

**Перспективи виробництва передового
біогазу/біометану з лігноцелюлозних
матеріалів**

Петро Кучерук

Біоенергетична асоціація України
(UABIO), експерт

Основні види пожнивних решток в Україні

Культура	Тип пожнивних решток	Доступність пожнивних решток як сировини для виробництва біогазу
Пшениця, ячмінь	Солома	Переважно збирається з полів і має значний альтернативний попит в різних сферах (підстилковий матеріал, субстрат для вирощування грибів або компостування, біопаливо, тощо)
Кукурудза	Кукурудзиння (стебла, листя, обгортки качанів, волоті, качани)	Як правило залишається в полі і заорюється в ґрунт. Є приклади виробництва гранул з кукурудзиння. Переважно доступна сировина для біогазу
Соняшник	Стебла, кошики	Як правило залишається в полі і заорюється в ґрунт. Доступна сировина для біогазу
Ріпак	Стебла, стручки	Як правило залишається в полі і заорюється в ґрунт. Переважно доступна сировина для біогазу
Соя	Стебла, листя	Як правило залишається в полі і заорюється в ґрунт. Переважно доступна сировина для біогазу

Солома пшениці



Кукурудзиння в полі



Солома ріпаку в полі



Стебла соняшнику в полі



Характеристика пожнивних решток як сировини для виробництва біогазу

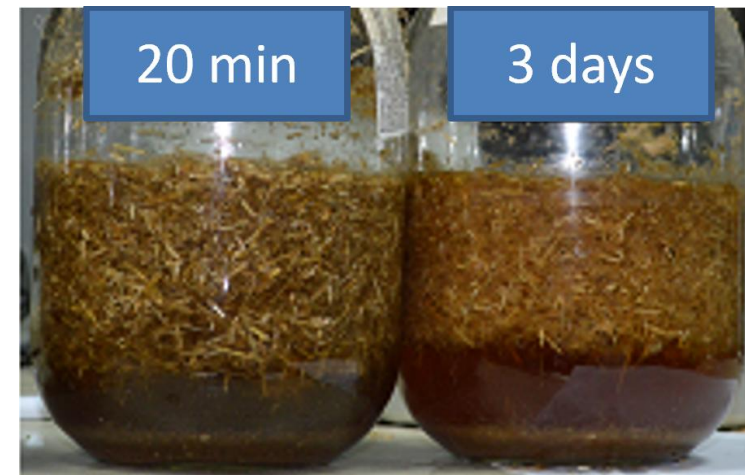
Вид	CP (%)	C:N	CEL	HCEL	LGN	Рівень гідрофобності
Солома пшениці	84-92	60-100	32-42	20-28	15-21	Високий
Кукурудзиння	72-84	45-65	34-45	22-30	12-18	Середньо високий
Стебла соняшнику	76-85 (*)	40-60	30-42	20-28	15-22	Середньо високий
Ріпакова солома	80-90	50-75	30-40	18-26	18-24	Середній
Солома сої	82-88	25-35	32-42	20-26	14-20	Низько середній

*після підсушування в полі

Гідрофобність кутикули



Тест на змочуваність соломи



Ключові фактори, що впливають на виробництво біогазу

- ! Гідрофобність
- ! Не оптимальне (високе) C:N
- ! Високий вміст лігніну та низька біодоступність органічної речовини
- ! Низька вологість

Підходи щодо усунення недоліків пожнивних решток як сировини для біогазу: зниження гідрофобності

Основні фактори, що обумовлюють гідрофобність

- високий вміст лігніну
- покриття поверхні восковою кутикулою
- кристалічність целюлози
- накопичення кремнезему (SiO_2)
- закриті клітинні структури

Основні методи зниження гідрофобності

Лужна обробка – руйнує лігнін та воски

Паро-вибухова обробка – відкриває клітинні стінки

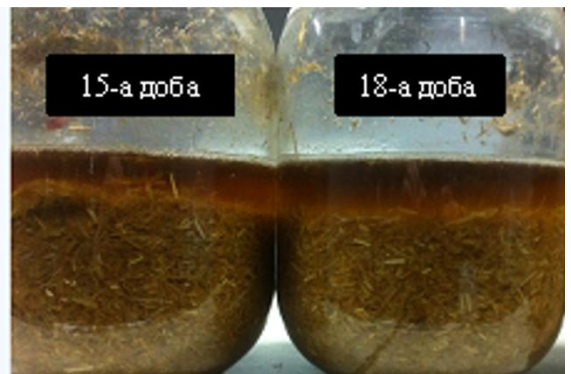
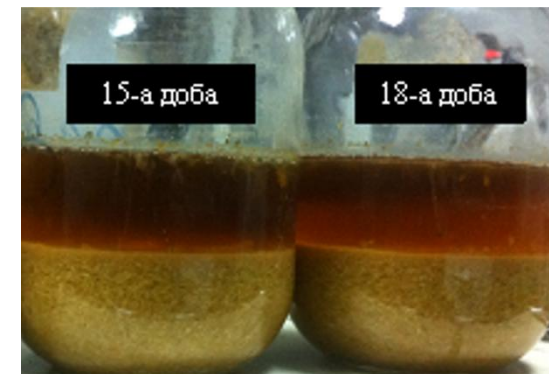
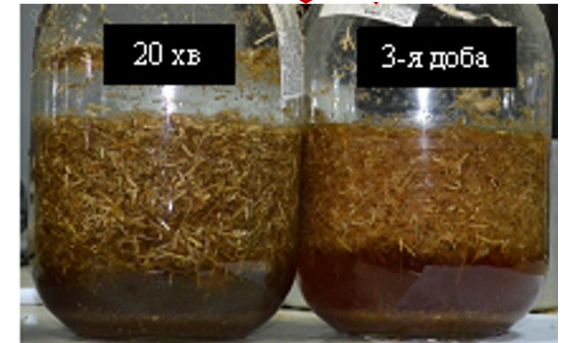
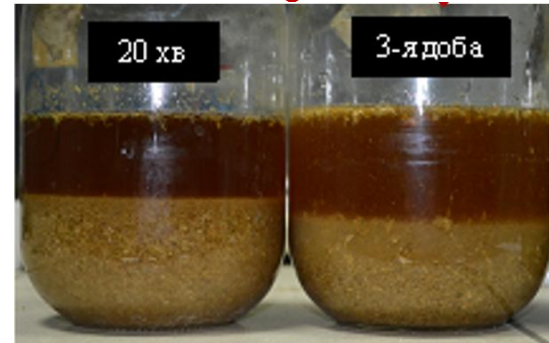
Біологічна обробка з допомогою грибів – розкладає лігнін

