

Виробництво передового біометану з лігноцелюлозної сировини

АНАЛІТИЧНА
ЗАПИСКА № 2

Георгій Гелетуха
Юрій Матвеев
Петро Кучерук
Семен Драгнєв
Володимир Крамар



Замовник:
The Energy Community

Виконавець:
ГС "БІОЕНЕРГЕТИЧНА
АСОЦІАЦІЯ УКРАЇНИ" (UABIO)

Контракт:
PN01-2025_Ukrainian Biomethane
Sector Development

06/2025

 **UK International
Development**
Partnership | Progress | Prosperity

UABIO





ОБ'ЄДНУЄМО ЕНЕРГЕТИКУ ЄВРОПИ СЬОГОДНІ

energy-community.org

ВІДМОВА ВІД ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ

Цей матеріал було профінансовано завдяки допомозі уряду Сполученого Королівства; проте висловлені думки не обов'язково відображають офіційну позицію уряду Сполученого Королівства.

06/2025

Зміст

ВСТУП	5	<i>Обладнання на основі методів попередньої обробки екструзією</i>	38
1. ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ І ТЕРМІНИ	6	6. ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ АНАЕРОБНОГО ЗБРІДЖУВАННЯ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК	42
2. ОГЛЯД ПОТОЧНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ	7	7. АГРОНОМІЧНІ, ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ	45
3. ВИДИ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК, ДОСТУПНИХ В УКРАЇНІ	12	<i>АГРОНОМІЧНІ АСПЕКТИ</i>	45
<i>ОСНОВНІ ВИДИ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК</i>		<i>ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ</i>	45
<i>Солома пшениці</i>	12	<i>ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ</i>	47
<i>Кукурудзиння</i>	13	8. ТЕО ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ З ПОЖНИВНИХ РЕШТОК	48
<i>Пожнивні рештки соняшнику</i>	15	9. ПРИКЛАДИ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОЄКТІВ З ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ З ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНОЇ АГРОСИРОВИНИ	58
<i>Солома сої</i>	15	<i>БІОГАЗОВА СТАНЦІЯ В М. ЧЕРНОЗЕМЕН, БОЛГАРІЯ</i>	58
<i>Солома ріпаку</i>	16	<i>ДЕМОНСТРАЦІЙНА БІОГАЗОВА УСТАНОВКА У ФОУЛУМІ, ДАНІЯ</i>	58
<i>ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК ЯК СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ</i>	17	<i>БІОМЕТАНОВИЙ ЗАВОД VERBIO SCHWEDT, НІМЕЧЧИНА</i>	59
<i>Гідрофобність</i>	17	<i>БІОМЕТАНОВИЙ ЗАВОД VERBIO NEVADA BIOREFINERY, США</i>	60
<i>С:N співвідношення</i>	19	<i>НАЙБІЛЬША КОМЕРЦІЙНА БІОМЕТАНОВА СТАНЦІЯ НА СОЛОМІ, КИТАЙ</i>	62
<i>Біодоступність органічної речовини</i>	20	<i>АГРО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПАРК, ДАНІЯ</i>	62
<i>Вміст вологи</i>	20	<i>БІОМЕТАНОВИЙ ЗАВОД ШАРПАНТЬЄ, ФРАНЦІЯ</i>	63
<i>Біохімічний потенціал виходу CH₄</i>	21	<i>БІОМЕТАНОВИЙ ЗАВОД ALLIANCE BERRY ENERGIES VERTES, ФРАНЦІЯ</i>	64
4. ТЕХНОЛОГІЇ ЗБОРУ, ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК	22	10. ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ З ПОЖНИВНИХ РЕШТОК В УКРАЇНІ	66
<i>ОЦІНКА ВИТРАТ НА ЗАГОТІВЛЮ СОЛОМИ ПШЕНИЦІ У ВЕЛИКИХ ПРЯМОКУТНИХ ТЮКАХ</i>	26	<i>МЕТОДОЛОГІЯ</i>	66
<i>ОЦІНКА ВИТРАТ НА ЗАГОТІВЛЮ ПОБІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО У ВЕЛИКИХ ПРЯМОКУТНИХ ТЮКАХ</i>	28	<i>ПОТЕНЦІАЛ БІОМЕТАНУ</i>	67
5. ТЕХНОЛОГІЇ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК ПЕРЕД АНАЕРОБНИМ ЗБРІДЖУВАННЯМ	31	<i>Національний рівень</i>	67
<i>МЕТОДИ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ</i>	31	<i>Регіональний рівень</i>	68
<i>Фізичні методи</i>	32	<i>Районний рівень</i>	69
<i>Хімічні методи</i>	32	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	70
<i>Біологічні методи</i>	33		
<i>Комбіновані методи</i>	34		
<i>Порівняння методів</i>	35		
ОБЛАДНАННЯ	36		
<i>Обладнання, що використовує механічні методи попередньої обробки</i>	37		

Перелік скорочень

CAPEX

Капітальні вкладення

CEL

Целюлоза

CSTR

Резервуарний реактор безперервного
перемішування
(англ.: Continuous Stirred Tank Reactor)

DES

Глибокі евтектичні розчинники
(англ.: Deep Eutectic Solvents)

HCEL

Геміцелюлоза

IRR

Внутрішня норма прибутку
(англ.: Internal Rate of Return)

LCOE

Приведена собівартість енергії
(англ.: levelized Cost of Energy)

LGN

Лігнін

NVZ

Зони, вразливі до нітратів
(англ.: Nitrate Vulnerable Zones)

OPEX

Операційні витрати

RED

Директива з відновлювальної енергетики
(англ.: Renewable Energy Directive)

A3

Анаеробне зброджування

БАУ

Біоенергетична асоціація України

БГУ

Біогазова установка

ВРХ

Велика рогата худоба

ГМФ

Гідроксиметилфурфурол

ГП

Гарантії походження

ГТС

Газотранспортна система

ДССУ

Державна служба статистики України

екв.

Еквівалент

ЄБА

Європейська біогазова асоціація

KPP

Країни та ринки, що розвиваються

КГУ

Когенераційна установка

МЕА

Міжнародне енергетичне агентство

н.д.

Немає даних

ОФ

Органічна фракція

ПГ

Парникові гази (за контекстом)

ПГ

Природний газ (за контекстом)

ПДВ

Податок на додану вартість

ПММ

Паливо і мастильні матеріали

ППК

Покривні/проміжні культури

СОР

Суша органічна речовина

СР

Суша речовина

ТПВ

Тверді побутові відходи

Вступ

Метою Аналітичної Записки є оцінка потенційних можливостей використання лігноцелюлозної агросировини для виробництва передового біометану в Україні.

Виробництво біогазу та біометану залишається одним з основних трендів в енергетичній політиці як європейських країн, так і в Україні. В ЄС в 2022 році започатковано нову амбітну програму Єврокомісії REPowerEU¹, згідно якої за рахунок біометану планується замінити 20% імпортованого з російської федерації природного газу до 2030 року, а до 2050 року наростити виробництво біометану до понад 100 млрд м³ на рік.

Наразі у ЄС спостерігається бум розвитку сектору біометану – біогазу, доведеного до якості природного газу, який можна подавати в газопроводи, транспортувати, зберігати і використовувати на рівні з природним газом. Зокрема, ЄС планує збільшити виробництво біометану з 3,5 млрд м³/рік у 2021 р. до 35 млрд м³/рік у 2030 р². Здійснюється пріоритетна підтримка виробництва біометану з відходів та побічних продуктів, які не конкурують з продуктами харчування і кормами.

Згідно директиви ЄС з відновлюваної енергетики (Директива (ЄС) 2018/2001, або RED II)³, внесок рідких біопалив і біогазу до виконання цілі ЄС зі споживання відновлюваної енергії на транспорті зараховується у подвійному розмірі, згідно енергетичного вмісту, якщо ці рідкі біопалива або біогаз вироблені з видів сировини, перелічених у Додатку IX (ст. 27). Важливо, що солома, лушпиння, качани, очищені від зерен кукурудзи та інші лігноцелюлозні матеріали, що використовуються для виробництва біогазу/біометану, відносяться до видів сировини з Частини А Додатку IX RED II, що робить їх пріоритетною сировиною.

Дотепер, використання пожнивних решток для виробництва біогазу та біометану, не було поширеним в Україні, хоча на окремих біогазових станціях їх частково додають до основних видів сировини, як то жом, гній, тощо.

Це обумовлено як технологічними факторами, пов'язаними зі складністю переробки такої сировини, так і економічними факторами, пов'язаними з низькою рентабельністю традиційної концепції виробництва електричної енергії з біогазу.

З відкриттям можливостей реалізувати вироблений біометан на преміальному ринку відновлюваних біопалив в європейських країнах, фокус проєктів виробництва біогазу в Україні зміщується в сторону виробництва та експорту біометану. При цьому, традиційні та найбільш використовувані види сировини в Україні, як то силос кукурудзи та жом цукрових буряків, згідно Директиви (ЄС) 2018/2001 не є сталими, а тому попит на біометан з цих видів сировини та ціна на нього є низькими. Відтак, виникає потреба в пошуку сталих видів сировини, серед яких найбільш вагомими можуть бути пожнивні рештки. До пожнивних решток відноситься широкий спектр рослинних решток (солома, ботвина коренеплідних тощо), які характеризуються різними властивостями. Лєвова частка, особливо в Україні, припадає на лігноцелюлозну біомасу, як то солома чи стебла кукурудзи. **Для задач даної Аналітичної Записки, надалі під терміном «пожнивні рештки» будуть розумітись лігноцелюлозні типи пожнивних решток (солома, стебла кукурудзи).**

Попередня обробка лігноцелюлозної біомаси, такої як солома або стебла кукурудзи, є важливим етапом виробництва біогазу. Її метою є руйнування складної структури лігноцелюлози, для забезпечення доступу до целюлози та геміцелюлози активних компонентів, які згодом перетворюють ці полімери на прості молекули цукру шляхом ферментативного або кислотного оцукрювання.

Залучення пожнивних решток для масштабного виробництва біометану потребуватиме узагальнення та поглиблення знань про особливості такої сировини з точки зору технологій та економіки виробництва біогазу, чому і присвячена дана Аналітична Записка.

Основні визначення і терміни

Директива (ЄС) 2018/2001 (RED II) передбачає наступні визначення для целюлозовмісних матеріалів:

«лігноцелюлозний матеріал» означає матеріал, що містить лігнін, целюлозу та геміцелюлозу, як-от біомаса, отримана з лісів, деревні енергетичні культури та залишки і відходи деревообробної промисловості;

Зазначені матеріали можна переробляти у біометан із застосуванням термохімічних технологій, проте це виходить за рамки цієї Аналітичної Записки.

«нехарчовий целюлозний матеріал» означає сировину, що складається переважно з целюлози та геміцелюлози та має нижчий вміст лігніну, ніж лігноцелюлозний матеріал, включаючи **залишки харчових та кормових культур, такі як солома, стебла, лушпиння та шкаралупа**; трав'янисті енергетичні культури з низьким вмістом крохмалю, такі як райграс (пажитниця), світчграс, міскантус, гігантська тростина; покривні культури до та після основних культур; лейні культури; промислові залишки, включаючи залишки харчових та кормових культур після екстракції з них рослинних олій, цукрів, крохмалю та білку; та матеріал з біовідходів, де під лейними та покривними культурами розуміються тимчасові, короткочасні посіви, що містять суміш трав та бобових рослин з низьким вмістом крохмалю, для отримання корму для худоби та покращення родючості ґрунту для отримання вищих врожаїв основних сільськогосподарських культур.

З переліку матеріалів, які відносяться до **«нехарчових целюлозних матеріалів»**, найбільш релевантними для цілей цієї Аналітичної Записки є **солома** та **стебла кукурудзи**. Лушпиння широко використовується в Україні для виробництва тепла на олійно-екстракційних заводах, як у необробленому, так і в гранульованому вигляді. Трав'яні енергетичні культури, такі як райграс, світчграс та міскантус, також можуть бути релевантними, якщо їх збирати на пізніх стадіях вегетації у сухому вигляді. Проте на сьогоднішній день ці культури

РОЗДІЛ 1

займають незначну частку земель в Україні і збираються переважно для виробництва біомаси, яка використовується для виробництва тепла. Покривні або лейні культури мають схожі характеристики з кукурудзяним силосом і низький вміст лігніну, що не відповідає цілям цієї Аналітичної Записки. Промислові залишки від харчових і кормових культур в Україні представлені переважно жомом цукрових буряків та олійним шротом (макухою), які також не є релевантними для цілей цієї Аналітичної Записки.

Анаеробне зброджування означає процес, що включає серію біологічних процесів перетворення, в яких мікроорганізми розкладають біорозкладний матеріал за відсутності кисню: гідроліз; ацидогенез; ацетогенез; та метаногенез. Отриманий біогаз містить метан (50–70%), вуглекислий газ (30–40%) та інші гази.

Рослинні рештки – частина створеної рослинами надземної і підземної органічної речовини, яка включає побічні продукти та післяжнивні рештки⁴. Загалом, **побічні продукти** – це залишки, які не є відходами. Зокрема, у рослинництві побічна продукція – частина створеної рослинами надземної органічної речовини, яка збирається при відокремленні комбайном зрілих зерен культури, і складається з соломи і полови (далі – **пожнивні рештки**).

Післяжнивні рештки – частина створеної рослинами надземної і підземної органічної речовини, яка залишається на полі після відокремлення комбайном зрілих зерен культури і складається з кореневої системи рослин і стерні.

Згідно з визначенням українського законодавства⁵, **біометан** – це біогаз, який за своїми фізичними та хімічними характеристиками відповідає вимогам нормативно-правових актів щодо природного газу для постачання до газотранспортної або газорозподільної системи або для використання як моторне паливо. Біометан отримують шляхом очищення біогазу, що включає видалення CO₂ та інших домішок. Сучасні методи очищення забезпечують виробництво біометану, що містить 97–98% CH₄.

Огляд поточного стану та перспектив використання поживних решток для виробництва біометану

РОЗДІЛ 2

Кожна частина світу має значні можливості для виробництва біогазу та/або біометану. Оцінку Міжнародним енергетичним агентством⁶ потенціалу виробництва біогазу або біометану в мільярдах кубічних метрів еквіваленту природного газу (млрд м³ екв. ПГ) за регіонами та джерелами сировини показано на **рис. 2.1**.

Найбільшим потенціалом володіє Бразилія, країни Африки, Китай, Індія та Сполучені Штати. Сформований він за рахунок рослинних залишків, включаючи залишки зернових культур, цукрових культур, залишки коренеплодів та бульб, а також залишки виробництва олії та білку, відходи тваринництва, інші біологічні відходи та деревна біомаса для термічної газифікації.

Поживні рештки разом із гноєм тварин є найбільшими джерелами сировини для виробництва біогазу у всіх регіонах,

особливо в країнах, що розвиваються, де сільськогосподарський сектор часто відіграє важливу роль в економіці. Наприклад, у Бразилії великі обсяги залишків кукурудзи та цукрової тростини надходять від цукрової та етанольної промисловості. В Індії, де сільськогосподарський сектор забезпечує близько половини загальної зайнятості, переважна частка потенціалу біогазу формується за рахунок поживних решток цукрової тростини, рису та пшениці.

Потенціал виробництва біогазу в Сполучених Штатах та Європі розподіляється між рослинними рештками (головним чином залишками кукурудзи від етанольної промисловості в США), гноєм тварин та твердими побутовими відходами.

У світовому масштабі витрати на виробництво біогазу знаходяться в відносно широкому

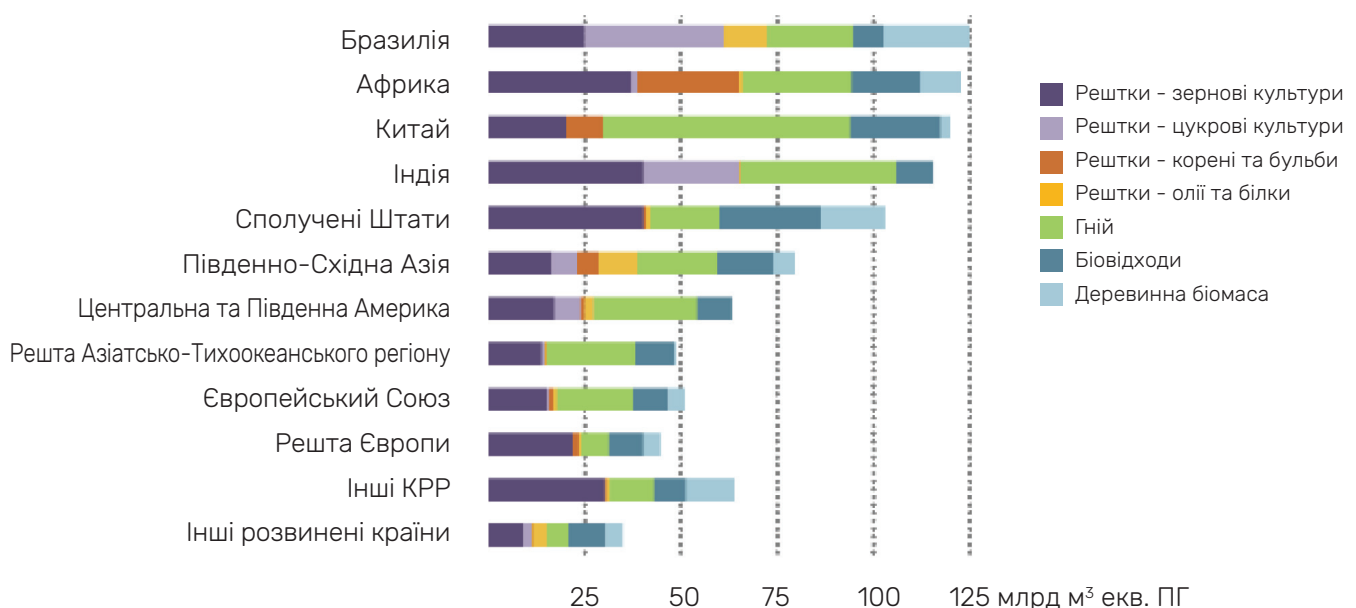


Рис. 2.1 – Потенціал виробництва біогазу за регіонами та типами сировини, 2024 р.⁶
(КРР = країни та ринки, що розвиваються)

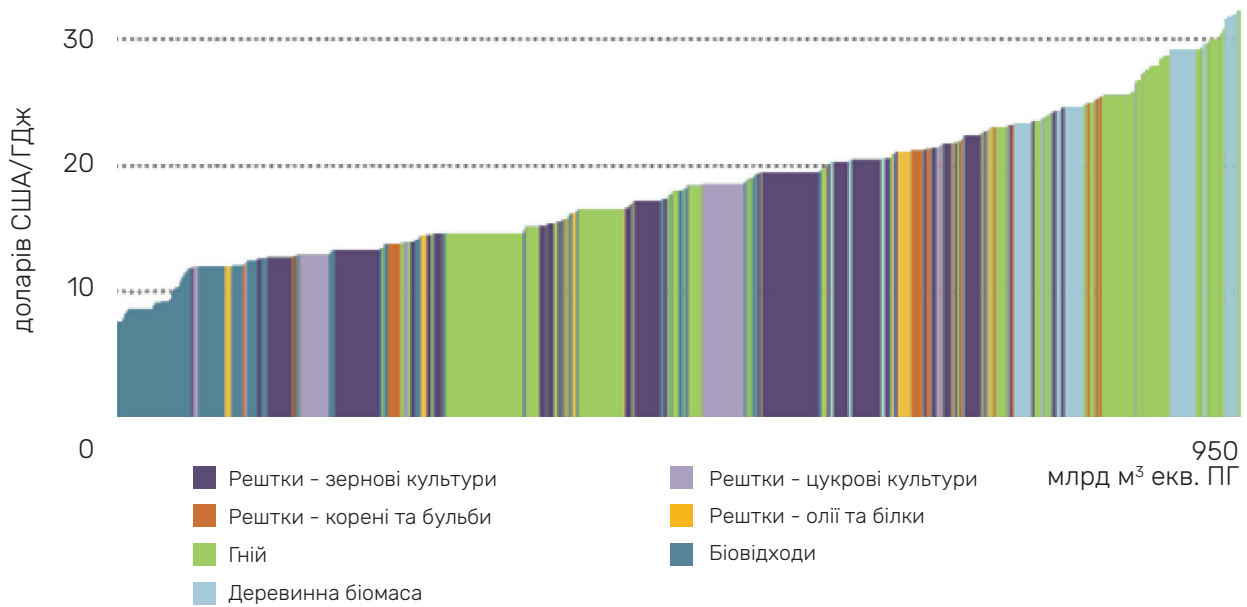


Рис. 2.2 – Крива вартості виробництва глобального потенціалу біометану за ключовими видами сировини, 2024 р.⁶

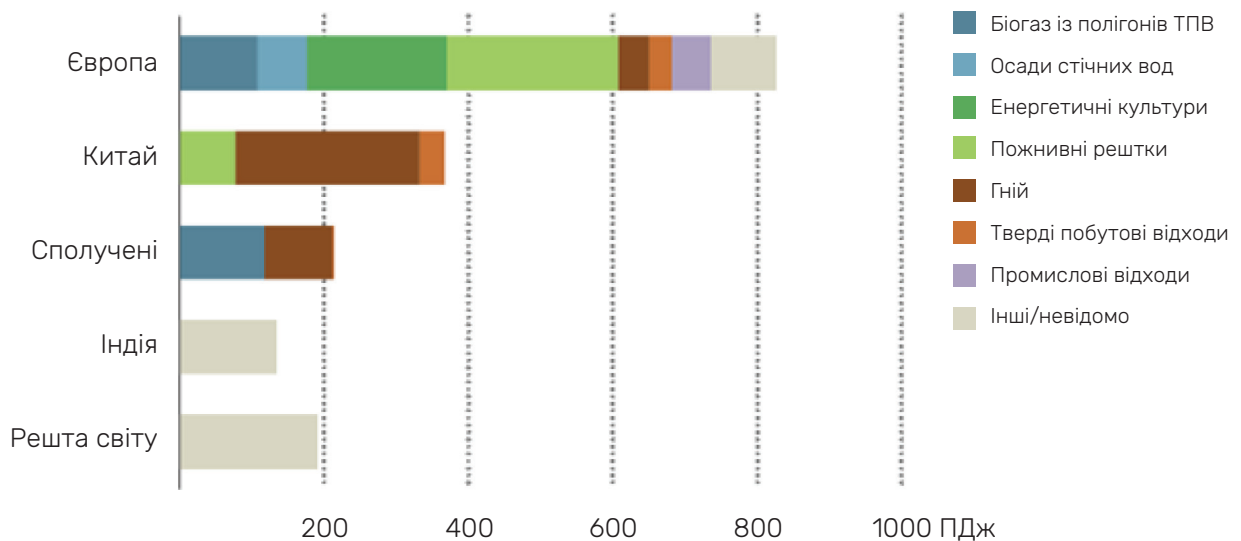


Рис. 2.3 – Використання сировини для виробництва біогазу за вибраними країнами та регіонами, 2023 р.⁶

діапазоні від 8 до 32 доларів США/ГДж (рис. 2.2). Близько 70–95% загальних витрат на біогаз припадає на будівництво біореакторів, решта – на збір та переробку сировини. Велика варіативність цього показника пов'язана з тим, що сировина може мати нульову або навіть негативну вартість у випадках, коли виробники відходів зобов'язані платити за утилізацію своїх відходів, тоді як в інших випадках вхідна вартість деяких видів сільськогосподарської сировини може сягати 100 доларів США за тону в окремих регіонах.

