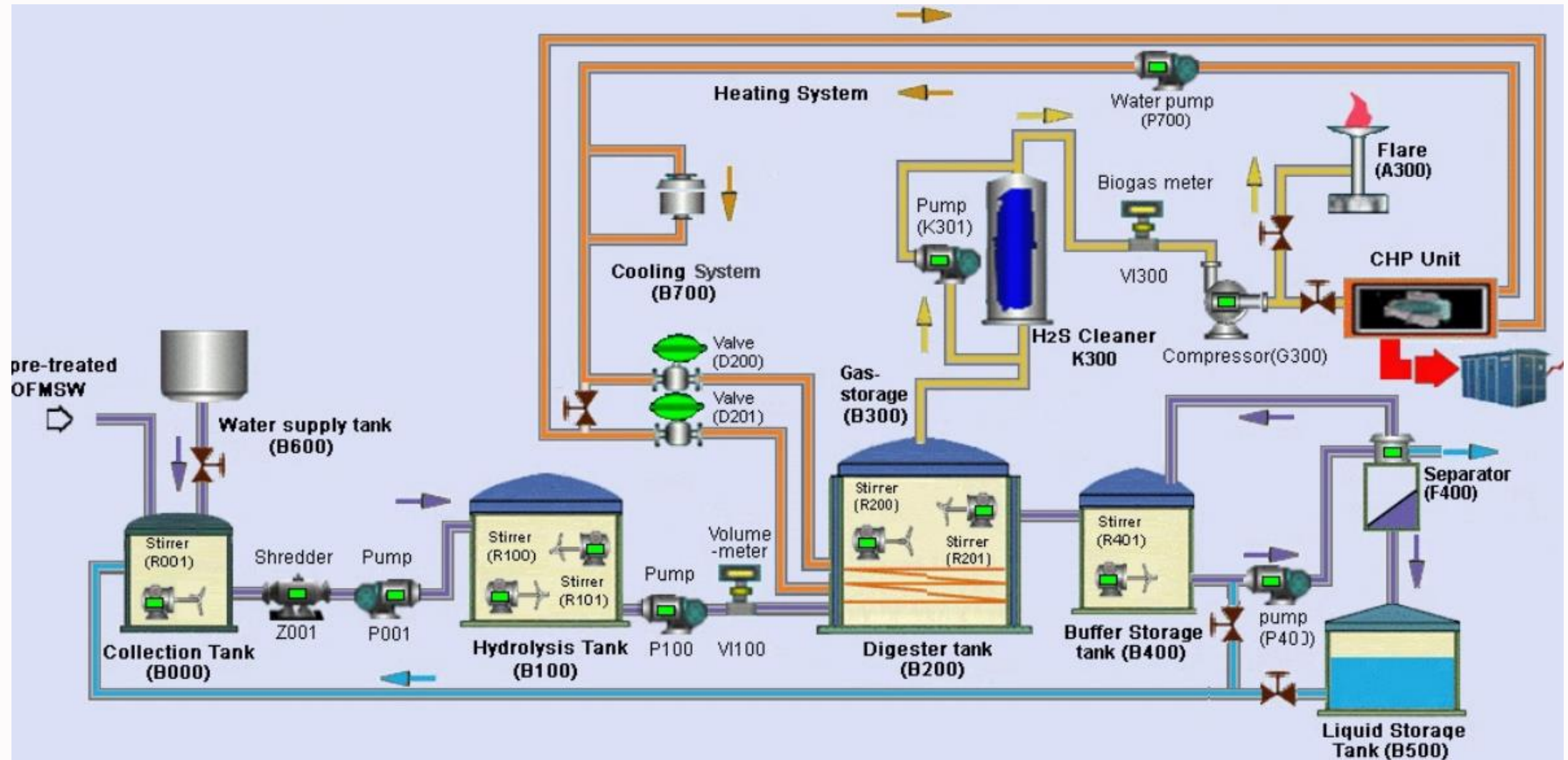
1-стадійна технологічна схема



2-стадійна технологічна схема



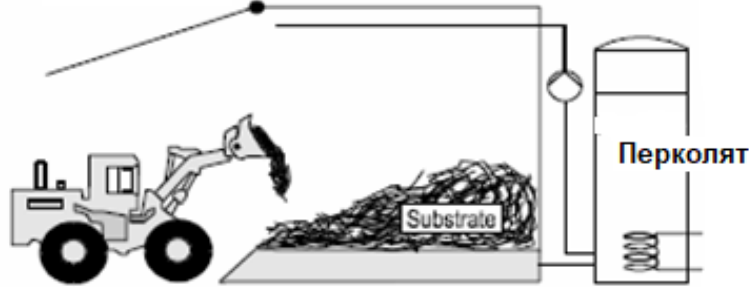
Приклад технологічної схеми БГУ



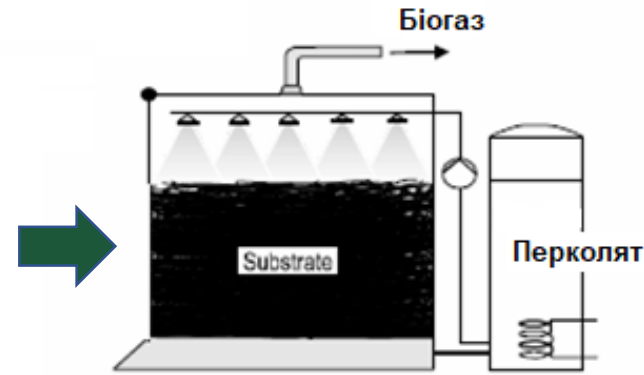
Технології періодичного зброджування

Контейнерний процес з циркуляцією перколяту

Завантаження / вивантаження



Зброджування

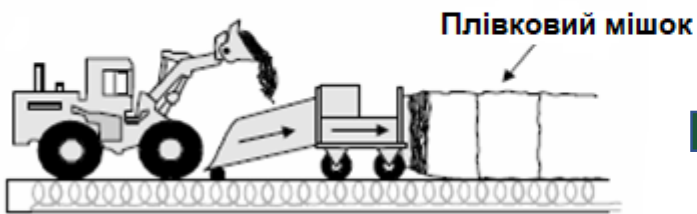


Основні особливості технології

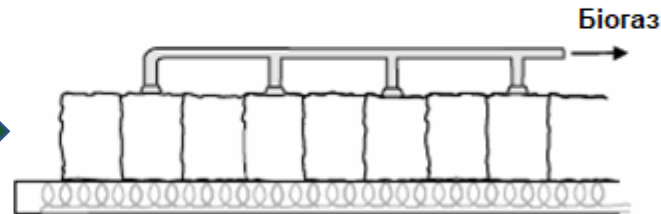
- Придатні для зброджування штабельованих твердих типів сировини
- Менш чутливі до домішок в сировині
- Менш чутливі до параметрів середовища
- Менше споживають електричної енергії
- Потребують попереднього змішування свіжої сировини зі зброженою масою
- Мінімальний вихід рідкої фракції дигестату
- Викиди метану при завантаженні сировини
- Нестабільний склад та обсяг біогазу