Механіко-термічна обробка (екструзія, гранулювання)

Товарна гранула з соломи



Механічно подрібнена солома $L_{\text{max}} = 30 \text{ мм}$



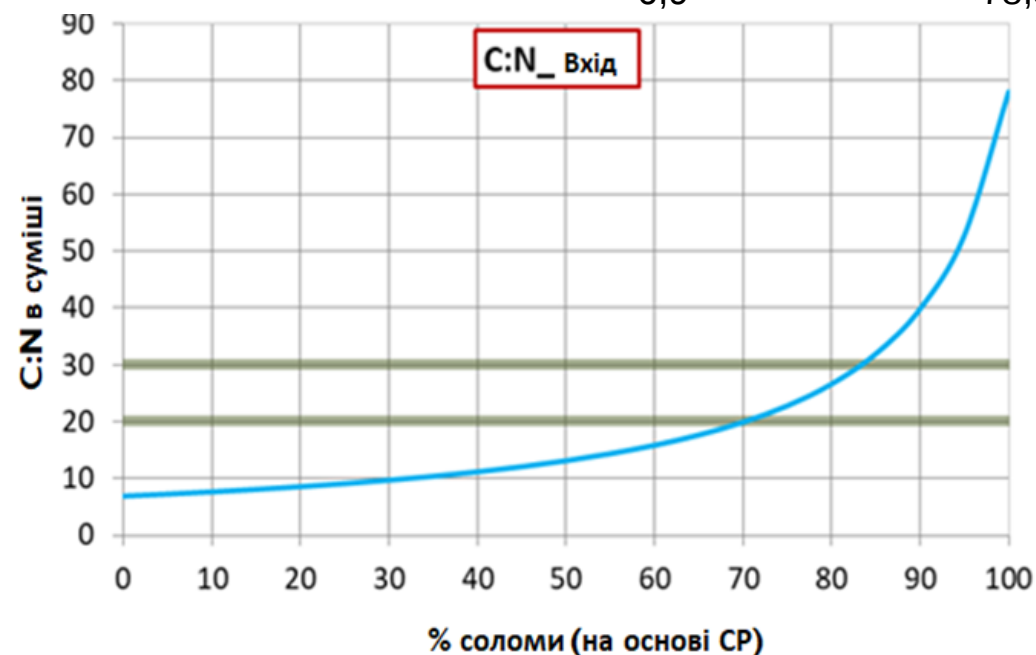
Підходи щодо усунення недоліків поживних решток як сировини для біогазу: оптимізація C:N

Можливі стратегії оптимізації величини C:N

- **Сумісне зброджування** з ко-субстратами, багатими на азот, напр., послід, барда, гноївка свиней
- **Попередня обробка грибками** (селективна біологічна делігніфікація)
- **Вилуговування водою або замочування**
- **Контрольована термічна обробка** (низькотемпературна гідротермальна обробка)
- **Лужна попередня обробка + розділення твердих/рідких речовин**
- **Додавання штучних азотних добрив**

Приклад оптимізації C:N за рахунок додавання посліду курячого

Параметр	Од. вим.	Значення	
		Курячий послід	Пелети з пшеничної соломи
Вміст CP	% сирової маси	30	91
Вміст COP	% CP	72	91
Вміст N	г N / кг COP	73,6	6
Вміст C	г C / кг COP	509	470
C:N	-	6,9	78,3



Підходи щодо усунення недоліків поживних решток як сировини для біогазу: підвищення біодоступності