Витрати на виробництво біогазу з сільськогосподарських культур знаходяться в

діапазоні від 12 до 25 доларів США/ГДж. Слід зазначити, що крива MEA інтегрує витрати на технології та сировину. Витрати на технологію включають лише біореактор, тобто виключають будь-які витрати на обладнання для перетворення біогазу на електроенергію та тепло.

Фактичне використання сировини для виробництва біогазу та біометану показано на рис. 2.3. Видно, що аграрні рештки використовуються переважно в Європі та Китаї.

Потенціал виробництва біометану в Європі представлено найбільш універсальним набором сировини, включаючи біогаз з полігонів ТПВ, осаді стічних вод, енергетичні культури,

аграрні рештки, гній, тверді побутові відходи та промислові відходи.

Біогаз та біометан відіграватимуть важливу роль у прагненні Європейського Союзу (ЄС) досягти нульових викидів парникових газів до 2050 року. Згідно плану REPowerEU, Європейська Комісія встановила ціль виробляти 35 мільярдів кубічних метрів біометану щорічно в ЄС до 2030 року, забезпечуючи відновлюване та місцеве джерело газу, що може бути прямою заміною викопного природного газу в багатьох секторах економіки.

Загальне виробництво біогазу та біометану у 2023 році склало 22,1 млрд м³ або 234 ТВт•год енергії⁷. Хоча виробництво біогазу залишається важливим та відносно стабільним, біометан є сегментом ринку, що найшвидше розвивається. У 2022 році європейські країни виробили 4,2 млрд м³ або 44 ТВт•год біометану. У 2023 році цей показник зріс до 4,9 млрд м³ або 52 ТВт•год, що становить збільшення на 18%. Виробничі потужності Європи з виробництва біометану зросли з 5,5 млрд м³/рік у 2022 році до 6,1 млрд м³/рік у 2023 році, та 6,4 млрд м³/рік у першому кварталі 2024 року.

Інформація щодо використання сільськогосподарських відходів у європейських країнах все ще обмежена. На **рис. 2.4** зі статистичного звіту ЄБА за 2024 рік показано

у масових відсотках (сира вага) відносно використання різних видів сировини для виробництва біогазу у 18 європейських країнах. Категорії сировини поділяються на сільськогосподарські відходи, гній, проміжні/покривні та енергетичні культури, осади стічних вод, органічну фракцію твердих побутових відходів (ТПВ) та тверді промислові відходи. Слід зазначити, що для деяких країн не можливо виокремити категорії аграрних решток та гною. Для цих країн ЄБА включила гній до категорії аграрних решток.

Можна побачити, що частка сільськогосподарських відходів у сировині є значною для тих країн, де розподіл між рослинними рештками та відходами тваринного походження не надано. Це може означати, що загалом частка рослинних решток у біогазовій сировині залишається невеликою, порівняно з гноєм. Серед країн, де представлено розподіл між гноєм та рослинними рештками, лідерами у використанні рослинних решток є Бельгія (>25% за свіжою вагою) та Польща (20% за свіжою вагою). Також видно, що використання рослинних решток в Україні все ще незначне.

З іншого боку, спостерігається чітка тенденція до використання аграрних решток для виробництва біометану. На **рис. 2.5** зі статистичного звіту ЄБА за 2024 рік показано

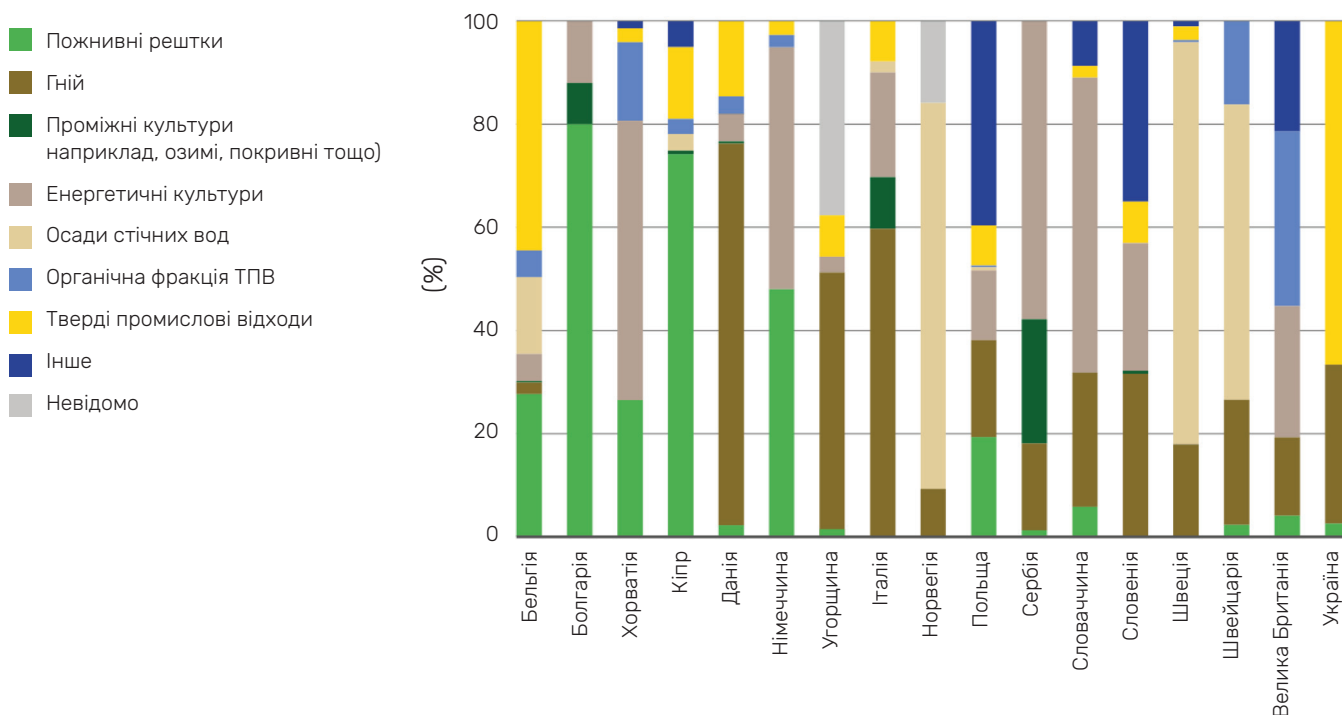


Рис. 2.4 – Відносне використання різних типів сировини для виробництва біогазу в окремих європейських країнах у 2023 році⁷

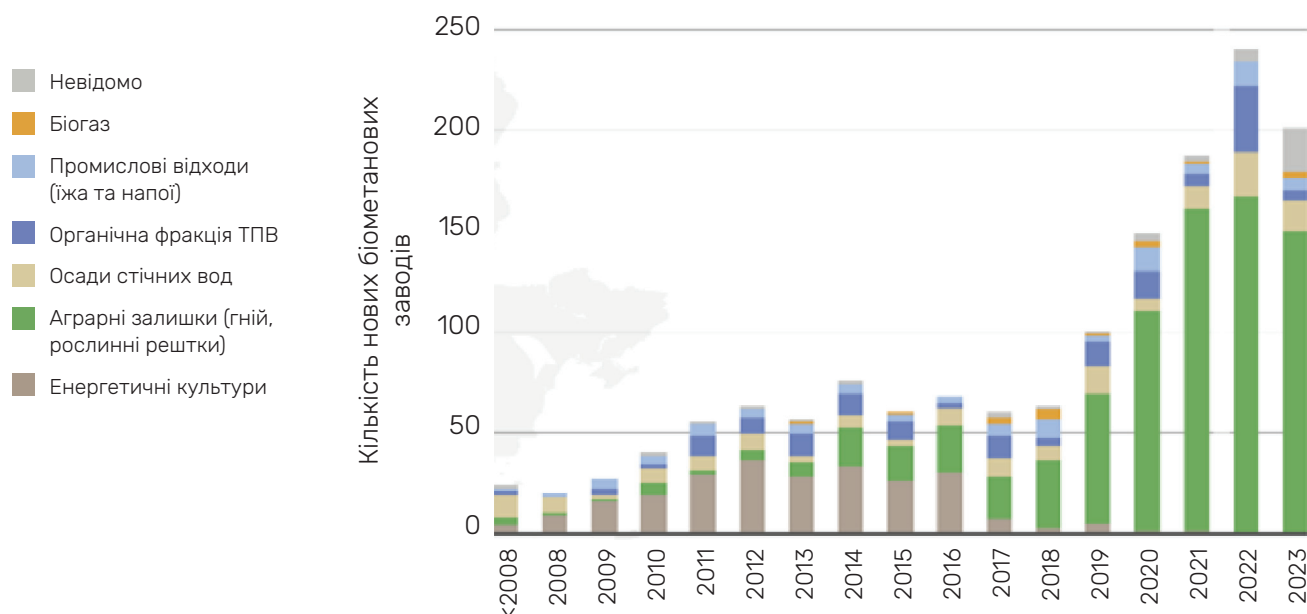


Рис. 2.5 – Кількість нових біометанових установок у Європі за типом сировини, 2008-2023 pp⁷

кількість нових установок з виробництва біометану в Європі щороку, загалом та для кожного окремого типу сировини. З 2017 року майже не було побудовано нових установок для роботи на енергетичних культурах. ЄБА вважає, що «ця зміна частково відображає той факт, що зростання виробництва біометану більше не зосереджено переважно в Німеччині, а натомість будується більше заводів у Франції, Італії, Нідерландах та Данії. У той час як значна частина біометанових заводів у Німеччині працює на енергетичних культурах, заводи в країнах, які наразі лідирують за зростанням у цьому секторі, працюють переважно на сільськогосподарських відходах та залишках і меншою мірою також на органічній фракції твердих побутових відходів, осадах стічних вод та промислових відходах». Слід зазначити, що в цьому випадку сільськогосподарські відходи включають як рослинні рештки, так і відходи тваринництва.

У 2022 році консорціум Gas for Climate⁸ опублікував дослідження, в якому оцінюється потенціал виробництва біометану в ЄС-27, а також Норвегії, Швейцарії та Великій Британії. Потенціал ЄС-27 у 2030 році оцінено в 41 млрд м³, з прогнозом росту до 151 млрд м³ у 2050 році, якщо буде реалізовано увесь потенціал сталого біометану. Оцінений потенціал для ЄС-27 плюс Норвегія, Швейцарія та Велика Британія становив 45 млрд м³ у 2030 році та 165 млрд м³ у 2050 році.

Біогаз та біометан можна виробляти з різноманітної сировини. Дві основні технології виробництва біометану включають анаеробне зброджування зі збагаченням біогазу та газифікацію. Газифікація означає термічну газифікацію, яка перетворює на біогаз суху деревну або лігноцелюлозну біомасу та тверді відходи, та гідротермічну газифікацію (також відому як газифікація з використанням надкритичної води), яка особливо добре підходить для обробки вологих органічних відходів та стічних вод.

Майже весь біометан у Європі сьогодні виробляється шляхом анаеробного зброджування. Термічна газифікація з синтезом біометану наразі досягла лише демонстраційного рівня. Гідротермічна газифікація перебуває на стадії промислової демонстрації, ініціативи реалізуються в кількох європейських країнах. Потенціал для масштабування обох технологій є великим у середньостроковій та довгостроковій перспективі (2030 рік і далі).

Пожнивні рештки – це матеріали, що залишаються на полі після збору основної культури (наприклад, солом зернових). Пожнивні рештки придатні як для анаеробного зброджування, так і для термічної газифікації. Однак у контексті цього дослідження розглядається лише анаеробне зброджування сировини, яке вже комерційно впроваджується у великих масштабах. Разом з тим, у майбутньому

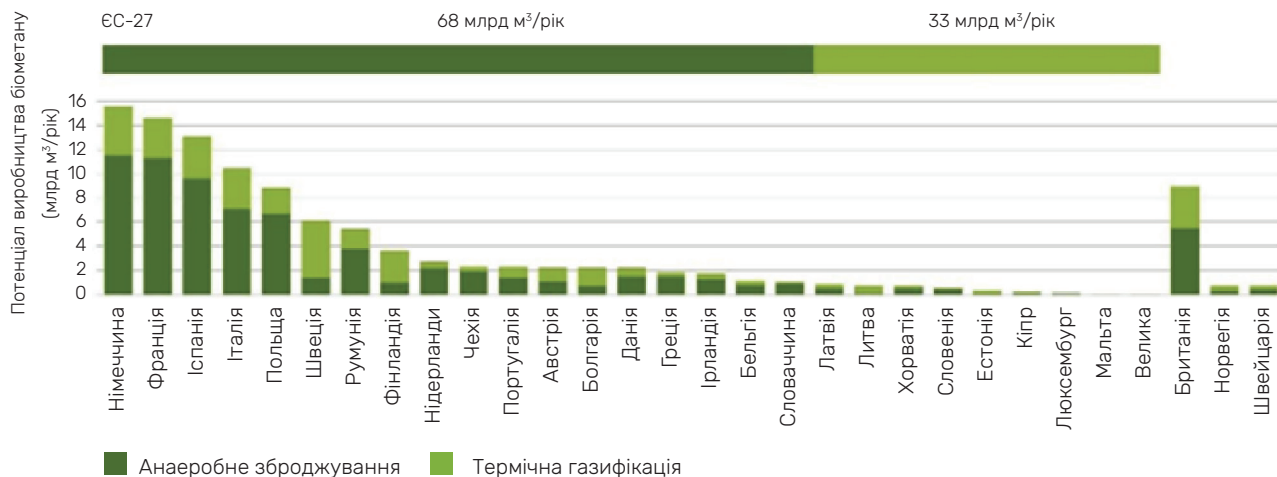


Рис. 2.6 – Потенціал біометану (млрд м³/рік) у 2040 році за країнами та технологіями⁸

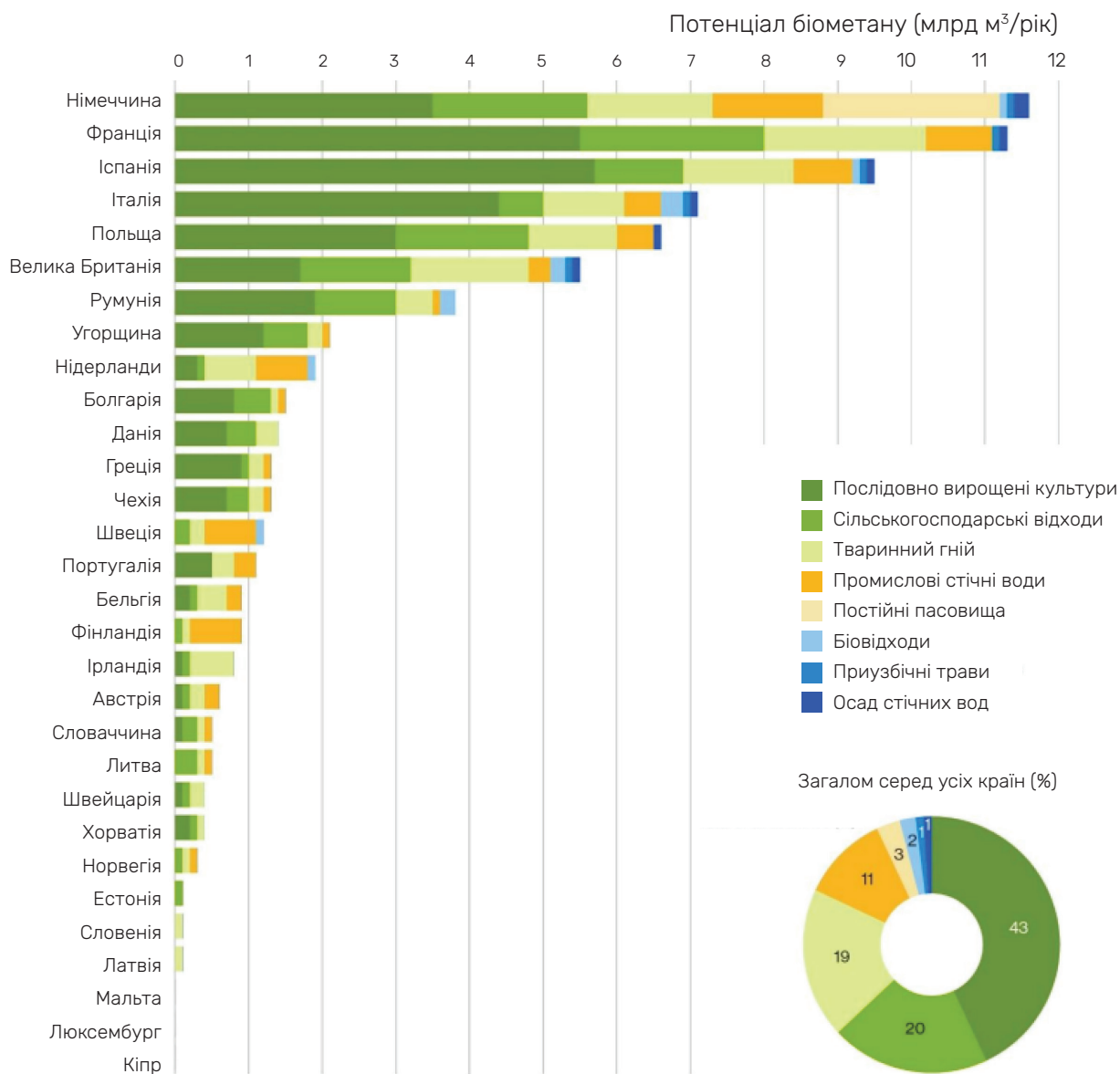


Рис. 2.7 – Потенціал біометану анаеробного зброджування (млрд м³/рік) для кожної країни та загалом для всіх країн у 2040 році¹⁰

при використанні технології гідротермічної газифікації можна буде ще більше розширити спектр сировини, придатної для виробництва біометану, включаючи пожнивні рештки.