Тонельний процес без перколяту

Завантаження / вивантаження

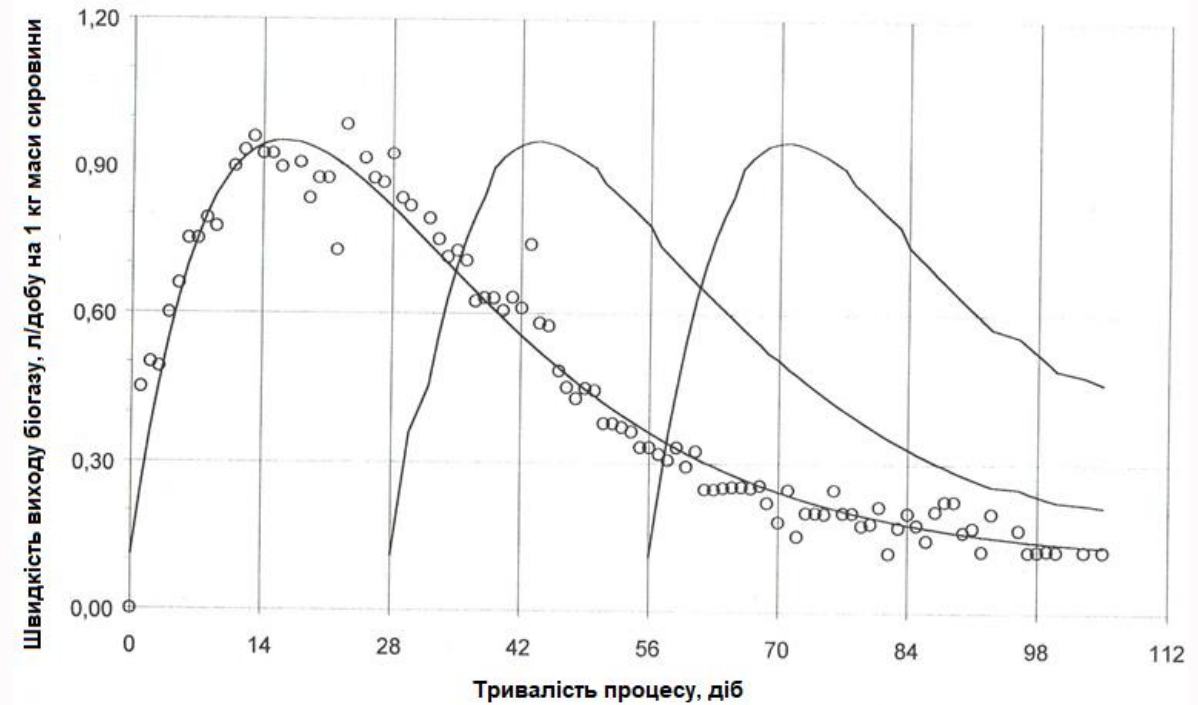
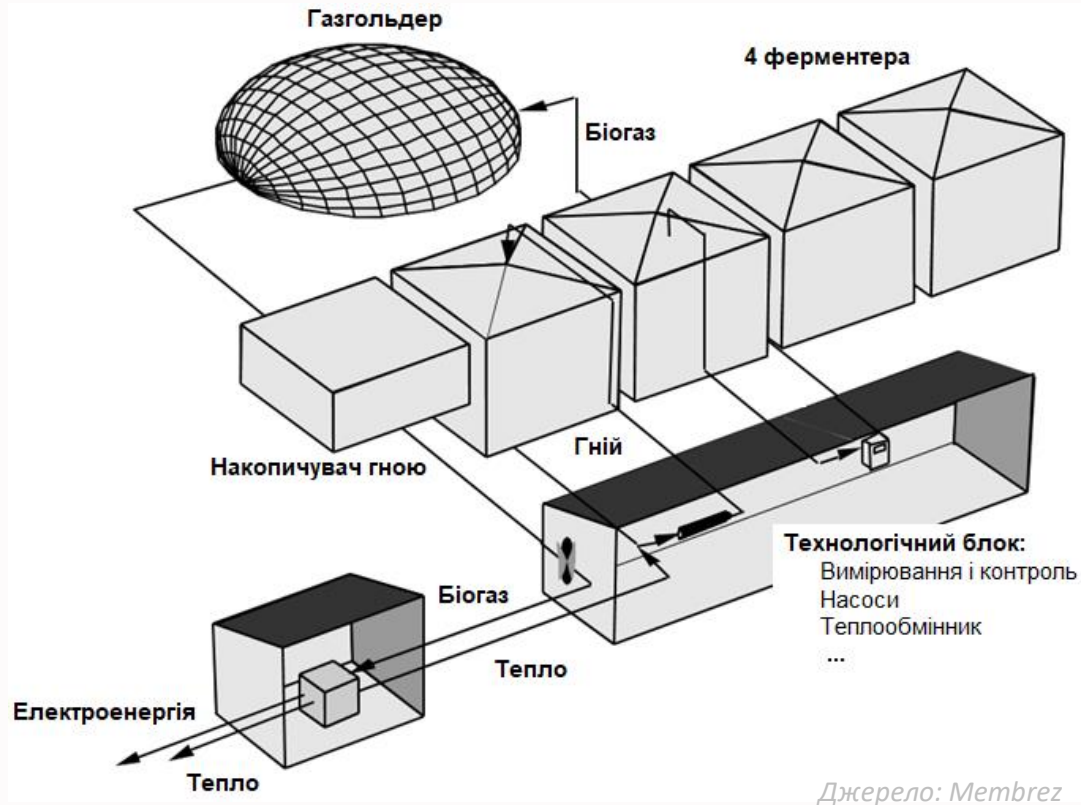


Зброджування



Приклад технологічної схеми періодичного режиму анаеробного зброджування

Швидкість виходу біогазу при сухій ферментації гною ВРХ, змішаного з 50% дигестату при температурі 35°C

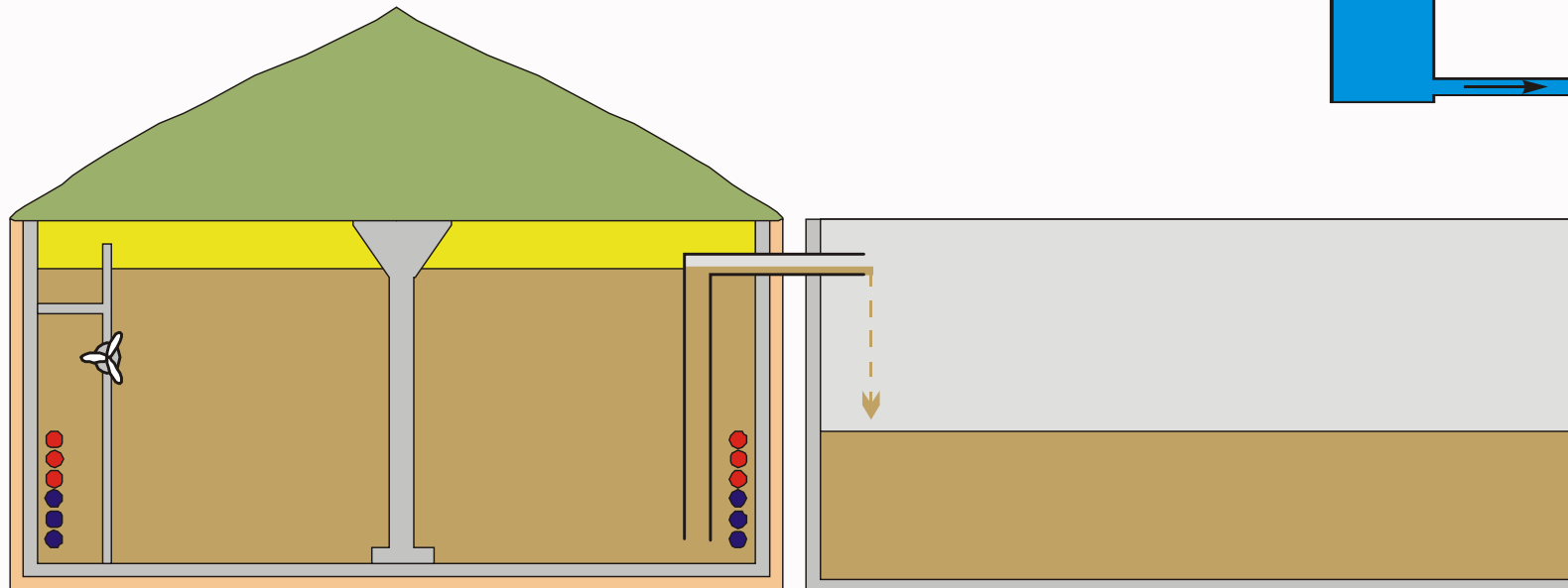


Параметри технології виробництва біогазу

			Основні фактори впливу
Біодоступний потенціал виходу біогазу	Q_{bg}	$\frac{M^3_{БГ,lim}}{кгСОР}$	<ul style="list-style-type: none"> Вихідний склад субстрату Спосіб обробки субстрату
Фактичний вихід біогазу	q_{bg}	$\frac{M^3_{БГ,факт}}{кгСОР}$	<ul style="list-style-type: none"> Біодоступний потенціал Гідравлічне навантаження
Органічне навантаження біореактора	R_{vs}	$\frac{кгСОР}{M^3_{p.o.} \cdot доба}$	<i>Параметр технологічного регламенту роботи біореактора</i>
Гідравлічне навантаження	D	$\frac{1}{доба}$	<i>Параметр технологічного регламенту роботи біореактора</i>
Інтенсивність виходу біогазу з одиниці робочого об'єму біореактора	P_{bg}	$\frac{M^3_{БГ}}{M^3_{p.o.} \cdot доба}$	<ul style="list-style-type: none"> Вихідний склад субстрату Органічне навантаження Температура процесу Гідродинамічний режим
Ступінь біоконверсії субстрату в біогаз	$\frac{q_{bg}}{Q_{bg}}$	%	Q_{bg}, q_{bg}

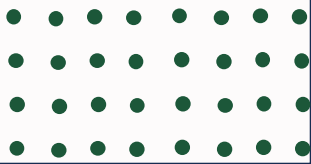
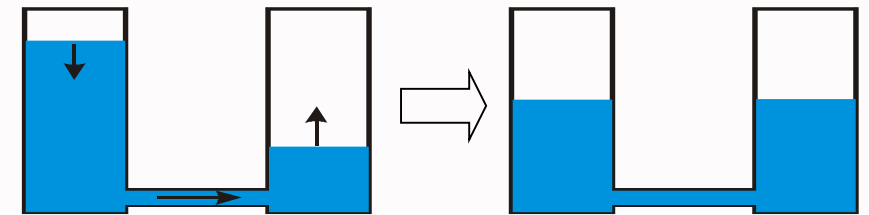
Принцип дії ферментера проточного типу

- Завдяки гідростатичному тиску, рівень рідини в ферментері знаходиться на тому ж рівні, що і в з'єднувальній трубці
- Рівень рідини врівноважується самостійно
- Працює принцип перетікання