Основні фактори, що обумовлюють низьку біодоступність

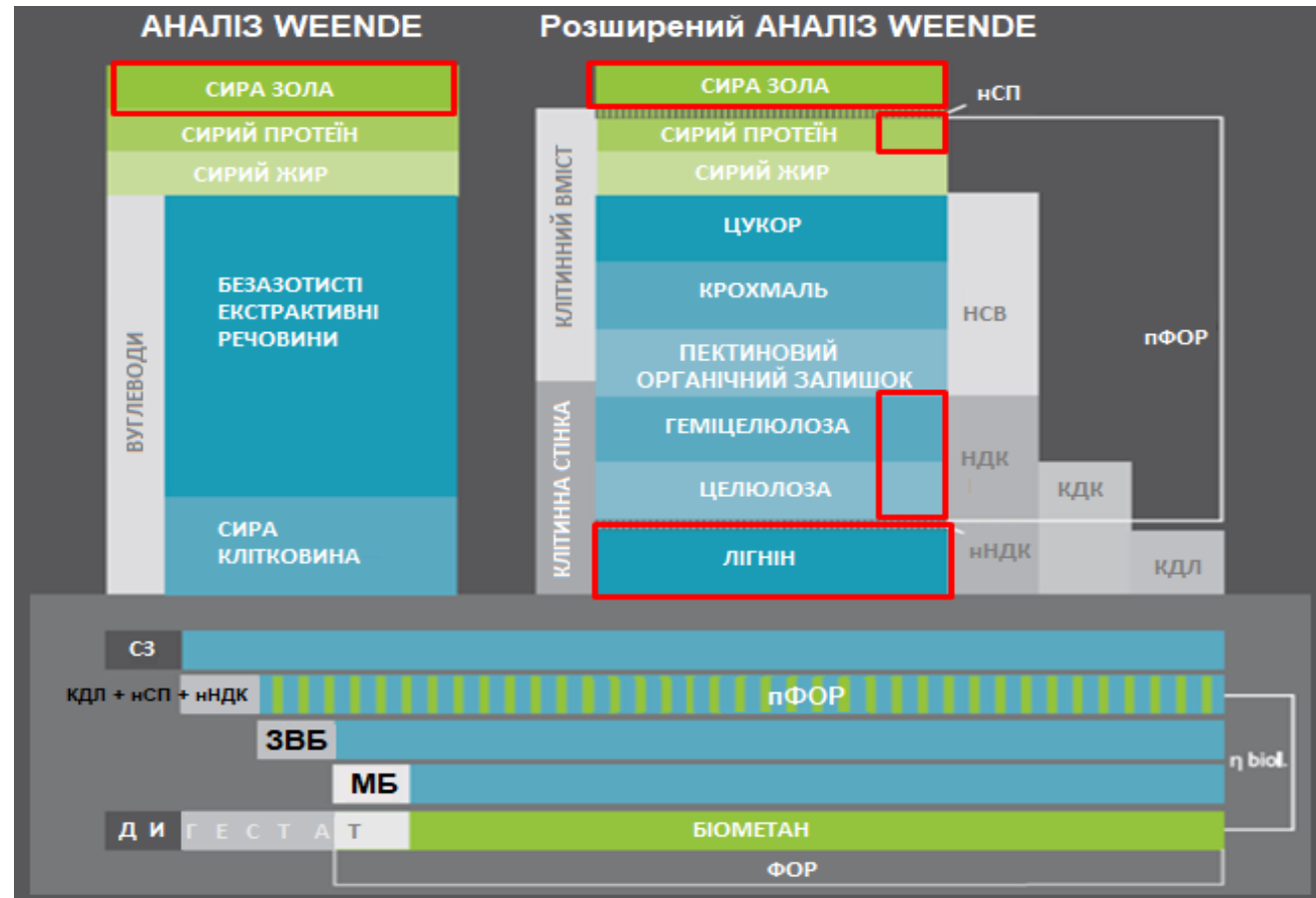
- Лігнін в процесі метанового бродіння не зброджується
- Закрита структура лігно-целюлозних комплексів перешкоджає доступу води та бактерій
- Частина сирого протеїну та (гемі)-целюлози також не зброджується

Рівень впливу різних методів попередньої обробки на біодоступність

Високотемпературна обробка під тиском, кавітаційні методи

Хімічна обробка, екструзія

Механічне подрібнення



пФОР - загальна потенційна здатність органічної речовини до зброджування
ФОР - фактично зброджувана органічна речовина
НДК - нейтрально детергентна клітковина
КДК - кислотно детергентна клітковина (целюлоза, лігнін)

НСВ - неструктурні вуглеводи
КДЛ - кислотно детергентний лігнін
ННДК- не зброджувана нейтрально детергентна клітковина
нСП – не зброджуваний сирий протеїн
ЗВБ – залишковий вихід біогазу
МБ – приріст бактеріальної маси

Підходи щодо усунення недоліків поживних решток як сировини для біогазу: **забезпечення вологою**

Основні стратегії вирішення питання низької вологості поживних решток при зброджуванні

- **Додавання свіжої води**
- **Рецикл рідкої фракції дигестату**
- **Рецикл рідкої фракції дигестату після попередньої обробки** (освітлення, віддувка аміаку, тощо)
- **Додавання ко-субстратів з більш високим вмістом води**, напр., рідкої гноївки, барди, рідких виробничих стоків, тощо
- **Вибір технологій «сухого» зброджування**, що потребують менше води

Приклад 1 забезпечення достатньої кількості води при додаванні **свіжої води** до соломи

Вхідні дані:

Вихідна вологість соломи: 15%

Цільовий вміст сухих речовин в біореакторі: $\leq 10\%$,

Результат:

Необхідно додати не менше **3,1 м³ води на 1 т соломи**

Для проекту 5 млн нм³CH₄/рік → 74,6 тис. м³/рік води

Приклад 2 забезпечення достатньої кількості води при додаванні **гноївки свиней** до соломи

Вхідні дані:

Вихідна вологість соломи: 15%

Вологість гноївки свиней: 96%

Цільовий вміст сухих речовин в біореакторі: $\leq 10\%$,

Результат:

Необхідно додати не менше **3,9 м³ гноївки на 1 т соломи**

Для проекту 5 млн нм³CH₄/рік → 77,5 тис. м³/рік гноївки зі свиноферми орієнтовно 15,7 тис. голів

Методи попередньої обробки та їх ефективність

Фізичні

- Механічні
- Термічні
- Ультразвукові
- Електрохімічні

Хімічні

- Лужні
- Кислотні
- Окислювальні

Біологічні

- Мікробіологічні
- Ферментні

Комбіновані

- Паровий вибух
- Екструзія
- Термохімічні

Метод	Де-кристалізація целюлози	Розпад гемі-целюлози	Розпад лігніну	Збільшення питомої поверхні
Біологічні методи				+
Подрібнення	+			+
Паровий вибух		+	+	+
Обробка концентрованою кислотою		+	+	+
Обробка розведеною кислотою		+		+
Лужна обробка		-	+	+
Екструзія				+
Символ плюс (+) вказує на те, що метод попередньої обробки має цей ефект, символ мінус (-) вказує на відсутність ефекту, а відсутність символу означає, що незрозуміло, чи є ефект, чи ні.				