Загальний потенціал біометану для кожної країни був розрахований з урахуванням оцінки доступності кожного виду сировини та ступеня її конверсії в біометан за допомогою визначеної технології виробництва біометану. Для аграрних решток, гною тварин, промислових стічних вод, проміжних/покривних культур та осадів стічних вод потенціал оцінювався методом «знизу вгору», на основі поточних статистичних даних європейського та національного рівнів та прогнозів до 2050 року, з урахуванням тенденцій у чисельності населення, площі земель/виробництві сільськогосподарських культур або чисельності тварин.

Потенціал сировини відображає технічні обмеження (наприклад, частку теоретичного потенціалу сировини, яку можна реально використати) та, де це доречно, екологічні обмеження (наприклад, збереження ґрунту), щоб отримати сталий потенціал. Сталий потенціал був додатково зменшений, щоб врахувати існуючі неенергетичні способи використання, щоб гарантувати, що використання сировини для виробництва біометану не впливатиме

на ці існуючі способи використання та не призводитиме до непрямого впливу.

Потенціал біометану на 2040 рік оцінювався в 111 млрд м³ (рис. 2.6), з яких 101 млрд м³ стосується ЄС-27. Цей потенціал складається з 74 млрд м³ біогазу, отриманого анаеробним зброджуванням (67% від загальної кількості) та 37 млрд м³ біогазу від термічної газифікації (33% від загальної кількості). Європейськими країнами з найбільшим потенціалом у 2040 році є Німеччина, Франція, Іспанія, Італія та Велика Британія. Разом ці країни забезпечують понад 50% загального потенціалу біометану. Високий потенціал біометану оцінено також у Польщі.

Як уже згадувалося, загальний потенціал **анаеробного зброджування** до 2040 року оцінюється в **74 млрд м³**, з яких 68 млрд куб. м припадає на ЄС-27. До п'ятірки лідерів входять Німеччина, Франція, Іспанія, Італія та Польща (рис. 2.7)⁹. Основними сировинними ресурсами у 2040 році будуть послідовно вирощені культури (43%), а також аграрні рештки 20%) та гній тварин (19%). Разом ці сировинні ресурси становлять 82% від загальної кількості.

Країнами з найбільшим потенціалом аграрних решток у 2040 році будуть Франція (2,5 млрд м³), Німеччина (2,1 млрд м³), Польща (1,8 млрд м³), Велика Британія (1,5 млрд м³) та Іспанія (1,2 млрд м³).

Види та властивості пожнивних решток, доступних в Україні

Основні види пожнивних решток

В Україні щорічно утворюється значна кількість пожнивних решток у результаті вирощування основних сільськогосподарських культур. Серед лігноцелюлозних видів пожнивних решток, до найбільш поширених в Україні можна віднести **солому злакових культур**, таких як пшениці, ячменю, **кукурудзиння, стебла та кошики соняшнику, солому ріпаку та солому сої** (табл. 3.1). В незначних кількостях утворюються також пожнивні рештки гречки, вівса, рису, сорго, проса, квасолі, бобів, гороху, нуту, сочевиці, вики, люпину.

РОЗДІЛ 3

Таблиця 3.1 – Основні види пожнивних решток в Україні

Культура	Тип решток
Пшениця	Солома
Ячмінь	
Кукурудза	Стебла, листя, обгортки качанів, волоті, качани
Соняшник	Стебла, кошики
Ріпак	Стебла, стручки
Соя	Стебла, листя



Рис. 3.1– Солома нативна



Рис. 3.2 – Солома в круглих тюках (рулонах) в полі

Солома пшениці

Пшениця є культурою, під яку в Україні зазвичай відводяться найбільші посівні площі. Її вирощують в усіх регіонах України, однак більше – в центральних, південних та східних частинах, з більш сухим та теплим кліматом.

Солома пшениці (далі – солома) є найбільш поширеним видом пожнивних решток, що знаходять широке застосування в різних сферах, зокрема:

як підстилковий матеріал для утримання тварин (рис. 3.1), зокрема домашніх (пелети соломи),

як субстрат для вирощування грибів, в нативній або додатково подрібненій формі,

як біопаливо, в тюкованій (рис. 3.2) або гранульованій/брикетованій формі,

як субстрат для компостування та вермікомпостування,

як сировина для виробництва біогазу/біометану,

як будівельний матеріал,

як джерело целюлози для виробництва паперу, тощо.

Технології збору соломи в полі, тюкування подрібнення та гранулювання/брикетування, на відміну від багатьох інших видів пожнивних решток, є комерційно розвиненими та поширеними в застосуванні. Відтак, солома може розглядатись як технічно доступна сировина для виробництва біогазу. Разом з тим, враховуючи досить високий конкурентний

попит на солому в інших сферах застосування, такий ресурс має, з однієї сторони, конкурентне ціноутворення, а з іншої – може бути обмеженим ресурсом в певних районах та господарствах.

Враховуючи той факт, що таку солому, як правило, збирають в теплу суху погоду, її склад та властивості є досить стабільними. Суха маса соломи з вологістю 15-20% добре зберігається протягом року в тюкованій формі під накриттям, а також є придатною для виробництва з неї гранул та брикетів. Це робить солому прогнозованою сировиною для технологічного процесу виробництва біогазу.

Кукурудзиння

Останніми роками кукурудза на зерно в Україні традиційно займає значні площі посівних земель, що за масштабом поступаються лише площам під пшеницею. Кукурудзу вирощують практично в усіх регіонах України, втім найбільше – в центральних, північних та західних областях, що характеризуються порівняно більшою вологозабезпеченістю в ґрунті.

Відтак пожнивні рештки кукурудзи на зерно (кукурудзиння) можуть бути ще одним вагомим видом сировини для виробництва біогазу. При цьому, на відміну від соломи, кукурудзиння в Україні зрідка збирається з полів і використовується в інших сферах діяльності, що робить його сировиною з відносно низьким конкурентним попитом. Проте, практика збору кукурудзиння в Україні існує. Відомо про виробництво пелет з кукурудзиння, зокрема

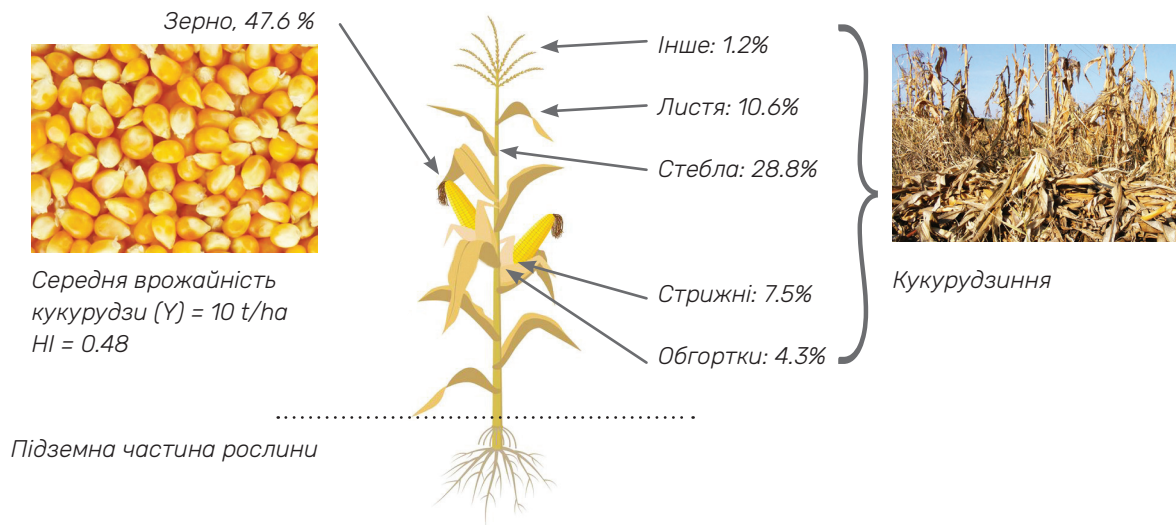


Рис. 3.3 – Різні надземні частини рослини кукурудзи та співвідношення їх сухої маси



Рис. 3.4 – Кукурудзиння в полі після збору урожаю



Рис. 3.5 – Кукурудзиння в круглих тюках

в Одеській області. Кукурудзиння також може бути сировиною для виробництва біоетанолу 2-го покоління, втім в Україні такі технології поки не розвиваються.

Кукурудзиння, що утворюється при збиранні урожаю зерна кукурудзи, містить в собі переважну масу надземної частини рослини, що зрізається комбайном. Воно містить різні частини рослини, зокрема стебла, листя, стрижні, обгортки та стовпчики з приймочками (вусики) (рис. 3.3).

Головною особливістю використання кукурудзиння як сировини для виробництва біогазу є не прогнозованість його складу, що залежить від сорту кукурудзи, періоду збирання урожаю, погодних умов. Кукурудзу на зерно збирають у різні терміни, залежно від сорту, місця вирощування та строків сівби. Вологість різних частин кукурудзи неоднорідна і швидко зменшується через 120 днів від дати посіву. У Європі типовий період збирання кукурудзи –

вересень-листопад. Нерідко аграрії збирають кукурудзу в грудні-січні, а то й пізніше, що пов'язано з певними виробничими потребами та економічною доцільністю.

Під час збирання врожаю кукурудзиння (рис. 3.4) часто більш вологе ($W > 30\%$), ніж зерно (стандартна вологість у ЄС $W14\%$), але після збирання зерна волога з кукурудзиння інтенсивно випаровується, зокрема за рахунок вітру¹¹. Крім того, вологість кукурудзиння сильно залежить від погодних умов під час збирання врожаю, а інтенсивні опади можуть призвести до дуже несприятливих умов для збирання біомаси і подальшого її енергетичного використання.

Забезпечення належного зберігання кукурудзиння як сировини для біогазу протягом року є більш складною задачею, ніж для соломи. При вологості зібраного в тюки кукурудзиння (рис. 3.5) більше 25%, воно може з часом пріти, що погіршуватиме його якість та призводитиме

до значних втрат сухої речовини, особливо при відкритому зберіганні тюків. Так, в дослідженні¹² було показано, що при відкритому зберіганні тюків кукурудзиння втрачається від 10 до 23% сухої речовини, залежно від його початкової вологості. Досушування кукурудзиння в полі в осінній період до прийнятної для тюкування вологості $\leq 20\%$ часто не можливо забезпечити¹³, а тому є не прогнозованим.

Для ефективного виробництва пелет з кукурудзиння, його вологість повинна бути в межах 10–15%. Цей рівень вологості забезпечує оптимальне пресування, міцність пелет і зменшує ризик утворення цвілі під час зберігання. Відтак, при гранулюванні кукурудзиння виникатиме потреба в його попередньому досушуванні, що відповідно збільшує енергетичні витрати на підготовку такої сировини.

Альтернативою є збір, подрібнення на наступне силосування вологої маси кукурудзиння ($W=30-45\%$), що може бути реалізовано на практиці¹⁴. Втім, для ефективного силосування цієї вологості може бути недостатньо і буде потрібно додаткове зволоження такої маси, з тим щоб забезпечити достатній вихід цукрів з кукурудзиння та достатнє пресування в силососховищі для створення анаеробних умов в його товщі. Збір вологої біомаси з поля може також приводити до збільшення її зольності, за рахунок потрапляння в неї більшої маси

землі, що може негативно позначатись на технологічних процесах виробництва біогазу.

Резюмуючи, можна сказати, що використання кукурудзиння як сировини для виробництва біогазу потребуватиме більш ретельних підходів до його заготівлі та зберігання, а характеристики кукурудзиння можуть бути не прогнозованими від сезону до сезону, що робить таку сировину до певної міри ризикованою для біометанових проєктів. Стратегія мінімізації цих ризиків може полягати в адаптації технологічного процесу виробництва біогазу до використання кукурудзиння змінного складу, що є можливим.

Пожнивні рештки соняшнику

Соняшник – основна олійна культура в Україні. Традиційно найбільше соняшнику вирощують у центральній, південній та східній частинах країни. В Україні період збирання соняшнику починається у серпні і закінчується у листопаді, при цьому основний урожай збирають у вересні-жовтні¹⁵.

Стебла соняшнику (рис. 3.6) після зрізання кошиків з насінням, як правило, в подальшому зрізають, подрібнюють і залишають в полі. Однак такі стебла можна зібрати, наприклад, самохідним кормозбиральним комбайном, який обладнаний жаткою для збирання грубостеблих



Рис. 3.6 – Поле після збирання урожаю соняшнику



Рис. 3.7 – Збір урожаю сої

культур¹⁵, для подальшого використання. Їх можна використовувати як біопаливо¹¹, як матеріал для отримання паперу¹⁶, хоча подібні практики не є поширеними, зокрема і в Україні. Відтак, стебла соняшнику є доступною біомасою для виробництва біогазу, з практично відсутнім конкурентним попитом.

Стебла, кошики соняшнику (без насіння) та суміші стебел і кошиків являють собою волокнисті матеріали із низьким вмістом білку та дуже змінним складом через різницю в зрілості та пропорціях різних фракцій решток¹⁷. Аналогічно як і у інших видів побічної продукції рослинництва, характеристики стеблової маси та кошиків залежать від місця вирощування, періоду збирання та погоди, ґрунту та добрив. Також на якісні характеристики зібраної побічної продукції соняшнику суттєво впливає технологія заготівлі та зберігання.

Враховуючи те, що стебла соняшнику можуть залишатись в полі в незрізаному стані ще деякий час, можна забезпечити їх збирання при достатньо низькій вологості, що зробить таку біомасу придатною для тривалого зберігання протягом року з відносно прогнозованими характеристиками. Основним недоліком концепції використання стебел соняшнику як сировини для виробництва біогазу є низька рентабельність їх збору, що обумовлено низьким виходом такої біомаси з 1 га.

Солома сої

Соя, як правило, займає друге місце в Україні по засіяним площам серед технічних культур, після соняшника. Вирощують сою в більшій мірі в центральних та західних регіонах. За основними властивостями солома сої схожа до соломи колосових, досить легко тьокеться, а тому може мати схожі сфери застосування.

Як правило, урожай сої збирають, коли зерна досягають вологості приблизно 13-15%, листя вже опало, боби стали сухі, стебла і боби побуріли. Типовий період збирання сої може відрізнятися залежно від географічного розташування та місцевого клімату. В Україні в більшості регіонів збір врожаю відбувається в період з кінця літа до початку осені, як правило, з кінця серпня до жовтня¹⁸.

Пряме скошування сої за допомогою зернозбиральних комбайнів є найбільш поширеним методом збирання сої в Україні та світі. (рис 3.7). При цьому, солома відділяється від зерна сої в самому комбайні і розкидається по полю. Метод роздільного збирання сої, коли в першій фазі сою скошують у валки за допомогою валкової соєвої жниварки, а у другій фазі за допомогою платформи підбирача збирають та подають на обмолот до комбайну, використовується зрідка. Солому сої при зборі з поля, як правило, є сухою, тому добре підходить



Рис. 3.8 – Збір урожаю ріпаку



Рис. 3.9 – Солома ріпаку в полі

для тюкування. Відтак, соломі сої також можна розглядати як потенційну сировину для виробництва біогазу з прогнозованими характеристиками.

Солома ріпаку

Ріпак займає третю сходинку за площею посівів серед технічних культур, що вирощуються в Україні. Головна причина популярності вирощування ріпаку – це можливість продати його на зовнішніх ринках. У 2023 році Україна експортувала 3,7 млн тон ріпаку, всього зібравши 4,5 млн тон¹⁹. Лідерами за виробництвом ріпаку є Хмельницька, Тернопільська, Одеській та Херсонська області. Багато ріпаку вирощується також в Вінницькій, Волинській, Дніпропетровській, Львівській та Миколаївській областях. В Україні вирощується переважно озимий ріпак (> 96% усіх площ під ріпаком).

Терміни збирання ріпаку зазвичай залежить від кількох факторів, таких як кліматичні умови, географічне розташування та відповідність вимогам певного сорту ріпаку. Процес збирання ріпаку (рис. 3.8) зазвичай відбувається у літній період. Але конкретні строки можуть відрізнятися залежно від кожного регіону та гібриду ріпаку. Зазвичай для України ріпак скошують в липні-серпні. Збирають ріпак, як правило, комбайнами, з розкиданням соломи в полі (рис. 3.9). Враховуючи, збір урожаю в літню пору, соломі ріпаку можна збирати в досить сухому стані, придатному для тюкування і подальшого енергетичного використання, зокрема на біогаз.

Характеристики поживних решток як сировини для виробництва біогазу

З точки зору технології анаеробного зброджування, не оброблена лігноцелюлозна біомаса є відносно складною сировиною, що обумовлено наступними основними її властивостями:

- сильні гідрофобні властивості*
- високе (не оптимальне) співвідношення C:N*
- високий вміст лігніну та низька біодоступність органічної речовини*
- низька вологість*

Як правило, використання поживних решток для виробництва біогазу вимагає застосування технологій їх попередньої обробки перед зброджуванням, а також використання додаткових, комплементарних видів сировини, як правило, багатих на нітроген.

Гідрофобність

Гідрофобність соломи – її стійкість до поглинання води – зумовлена, перш за все, її біохімічним складом та структурою поверхні, типовими для лігноцелюлозної біомаси.

Гідрофобність не дозволяє рідині проникати в пористу структуру волокон соломи, що містить повітря. Гідрофобні властивості необробленої соломи проявляються протягом тривалого часу, що робить такий матеріал плавучим і схильним до флотації та закупорення верхніх частин технологічних ємностей.

Хоча абсолютна густина волокон соломи є більшою за густину води (**табл. 3.2**), наявність повітря в їх пористій структурі не дозволяє осідати такому матеріалу в технологічних ємностях та біореакторах «вологого» типу.

Таблиця 3.2 – Абсолютна густина лігноцелюлозного матеріалу

Поживні рештки	Абсолютна густина, г/см ³
Пшенична солома	1.30–1.50
Кукурудзиння	1.35–1.45
Стебла соняшнику	1.20–1.40
Ріпакова солома	1.25–1.45
Солома сої	1.30–1.45

При цьому, пористість різних типів поживних решток може бути різною і залежить від внутрішньої структури стебла та інших частин рослини та структури лігноцелюлозних комплексів. Внутрішня пористість волокон соломи може складати 50–70%²⁰.

Серед видів поживних решток солома пшениці, солома жита та солома рису характеризуються найвищим рівнем гідрофобності (**табл. 3.3**). Порівняно менш гідрофобними є стебла кукурудзи та соняшнику, ріпакова та соєва солома. Високий рівень гідрофобності потребуватиме застосування досить інтенсивних методів попередньої обробки,

включно з механічними, термічними чи хімічними, щоб зробити таку біомасу придатною для анаеробного зброджування в технологічних системах гідравлічного типу.

До основних факторів, що обумовлюють гідрофобність соломи та інших поживних решток, відносяться:

*високий вміст лігніну,
покриття поверхні восковою кутикулою,
кристалічність целюлози,
накопичення кремнезему (SiO₂),
закриті клітинні структури.*

Лігнін є ароматичним полімером, що заповнює простір між целюлозою та геміцелюлозою, і є найважливішим чинником гідрофобності. Сильно гідрофобний через свою неполярну, ароматичну структуру. Лігнін виконує роль природного водозахисного бар'єра та структурної опори волокон рослинної біомаси.

Зовнішня поверхня соломи (особливо стебел і листків) покрита кутикулою. Кутикула складається з нерозчинної у воді з детергентами кутикулярної мембрани, вкритої та просякнутої розчинними восками. Найвідомішим компонентом кутикулярної мембрани є поліестерний полімер кутин, що складається зі з'єднаних естерними та епоксидними зв'язками гудроксильних кислот²³.

Таблиця 3.3 – Гідрофобні властивості деяких поживних решток^{21, 22}

Поживні рештки	Рівень гідрофобності	Ключові гідрофобні фактори	Ефективність поглинання води
Солома пшениці	Високий	Високий вміст лігніну, воскова кутикула, кремнезем	Погана змочуваність
Кукурудзиння	Помірно високий	Помірний вміст лігніну, менш воскова поверхня	Помірна
Стебла соняшнику	Помірно високий	Воскоподібна поверхня, жорстка	Повільне поглинання води
Солома ріпаку	Помірний	Помірний вміст лігніну, тонший віск	Помірно гідрофобна
Солома сої	Низько помірний	Нижчий вміст лігніну, пориста	Гідрофільна
Солома ячменю	Високий	Високий вміст кремнезему, воскова кутикула	Погана

Кутикулярний шар сильно відштовхує воду, подібно до природного «пластикового» шару (рис. 3.10).



Рис. 3.10 – Краплини води на восковій кутикулі
листя капусти-кале

Целюлоза має аморфні та кристалічні ділянки. Кристалічні ділянки щільно упаковані й стійкі до проникнення води. Хоча сама целюлоза є гідрофільною, її структура у соломі обмежує доступ води.