Система перетікання

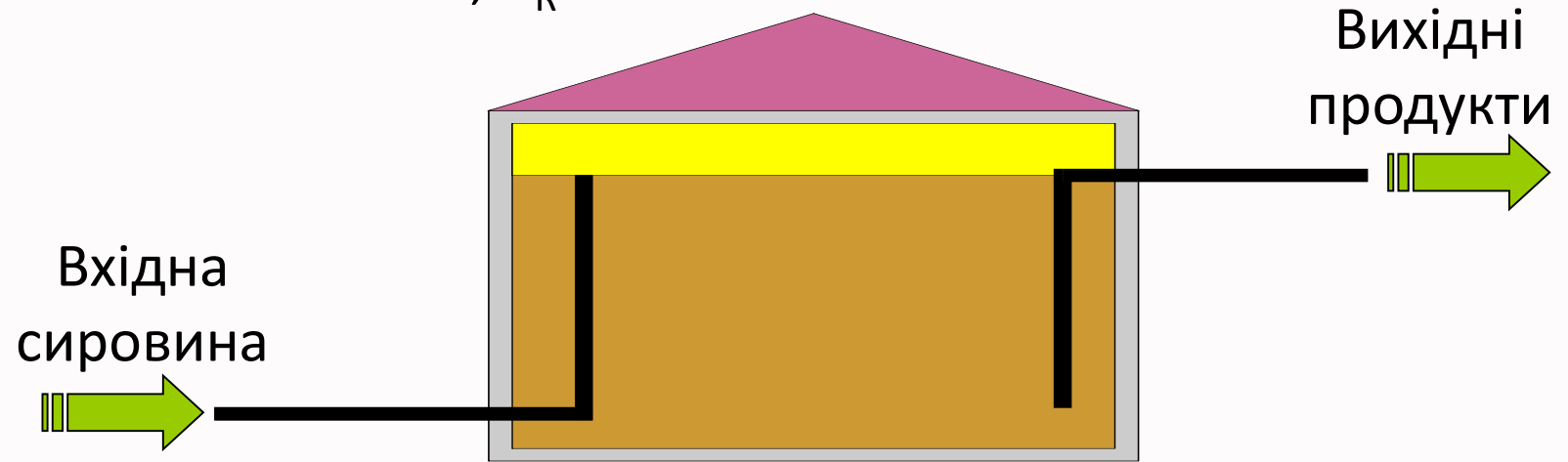
→ сполучені посудини



Фундаментальні параметри технологічного процесу

Об'єм ферментера розраховується виходячи з:

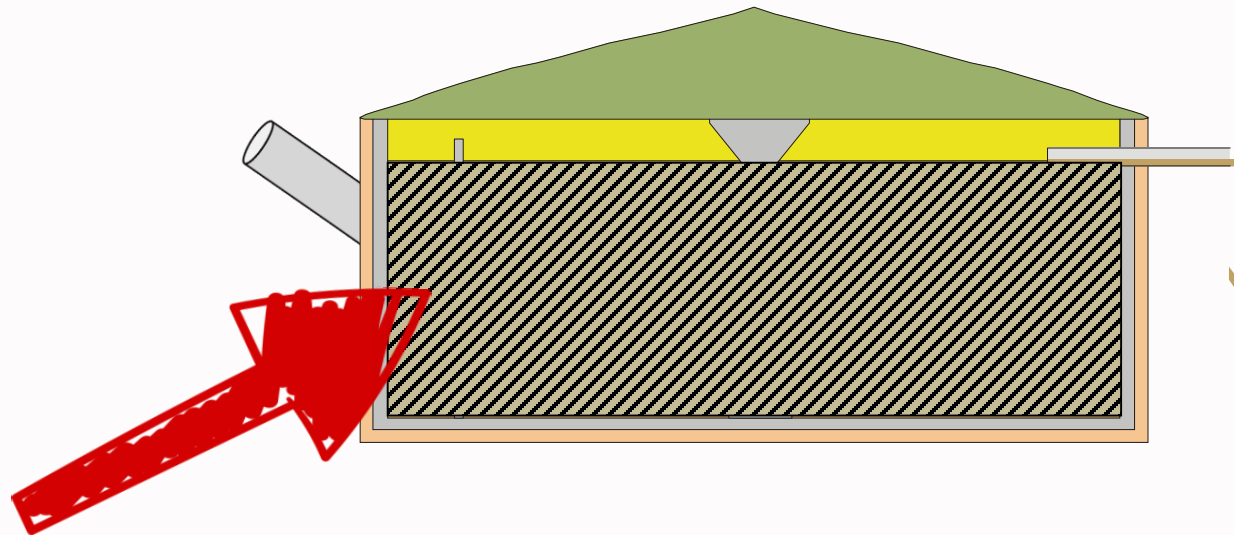
- Вмісту сухої речовини; CP
- Органічної сухої речовини (oCP); або VS (oDM)
- Гідравлічного часу утримання; T (HTR)
- Органічного навантаження; V_R



(Гідравлічний) час утримання T , HRT

$$T_{\text{HRT}} = \frac{\text{Робочий об'єм заповнення ферментера [м}^3\text{]}}{\text{Добова норма подачі субстрату [м}^3\text{/доб]}} = x \text{ днів}$$

Об'єм ферментера = Робочий об'єм (повний об'єм ферментера без врахування об'єму, виділеного для накопичення газу)



(Гідравлічний) час утримання T , HRT

$$T_{\text{HRT}} = \frac{\text{Робочий об'єм заповнення ферментера [м}^3\text{]}}{\text{Добова норма подачі субстрату [м}^3\text{/доб]}} = x \text{ днів}$$

Об'єм ферментера = Робочий об'єм (повний об'єм ферментера без врахування об'єму, виділеного для накопичення газу)

$$\text{Об'єм завантаження} = \frac{\text{Маса завантаженого субстрату [т]}}{\text{Густина субстрату [т/м}^3\text{]}} = x \text{ м}^3$$

- ключовий параметр при проєктуванні ферментерів, що працюють на гноївці
- не настільки важливий параметр у разі ферментації силосу

Органічне навантаження ферментера

$$B_R = \frac{\text{Добова норма оСР} \left[\frac{\text{кг оСР}}{\text{добу}} \right]}{\text{Об'єм заповнення ферментера} \left[\text{м}^3 \right]} = x \left[\frac{\text{кг оСР}}{\text{добу} \cdot \text{м}^3} \right]$$

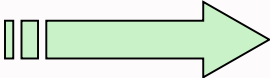
- Суха органічна речовини (**оСР**) – завантаження на м³ робочого об'єму на добу
- Згідно літературних джерел, типові значення навантажень: 2,5...4 кг_{оСР}·м⁻³·д⁻¹
- На сьогодні, існує тенденція до досягнення високого ступеня B_R , особливо при ферментації сільськогосподарських культур
- При значенні навантаження $B_R > 4 \text{ кг}_{\text{оСР}} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{д}^{-1}$, необхідний глибокий та детальний моніторинг технологічного процесу та, за необхідності, внесення добавок, на кшталт мікронутрієнтів

Приклад розрахунку: Органічне навантаження V_R

Субстрат	Субстрат [т/рік]	oCP [%СВМ]	oCP [т/рік]	oCP [кг/добу]
Гній ВРХ	2200	9,0%	198	542
Харчові відходи	700	17,0%	119	326
Сухий послід птахівництва	500	34,0%	170	466
Відсепарований жир	800	27,0%	216	592
Сумарно	4200		703	1926