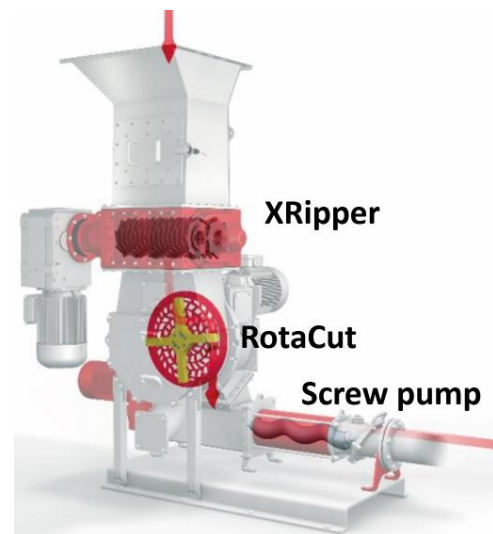
Процес	Переваги	Недоліки
Подрібнення	- збільшена площа поверхні - полегшена обробка субстрату - часто покращена плинність у біореакторі	- підвищене енергоспоживання - високі витрати на обслуговування / чутливість до каменів тощо.
Гаряча вода (TDH)	збільшує доступність для ензимів	- високе споживання тепла - ефективний лише до певної температури
Лужна обробка	розщеплює лігнін	- висока концентрація лугу в біореакторі - висока вартість хімікатів
Мікробний	низьке споживання енергії	- повільний процес - не розщеплює лігніну
Ензимний	низьке споживання енергії	- необхідність постійного додавання ензимів - висока вартість ензимів
Паровий вибух	розщеплює лігнін та розчиняє геміцелюлозу	- високе тепло- та електроспоживання - ефективний лише до певної температури
Екструзія	збільшує площу поверхні	- підвищене енергоспоживання - високі витрати на обслуговування / чутливість до каменів тощо.
Кислотна обробка	розчиняє геміцелюлозу	- висока вартість кислоти - проблеми з корозією - утворення інгібіторів, особливо при нагріванні

Приклади обладнання для обробки пожнивних решток

BIOEXTRUDER LEHMANN



VOGELSANG PREMIX



Комплекс підготовки соломи Euromilling / Lin-Ka



BIOCRUSHER BIO-G



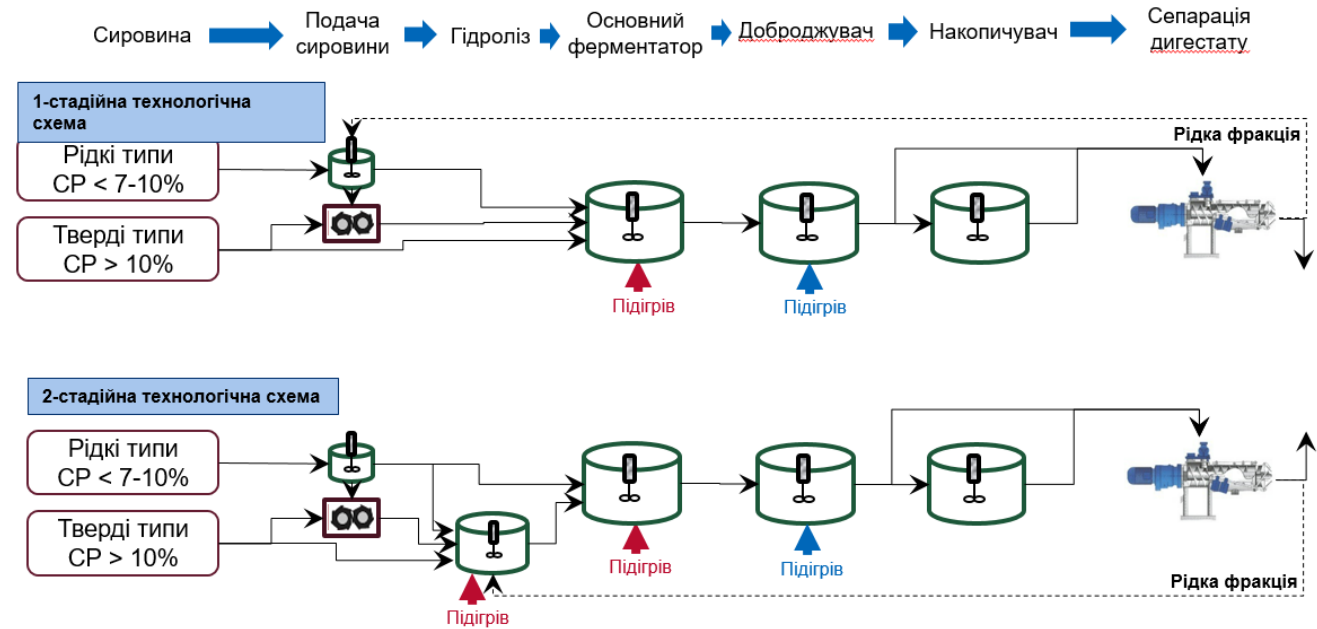
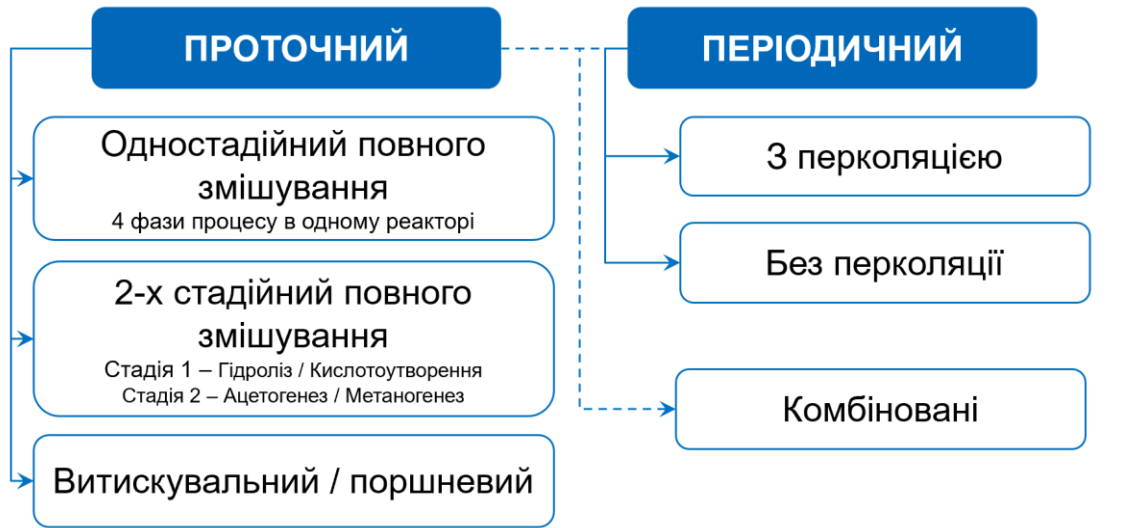
MAXXIMIZER MethaPlanet