Кремнезем (SiO_2) часто накопичується в епідермісі соломи, зокрема пшеничної та рисової. Він зміцнює тканину рослини, збільшує твердість та шорсткість поверхні, і тим самим створює додатковий бар'єр проникненню води та сприяє водовідштовхуванню.

Анатомічна будова соломи, особливо клітини склеренхіми, обмежує капілярне всмоктування води, на відміну від м'яких клітин інших рослин. Склеренхіма — тканина рослини, що складається з щільно розташованих клітин з потовщеними здерев'янілими оболонками, які надають органам рослин міцності. Оболонки склеренхімних клітин мають високу міцність, близьку до міцності сталі²⁴.

До основних методів зниження гідрофобності соломи відносяться:

Лужна обробка – руйнує лігнін та воски²¹

*Паро-вибухова обробка –
відкриває клітинні стінки²⁵*

*Біологічна обробка з допомогою грибів –
розкладає лігнін²⁶*

*Механіко-термічна обробка (екструзія,
гранулювання)²⁷.*

Загальним висновком може бути той факт, що без застосування термічних, біологічних або хімічних методів попередньої обробки, забезпечити достатній рівень зниження гідрофобних властивостей соломи є складною задачею.

C:N співвідношення

Співвідношення C:N є одним з ключових показників, що характеризують придатність сировини для ефективного анаеробного зброджування. Рекомендоване співвідношення вуглецю до азоту для анаеробного зброджування зазвичай становить від 20:1 до 30:1^{28, 29}, в той час як оптимум складає 25–30:1³⁰. Такий діапазон передбачає:

достатню кількість вуглецю як джерела енергії для мікробів

достатню кількість азоту для синтезу мікробного білка

уникнення інгібування аміаком (через надлишок азоту) або уповільнення процесів (через дефіцит азоту)

З огляду на те, що більшість видів поживних решток мають значення C:N > 40 (табл. 3.4), виникатиме потреба в балансуванні їх складу за цим показником перед анаеробним зброджуванням. Найбільше це стосуватиметься соломи пшениці та соломи ріпаку.

Таблиця 3.4 – Типові значення C:N в поживних рештках

Поживні рештки	C:N типове значення	C:N діапазон	Джерело
Солома пшениці	80	60-100	31
Кукурудзиння	55	45-65	32
Стебла соняшнику	50	40-60	33
Солома ріпаку	60	50-75	34
Солома сої	30	25-35	35

Найбільш дієвим та поширеним способом є сумісне зброджування з сировиною, більш багатою на нітроген, як то гноївка свиней, послід курячий, післяспиртова барда, тощо. Нижче наведено приклад оцінки необхідної

пропорції мас соломи гранульованої та посліду для досягнення прийнятного величини співвідношення C:N в суміші (табл. 3.5, рис. 3.11).

Таблиця 3.5 – Вихідний склад соломи пшениці гранульованої та посліду

Параметр	Од. вим.	Значення	
		Курачий 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

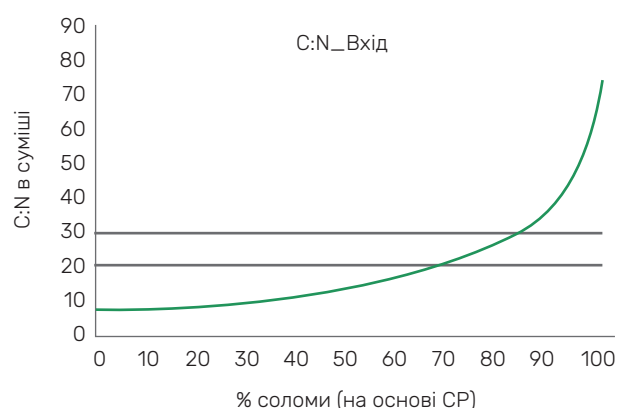


Рис. 3.11 – Залежність величини C:N від частки соломи в суміші з послідом курячим

Як видно з результатів наведеного прикладу, для отримання значення C:N на рівні 20-30, співвідношення соломи гранульованої до посліду повинно складати від 70%:30% (C:N=20) до 84%:16% (C:N=30) за сухою речовиною. В перерахунку на свіжу масу це складає від 43%:57% до 63%:37%, відповідно.

Альтернативними стратегіями оптимізації величини C:N в поживних рештках можуть бути наступні:

*Попереднє пророщування грибів
(селективна біологічна делігніфікація)*

Вилуговування водою або замочування

*Контрольована термічна попередня обробка
(низькотемпературна гідротермічна обробка)*

*Лужна попередня обробка + розділення
твердих/рідких речовин*

Додавання штучних азотних добрив

Гнильний гриб розкладає лігнін і деяку целюлозу, які багаті на вуглець, але залишають азот, мінерали та білки відносно недоторканими²⁶. Таким чином, частка вуглецю зменшується шляхом еволюції CO₂, але N, P, K залишаються в біомасі або в отриманому дигестаті.

Замочування соломи у воді видаляє розчинні вуглецеві сполуки (наприклад, прості цукри, фенольні сполуки), зберігаючи при цьому мінерали, такі як K, P, Mg, які менш вилуговуються за нейтрального pH³⁶. Щоб уникнути надмірної втрати поживних речовин, слід застосовувати низькі температури та короткі тривалості обробки.

Помірне нагрівання (60-120°C) може вивільняти леткі вуглецеві сполуки (наприклад, CO₂, оцтову кислоту), але зберігати структурні азот, фосфор та інші елементи³⁷. Таким чином можна досягти часткової декарбонізації з обмеженим впливом на поживні речовини. За вищих температур (>150°C) може відбуватися втрата поживних речовин або структурне руйнування.

Обробка NaOH або вапном розчиняє лігнін та геміцелюлозу (багаті на вуглець), після чого слідує пресування або фільтрування³⁸. Поживні речовини можуть залишатися у твердій або рідкій фазі залежно від розчинності. За потреби, N та P можна більше зберегти у твердій фазі коригуючи час реакції та значення pH.

Використання штучних азотних добрив може бути виправданим, оскільки вони будуть вноситися з дигестатом майже у всій своїй абсолютній масі на поля, де вони все одно використовувалися б для вирощування основних сільськогосподарських культур.

Таблиця 3.6 – Лігноцелюлозний склад поживних решток

Тип залишків	CEL (%)		HCEL (%)		LGN (%)		Джерело
	Сер.	Діап.	Сер.	Діап.	Сер.	Діап.	
Солома пшениці	37	32-42	24	20-28	18	15-21	39
Кукурудзиння	39	34-45	26	22-30	15	12-18	40
Стебла соняшнику	36	30-42	24	20-28	18	15-22	41
Солома ріпаку	35	30-40	22	18-26	21	18-24	42
Солома сої	37	32-42	23	20-26	17	14-20	40

Таблиця 3.7 – Типові значення вмісту сухих речовин в поживних рештках

Поживні рештки	CP (%) типове (середнє) значення	CP (%) діапазон	Джерело
Солома пшениці	86	84-92	45
Кукурудзиння	78	72-84	46
Стебла соняшнику	80	76-85 (після підсушування в полі)	47, 48
Солома ріпаку	85	80-90	34
Солома сої	86	82-88	49

Однак, цей підхід слід ретельно оцінити з точки зору специфічної формули різних добрив та біологічної доступності джерела азоту.

Усі перераховані альтернативні стратегії досі не застосовувались в промисловому масштабі при підготовці лігноцелюлозної сировини до анаеробного зброджування, тому доцільність їх застосування потребує більш детального вивчення та відповідних досліджень.

Біодоступність органічної речовини

Відомо, що в процесі анаеробного зброджування лігнін практично не розкладається або тривалість такого розпаду значно перевищує економічно доцільну тривалість зброджування. Відтак, частка лігніну в соломі є часткою незброджуваної органічної речовини. В поживних рештках частка лігніну складає від 12-16% (солома сої) до 18-22% (стебла соняшнику, солома ріпаку) (табл. 3.6).

Окрім лігніну, не зброджується також частина целюлози та геміцелюлози, а також

частина протеїну. Загальний ступінь розпаду органічної речовини соломи при анаеробному зброджуванні, як правило, не перевищує 45-55%, і лише при застосуванні лужної обробки або паро-вибухової технології може досягати 70-75%^{21, 43}. Гранулювання соломи також призводить до підвищення ступеня біодоступності органічної речовини соломи. Так, наприклад, в роботі⁴⁴ показано, що ступінь конверсії сухої органічної речовини гранульованої соломи пшениці склав 62,6%, що на 22,3% більше такого показника для нативної соломи та на 15,9% для соломи, механічно подрібненої до фракції менше 2 мм.

Вміст вологи

Вихідна вологість сировини в процесі виробництва біогазу є фактором, що зокрема визначає можливість або доцільність застосування тих чи інших технологій та типів біореакторів. Поживні рештки є, як правило, сухою біомасою з вологістю 10-28% (табл. 3.7), що при застосуванні найбільш поширених серед

аграрних БГУ біореакторів «вологого» типу буде потребувати вирішення питання забезпечення достатньою кількістю вологи.

Найбільш очевидним рішенням в даному контексті може бути використання свіжої води. Так, наприклад, для того щоб організувати процес зброджування соломи в біореакторі «вологого» типу при її вихідній вологості 15% та за умови забезпечення вмісту сухих речовин в реакторі не вище 10%, необхідно буде додати не менше 3,1 м³ води на кожен тону соломи. Для проекту потужністю 5 млн нм³CH₄ на рік це потребувало б постачання принаймні 74,6 тис. м³/рік води, що відповідає середньому водоспоживанню 1550 мешканців міста. Однак в певних регіонах, особливо зважаючи на зміну клімату, в окремі періоди року може спостерігатись значний дефіцит води, що обмежуватиме використання такого рішення.

Іншим можливим рішенням може бути використання рециркулю рідкої фракції дигестату в процес. Втім таке рішення теж матиме свої обмеження по частці такого рециркулю, що обумовлено ризиком надмірного підняття концентрації солей та інших небажаних для процесу бродіння речовин.

Найбільш прийнятним рішенням може бути сумісне зброджування сухої біомаси пожнивних решток з субстратами, що містять достатню кількість вологи і при цьому можуть бути комплементарними для оптимізації макро- та мікроелементного складу суміші. Одним з найбільш придатних в цьому плані видів сировини є рідка гноївка свиней, що, як правило, містить 94–98% вологи. Для того, щоб організувати процес зброджування соломи в біореакторі «вологого» типу при її вихідній вологості 15% та за умови забезпечення вмісту сухих речовин в реакторі не вище 10%, необхідно буде додати не менше 3,9 м³ гноївки вологістю 96% на кожен тону соломи. Для проекту потужністю 5 млн нм³CH₄ на рік це потребувало б постачання принаймні 77,5 тис. м³/рік гноївки, що відповідає свинофермі з середнім поголів'ям на рівні 15 700 голів.

Зброджування пожнивних решток, як буде показано в **Розділі 6**, можливе також в ферментерах «сухого» типу. При цьому, потреби в додаванні води суттєво знижуються, а низька вологість пожнивних решток не є критичною для процесу анаеробного зброджування.

Біохімічний потенціал виходу CH₄

Питомий вихід CH₄ з пожнивних решток з розрахунку на 1 кг СОР є помітно меншим, ніж для зеленої біомаси відповідних рослин, що обумовлено лігніфікацією біомаси при втраті в ній вологи. Наприклад, з кукурудзиння можна отримати до 270–300 млCH₄/гСОР, на відміну від силосу кукурудзи з виходом 350–360 млCH₄/гСОР.

Вихід метану з **пшеничної соломи** коливається від 240 до 296 млCH₄/гСОР, причому найвищий вихід досягається шляхом сумісного зброджування та рециркулю рідкого дигестату⁵⁰. Згідно лабораторних даних НТЦБ, вихід метану з гранульованої соломи пшениці склав 300–320 млCH₄/гСОР, що на 13–16% вище, ніж для механічно подрібненої соломи 265–275 млCH₄/гСОР. Схожі результати отримано також в роботі²⁷, де вихід метану коливався від 260–319 млCH₄/гСОР для пелет із соломи та 262–289 млCH₄/гСОР для необробленої соломи.

Необроблені **стебла кукурудзи** дають 256 ± 15 млCH₄/гСОР⁵¹. Після попередньої лужної обробки, вихід метану зріс на 43,3% до 367 ± 35 млCH₄/гСОР. За лабораторними даними НТЦ Біомаса, з подрібнених стебел кукурудзи можна отримати 306–317 млCH₄/гСОР. З гранульованого кукурудзиння в одному експерименті було отримано 247–257 млCH₄/гСОР, в іншому – 300 млCH₄/гСОР. Очевидно, що сорт кукурудзи⁵² та період збору кукурудзиння можуть суттєво впливати на вихід метану.

Біохімічний потенціал метану необроблених **кошиків соняшнику** становив 210 ± 1,97 млCH₄/гСОР, та 127,98 ± 5,19 млCH₄/гСОР для необроблених **стебел соняшнику**. Кошики вважаються кращою сировиною для виробництва біогазу порівняно зі стеблами соняшнику. Після попередньої обробки лугом вихід метану із кошиків становив 268,35 ± 0,11 млCH₄/гСОР, тоді як вихід метану з оброблених стебел соняшнику становив 168,17 ± 6,87 млCH₄/гСОР⁵³.

Дослідження⁵⁴ показало, що з необробленої **соломи ріпаку** можна отримати в середньому 255,2 ± 7,7 млCH₄/гСОР. Попередня обробка імпульсним електричним полем (PEF) збільшила вихід метану з ріпакової соломи, досягнувши 290,8 ± 12,1 млCH₄/гСОР, що на 14% більше порівняно з необробленим зразком. Дослідження НТЦ Біомаса показало, що з нативної соломи ріпаку можна отримати

170–200 млCH₄/гCOP, з механічно подрібненої фракції <2 мм – 226 млCH₄/гCOP, що більше на 13–33%. Гранулювання соломи ріпаку дозволяє отримати ще більший вихід метану – 256 млCH₄/гCOP.

Солома сої має відносно менший потенціал, у порівнянні з іншими видами пожнивних решток. З необробленої соломи сої можна отримати 127±2 млCH₄/гCOP⁵⁵. При застосуванні методів попередньої обробки, як-от NaOH-H₂O₂ та екструзії, можна збільшити вихід метану на 28–62% порівняно з необробленою соломой. Зокрема, попередня обробка NaOH-H₂O₂, дозволяє збільшити виробництво метану до 206 ± 2 млCH₄/гCOP. Схожі результати, 145 млCH₄/гCOP, було отримано в лабораторії НТЦ Біомаса з подрібненої до фракції <2 мм

соломі сої. Гранулювання соломи сої дозволило збільшити вихід CH₄ на 22% до 177 млCH₄/гCOP, що втім є значно меншим показником, ніж для гранульованої соломи пшениці чи кукурудзиння.

Відтак, можна резюмувати, що різні пожнивні рештки від різних культур дають різний вихід метану на одиницю органічної речовини. При цьому, різні методи попередньої обробки пожнивних решток в різній мірі здатні підвищити вихід біогазу. Гранулювання пожнивних решток дозволяє підвищити вихід метану на 10–20%, у порівнянні з необробленою біомасою. Серед основних видів пожнивних решток в Україні, найвищі виходи метану можна отримати з соломи пшениці та кукурудзиння, найменші – з соломи сої та стебел соняшнику.

Технології збору, транспортування та зберігання пожнивних решток

Рослинні рештки формують первинну сільськогосподарську біомасу (солома, стебла і стрижні кукурудзи, стебла і кошики соняшнику, тощо), яка придатна для збирання, та має найбільший наявний потенціал біомаси аграрного походження, доступної для енергетичного використання в Україні. Така біомаса розосереджена по площі полів і тому потребує додаткових витрат на збирання на відміну від вторинної біомаси, яку отримують при переробці основної сільськогосподарської продукції (макуха, лушпиння, шкаралупа, костриця тощо).

Обсяги рослинних решток суттєво залежать від сортових особливостей сільськогосподарських культур, таких як їхня врожайність, висота стебла та співвідношення вегетативної маси до зерна, а також від ґрунтово-кліматичних умов регіону вирощування, включаючи кількість опадів, температурний режим та

РОЗДІЛ 4

родючість ґрунту, і, нарешті, від застосованої агротехнології, зокрема системи обробки ґрунту, внесення добрив та методів збирання врожаю. Наявні технології заготівлі дозволяють частково зібрати лише надземну частину культури, яка вважається побічною продукцією рослинництва, наприклад, соломі та полові, яких зазвичай збирають від 2 до 5 т/га⁵⁶. При цьому стерня та підземна частина рослини залишаються у полі. Побічна продукція рослинництва характеризується низькою насипною щільністю (наприклад, солома у неущільненому вигляді має 20–50 кг/м³), тому для забезпечення ефективної логістики таку біомасу доцільно пресувати у тюки (рулони) щільністю 90–230 кг/м³, брикети або гранули із насипною вагою 650–700 кг/м³.

Слід відзначити, що бувають ситуації, коли рослинні рештки збирають у подрібненому вигляді через неможливість та недоцільність їх

ущільнення, зокрема, через високу вологість. До того ж надмірний вміст води у побічній продукції рослинництва спричиняє псування біомаси під час її зберігання. Контроль вологості біомаси особливо важливий для осіннього збирання рослинних решток, коли переважає дощова і холодна погода. Зокрема, такі умови виникають при збиранні кукурудзиння у жовтні – листопаді. Мікробна активність сповільнюється, якщо вміст води у біомасі менше 22% і стає майже неактивною за вологості менше 18%⁵⁷.

Ці та інші особливості рослинних решток слід враховувати при плануванні та організації ланцюжка «заготівля-постачання». Анаеробне зброджування рослинних решток є ключовим елементом економіки замкнутого циклу в агросекторі. Цей процес дозволяє перетворити побічну продукцію рослинництва на два цінні продукти: біогаз (або біометан) для виробництва чистої енергії та дигестат – екологічне органічне добриво. Внесення дигестату назад на поля забезпечує повернення ключових елементів живлення у ґрунт, що зменшує залежність від мінеральних добрив. Таким чином, цикл, що починається з ефективного збору рослинних залишків, завершується генерацією енергії та підтриманням родючості ґрунтів.

Збирання врожаю – найбільш відповідальний період в технології вирощування сільськогосподарських культур. Головна вимога до проведення цього заходу полягає в тому, щоб зібрати без втрат увесь біологічний урожай та зберегти його продовольчі і кормові якості при мінімальних затратах праці і коштів, що можна досягти чітким плануванням і високою організацією збиральних робіт.

Загальна стратегія організації збирання зернових і технічних культур – зуміти швидко і в повному обсязі вивезти зерно і насіння з поля, уникнути його псування і втрат від осипання або дії опадів. Тому, агровиробники під час жнив, стикаючись з обмеженнями у ресурсах, нестачі часу, несприятливими погодними умовами, тощо, основну увагу приділяють збору врожаю основної продукції із забезпеченням мінімального рівня його кількісних та якісних втрат. Досвід аграріїв свідчить, що для забезпечення заготівлі заданих обсягів та необхідної якості соломи і кукурудзиння потрібно використовувати

спеціальні заготівельні механізовані ланки, укомплектовані технікою та кваліфікованим персоналом. Слід відзначити, що у агровиробників тваринницького напрямку є в наявності техніка для заготівлі соломи, але вони її збирають для власних потреб. Сільськогосподарські підприємства рослинницького напрямку готові реалізовувати солому, але в них відсутня необхідна техніка, зокрема прес-підбирачі та навантажувачі. Ґрунт з необробленою стернею швидко втрачає воду, також розростаються бур'яни. Тому побічну продукцію, зокрема, солому, необхідно забирати з полів одночасно із збиранням врожаю. Строки заготівлі і вивезення побічної продукції рослинництва з полів потрібно узгоджувати із аграріями та суворо їх виконувати. Крім того, особливу увагу слід приділяти підготовці складів, які мають забезпечити належні забезпеченню належних умов для зберігання біомаси. Також важливо налагодити контроль і моніторинг якості й кількості поставленої сировини.

Необхідність використання спеціалізованих машин і обладнання для збирання, переробки та логістики побічної продукції рослинництва призводить до значних капітальних витрат. Прикладами такої техніки є прес-підбирачі великих прямокутних тюків, самозавантажувальні причепа, потужні трактори, навантажувачі, автотранспорт, дробарки, прес-брикетувальники, гранулятори тощо. Ця техніка має бути максимально завантажена, що потребує ретельного планування з огляду на сезонність сільськогосподарської діяльності, залежність від погодних умов та агротехнологічні обмеження. Схеми основних технологій механізованої заготівлі побічної продукції рослинництва наведені на **рис. 4.1**.