Добова норма завантаження oCP = 1926 кг

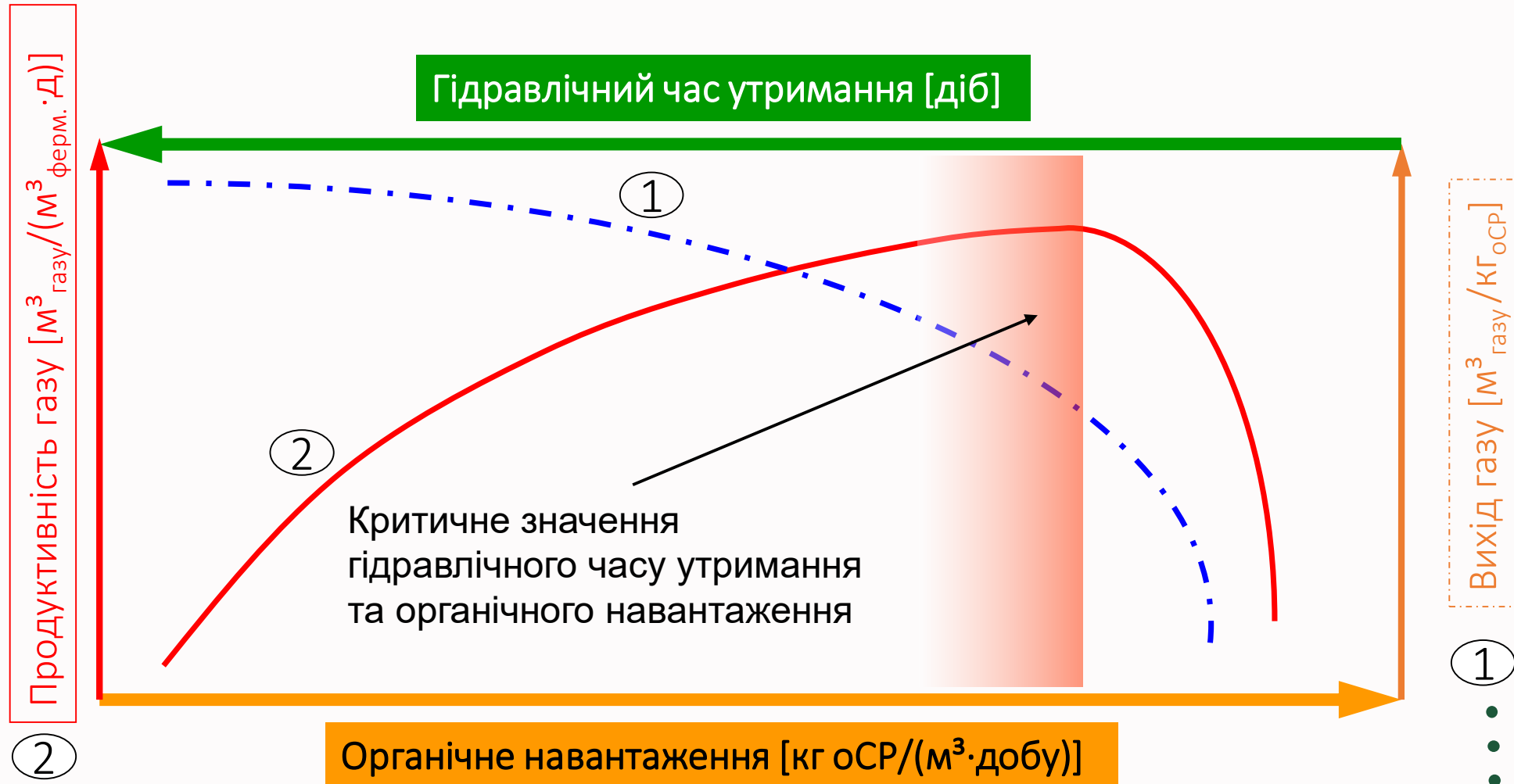
Робочий об'єм ферментера = 800 м³


$$B_R = \frac{1926 \text{ кг oCP/добу}}{800 \text{ м}^3} = 2.41 \frac{\text{кг oCP}}{\text{добу} \cdot \text{м}^3}$$

Чутливість технологічного процесу зростає зі збільшенням органічного навантаження

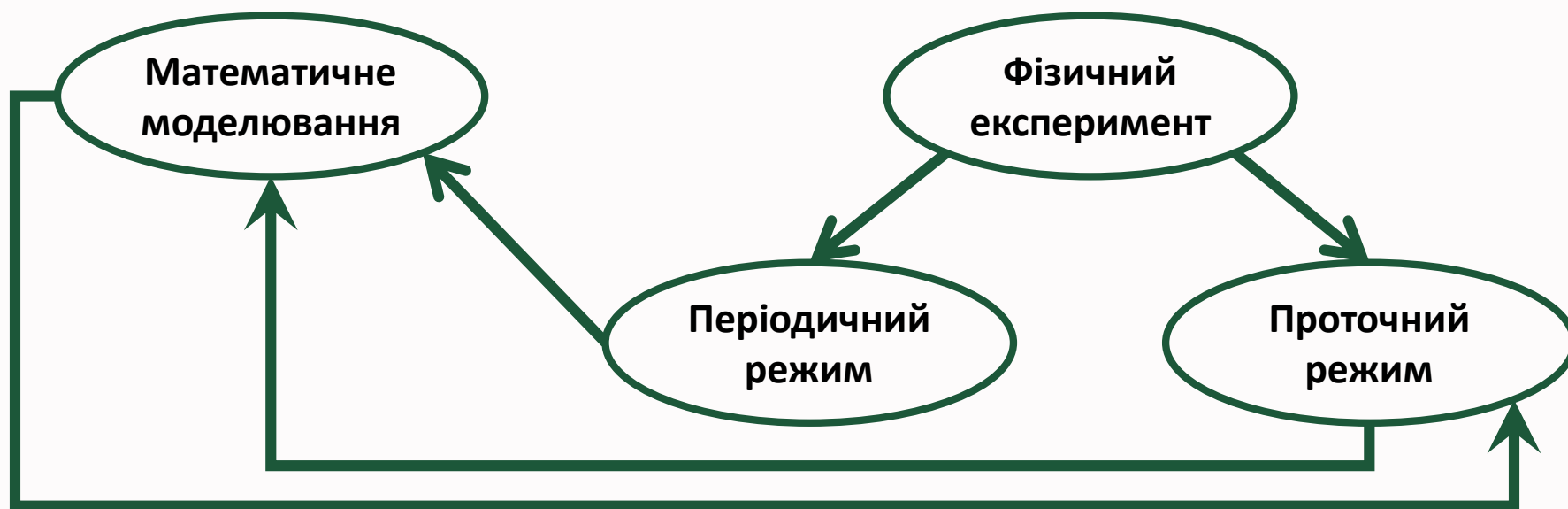
Критичне значення гідравлічного часу утримання та органічного навантаження

Гідравлічний час утримання та органічне навантаження є взаємопов'язаними і впливають як на вихід біогазу, так і на швидкість виходу біогазу в реакторі



Основні задачі та методи досліджень процесу метанового бродіння

- Оцінка біодоступного потенціалу виходу біогазу (*“батч”-тести*)
- Порівняння кінетики розпаду органічної речовини різних типів субстратів
- Оцінка граничного / оптимального органічного / гідравлічного навантаження
- Оцінка впливу методів попередньої обробки субстратів
- Відпрацювання технологічних режимів в проточному режимі...



Методи визначення кінетичних параметрів

**Проточний
режим
зброджування**

Вимірювання початкової швидкості споживання субстрату при поступовому збільшенні його концентрації

Лінійна графічна інтерпретація рівняння Моно

**Періодичний
режим
зброджування**

Оцінка споживання субстрату в часі

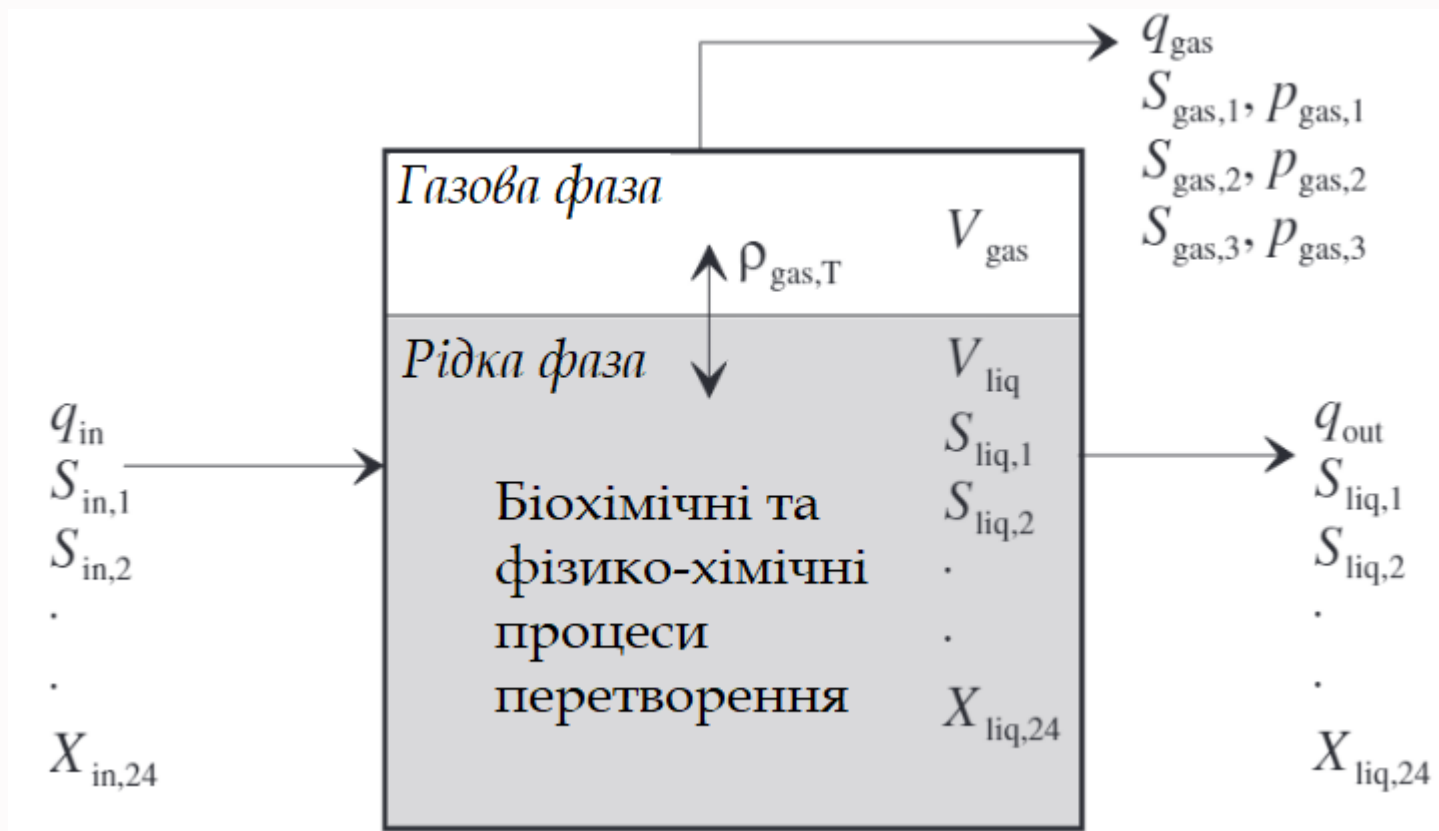
Лінійна графічна інтерпретація інтегральної форми рівняння Моно