BIOGRINDER MEBA

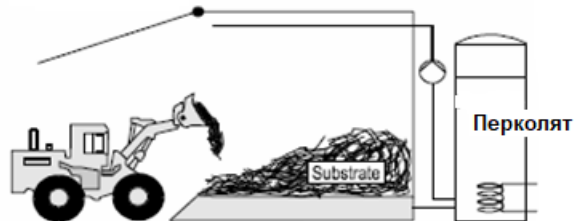


Технології анаеробного зброджування

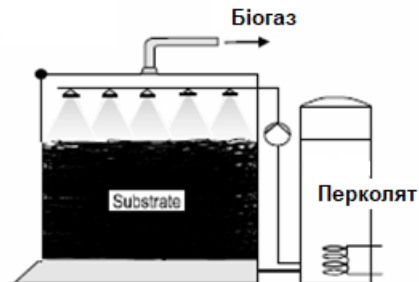


Контейнерний процес з циркуляцією перколяту

Завантаження / вивантаження



Зброджування

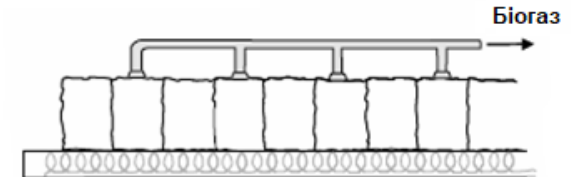


Тонельний процес без перколяту

Завантаження / вивантаження

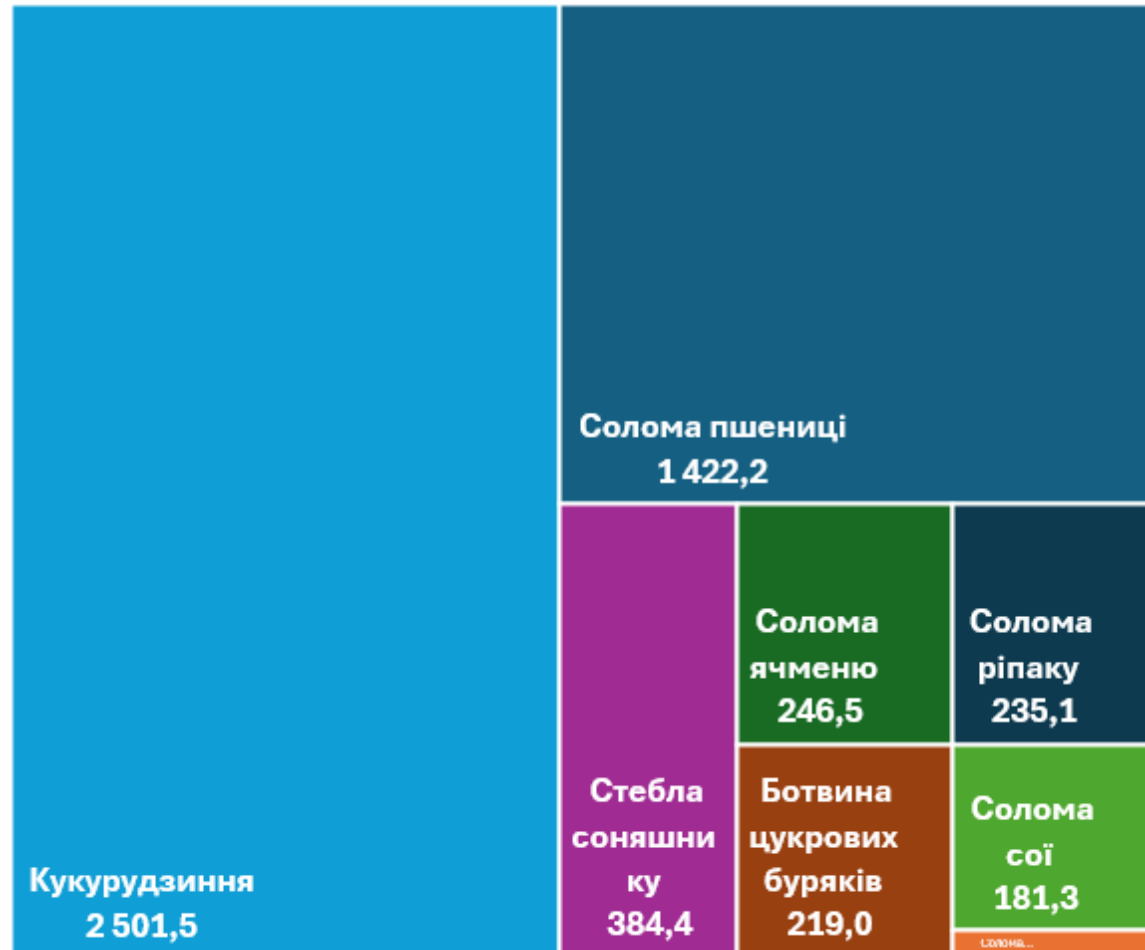


Зброджування

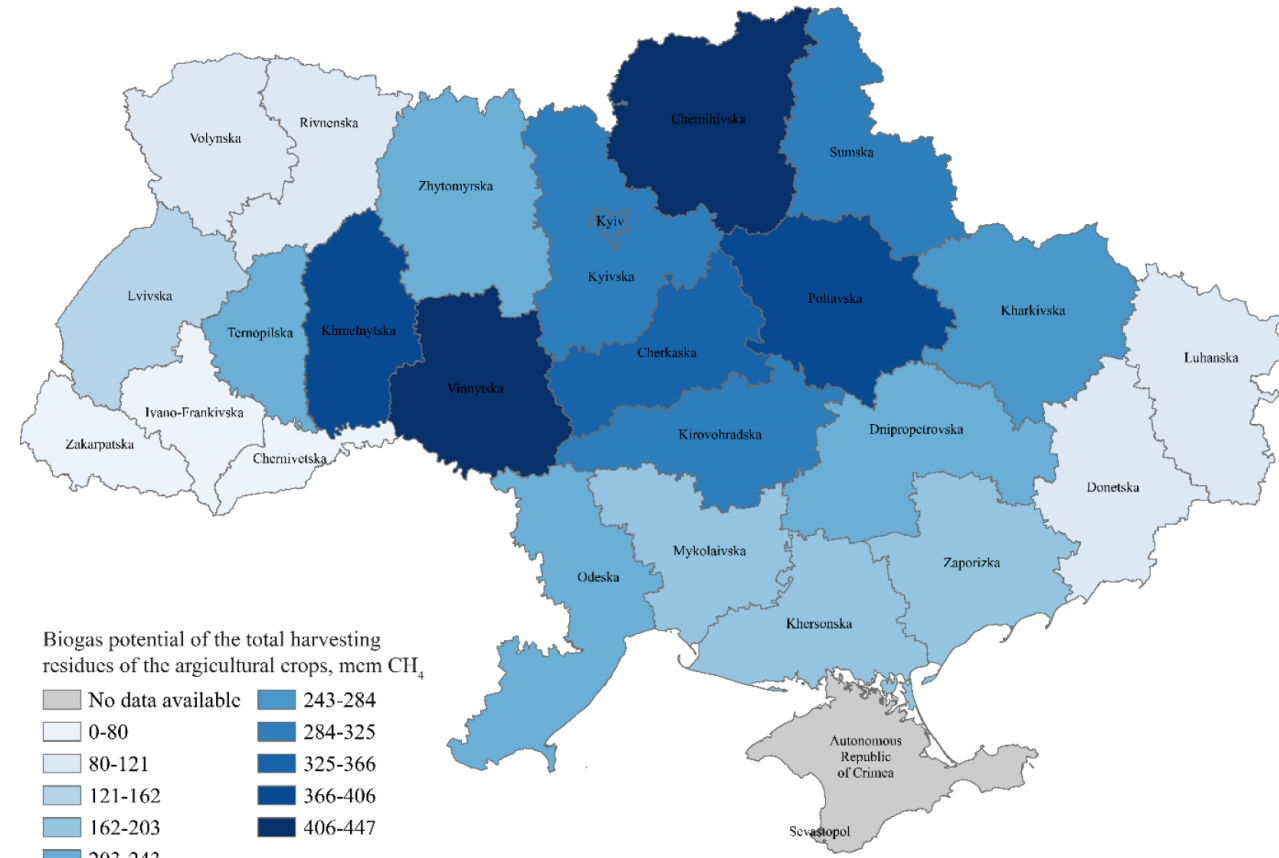


Потенціал виробництва біометану з поживних решток в Україні

Всього – 5.2 млрд nm^3CH_4 на рік



Від 10 до 447 млн nm^3CH_4 /рік по
областям



Note: numbers for the Donetsk and Luhansk districts are given with the temporarily occupied territories excluded

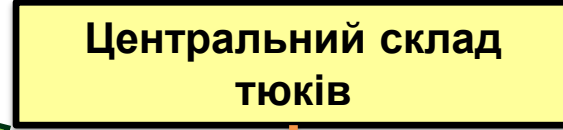
Концептуальна схема проєкту

Підприємство рослинництва