Нині найбільш розповсюдженим способом заготівлі соломи та інших сухих рослинних решток є тюкування безпосередньо у полі. Для формування тюків з соломи та їх обв'язування використовують прес-підбирачі, що дозволяють отримати щільні, заданої форми й потрібних розмірів прямокутні тюки або циліндричні рулони. Розрізняють наступні види прес-підбирачів: поршневі для формування малих, середніх і великих прямокутних тюків, рулонні з постійною та змінною камерою пресування. Типові розміри і вага тюків наведена у **табл. 4.1**.

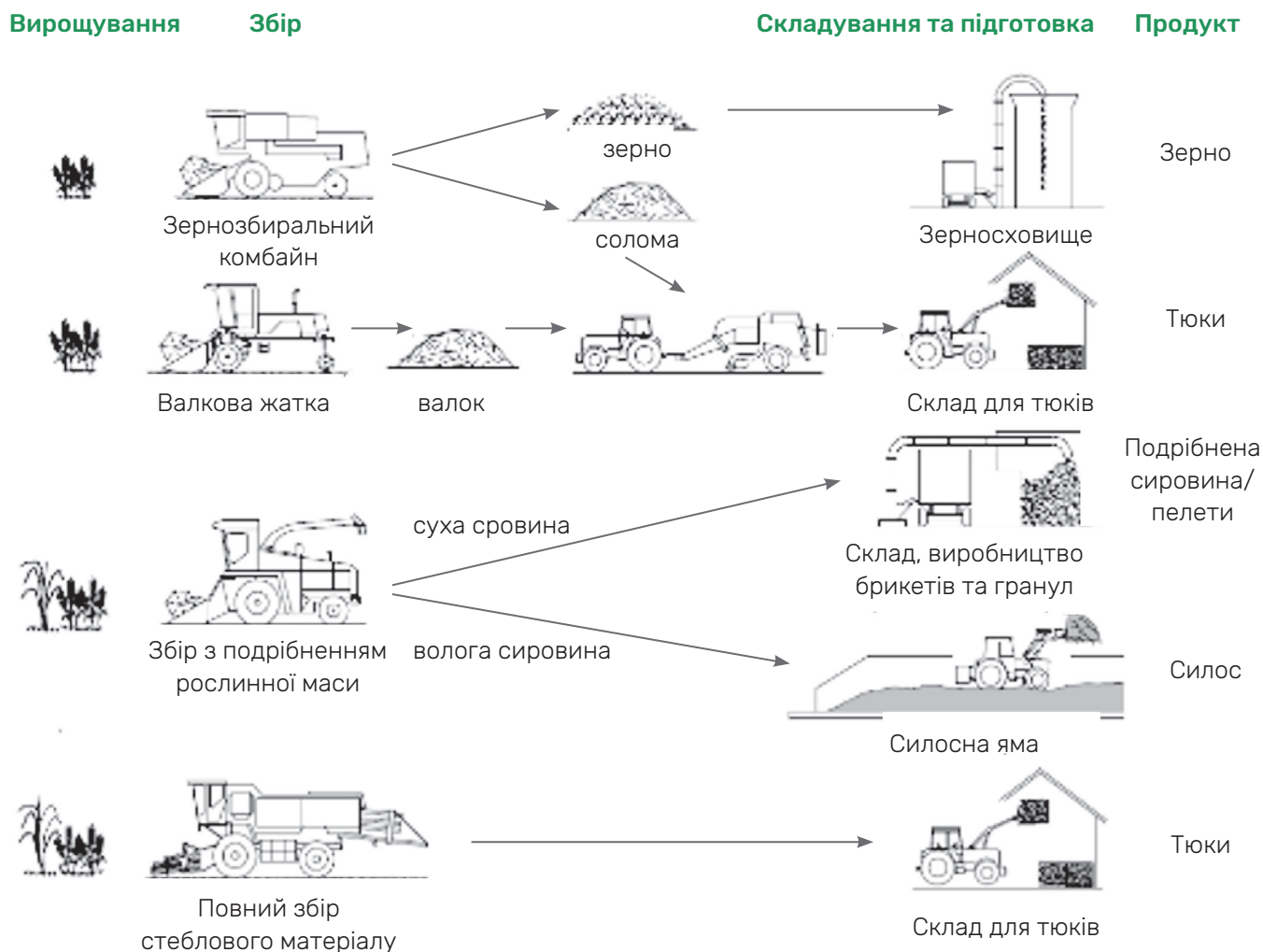


Рис. 4.1 – Варіанти збору врожаю основної продукції та рослинних решток⁵⁸

Таблиця 4.1. Властивості тюків соломи⁵⁹

Тип тюка	Розміри Д × Ш × В, см	Вага, кг	Щільність, кг/м ³
Малі тюки	70-90 × 46 × 36	12-15	90-100
Круглі тюки (рулони)	120 × 170*	220-270	100-120
Середні тюки	200-240 × 80 × 80	200-250	110-150
Міні-великі тюки	230-250 × 120 × 70	290-450	150-215
Середньо-великі тюки	230-250 × 120 × 90	450-650	160-230
Великі тюки	230-250 × 120 × 130	450-650	140-170

Примітка:

* ширина × діаметр

Швидкість роботи прес-підбирачів у полі:

*малих тюків 4-10 км/год, типова 6,5 км/год;
великих і середніх тюків 6,5-13 км/год,
типова 8 км/год;
рулонів 5-13 км/год; типова 8 км/год.*

Але, слід відзначити, що рулонні прес-підбирачі зупиняються для вивантаження рулонів, тоді як прес-підбирачі прямокутних тюків вивантажують тюки у русі. Тому орієнтовна ефективності роботи тюкового прес-підбирача у полі 80%, рулонного – 55-65%.

У сільському господарстві останні десятиріччя набула широкого розповсюдження технологія заготівлі сіна та соломи в рулонах, зокрема, у невеликих господарств. Це пояснюється простотою конструкції рулонних прес-підбирачів і відповідно меншою їхньою вартістю порівняно з прес-підбирачами великих прямокутних тюків. В Україні також розповсюджені прес-підбирачі малих прямокутних тюків. Прес-підбирачі рулонні та малих прямокутних тюків значно дешевші за прес-підбирачі середніх та великих прямокутних тюків. Проте враховуючи меншу щільність соломи у рулонах та малих тюках, меншу продуктивність пресування, складності у логістиці і зберіганні тюків внаслідок гіршого використання об'єму транспорту й складів на потужних біоенергетичних об'єктах їх використання обмежене. Також мало для виробництва тюків для енергетичного використання через більші витрати на збирання і вантажні операції застосовуються прес-підбирачі середніх тюків. Можливості технології заготівлі сіна та соломи із застосуванням прес-підбирачів великих тюків в останні роки значно розширилась, зокрема, їх можна використовувати для заготівлі післяжнивних решток кукурудзи – кукурудзиння. Ці машини мають незаперечні переваги перед іншими конструкціями машин. Головні з них наступні:

висока продуктивність і відповідно менші затрати праці, зокрема, один прес-підбирач великих прямокутних тюків може зібрати біомасу з такої ж площі як 2-3 рулонних прес підбирача;

висока щільність пресування, яка у великих прямокутних тюків на понад 25% більша ніж у рулонів;

збереження високої якості сировини;

краще використання вантажопідйомності транспортних засобів, місткості складських приміщень, підвищення продуктивності навантажувачів.

При виборі прес-підбирача часто основним фактором, який впливає на весь ланцюг заготівля – транспортування – зберігання – використання соломи, є розмір тюка. Великі прямокутні тюки мають різні габарити: ширину 1,2 м, висоту від 0,7 до 1,3 м, довжину від 2,0 до 3,2 м. Щільність тюків залежить від типу сировини, щільності валків, швидкості пресування та конструктивних особливостей прес-підбирача і може становити 120-300 кг/м³ (для соломи 230 кг/м³).

Завдяки значному ущільненню сировини прес-підбирачі великогабаритних прямокутних тюків відкривають нові можливості у використанні соломи і перетворюють її в перспективний товарний продукт не тільки для сільськогосподарського виробництва, але і біоенергетики та різних галузей промисловості. При цьому найчастіше використовують середньо-великі тюки вагою 450-650 кг із перерізом 1,2 × 0,9 м та великі тюки 450-650 кг – 1,2 × 1,3 м, що робить їх транспортування, складування та зберігання найбільш економічно доцільним.

В Україні найперспективнішими видами рослинних решток для виробництва біогазу та біометану, зважаючи на їхні обсяги, вважаються солома, кукурудзиння та стебла соняшнику. Водночас вітчизняні аграрії добре відпрацювали технологію заготівлі соломи, тоді як побічну продукцію кукурудзи заготовляють в обмежених обсягах, хоча масштабна заготівля кукурудзиння поширена у США, а стебла соняшнику поки що не збирають. Виконаємо техніко-економічне обґрунтування заготівлі соломи та кукурудзиння у великих прямокутних тюках для подальшого виробництва біометану у вітчизняних умовах. Для цього розглянемо умовне господарство із загальною площею посівних площ 10 тис. га, з яких на 2400 га планується заготовити соломку пшеницю та 1900 га – кукурудзиння.

Оцінка витрат на заготівлю соломи пшениці у великих прямокутних тюках

За хороших погодних умов під час збирання врожаю соломку можна тюкувати відразу після того, як комбайн сформував валки в полі. Типовий ланцюжок постачання агробіомаси складається з таких основних технологічних операцій: формування валків соломи

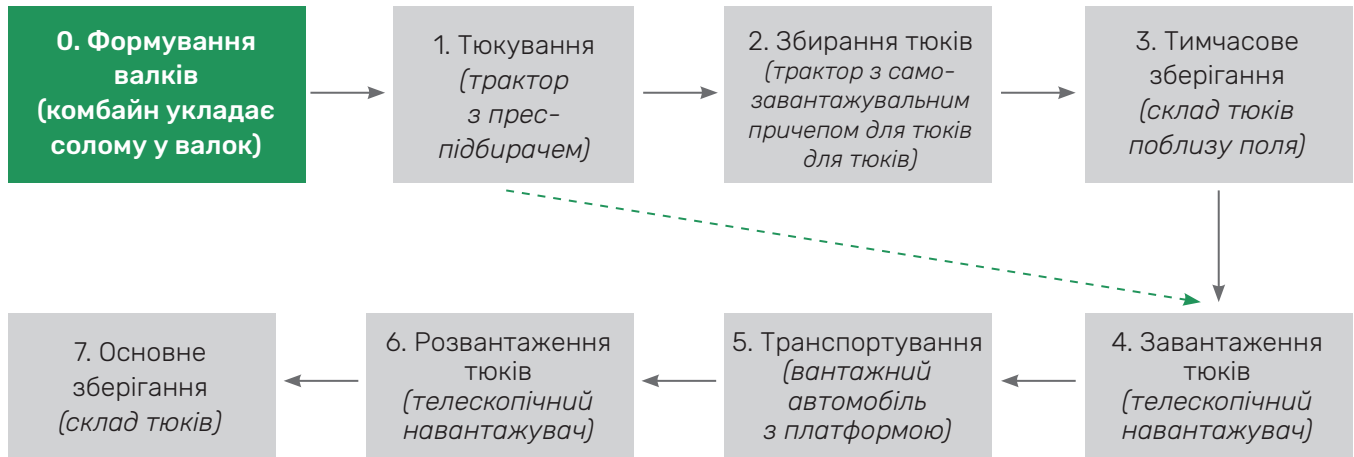


Рис. 4.2 – Структурна схема заготівлі соломи у великих прямокутних тюках.

зернозбиральним комбайном, тюкування, збору тюків та тимчасового зберігання поблизу поля, завантаження та транспортування тюків соломи до основного складу. Виходячи з виду тюків, місцевих умов та наявної техніки, агровиробники вносять деякі зміни в даний ланцюжок. Зокрема, для розвантаження транспортних засобів і укладання привезених великих тюків та рулонів на складі потрібно використовувати навантажувачі. Кількість вантажних та транспортних операцій залежить від підходів до організації зберігання. Також може виникати додаткові операції після укладання соломи у валок. Якщо солома занадто волога (типова середня вологість вище 15%), їй потрібно дати час висохнути у валку перед тюкуванням. Якщо пройде сильний дощ, то, можливо, доведеться застосувати граблі раз або декілька разів. Сучасні граблі призначені для того, щоб або розподілити солом у валку по всій ширині граблів (для сушіння на повітрі), або збирати/перевертати солом у валках.

Найбільше розповсюдження для великих обсягів соломи понад 5 тис. т/рік отримала заготівля у великих прямокутних тюках (рис. 4.2), що передбачає формування валків соломи комбайном (п. 0), підбір біомаси з валків та її пресування у тюки (п. 1), збирання тюків по полю трактором із самозавантажувальним причепом та укладання тюків у штабелі (п. 2), тимчасове зберігання тюків на локальному складі поблизу поля (п. 3), завантаження тюків навантажувачом на транспортні засоби (п. 4), транспортування тюків на центральний склад для основного зберігання (п. 5), розвантаження

та складування тюків (п. 6), довготривале зберігання тюків (п. 7).

Описана схема може бути спрощена, якщо тюки збирати навантажувачом і завантажувати у транспортні засоби безпосередньо у полі, таким чином, технологічні операції п. 2 і 3 не проводять. Але, при цьому виникає необхідність у застосуванні ще одного додаткового навантажувача у полі, що буде збирати тюки та їх складати поруч у окремі групи для більш швидкого завантаження транспорту, який повинен рухатися по полю. Враховуючи це тривалість завантаження буде довше ніж при використанні трактора із самозавантажувальним причепом. До того ж за дощової погоди ґрунт на полях розмокне, що перешкоджатиме руху транспортних засобів. Таким чином будуть виникати затримки у вивезенні тюків і вони будуть вбирати вологу від опадів не тільки зверху, а із низу із землі. Тому для заготівлі соломи восени, зокрема, соломи сої, доцільним є використання самозавантажувальних причепів для швидкого вивезення тюків з полів та тимчасових складів для зберігання біомаси поблизу полів. Розташування ділянок для тимчасових складів краще вибирати біля доріг та на підвищенні для стікання води під час опадів.

Визначимо витрати на заготівлю 4,0 т/га соломи пшениці базової вологості 15% у великих прямокутних тюках з площі 2400 га з їх транспортуванням автотранспортом з поля до центрального складу на відстань 20 км. Загальний обсяг соломи складе 9600 т.

Прийнято продуктивність тюкування 6,0 га/год, що дозволить підібрати та ущільнити у тюки солому з базової площі за 400 год. Із врахуванням очікуваної тривалості тюкування 10 год/день доцільно прийняти 2 прес-підбирача. Перелік технічних засобів для заготівлі з цієї площі соломи відповідно до описаної вище схеми включає

2 трактора із прес-підбирачами великих прямокутних тюків;

трактор із причепом-тюковозом самозавантажувальним;

4 телескопічні навантажувачі;

6 автомобілів тягачів із напівприцепом-платформою.

Загальна вартість техніки складає 2032 тис. євро.

Для тракторів та навантажувачів прийнято базове річне завантаження 1600 год/рік, для вантажних автомобілів – 1840 год. Враховано, що прес-підбирач і причеп-тюковіз будуть задіяні на заготівлі соломи 50% річного завантаження, трактори – 25%, телескопічні

навантажувачі – 20%; автомобілі-тягачі – 16%; напівпричепа-платформи 50%. Решту часу техніка буде використовуватися для інших потреб, зокрема, і для заготівлі кукурудзиння. Умовна вартість техніки з врахуванням завантаження на збиранні соломи становить 594,6 тис. євро. Результати розрахунків витрат на заготівлю соломи пшениці та інші припущення представлено у **табл. 4.2** та **рис. 4.3**.

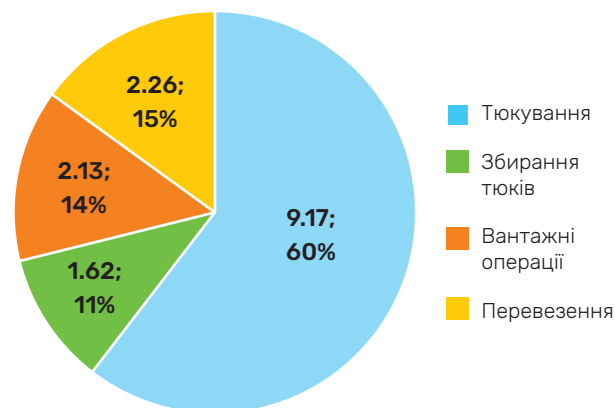


Рис. 4.3 – Структура витрат на заготівлю соломи пшениці вологістю 15% у великих прямокутних тюках за технологічними операціями, євро/т

Таблиця 4.2 – Питомі виробничі витрати на заготівлю 9600 т соломи пшениці вологістю 15% з площі 2400 га

№ п/п	Стаття витрат	Витрати, грн/т	Витрати*, євро/т	Частка, %	Примітка
1	Оплата праці	49,5	1,05	6,4	160 грн/год, 7 механізаторів на тракторах і навантажувачах; 6 водіїв
2	Витрати на паливо і мастильні матеріали	181,2	3,83	23,5	Дизельне паливо (ДП): 3.6 л/т соломи. Мастильні матеріали 15% від вартості ДП
3	Витрати на ТО і ремонт	147,0	3,11	19,1	Відрахування 5% від вартості техніки з врахуванням завантаження
4	Витрати на матеріали	98,6	2,08	12,8	Шпагат 123 грн/кг без ПДВ
5	Амортизація техніки	293,9	6,21	38,2	10 років із урахуванням умовного завантаження техніки
	Разом:	770,1	16,28		
	Виробнича собівартість тони тюкованої соломи без амортизації	476,2	10,07		На центральному складі

Примітка: * обмінний курс 47,31 грн/євро

Для окупності техніки до 7 років відповідно до завантаження на збиранні соломи пропонується продажна ціна тюків соломи у великих прямокутних з доставкою до місць зберігання на центральному складі 25 євро/т, без ПДВ.

Оцінка витрат на заготівлю побічної продукції кукурудзи на зерно у великих прямокутних тюках

Збирання кукурудзи починають при настанні повної стиглості зерна, при цьому припиняється надходження поживних речовин, а вологість зерна становить до 35%. Вологість окремих частин поживних решток неоднорідна. Стрижні качанів кукурудзи завжди вологіші (W 35–45%), ніж зерно (W 22–35%), але під час сушіння інтенсивніше випаровують вологу. Кукурудзиння вранці вологіше ніж вдень до 7%. Одразу після збирання вологість стебел знаходиться в межах 45–60%. Як правило вважається, що вологість стебел у 2 рази вище ніж вологість зерна. Але належна технологія, що

створює умови для продування біомаси вітром, дозволяє у полі її зменшити до 30% протягом 10 годин. Також вологість кукурудзиння дуже сильно залежить від часу збирання та погодних умов, а тому сильні опади у період збирання врожаю будуть перешкоджати заготівлі біомаси. Під час збиральної компанії, коли вологість зерна кукурудзи стає нижче 20% вологість кукурудзиння стрімко зменшується (рис. 4.4). Але після настання фізичної зрілості зерна кукурудзи вихід сухої маси кукурудзиння зменшується з орієнтовною швидкістю 1,6 ц/га за тиждень. Тому формування валків та збирання кукурудзиння потрібно проводити як можна швидше після збирання зерна кукурудзи.