Методи нелінійної регресії

Моделювання процесів метанового бродіння

ADM 1 (anaerobic digestion model) – є найбільш повною математичною моделлю метанового бродіння, що фактично є матрицею вирішення 19 послідовних та паралельних біохімічних та фізико-хімічних процесів для 24 компонентів

$$\frac{dS_{liq,i}}{dt} = \frac{q_{in} S_{in,i}}{V_{liq}} - \frac{S_{liq,i} q_{out}}{V_{liq}} + \sum_{j=1-19} \rho_j v_{i,j}$$

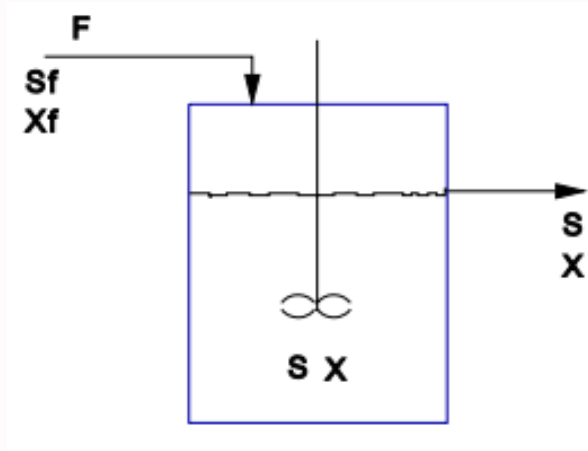


Математична модель біохімічного процесу

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\frac{1}{\gamma} N \frac{rS}{a+S} \\ \frac{dN}{dt} = N \frac{rS}{a+S} - mN \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{Швидкість споживання субстрату} \\ \text{Швидкість росту біомаси бактерій} \end{array}$$

S – концентрація субстрату N – концентрація біомаси бактерій r – швидкість росту популяції бактерій a – константа напівнасичення γ – вихід біомаси бактерій

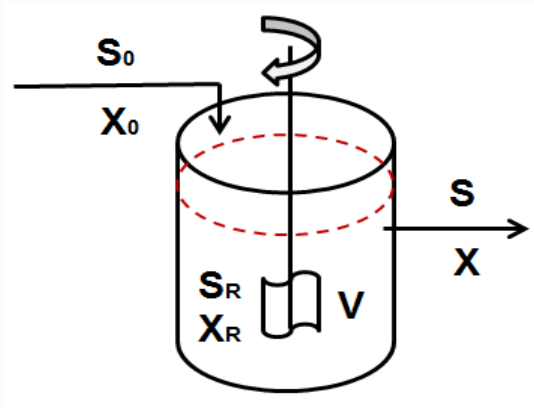
Математична модель хемостату



$$0 = D(R - S) - \frac{1}{\gamma} N \frac{rS}{a+S}$$
$$0 = N \left[\frac{rS}{a+S} - D \right]$$

D – гідравлічне навантаження, доба⁻¹ R – вхідна концентрація субстрату, гСОР·л⁻¹

Чисельне моделювання процесу метанового бродіння в біореакторі повного змішування проточного типу



Чисельна модель роботи біореактора повного змішування в проточному режимі

$$\begin{cases} D(S_0 - S) - \frac{1}{Y_{X/S}} \frac{k_{\max} S}{K_S + S} X = 0 \\ X \left[\frac{k_{\max} S}{K_S + S} - D \right] = 0 \end{cases}$$



$$F = DX = \frac{D(K_S + S_0)}{Y_{X/S} (k_{\max} - D)} \left[\frac{k_{\max} S_0}{K_S + S_0} - D \right]$$

D – гідравлічне навантаження, *доба*⁻¹

S_0 – вхідна концентрація субстрату, г *COP* · л⁻¹

X – концентрація бактеріальних клітин, г *COP* · л⁻¹

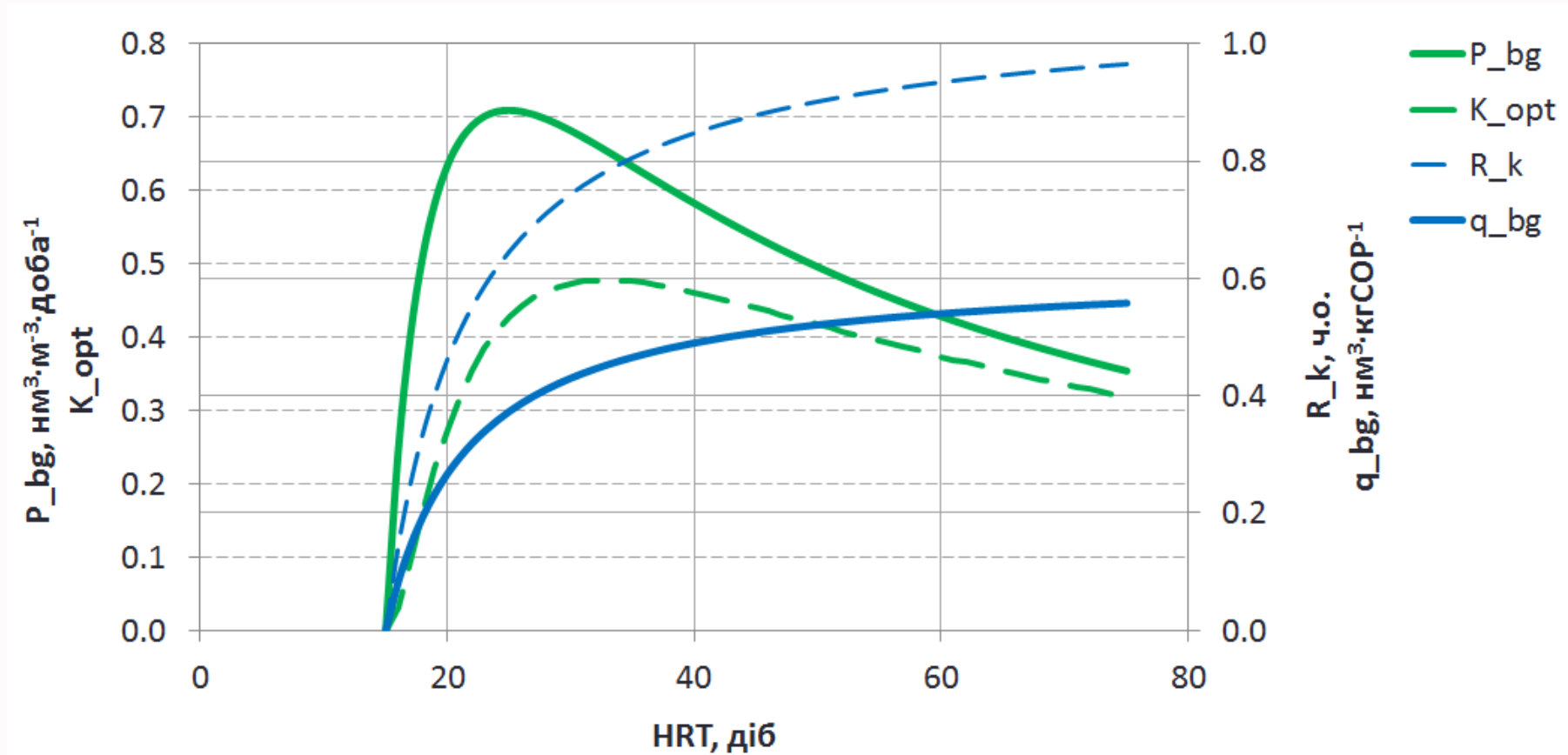
$$P_{CH_4} = \frac{1.43 D X Y_{CH_4/S}}{\rho_{CH_4} Y_{X/S}},$$

Питома швидкість виходу CH_4 , нм³/м³/добу

$$Q_{CH_4,T} = \frac{P_{CH_4}}{D S_0}$$

Питомий вихід CH_4 з 1 кг *COP*, нм³/кг*COP*

Приклад моделювання процесу моно-зброджування гною свиней (СР = 5,8%)