та свинарства



Силос
кукурудзи

Солома +
Кукурудзиння



Концепція 1

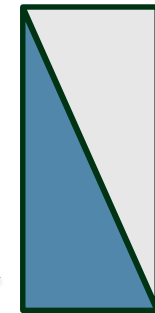
Концепція 2



Біогаз

Е/е на власні потреби

Тепло на власні потреби



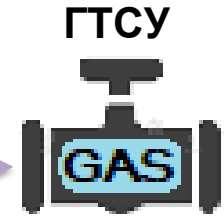
Зріджений CO2



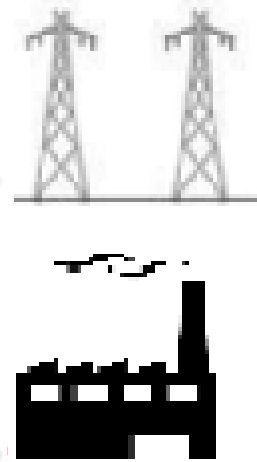
Логістика
зрідженого
CO2



Біометан



Резервна
котельня
на
пелетах



Сировина і вихід CH_4 – концепція 1

Вид сировини	Споживання сировини	Питомий вихід CH_4	% CH_4 в біогазі	Вихід CH_4
	т/рік	$\text{нм}^3\text{CH}_4/\text{т}$	% об.	млн $\text{нм}^3\text{CH}_4/\text{рік}$
Гноївка свиней (СР 4%)	90 000	12	65%	1,05
Солома пшениці (СР 85%)	9 312	205	55%	1,91
Кукурудзиння (СР 75%)	8 123	177	55%	1,44
Силос кукурудзи (СР 35%)	15 974	108	55%	1,73
ВСЬОГО	123 408	-	57%	6,12
в т.ч. на збагачення →				4,40