Враховуючи що збирання буде відбуватися у другій половині осені, коли спостерігається дощова і холодна погода, важко спрогнозувати якою буде вологість кукурудзиння. Тому доцільно визначити дві стратегії заготівлі і зберігання кукурудзиння:

А. ланцюжок постачання сухої біомаси – за вологості до 25% кукурудзиння можна тюкувати у прямокутні тюки або рулони і

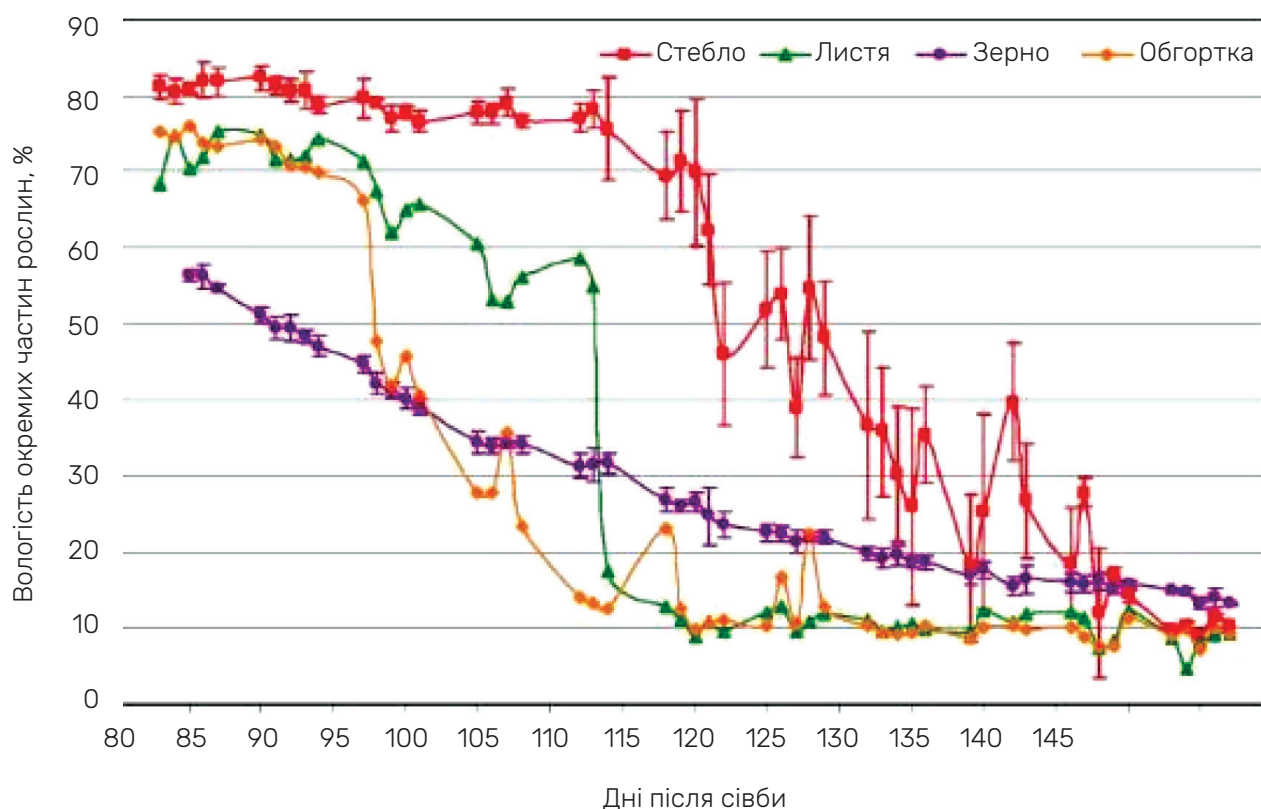


Рис. 4.4 – Розподілення води у надземній частині стоячої рослини кукурудзи⁶⁰



Рис. 4.5 – Технологічна схема заготівлі кукурудзиння у великих прямокутних тюках

зберігати під гнучким накриттям аналогічно до відпрацьованої у компанії практики зберігання соломи. При цьому прес-підбирачі повинні бути розраховані на тюкування такої маси.

Б. ланцюжок постачання вологої біомаси – за вологості понад 25% кукурудзиння збирають у подрібненому вигляді і силосують.

Для збирання вологого кукурудзиння можна використовувати широко розповсюджену технологію заготівлі силосу кукурудзи на базі самохідного кормозбирального комбайну. Тому розглянемо технологію заготівлі кукурудзиння для варіанта А – ланцюжка постачання сухого біомаси у великих прямокутних тюках.

Головна відмінність заготівлі післяжнивних решток кукурудзи від соломи полягає у необхідності використанні додаткових машин для формування валків кукурудзиння (рис. 4.5). Так як при збиранні кукурудзи на зерно через комбайн проходить тільки менша частина післяжнивних решток, тоді як основна їх частина розкидається жаткою і звичайний зернозбиральний комбайн не може сформувати валки з біомаси, пропонується використовувати мульчувач-валкоутворювач для формування валків кукурудзиння. Ця машина підбирає рослинні рештки, підрізає стерню, подрібнює біомасу та укладає у валки. При заготівлі ж соломи зернозбиральний комбайн укладає її у валки і нема необхідності у використанні мульчувачів-валкоутворювачів.

На рис. 4.6 представлено роботу мульчувача-валкоутворювача Berti моделі LAND/P 600 BIOG із шириною захвату 6 м. Такий мульчувач має продуктивність 2,5–4 га/год та агрегується із трактором потужністю 220 к.с. Мульчувач може сформувати один валок за два проходи на ширину 12 м, що забезпечить більш ефективне використання прес-підбирача.

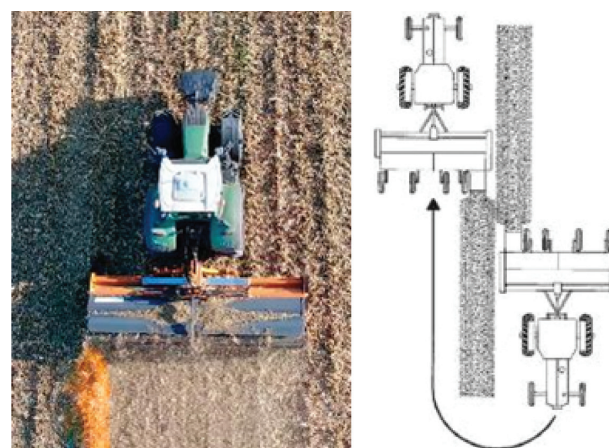


Рис. 4.6 – Робота LAND/P 600 BIOG та схема здоювання валків

Далі біомаса з валків підбирається прес-підбирачем і тюкується у великі прямокутні тюки та інші технологічні операції повністю відповідають технологічним операціям із заготівлі соломи. Тюки доцільно збирати спеціальним причепом та вивозити на тимчасовий склад поблизу поля для більш зручного завантаження вантажних автомобілів. Потім тюки звантажуються телескопічним навантажувачем на довгі платформи автомобільних напівпричепів, що дозволить завантажувати 30 тюків, та перевозяться на центральний склад. Розвантаження тюків на складі відбувається також телескопічним навантажувачем. Вантажні автомобілі з огляду на короткотривале використання краще орендувати.

Оцінімо витрати на заготівлю 4,5 т/га кукурудзиння базової вологості 25% у великих прямокутних тюках з площі 1900 га з їх транспортуванням з поля до центрального складу на відстань 20 км автотранспортом. Загальний обсяг кукурудзиння складе 8550 т. Прийнято продуктивність тюкування 5,0 га/год, що дозволить підібрати та ущільнити у тюки соломі з базової площі за 380 год. З огляду

Таблиця 4.3 – Питомі виробничі витрати на заготівлю 8550 т кукурудзиння вологістю 25% з площі 1900 га

№ п/п	Стаття витрат	Витрати, грн/т	Витрати, євро/т	Частка, %	Примітка
1	Оплата праці	54,0	1,14	4,5	160 грн/год, 10 механізаторів на тракторах та навантажувачах і 6 водіїв
2	Витрати на паливо і мастильні матеріали	278,5	5,89	23,3	Дизельне паливо (ДП): 5,5 л/т кукурудзиння. Мастильні матеріали 15% від вартості ДП
3	Витрати на ТО і ремонт	260,2	5,50	21,8	Відрахування 5% від вартості техніки з врахуванням завантаження
4	Витрати на матеріали	83,2	1,76	7,0	Шпагат 123 грн/кг без ПДВ
5	Амортизація техніки	520,4	11,00	43,5	10 років із урахуванням умовного завантаження техніки
	Разом:	1196,3	25,29		
	Виробнича собівартість тони без амортизації	675,9	14,29		На центральному складі

на обмеження термінів збиральної компанії доцільно використовувати 2 прес-підбирача. Перелік технічних засобів для заготівлі з цієї площі соломи відповідно до описаної вище схеми включає

*3 трактора із мульчувачами
валкоутворювачами;*

*2 трактора із прес-підбирачами великих
прямокутних тюків;*

*трактор із причепом-тюковозом
самозавантажувальним;*

4 телескопічні навантажувачі;

*6 автомобілів тягачів із напівпричепом-
платформою.*

Загальна вартість техніки становить 2812 тис. євро. Як і при заготівлі соломи для тракторів та навантажувачів прийнято базове річне завантаження 1600 год/рік, для вантажних автомобілів – 1840 год. Враховано, що прес-підбирач і причеп-тюковіз будуть задіяні на заготівлі кукурудзиння 50% річного завантаження, трактори із мулчувачами валкоутворювачами – 15%; інші трактори – 25%, телескопічні навантажувачі – 20%; автомобілі-тягачі – 10%; напівпричепи-платформи 50%. Решту часу техніка буде використовуватися

для інших робіт. Умовна вартість техніки з врахуванням завантаження на збиранні соломи становить 940,5 тис. євро. Результати розрахунків витрат на заготівлю кукурудзиння та інші припущення представлено у **табл. 4.3** та **рис. 4.7**.

Для окупності техніки до 7 років відповідно до завантаження на збиранні кукурудзиння пропонується продажна ціна тюків побічної продукції кукурудзи у великих прямокутних з доставкою до місць зберігання на центральному складі 35 євро/т, без ПДВ.

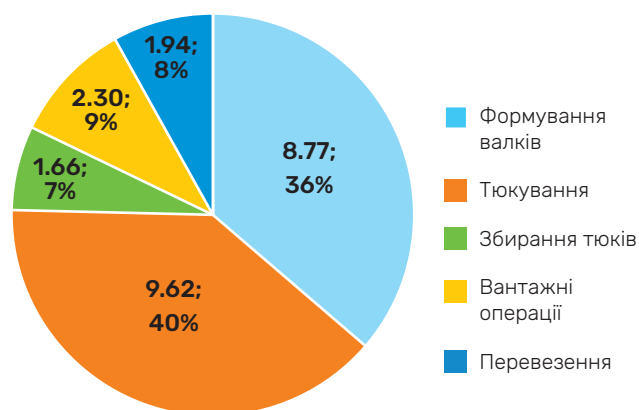


Рис. 4.7 – Структура витрат на заготівлю кукурудзиння вологістю 25% у великих прямокутних тюках, євро/т

Технології попередньої обробки поживних решток перед анаеробним зброджуванням

Попередня обробка лігноцелюлозної агробіомаси є критичним етапом у виробництві біогазу з неї. Її метою є руйнування складної структури лігноцелюлози, щоб забезпечити доступ до целюлози та геміцелюлози, які згодом перетворюються на прості цукри шляхом ферментативного або кислотного оцукрювання.

Задачами попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси перед зброджуванням також є:

Збільшення питомої поверхні масообміну

Зниження гідрофобності

Гомогенізація

Різні методи можуть досягати також побічних ефектів, таких як зміна балансу окремих компонентів та хімічних елементів, зниження загальної маси органічної речовини, зміна об'ємної ваги.

Збільшення питомої поверхні масообміну досягається дезінтеграцією волокон та відкриттям внутрішніх клітинних стінок для проникнення води та мікробів. Як правило, першим етапом дезінтеграції поживних решток є їх механічне подрібнення. Поєднання механічних та термічних методів, наприклад паро-вибухового методу або гранулювання, дозволяє додатково розкрити структуру волокон. Дезінтеграція волокон дозволяє суттєво підвищити гомогенізацію часток соломи в реакторі, знижувати при цьому в'язкість суміші і, відповідно, витрати електричної енергії на переміщення та перемішування сумішей. Це дозволяє також зменшувати схильність до стратифікації твердої фази в технологічних ємностях, а відтак ускладнення або блокування роботи технологічного обладнання. Збільшення поверхні масообміну, а відтак швидкості конверсії органічної речовини в біогаз, дозволяє зменшити тривалість зброджування і, відповідно, вартість будівництва біореакторів.

РОЗДІЛ 5

Зниження гідрофобності є більш складною задачею, що, як правило, не вирішується лише механічною дезінтеграцією волокон. Як було показано в **Розділі 3**, зниження гідрофобних властивостей соломи можна досягти за рахунок термічних, хімічних та біологічних методів, або їх поєднання, зокрема з механічними методами.

Методи та їх ефективність

У літературі описано різні методи попередньої обробки, що відрізняються ефективністю, вартістю та впливом на кінцевий процес ферментації. Останні досягнення підкреслюють важливість інтеграції попередньої обробки з наступними процесами, такими як ферментативний гідроліз та ферментація, для зниження витрат та підвищення загальної ефективності⁶¹.

Можна виділити 4 основних групи методів попередньої обробки, а саме: фізичні, хімічні, біологічні, а також комбіновані (**рис. 5.1**).

Фізичні	• Механічні • Термічні • Ультразвукові • Електрохімічні
Хімічні	• Лужні • Кислотні • Окислювальні
Біологічні	• Мікробіологічні • Ферментні
Комбіновані	• Паровий вибух • Екструзія • Термохімічні

Рис. 5.1 – Основні методи попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси

Фізичні методи

Механічне подрібнення

Механічна попередня обробка здійснюється дробарками (млинами), що або зменшує розмір часток субстрату або стискає їх, щоб розірвати клітинну структуру, збільшуючи питому площу поверхні біомаси⁶². Це дає більшу можливість для ферментативної атаки, що особливо важливо для лігноцелюлозних субстратів. Зменшення розміру частинок не тільки збільшує швидкість ферментативного розкладання, але й може знизити в'язкість у біореакторах (що полегшує перемішування) та зменшити проблему плаваючого шару. Будь-яке зменшення розміру частинок є корисним, але для ефективного гідролізу лігноцелюлози рекомендується розмір частинок від 1 до 2 мм⁶³. Основним недоліком механічної попередньої обробки є те, що млини можуть бути пошкоджені інертними матеріалами в субстраті, такими як каміння або шматки металу, а ремонт обладнання може бути досить вартісним. Таким чином, слід застосовувати ретельні методи попереднього видалення механічних домішок перед подрібненням.

Механічне подрібнення соломи є, як правило, першою або основною стадією обробки перед зброджуванням, незалежно від застосування подальших методів. Лігноцелюлозну біомасу зазвичай подрібнюють у 2-3 стадії, в залежності від потрібного кінцевого розміру часток. Кінцевий розмір частинок зазвичай складає від 10-50 мм після першої стадії (грубого подрібнення) до 0,2-2 мм після тонкого подрібнення⁶⁴. Ступінь подрібнення повинен визначатися з огляду на співвідношення затрат енергії та отриманим ефектом.

Для подрібнення лігноцелюлозної біомаси використовуються двовалкові, ножові та молоткові дробарки, кульові, вібраційні, колоїдні та дискові млини, а також екструдери.

Як правило, потреба в енергії для механічного подрібнення залежить від типу подрібнювача, початкового та кінцевого розмірів частинок, а також характеристик біомаси, зокрема вмісту вологи в біомасі, що переробляється. В свою чергу, тип подрібнювача вибирають залежно від характеристик біомаси та планованої технології її переробки. Колоїдні млини та екструдери підходять лише для подрібнення вологих матеріалів з вмістом вологи понад 15-20%, тоді

як двовалкові, молоткові або ножові млини підходять лише для подрібнення сухої біомаси з вмістом вологи до 10-15%. Кульові або вібраційні кульові млини є універсальними типами дезінтеграторів і можуть використовуватися як для сухих, так і для вологих матеріалів.

Ножові, молоткові та шнекові подрібнювачі або їх комбінації є найбільш типовим обладнанням для подрібнення лігноцелюлозної сировини. Конструкція подрібнювачів тісно пов'язана з характеристиками біомаси, такими як механічні властивості, її розміри та вміст вологи.

Питомі витрати електричної енергії на подрібнення поживних решток можна орієнтовно оцінити за наступним рівнянням⁶⁵:

$$SED_{HM} = 4,3 \cdot MC \cdot D_p^{-0,8},$$

де SED_{HM} – питома витрата електричної енергії, кВт·год на тону сухої речовини; MC – вологість сировини (на вологу масу), %; D_p – кінцевий розмір часток сировини, мм.

Споживання електричної енергії на подрібнення соломи може складати діапазон 20-100 кВт·год/т, залежно від застосованого обладнання, властивостей соломи та цільового розміру часток. Так, наприклад, ножова дробарка може споживати 30 кВт·год/т при цільовому розмірі часток 6 мм⁶⁶. Молоткова дробарка споживає в 2-5 разів більше, ніж ножова⁶⁷.

Термічна обробка

При термічній попередній обробці субстрат нагрівають (зазвичай від 125 до 190 °C) під тиском і витримують при цій температурі до однієї години. У лабораторії це можна зробити за допомогою скороварок, автоклавів або мікрохвильових нагрівачів. Сухі субстрати потребують додаткової води перед термічною обробкою. Присутність тепла та води порушує водневі зв'язки, що утримують разом кристалічну целюлозу та лігноцелюлозні комплекси, що призводить до набухання біомаси⁶⁸. Термічна попередня обробка часто проводиться з одночасним використанням хімічних речовин або в поєднанні з механічним впливом.

Термічна (включаючи термохімічну або термо-механічну) попередня обробка збільшує вихід біогазу лише до певної температури, вище якої виробництво біогазу зменшується^{69, 70}. Тому ключовим завданням будь-якої технології із

застосуванням високих температур є пошук оптимальних умов для деструкції субстрату. При дуже високих температурах утворюються певні темні продукти розпаду ксилози та лігніну. Ці сполуки включають гетероциклічні та фенольні сполуки (такі як фурфурол)⁵⁷.

Хімічні методи

Хімічна обробка проводиться шляхом додавання до субстрату кислоти, як правило, сірчаної (кислотний гідроліз) або лугу, як правило, гідроксиду натрію (NaOH) або гідроксиду аміаку (NH₄OH) (лужний гідроліз).

Кислотний гідроліз є одним із найстаріших методів попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси. Він передбачає використання концентрованих або розведених кислот, найчастіше сірчаної кислоти, для розщеплення геміцелюлози та целюлози на прості цукри. У цьому процесі геміцелюлоза перетворюється на пентози (ксилозу та арабінозу), тоді як целюлоза розщеплюється на гексози (глюкозу, манозу)⁵⁶. Два основні підходи, що використовуються в кислотному гідролізі, такі:

Гідроліз з використанням концентрованої кислоти. Цей процес проводиться при низьких температурах (близько 50°C), але з високою концентрацією кислоти (70–90%). Незважаючи на високу ефективність оцукрювання, він вимагає дорогої нейтралізації та відновлення кислоти, що робить його менш економічним, ніж інші методи.

Гідроліз з використанням розбавленої кислоти. Проводиться при вищих температурах (140–200°C) з низькою концентрацією кислоти (2–5%). Цей метод дешевший, але менш ефективний, ніж концентрований кислотний гідроліз. Він також генерує значну кількість побічних продуктів, які необхідно видалити перед ферментацією.

Хімічна обробка потребує часу на протікання хімічних реакцій, як правило, від 1 години до 2 діб. Хімічні реагенти можуть призводити до утворення інгібуючих побічних продуктів, які знижують ефективність процесу метанового бродіння, а іноді навіть повністю його припиняють. При застосуванні H₂SO₄ утворюється сірководень (H₂S), що при певних

концентраціях стає інгібітором анаеробного процесу⁷¹. Крім того, Na⁺ при високих концентраціях, як відомо, є інгібуючим іоном для деяких метаногенних бактерій⁷². Перед подачею на анаеробне зброджування підготовлену масу необхідно нейтралізувати, що передбачатиме мінімізацію залишку кислоти та вирівнювання значення pH ближче до нейтрального.

Споживання електричної енергії при хімічних способах обробки соломи, що включає перемішування та перекачування, є досить високим – 50–120 кВт·год/т. Вартість хімічних реактивів, з врахуванням необхідності нейтралізації (pH компенсації) перед подачею на зброджування, та необхідність дотримання суворих умов їх застосування, обмежують доцільність застосування цих методів для підготовки соломи до зброджування. Варто також враховувати вартість самих систем хімічної обробки, що потребують кислото- та лугостійкого виконання.

Нові підходи зосереджені на зменшенні утворення інгібіторів ферментації шляхом попереднього замочування біомаси в лужних розчинах перед обробкою кислотою, що зменшує утворення фурфуролу та гідроксиметилфурфуролу (ГМФ)⁷³. Досягнення в конструкції реакторів та використання кислотостійких матеріалів ще більше покращили масштабованість та ефективність систем кислотного гідролізу. Крім того, було показано, що інтеграція передових біокатализаторів у процесі кислотного гідролізу підвищує ступінь оцукрювання, мінімізуючи утворення побічних продуктів, як підкреслюється в нещодавньому дослідженні⁷⁴.

Для розщеплення целюлози можна також застосовувати різні розчинники, наприклад, Organosolv або новітній DES (Deep Eutectic Solvents)⁷⁵, а також перекис водню H₂O₂.

Біологічні методи

Методи біологічної попередньої обробки передбачають використання грибів або бактерій, які природним чином розкладають лігноцелюлозу. Цей процес менш агресивний, ніж хімічні або термічні методи, але він займає більше часу та вимагає оптимальних умов навколишнього середовища, таких як вологість, температура та доступність кисню.

Переваги біологічних методів полягають у наступному:

Низьке енергоспоживання порівняно з термічною або хімічною попередньою обробкою.

Мінімальне утворення інгібіторів ферментації.

Ці процеси можна інтегрувати з ферментацією, скорочуючи час виробництва біогазу.