T_{min} – 15.0 діб

T_{opt_1} (за макс. інтенсивністю виходу біогазу) – 25.0 діб

T_{opt_2} (за комплексним критерієм) – 33.0 діб

R_{vs_lim} – 3.1 кгСОР/м³/добу

R_{opt} – 1.9 кгСОР/м³/добу

R_{opt} – 1.4 кгСОР/м³/добу



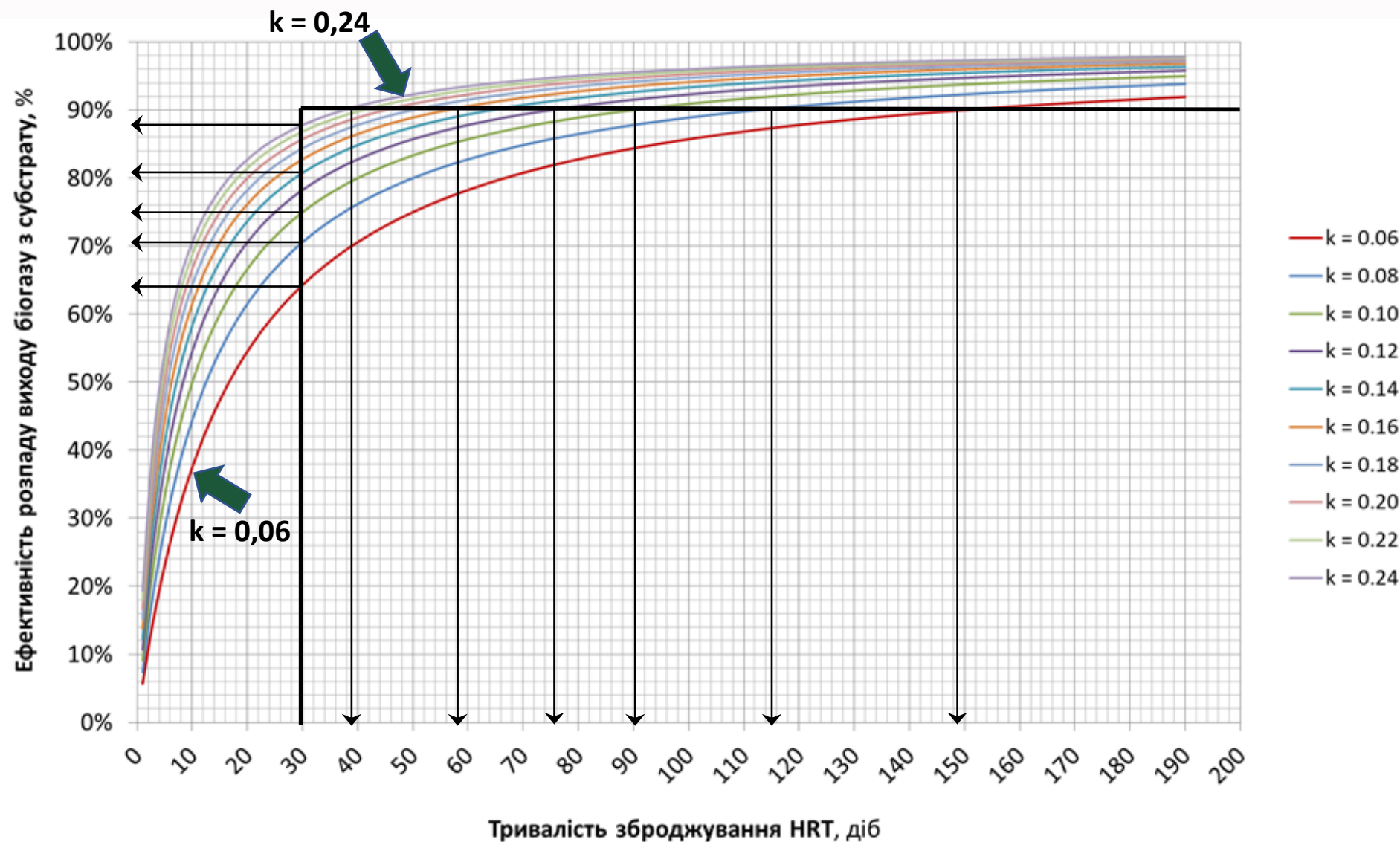
P_{bg_opt} – 0.65 м³/м³/добу

Спрощена оцінка розпаду органічної речовини з використанням кінетичної моделі 1-го порядку

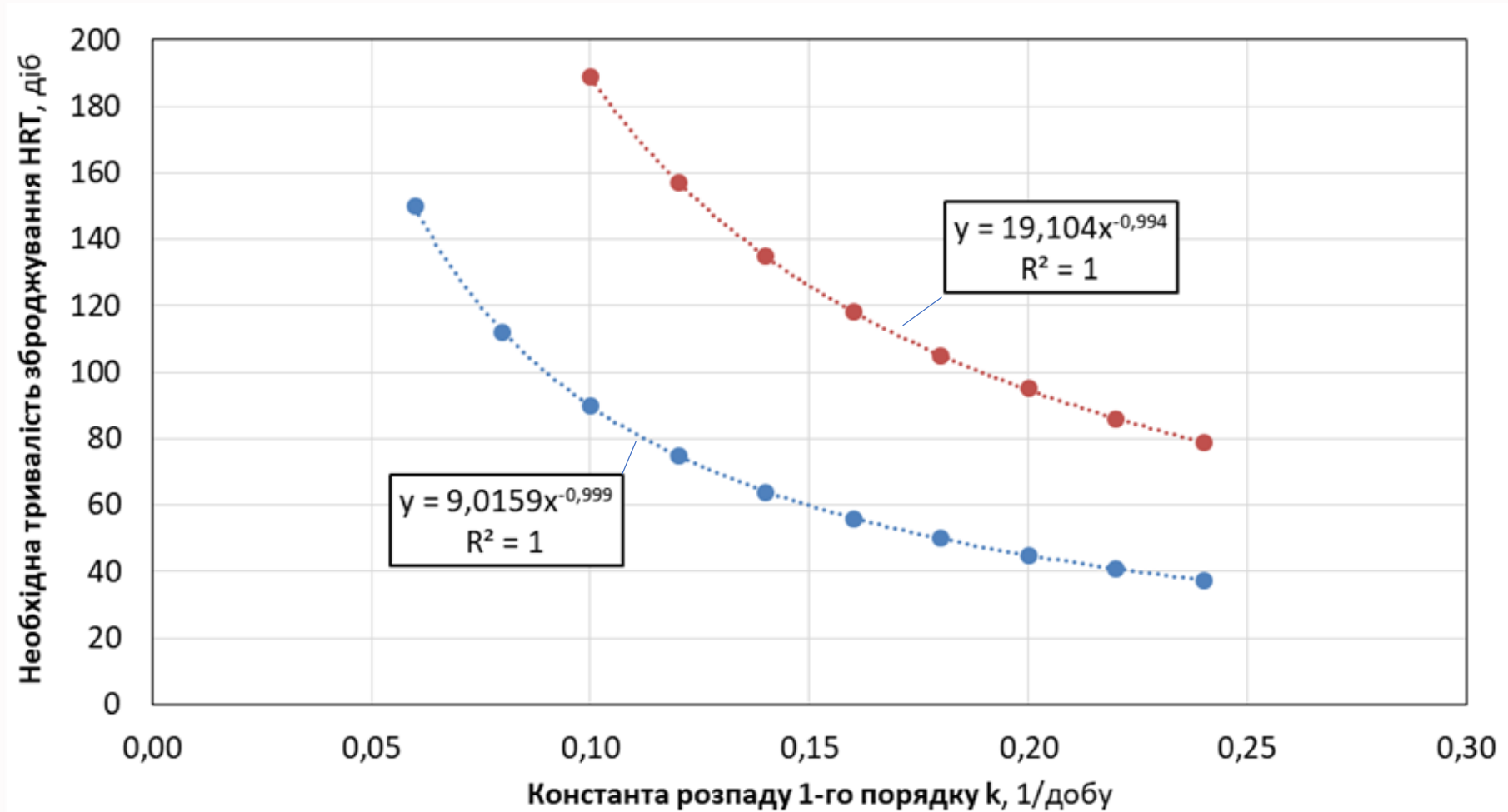
$$c = \frac{c_{in}}{1 + k \cdot HRT}$$

c	Концентрація органічної речовини в реакторі	(кгСОР/м ³)
c_{in}	Концентрація органічної речовини на вході в реактор	(кгСОР/м ³)
k	Константа розпаду 1-го порядку	(1/добу)
HRT	Середній гідравлічний час утримання в реакторі	(діб)

Номограма залежностей ефективності виходу біогазу в часі від константи розпаду 1-порядку k