Сировина і вихід CH₄ – концепція 2

Вид сировини	Споживання сировини	Питомий вихід CH ₄	% CH ₄ в біогазі	Вихід CH ₄
	т/рік	нм ³ CH ₄ /т	% об.	млн нм ³ CH ₄ /рік
Гноївка свиней (СР 4%)	90 000	12	65%	1,05
Пелети з соломи пшениці (СР 90%)	8 619	241	55%	2,08
Кукурудзиння (СР 75%)	6 633	236	55%	1,57
Силос кукурудзи (СР 35%)	21 374	108	55%	2,31
ВСЬОГО	126 626	-	57%	7,00
в т.ч. на збагачення →				4,69

Виробничі показники проєкту

Продукт		Вихід продукту:		
		Концепція 1 – біометан з соломи, після обробки біоекструдером + скраплений CO ₂	Концепція 2 – біометан з пелет + скраплений CO ₂	Концепція 3 – лише біометан з соломи, після обробки біоекструдером
Біометан (98% CH ₄)	тис. нм ³ /рік	4 455,3	4 756,9	4 455,3
	МВт·год/рік	43 540	46 488	43 540
Скраплений CO ₂ (99,99%)	т/рік	5 561	6 001	0
Дигестат	т/рік	109 760	110 928	107 344

Ключові КРІ проєктних концепцій

Показник	Розмірність	Значення для:		
		Концепція 1 біометан з соломи, після обробки біоекструдером + скраплений CO ₂	Концепція 2 біометан з пелет + скраплений CO ₂	Концепція 3 лише біометан з соломи, після обробки біоекструдером
Потужність проєкту	МВт _{біометан}	4,97	5,31	4,97
Питомий CAPEX	тис. євро/МВт _{біометан}	2 802	2 614	2 404
Питомий OPEX	євро/МВт·год _{біометан}	45,5	48,1	43,3
LCOE 15 років	євро/МВт·год _{біометан}	53,8	55,8	50,4
Сумарне споживання електроенергії	МВт·год/рік	7 482	9 973	5 981
Питомі витрати електроенергії	кВт·год/МВт·год _{біометан}	171,8	214,5	137,4
Карбонова інтенсивність біометану	гCO _{2екв} /МДж _{біометан}	- 17,33	- 14,05	14,94

Вихідні параметри фінансової моделі

Параметр	Розмірність	Значення, без ПДВ
Цільові продукти		
Ціна на біометан - концепція 1	євро/МВт·год (*)	91
Ціна на біометан – концепція 2	євро/МВт·год (*)	90
Ціна на біометан – концепція 3	євро/МВт·год (*)	82
Ціна на зріджений CO ₂	євро/т	133
Ціна на дигестат	євро/т	1,5
Сировина		
Солома пшениці	євро/т	25,77
Гноївка свиней	євро/т	0
Кукурудзиння	євро/т	36,84
Силос кукурудзи	євро/т	20,95
Зберігання та логістика сировини в межах комплексу		
Солома пшениці	євро/т	2,93
Гноївка свиней	євро/т	0
Кукурудзиння	євро/т	2,67
Силос кукурудзи	євро/т	3,14
Логістика цільвих продуктів		
Зріджений CO ₂	євро/(т·км)	0,05
Біометан: тариф для точки входу в ГТСУ	грн/(1000 м ³ /добу)	464,37
Біометан: тариф для точки входу та виходу на міждержавних з'єднаннях	євро/(1000 м ³ /добу)	25,66

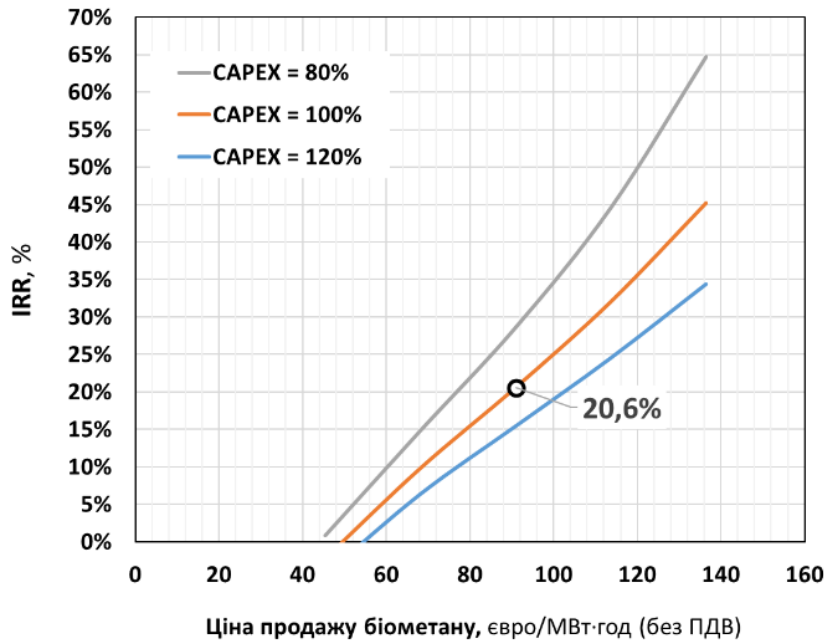
* 1 МВт·год енергії біометану = близько 100,28 нм³CH₄