Недоліки біологічних методів включають тривалий час розкладання та необхідність підтримки певних умов, яких важко досягти в промислових масштабах. Крім того, ефективність розкладання лігніну мікроорганізмами обмежена, а це означає, що ці методи часто використовуються в поєднанні з іншими методами попередньої обробки.

До поширених методів первинної біологічної обробки відносять 2-стадійну технологію зброджування, з першою стадією гідролізу. У той час як рН в процесі метаногенезу має бути між 6,5 і 8, значення рН в гідролізері (стадія кислотоутворення) має бути між 4 і 6, що перешкоджає виробленню метану та спричиняє накопичення летких жирних кислот. Мікробіологічна попередня обробка може прискорити швидкість розпаду субстратів в процесі метанового бродіння. Загалом ферменти, що розкладають целюлозу, геміцелюлозу та крохмаль, найкраще працюють між рН 4 і 6 при температурах від 30 до 50°C, тому етап попереднього кислотоутворення збільшує швидкість розкладання, створюючи оптимальне середовище для цих ферментів⁵⁷.

Ферменти, що розщеплюють біомасу, вже присутні в анаеробних реакторах, оскільки вони виробляються мікроорганізмами, що обумовлюють анаеробне зброджування. Для посилення цього процесу можна додати суміш ферментів, яка може включати ферменти, що розщеплюють целюлозу, геміцелюлозу, пектин та крохмаль. Ферментні добавки можна застосовувати трьома різними способами: шляхом безпосереднього внесення в анаеробний біореактор в одностадійному процесі зброджування, шляхом внесення в гідролізер в 2-стадійному процесі зброджування, або ж внесення в окремий спеціальний реактор для попередньої ферментативної обробки.

Багато грибів, зокрема гнильний гриб, відомі своєю здатністю видаляти забруднювачі навколишнього середовища з твердих та рідких відходів⁷⁶. Хоча гнильні гриби можуть делігніфікувати субстрати, вони також видаляють частину органічної речовини, яку можна було б використувати для анаеробного зброджування.

Комбіновані методи

Паро-вибуховий автогідроліз

Одним з відомих методів обробки лігноцелюлозної біомаси є паро-вибуховий автогідроліз. При використанні цього методу, біомасу обробляють під високим тиском насиченої пари, а потім тиск різко знижують, в результаті чого матеріал піддається впливу вибухової декомпресії. Паровий вибух ініціюється при досягненні температури 160-260°C та відповідного тиску 10-30 бар. Зазвичай такі умови досягаються після витримування зразку протягом часу від декількох секунд до декількох хвилин. Паровий вибух при 180 °C вимагає ~190 кВт•год/т⁷⁷.

Раптовий скид тиску до атмосферного призводить до деградації геміцелюлози та перетворення лігніну під дією високих температур, тим самим збільшуючи потенціал гідролізу целюлози⁷⁸. Чим вищими є тиск та температура витримування біомаси в паро-вибуховому методі, тим сильніше руйнується лігноцелюлозна структура, проте при цьому також збільшується утворення токсичних сполук та інгібіторів, таких як фурфурол, 5-гідроксиметилфурфурол (ГОМФ), мурашина кислота, левулінова кислота, оцтова кислота, фенольні сполуки⁷⁹.

В дослідженні⁸⁰ показано, що після попередньої обробки соломи пшениці паро-вибуховим методом (при температурах 160-200°C і тривалості витримування 0,16-0,33 год), вихід метану збільшився максимум на 20% – з 275,6 лCH₄/кгСОР (для необробленої соломи) до 331 лCH₄/кгСОР.

Переваги попередньої обробки під тиском та температурою полягають у наступному:

Вона руйнує структуру лігноцелюлози без використання додаткових хімікатів, що робить її більш екологічною порівняно з іншими методами,

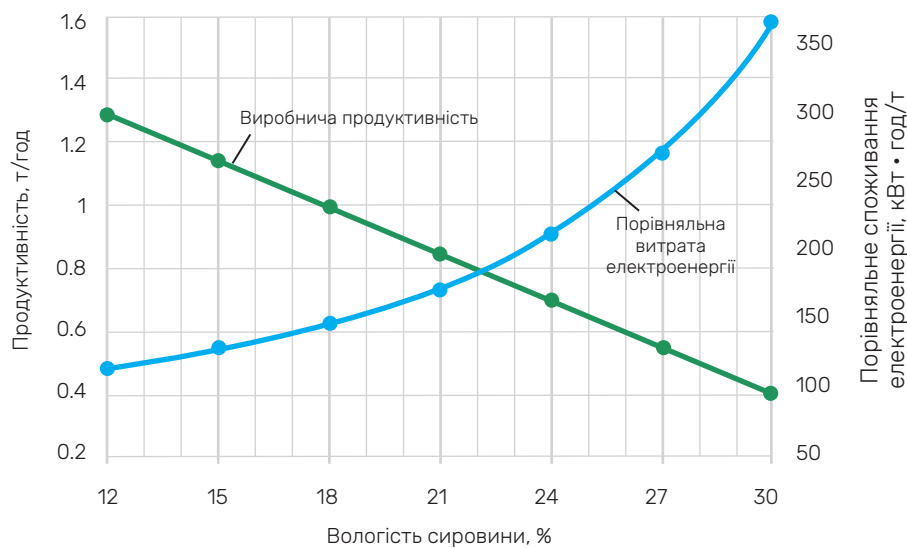


Рис. 5.2 – Залежність продуктивності та витрат електроенергії при виробництві гранул від вологості сировини

Швидка декомпресія забезпечує швидке та ефективне вивільнення цукру.

Ця попередня обробка генерує менше токсичних побічних продуктів, мінімізуючи потребу в подальшій детоксикації.

Нещодавні інновації, такі як попередня обробка термотиском за допомогою мікрохвиль, продемонстрували підвищені показники вивільнення цукрів та нижче споживання енергії порівняно зі звичайним паровим вибухом⁸¹. Крім того, було показано, що додавання лужних каталізаторів під час парового вибуху покращує руйнування лігніну, підвищуючи доступність целюлози⁸².

Екструзія та гранулювання

У промисловому екструдері матеріал подається в екструдер і транспортується шнеком по трубі, де він піддається впливу високого тиску, температури та зсувних сил. Біогазові субстрати в екструдерах піддаються тим самим силам, що призводить до розриву міцних волокон. Раптове падіння тиску, коли субстрат залишає екструдер, також може сприяти його руйнуванню.

Екструзія ефективно порушує клітинну структуру біомаси, що призводить до швидшого утворення метану, що, у свою чергу, дозволяє збільшувати органічне навантаження біореакторів⁸³. Основною проблемою технології попередньої обробки екструзією є шнеки, які необхідно міняти через кілька місяців через їх стирання. Як і в інших технологіях механічної попередньої обробки, каміння або металеві матеріали в субстратах значно скорочують

термін служби шнеків. Це негативно впливає на економіку процесу екструзії⁸⁷.

Однією з комерційно поширених технологій, що використовує екструзію, є виробництво пелет та брикетів. Такі технології також широко застосовуються для гранулювання соломи та кукурудзиння. Оптимальне значення вологості соломи при гранулюванні не повинно перевищувати 14%. При зростанні вологості падає продуктивність виробничої лінії, ростуть питомі витрати електроенергії на виробництво⁸⁴ (рис. 5.2).

Витрати електричної енергії на переробку поживних решток в гранули суттєво залежать від виробничої продуктивності лінії гранулювання (табл. 5.1).

Із **таблиці 5.1** видно, що сумарні додаткові витрати електричної енергії на гранулювання, у порівнянні з лише подрібненням молотковими дробарками, складають 64-109 кВт·год/т. Враховуючи той факт, що екструзія дозволяє збільшити вихід метану принаймні на 10-15%, що відповідає 15-25 м³CH₄/т, у порівнянні навіть з тонко подрібненою механічними дробарками соломою, додаткова енергія такого метану 156-234 кВт·год/т перекидає витрати на гранулювання. Якщо врахувати також зменшення витрат електричної енергії на перемішування в біореакторах за рахунок зниження в'язкості та схильності до стратифікації суміші з гранульованою соломою, а також зменшення тривалості анаеробного зброджування, енергетичний ефект від гранулювання соломи є очевидним.

Таблиця 5.1 – Орієнтовні витрати електричної енергії на переробку пожнивних решток в гранули

Виробничі процеси, обладнання	Номінальна виробнича продуктивність лінії, т/год			
	1	2	3	5
	Питомі витрати електричної енергії, кВт год/т гранул			
Первинне подрібнення	20	18	18	16
Остаточне подрібнення (дробарки молоткові)	45	41	39	37
Кондиціювання (підготовка до гранулювання)	5	5	4	4
Гранулювання	76	56	47	38
Охолодження гранул	4	4	4	3
Транспортери, пневмотранспорт	20	18	18	16
Освітлення, системи керування, інші витрати	4	3	3	3
ВСЬОГО	174	146	133	118

Порівняння методів

Можна резюмувати, що розглянуті методи попередньої обробки лігноцелюлозної сировини загалом дозволяють підвищити питому площу масообміну та біодоступність органічної речовини, однак мають різний ступінь впливу на різні види полісахаридів, як то целюлоза,

геміцелюлоза та лігнін (**табл. 5.2**).

Також, важливим аспектом впливу є можливість утворення побічних продуктів, що можуть бути інгібіторами процесу анаеробного зброджування, що притаманно при застосуванні високотемпературних або хімічних методів. Переваги та недоліки різних методів наведено в **табл. 5.3**.

 Таблиця – Вплив різних методів попередньої обробки на руйнування лігноцелюлозних комплексів⁷⁹

Метод	Декристалізація целюлози	Розпад геміцелюлози	Розпад лігніну	Збільшення питомої поверхні
Біологічний				+
Механічне 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.

Таблиця 5.3 – Переваги та недоліки різних технологій попередньої обробки⁷⁹

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 ферментів	- високе теплоспоживання - ефективний лише до певної температури
Луг	розщеплює лігнін	- висока концентрація луку в біореакторі - висока вартість хімікатів
Мікробний	низьке споживання енергії	- повільний процес - лігнін не розщеплюється
Ензимний	низьке споживання енергії	- необхідність постійного додавання - висока вартість ферментів
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.
Кислота	розчиняє геміцелюлозу	- висока вартість кислоти - проблеми з корозією - утворення інгібіторів, особливо при нагріванні

Обладнання

На ринку обладнання для біогазових станцій є досить багато готових рішень, що дозволяють одночасно проводити попередню обробку соломи та її подачу в біореактори, забезпечуючи тим самим повну інтеграцію в технологічний процес виробництва біогазу. Нижче наведено деякі приклади такого обладнання, інформація про яке доступна у відкритих джерелах або яке вже представлено на українському ринку. Наведені приклади представляють різні методи попередньої обробки або їх комбінації. Перелік наданого обладнання не є вичерпним серед того, що представлено на ринку, і не представлений тут як виключно рекомендований для використання.

Обладнання, що використовує механічні методи попередньої обробки

Подрібнювач компанії MEBA BIOGAS GmbH **Biogrinder (рис. 5.3)** розроблено в двох розмірах і декількох варіантах двигуна, що дозволяє оптимально інтегрувати його з біогазовою установкою, з врахуванням сировини.

Подрібнювач працює за принципом молоткової дробарки, розбиваючи сировину на дрібні частки. Відцентрові сили дозволяють ефективно перемішувати різні види сировини та розтирати їх об ребристі стінки подрібнювача. Для ефективного подрібнення сировина має бути відповідно зволожена і для цього може бути передбачена окрема подача рідкої фази в систему дозування. Типовим рішенням від компанії є встановлення подрібнювача безпосередньо на рамі контейнера сировини. Контейнер обладнаний системою подачі, змішування і дозування, що забезпечує рівномірну роботу подрібнювача і подачу підготовленої сировини до системи живлення реакторів.

Інший приклад подрібнювального обладнання представлений інжиніринговою та виробничою компанією BioG GmbH. Компанія є однією з небагатьох, що активно працює у сфері використання агровідходів для виробництва біогазу і пропонує власні розробки у сфері заготівлі кукурудзиння та їх переробки. Для біогазових установок компанія пропонує готове комплексне рішення – **BIOCRUSHER**, що включає в себе бункер накопичувач сировини з системою перемішування і дозування,



Рис. 5.3 – Подрібнювач Biogringer та його компоновка з системою подачі сировини

подрібнювач та систему подачі готової сировини (рис. 5.4 а).

Для подрібнення змішаної сировини компанія пропонує обладнання LINDER і BHS (рис. 5.4 б), що є лідерами на світовому ринку у сфері подрібнення і сортування. Основний принцип роботи аналогічний обладнанню МЕВА. Ударні та зсувні сили оптимально подрібнюють і розтирають вихідний матеріал (рис. 5.5), що прискорює утворення біогазу та робить загальний процес більш стабільним.

Конструкції і принцип дії обох подрібнювачів є однаковим і відрізняються технічними особливостями. Перевагою таких подрібнювачів є низька чутливість до вхідної сировини, короткий термін перебування часток в

подрібнювачі і висока продуктивність. Завдяки тому, що основна енергія витрачається на подрібнення, а не на нагрів, це робить процес енергоефективним. Потужність приводу подрібнювача може бути від 37 до 90 кВт. Сама конструкція подрібнювача виконана таким чином, що забезпечує легкий і швидкий доступ для обслуговування і ремонту, а широкі горловини забезпечують легку подачу і вивантаження сировини.

Система PreMix компанії Vogelsang дозволяє одночасно змішувати кілька різних потоків сировини, зокрема рідку і тверду фракції, і подавати суміш до біореактора (рис. 5.6). Зазвичай таке рішення є стандартним при використанні силосу, тому при використанні волокнистої сировини, зокрема соломи, система



а)



б)

Рис. 5.4 – Обладнання BIOCRUSHER: а) компоновка обладнання; б) подрібнювач



Рис. 5.5 – Деякі види сировини до та після подрібненні в обладнанні BIOCRUSHER

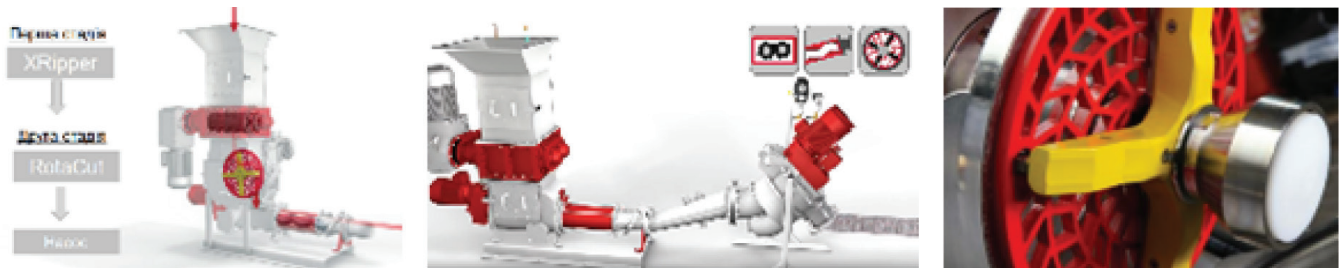


Рис. 5.6 – Система PreMix з додатковими подрібнювачами X - Ripper та RotaCut

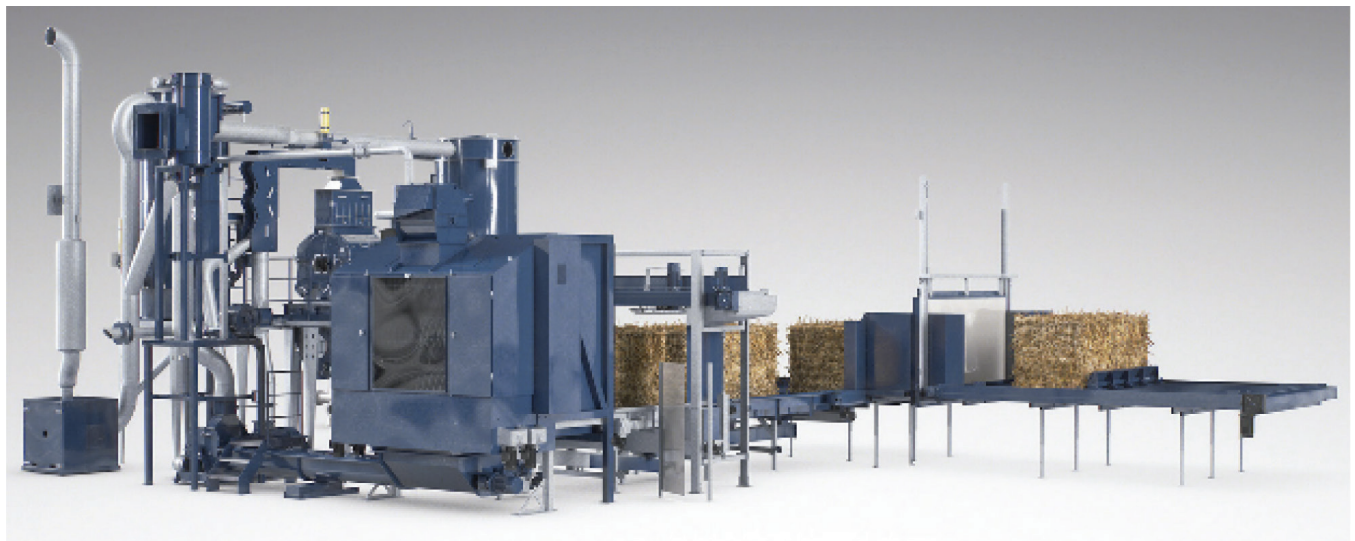


Рис. 5.7 – Міні-комплекс LinKa та Euromilling для спеціалізованого подрібнення соломи



Рис. 5.8 – Підстилковий гній ВРХ до обробки і після обробки в біоекструдері

додатково оснащується подрібнювальним обладнанням. Зазвичай подрібнювачі встановлюються на вході до системи змішування і подачі, але для додатково подрібнення може встановлюватися *RotaCut* на напірних трубопроводах. Рівень подрібнення регулюється підбором решіток та швидкістю обертання ножів, що самозаточуються.

Для кращого перемішування і подрібнення твердих часток, на вході доцільно встановлювати двовальний *X – Ripper*, що дозволяє подрібнювати солому, деревину, кістки, овочі і фрукти, пластик і текстиль. Регулюючи розмір ножів та зазор між ним можна регулювати продуктивність установки та ступінь подрібнення сировини. Ножі спеціальної конструкції обертаються з різною швидкістю, що дозволяє захоплювати сировину та самоочищатися.

Установка з подрібнення соломи, що запропонована **LinKa** у співпраці з компанією Euromilling, є по суті міні-комплексом спеціалізованого подрібнення соломи перед подачею на анаеробне зброджування (**рис. 5.7**).

Соломомельний комплекс LinKa включає все необхідне обладнання, що дозволяє переробляти тюковану соломку з вмістом сухої речовини 10-20% до потрібного розміру частинок, а саме:

Мостовий кран автоматично знімає мотузки з тюків соломи

Подрібнювач солом'яних тюків подрібнює тюки соломи для подальшої обробки

Уловлювач каміння, металу та інших сторонніх предметів забезпечує видалення небажаних включень

Млин попереднього подрібнення готує соломку до більш тонкого подрібнення

Молоткова дробарка тонкого подрібнення дозволяє досягти бажаного розміру часток соломи

Попередній змішувач гомогенізує соломку для оптимального виробництва біогазу

Насос переміщує тонко подрібнену соломку до реактора

Система управління та моніторингу – контролює, оптимізує та захищає роботу, забезпечуючи ефективність, безпеку, збір даних та дистанційне керування.

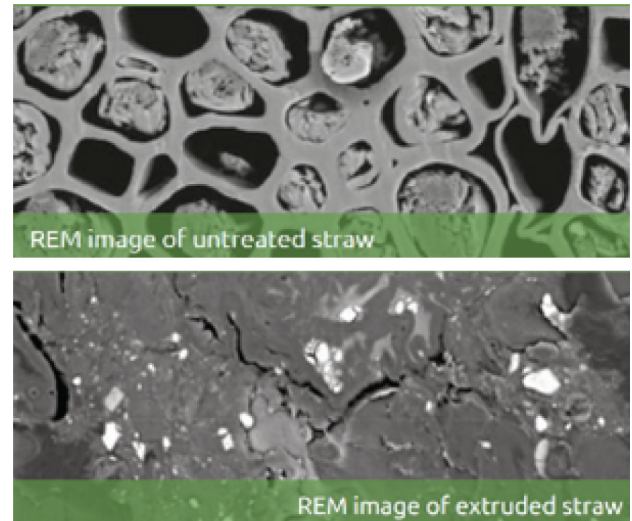


Рис. 5.9 – Структура необробленої соломи та соломи, обробленої в біоекструдері

Враховуючи, що солома в такому обладнанні подрібнюється практично до порохоподібного стану, комплекс виготовляється у вибухобезпечному виконанні. Комплекс переробки 8 т/год соломи вологістю до 20% має встановлену електричну потужність 510 кВт_е та споживає 76 кВт·год/т соломи.