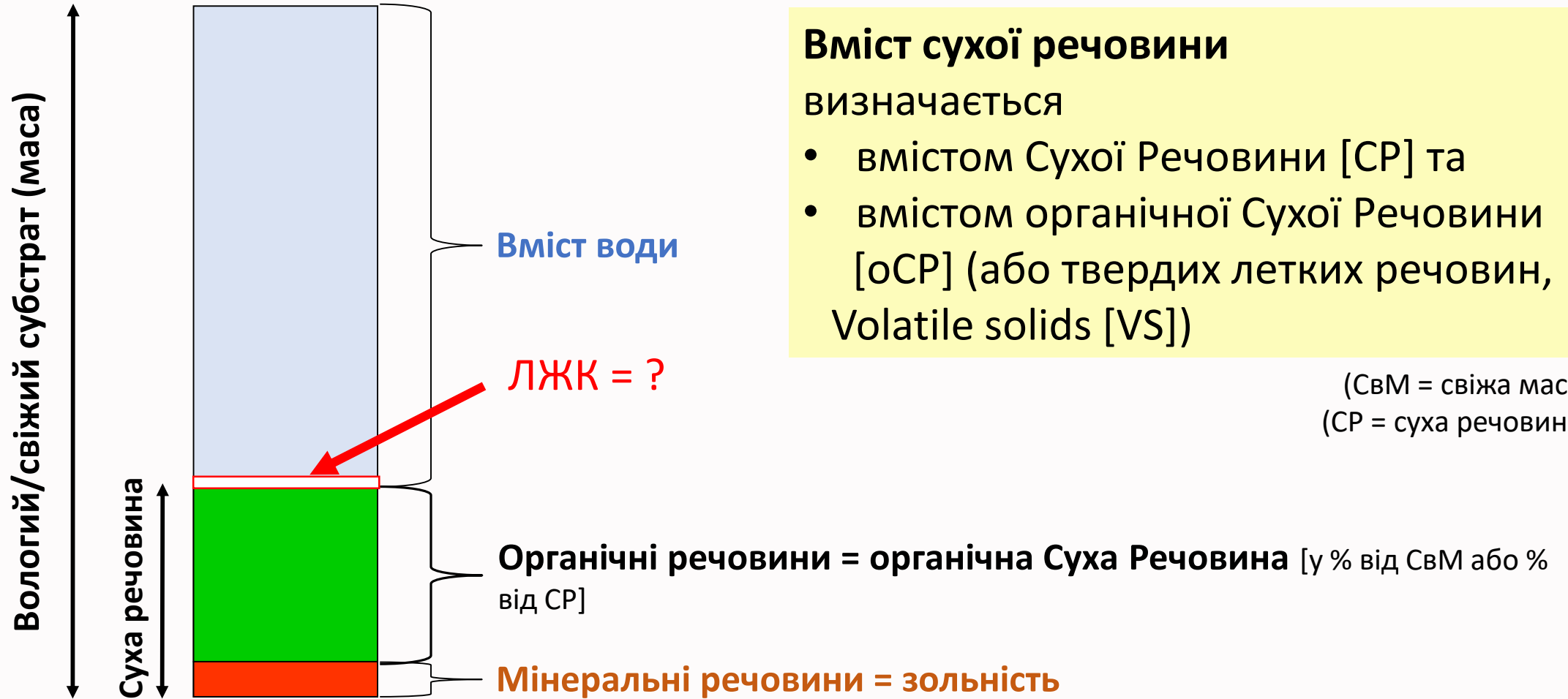
Оцінка необхідної тривалості процесу для досягнення 90% та 95% виходу біогазу





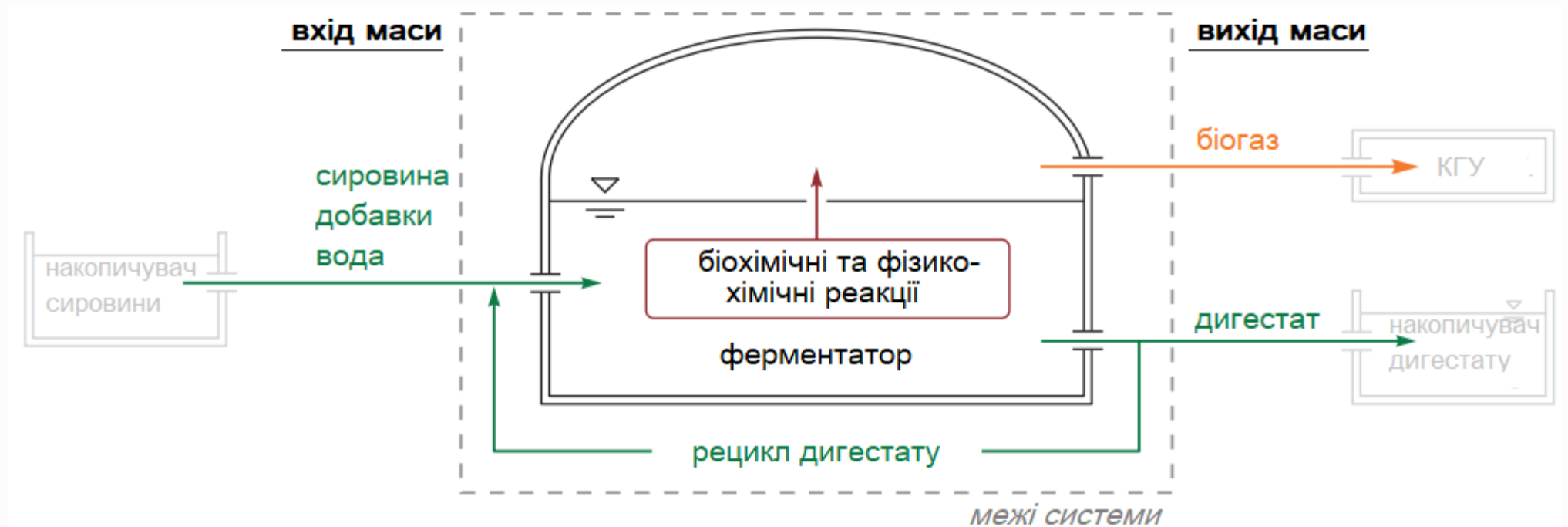
Матеріальні баланси в системі сировина-біогаз-дигестат

Базовий аналіз вихідної сировини



Масовий баланс в системі

$$\frac{dm}{dt} = 0 = \underbrace{\text{подана маса} - \text{видалена маса}}_{\text{перенесення маси в межах системи}} \pm \underbrace{\text{перетворена маса}}_{\text{біохімічні процеси}}$$



Втрата маси з біогазом

- Вихід збродженої маси з реактора, за умови постійного рівня маси в реакторі, можна оцінити шляхом зважування / вимірювання об'єму
- Альтернативно – можна визначити за втратою маси біогазу:

$$m_{\text{biogas}} = \left(M_{\text{CH}_4} \cdot \frac{V_{\text{STD}} \cdot c_{\text{CH}_4}}{V_m} \right) + \left(M_{\text{CO}_2} \cdot \frac{V_{\text{STD}} \cdot c_{\text{CO}_2}}{V_m} \right) + \left(M_{\text{H}_2\text{S}} \cdot \frac{V_{\text{STDd}} \cdot c_{\text{H}_2\text{S}}}{V_m} \right) + m_{\text{wv}}$$

V_{STD}	Об'єм виділеного біогазу	(л (н.у.))
m_{biogas}	Маса виділеного біогазу	(г)
$M_{(x)}$	Молярна маса відповідної речовини	(г/моль)
V_m	Молярний об'єм ідеального газу	(л (н.у.) / моль)
$c_{(x)}$	Концентрація відповідного газу	(%)
m_{wv}	Маса парів вологи в біогазі	(г)

Приведення об'єму сухого біогазу до нормальних умов (н.у.)

Рівняння Антуана (Antoine eq.)

$$V_{STD} = (V \cdot \Delta t_{24} + GM_{2-2}) \cdot \frac{\left(\left(p_a - 10^{\left[\frac{7.19621 - \frac{1730.63}{233.426 + T_a}}{kPa} \right]} \right) + \Delta p_{GM} \right) \cdot 273.15K}{101.325kPa \cdot (273.15K + T_a)}$$

V	Накопичений вихід біогазу	(мл / добу)
GM_{2-2}	Вихід біогазу з моменту крайнього завантаження реактора за показами газолічильника	(мл)
V_{STD}	Об'єм біогазу, приведений до н.у.	(мл (н.у.) / добу)
p_a	Тиск повітря в навколишньому середовищі	(кПа)
Δp_{GM}	Втрати тиску на газолічильнику	(кПа)
T_a	Температура повітря в навколишньому середовищі	(°C)

Визначення розпаду CP та COP

Розпад CP (з корекцією за ЛЖК)

$$TS_{\text{decomp}} = \frac{(m_{TS, \text{inp}} + c_{\text{inp}}) - (m_{TS, \text{dis}} + c_{\text{dis}})}{(m_{TS, \text{inp}} + c_{\text{inp}}) \cdot 100}$$