Економічні показники проєкту

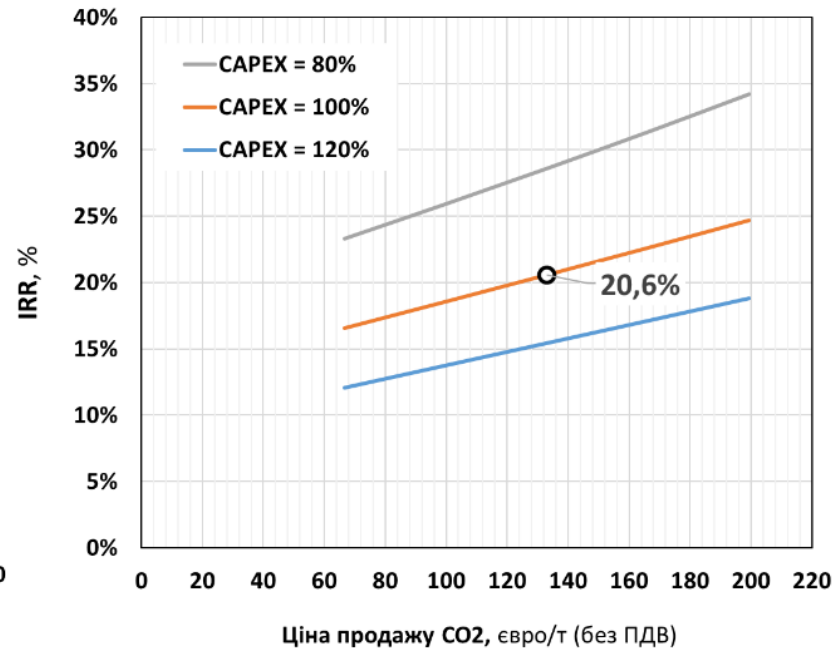
Показник	Розмірність	Значення		
		Концепція 1 біометан з соломи, після обробки біоекструдером + скраплений CO ₂	Концепція 2 біометан з пелет + скраплений CO ₂	Концепція 3 лише біометан з соломи, після обробки біоекструдером
Інвестиції (CAPEX), в т.ч.:		13,93	13,87	11,95
Запозичені кошти	млн євро	8,36	8,32	7,17
Власні кошти		5,57	5,55	4,78
Операційні витрати (OPEX), у т.ч.:		1,98	2,24	1,89
Сировина	млн євро/рік	0,97	0,95	0,90
Операційні витрати	(без ПДВ)	0,35	0,53	0,33
Логістика цільових продуктів		0,39	0,42	0,30
Дохід		4,87	5,15	3,73
Біометан в ГТС	млн євро/рік	3,96	4,18	3,57
Зріджений CO ₂	(без ПДВ)	0,74	0,80	-
Дигестат		0,16	0,17	0,16
NPV	млн євро	6,07	6,25	1,23
IRR	%	20,6%	20,9%	12,5%
PI	-	0,44	0,45	0,10
Простий термін окупності	років	5,8	5,7	7,8
Дисконтований термін окупності	років	7,6	7,5	12,1

Аналіз чутливості – концепція 1

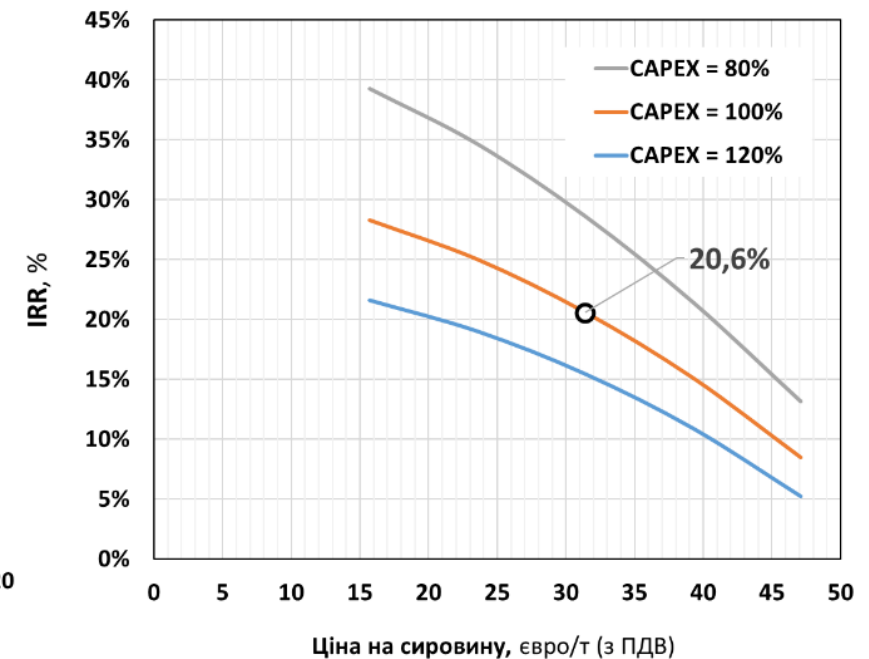
Вплив ціни на біометан



Вплив ціни на CO₂



Вплив ціни на сировину



- На рентабельність проєкту більшою мірою впливає ціна продажу біометану та ціна на сировину, меншою мірою – ціна продажу зрідженого CO₂
- Зменшення ціни біометану до 80 євро/МВт·год або зростання вартості проєкту на 20% знижує рівень рентабельності проєкту до IRR на рівні 15%.
- Такий же ступінь зниження рентабельності може бути при збільшенні ціни на покупну сировину в проєкті на 24 - 27%, з 31,4 до 39 - 40 євро/т, з ПДВ.

UABIO

Дякую за увагу!

Біоенергетична асоціація України
uabio.org

e-mail: kucheruk@secbiomass.com