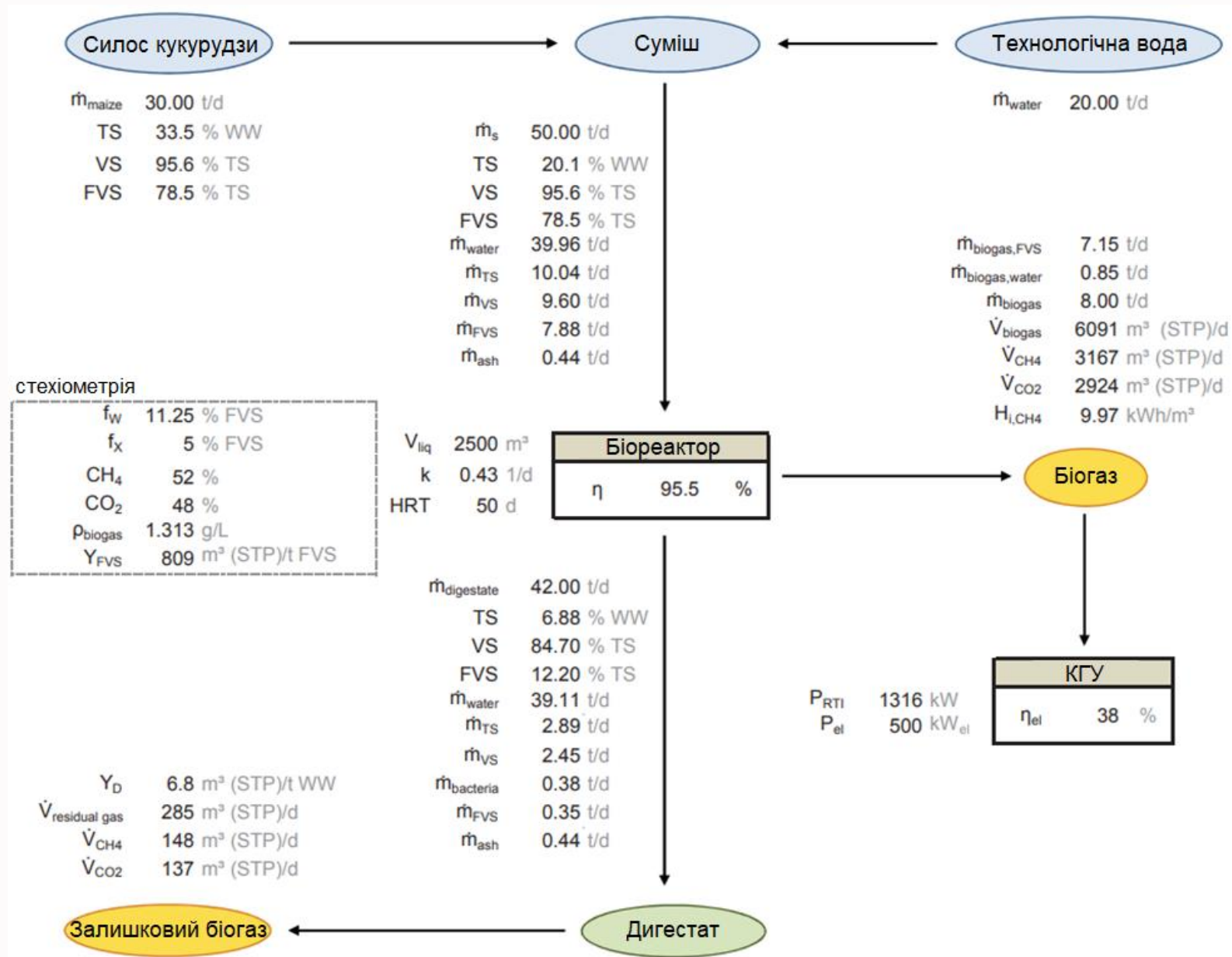
TS_{decomp}	розпад CP	(%)
$m_{TS, \text{dis}}$	маса CP в зброженій масі	(г)
$m_{TS, \text{inp}}$	маса CP у вхідній сировині	(г)
c_{inp}	концентрація ЛЖК у вхідній сировині	(г/кг)
c_{dis}	концентрація ЛЖК у зброженій масі	(г/кг)

Розпад COP

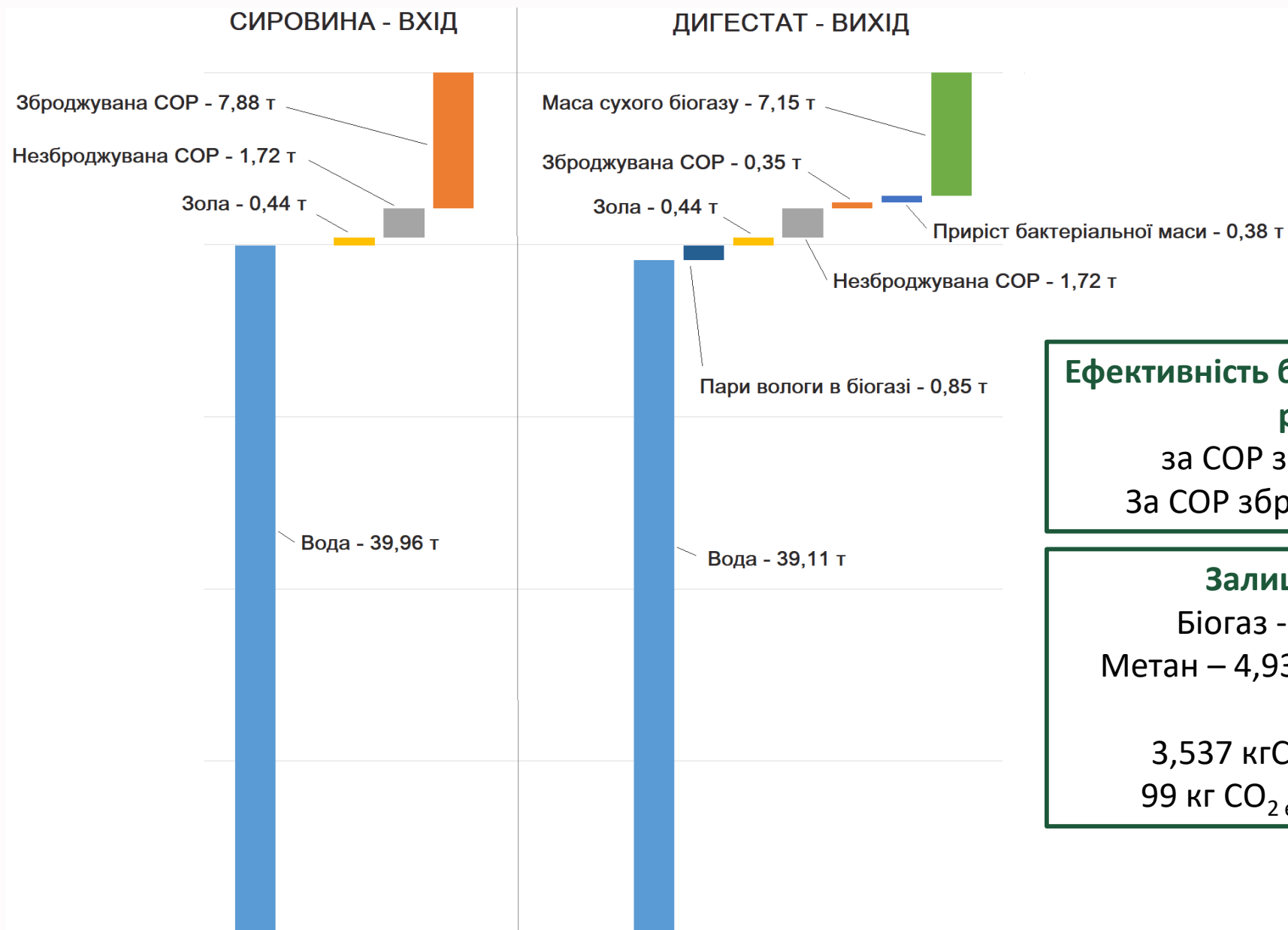
$$VS_{\text{decomp}} = \frac{m_{VS, \text{inp}} - m_{VS, \text{dis}}}{m_{VS, \text{inp}} \cdot 100}$$

VS_{decomp}	розпад COP	(%)
$m_{VS, \text{inp}}$	маса COP у вхідній сировині	(г)
$m_{VS, \text{dis}}$	маса COP в зброженій масі	(г)

Приклад складання масового балансу



Аналіз результатів матеріального балансу



Ефективність біодекструкції органічної речовини:

за СОР загальним – 74,5%
За СОР зброджуваним – 95,5%

Залишковий біогаз:

Біогаз - 4,5% потенціалу
Метан – 4,93 нм³СН₄ / т сировини
або
3,537 кгСН₄ / т сировини →
99 кг СО₂_{екв} парникових газів

Висновки

- Метанове бродіння – один з ефективних методів бродіння з утворенням відновлюваного джерела енергії – метану CH_4
- Метанове бродіння – комплексний 4 стадійний процес біотрансформації комплексної органічної речовини до простих сполук, зокрема метану, вуглекислого газу, ацетатів, тощо
- Ключові фактори впливу на процес є температура, рівень рН, солевміст та мікронутрієнти
- Процес метанового бродіння реалізується як в проточному, так і в періодичному режимах
- Величина органічного навантаження в біореакторах проточного типу не повинна призводити до зниження часу гідравлічного утримання в реакторі понад критичну величину, що визначається часом росту найбільш чутливої популяції бактерій (метаногенів)
- Органічна речовина в сировині трансформується під час метанового бродіння у приріст маси бактерій та масу біогазу, насиченого парами вологи



European Bank
for Reconstruction and Development



BIOMASS



IBBK
BIOGAS

Програма управління знаннями для розвитку сталої біоенергетики

Дякую!

Петро Кучерук



Експерт UABIO, к.т.н.



+380 97 917 70 47



kucheruk@secbiomass.com



<https://uabio.org>