Обладнання на основі методів попередньої обробки екструзією

Технологія та обладнання **BIOEXTRUDER** розроблені компанією LEHMANN. Процес біоекструзії в двошнекових екструдерах базується на гідротермічному розщепленні та довів свою ефективність для матеріального та енергетичного використання лігнін-вмісних субстратів. Сировина подрібнюється та частково розщеплюється аж до рівня клітинної структури (**рис. 5.8**) за допомогою повторюваних циклів тиску та декомпресії, а також підвищення температури в обладнанні. Вихід біогазу збільшується завдяки багатократному збільшенню поверхні масообміну. За інформацією компанії, збільшення виходу біогазу в результаті екструзії складає від 14 до 70%, зокрема для соломи цей показник склав 32-35%. Структура соломи до та після екструзії показана на **рис. 5.9**.

Серія екструдерів продуктивністю 0,3-8,5 т/год застосовується для різних видів сировини

(табл. 5.4). Для переробки соломи в біоекструдері потрібно буде додати вологу з рециклом дигестату або рідким субстратом чи водою, щоб вміст СР на вході складав не більше 50–60%. Споживання електричної енергії залежить як від продуктивності моделі, так і від виду перероблюваної сировини та її вологості.

Конструкція екструдера дозволяє його розміщення на відкритому повітрі, проте для швидкого монтажу і будівництва компанія розробила готове рішення з розміщення екструдера в морському контейнері (рис. 5.10).

Компанія MethaPlanet розробила технологічне рішення **Maxximizer** для спеціалізованого виготовлення енергетичних пелет з агробіомаси, зокрема соломи та підстилкового гною (рис. 5.11).

За допомогою спеціальної технології попередньої підготовки соломовмісної сировини перед гранулюванням, вдається досягти значного збільшення виходу метану з енергетичних пелет, навіть у порівнянні з пелетами, виготовленими з допомогою традиційного обладнання. Компанія заявляє, що лабораторно підтверджений вихід метану з таких енергетичних пелет складає $312 \text{ нм}^3\text{CH}_4$ на тону (свіжої маси), а вихід отриманий в реальних умовах – $361 \text{ нм}^3\text{CH}_4/\text{т}$, що в перерахунку на органічну речовину складає $357 \text{ нм}^3\text{CH}_4/\text{тСОР}$ та $413 \text{ нм}^3\text{CH}_4/\text{тСОР}$, відповідно. У порівнянні з виходом метану зі звичайних пелет із соломи пшениці, це на 19% та 38% більше, відповідно. На рис. 5.11 показано як використання енергетичних пелет дозволило отримати вищий вихід метану за короткий термін до 45 днів, у порівнянні з необробленим підстилковим гноєм ВРХ.

Таблиця 5.4 – Технічні характеристики біоекструдерів Lehmann

Продуктивність моделі	Кукурудзяний та трав'яний силос	Зелені відходи, підстилковий гній	Силос зів'ялої трави	Солома	Суміш (вкл. солому)
% СР	30	30	25	50–60	30–35
MSZ B 44e	1,5–3,2 т/год	1,4–3,2 т/год	1,8–3,2 т/год	0,5–0,8 т/год	2,2–3,4 т/год
MSZ B 60e	2,0–3,5 т/год	1,8–4,0 т/год	2,5–3,5 т/год	0,6–1,0 т/год	2,5–3,5 т/год
MSZ B 74e	4,5–7,0 т/год	3,5–6,5 т/год	3,5–6,0 т/год	1,2–3,0 т/год	3,0–6,5 т/год
MSZ B 90e	4,9–7,8 т/год	4,0–7,5 т/год	4,0–7,3 т/год	2,0–3,4 т/год	4,0–6,0 т/год
MSZ B 110e	5,2–8,5 т/год	4,5–8,0 т/год	4,5–8,0 т/год	1,6–4,0 т/год	4,5–8,0 т/год
Споживання електроенергії, кВт•год	6,0–14,0	2,5–12,5	5,0–12,5	30–45	8,0–18,0



Рис. 5.10 – Компонівка біоекструдера



Рис. 5.11 – Компонування обладнання Maximizer з біогазовою установкою

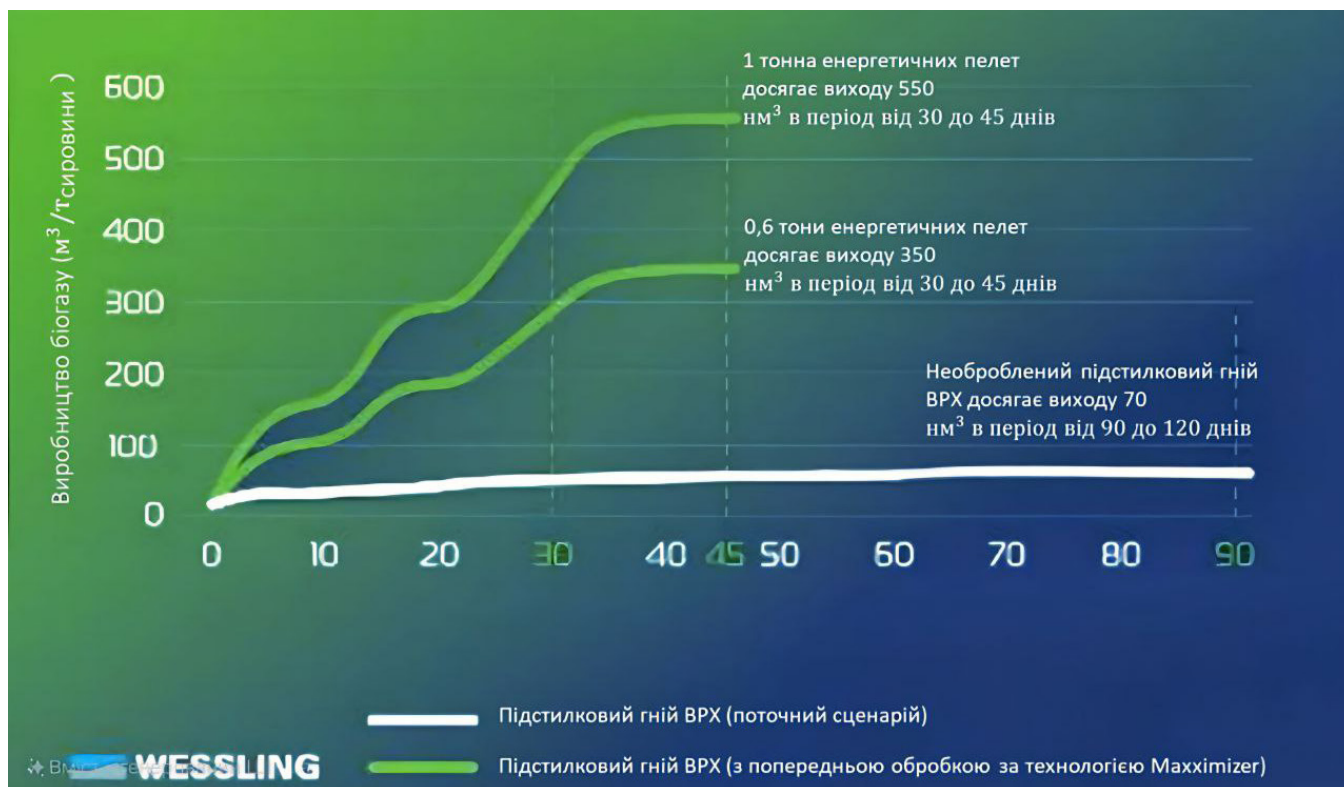


Рис. 5.12 – Порівняння виходу CH_4 з енергетичних пелет, виготовлених за технологією Maximizer, та необробленого підстилкового гною ВРХ

Технологічні рішення для анаеробного зброджування поживних решток

Лігноцелюлозна біомаса, як то солома чи кукурудзиння, може бути перероблена в більшості відомих типів анаеробних біореакторів та технологічних схем на їх основі. При цьому, така сировина повинна бути підготовлена відповідним чином, одним з розглянутих в Розділі 5 методів або будь-яким іншим інноваційним методом, що є рентабельним.

Процес анаеробного зброджування протікає у 4 основні етапи: 1) гідроліз, 2) кислотогенез, 3) ацетогенез та 4) метаногенез. Протікання кожного етапу є результатом метаболізму різних груп бактерій, для яких характерні різні оптимальні умови росту. Усі 4 етапи процесу можуть протікати в біореакторі одночасно, а можуть бути розділені в просторі, з протіканням окремих етапів в окремих біореакторах.

Основні технологічні режими анаеробного зброджування показано на **рис. 6.1**. Усі ці режими назагал застосовні до агросировини і мають практичну реалізацію. Разом з тим, серед біогазових установок, що працюють на агросировині, найбільшого поширення отримали технологічні режими **проточного** або **квазі-проточного** типу в біореакторах повного змішування.

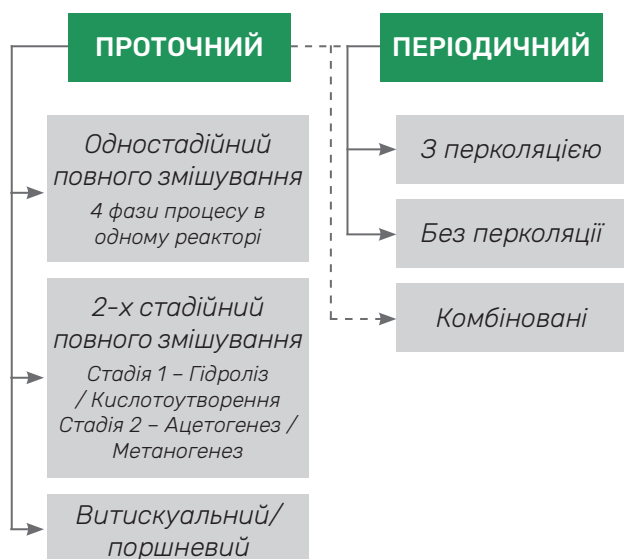


Рис. 6.1 – Основні види технологічних режимів анаеробного зброджування

РОЗДІЛ 6

На діючих біогазових установках процес анаеробного зброджування реалізують, як правило, за 2-ма основними підходами, а саме:

одностадійний процес, в якому всі 4 етапи протікають одночасно в одному біореакторі;

двостадійний процес, в якому перші два етапи, гідроліз та кислотогенез, реалізуються в біореакторі 1-ої стадії, а ацетогенез та метаногенез – в реакторі 2-ої стадії.

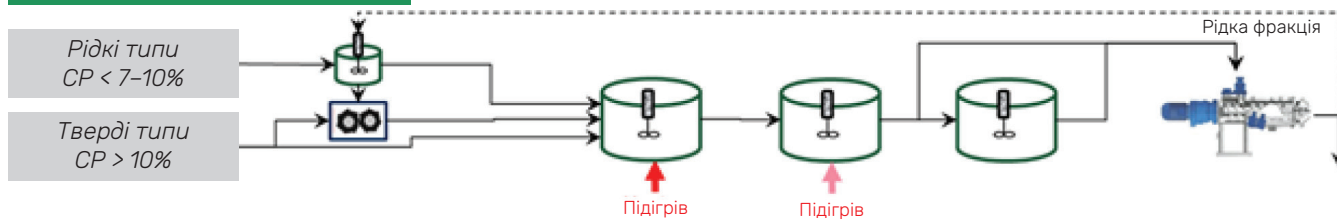
В обох підходах, як правило, використовують доброджувачі – герметичні резервуари, виготовлені по принципу основних біореакторів, які виконують роль стабілізатора біологічних процесів та збору залишкових обсягів біогазу.

Одностадійний процес найчастіше реалізують для тих видів сировини, що легко піддаються біологічному розпаду (наприклад, гній, силос кукурудзи, силос покривних культур, жом). При використанні лігноцелюлозної біомаси, як то солома чи кукурудзиння, одностадійний процес також може бути реалізовано. Однак це потребуватиме досить ретельної попередньої підготовки такої сировини, що забезпечить достатню гомогенізацію, втрату гідрофобних властивостей та швидкість біологічного розпаду соломи, співмірну з основними видами сировини.

Другий підхід часто використовується при зброджуванні більш складних видів сировини, зокрема поживних решток, та коли застосовують технології з високими органічними навантаженнями на основний ферментер. При такому підході солому гідролізують в окремому реакторі, забезпечуючи оптимальні умови процесу шляхом додавання необхідної кількості комплементарної сировини та/або макро- та мікроелементів. Двостадійне зброджування є більш складним технологічним процесом, оскільки вимагає контролю двох різних наборів параметрів в біореакторах, а також ретельного узгодження швидкості

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

1-стадійна технологічна схема



2-стадійна технологічна схема

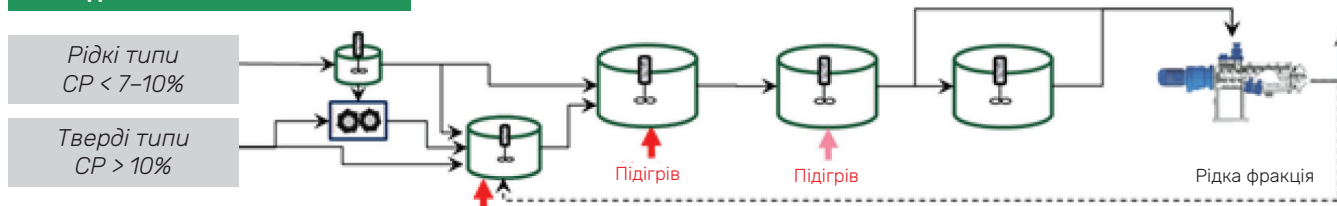


Рис. 6.2 – Приклади технологічних схем біогазових станцій.

протікання обох процесів та виходу проміжних та цільових продуктів технології. Перевагою такого підходу може бути пришвидшення загального процесу біотрансформації органічної речовини соломи в біогаз, зокрема за рахунок застосування спеціалізованих високопродуктивних ензимів на стадії гідролізу.

На **рис. 6.2** показано типовий склад **основних блоків** біогазової станції, що працює в 1-стадійному та 2-стадійному режимах. Такі схеми є універсальними і можуть застосовуватись для різних сумішей рідких та твердих типів сировини. 2-стадійні схеми зброджування є більш складними, потребують будівництва додаткового реактора гідролізу, що відповідно збільшує їх вартість. Наявність доброджувача в технологічній схемі дозволяє додатково зібрати до 10–15% біогазу та значною мірою стабілізувати утворений дигестат перед направленням в лагуну. Разом з тим, є приклади біогазових установок, зокрема в Україні, коли технологічний процес реалізується в 1-стадійному режимі без застосування доброджувачів. Підігрів доброджувачів не є обов'язковою опцією, і може застосовуватись в залежності від ефективності протікання процесу в основних реакторах.

Фактичний склад та розмір основних споруд біогазового комплексу визначається типами

використовуваної сировини та необхідним часом зброджування для досягнення планової ефективності біоконверсії органічної речовини в біогаз. Як правило, ступінь біоконверсії, що показує частку маси біологічно зброджуваної органіки, яка перейшла в біогаз, підтримується на рівні 90–95%. Різні види сировини, в залежності від способу їх попередньої підготовки, потребують різного часу утримання в біореакторах. Так, наприклад, силос кукурудзи потребує 40–45 діб зброджування, гній – 25–35 діб, механічно подрібнена солома – 50–60 діб. При змішуванні різних видів сировини, за одного часу утримання, для кожного виду сировини буде досягатись свій ступінь біоконверсії. Збільшення часу утримання сировини потребуватиме збільшення об'єму усіх технологічних споруд, потужності технологічного обладнання і, відповідно, споживання енергії і витратних матеріалів.

Для виробництва біогазу з соломи або кукурудзиння потенційно можна також застосовувати технології періодичного зброджування (**рис. 6.3**) або технології з високонавантажуваними біореакторами «сухого» типу, що типово використовують для зброджування органічної фракції ТПВ (**рис. 6.4**). Разом з тим, про випадки застосування таких технологій для зброджування соломи наразі не відомо з відкритих джерел інформації.



Рис. 6.3 – Приклади технологій періодичного анаеробного зброджування
а) – схема з перколят-реактором; б) схема з тунельним реактором

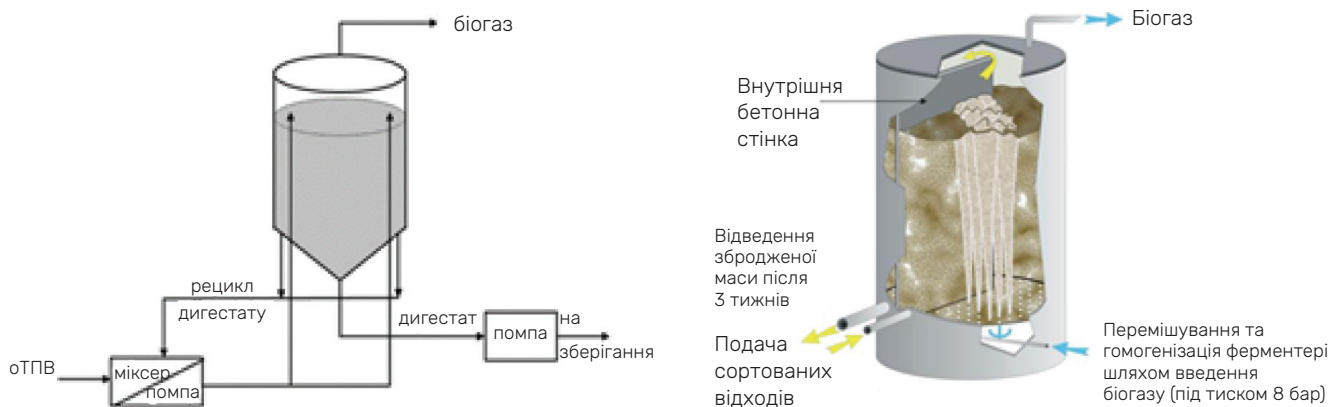


Рис. 6.4 – Приклади технологій з високонавантажуваними біореакторами «сухого» типу:
а) – схема з реактором DRANCO; б) схема з реактором VALORGA

Переваги систем періодичного зброджування наступні:

придатні для зброджування штабельованих твердих типів сировини, наприклад, соломи в прямокутних тюках, що не потребуватиме будь-якої попередньої обробки чи навіть видалення мотузок;

менш чутливі до домішок в сировині, що дозволить використовувати також відносно «брудні» технології заготівлі пожнивних решток;

менш чутливі до параметрів середовища, що дозволить зменшити або взагалі нівелювати потребу в комплементарних видах сировини;

менше споживають електричної енергії;

мінімальний вихід рідкої фракції дигестату.

Основними недоліками таких технологій є підвищені викиди метану при завантаженні сировини та вивантаженні зброженої маси, а також нестабільний склад та обсяг газу. Для вирівнювання складу та обсягу біогазу потрібно будувати цілий ряд окремих реакторів, що відповідно збільшить вартість всього проекту. Окрім цього, після періодичного зброджування тюкованої соломи, структурно вона практично не зміниться, і потребуватиме подальшої обробки перед внесенням на поля.

Агрономічні, екологічні та енергетичні аспекти використання пожнивних решток для виробництва біометану

Агрономічні аспекти

Солома як органічне добриво застосовується для утворення гумусу у верхньому шарі ґрунту. Підтримання належного балансу гумусу сприяє біологічній активізації ґрунту, а також його протиерозійному захисту. Для того, щоб солома стала по-справжньому цінним органічним добривом, а не наповнювачем, який заважає обробітку ґрунту, вона повинна якнайшвидше розкладатися. Солома швидше розкладається за хорошого доступу повітря в ґрунт (в аеробних умовах). Глибоке заорювання соломи викликає несприятливий ефект, тому що при її розкладанні в нижніх шарах орного горизонту утворюються леткі жирні кислоти, які негативно впливають на кореневу систему рослин. При внесенні у верхню третину орного шару солома розкладається швидше і накопичення шкідливих речовин не спостерігається. Через бідність соломи азотом (C:N=60-100) вона забирає 40-50 кг/га ґрунтового азоту на власну мінералізацію до досягнення співвідношення C:N=20. Тому в перший період свого росту і розвитку рослини відчувають нестачу азоту, якщо в ґрунт разом із соломою не вносять азот мінеральних добрив⁸⁵.

З агрономічної точки зору, використання пожнивних решток для енергетичних потреб розглядається як фактор зниження запасів гумусу та зменшення внесення органічних добрив. Разом з тим, виробництво біометану з пожнивних решток передбачає повернення їх в перетвореному виді з дигестатом, що можна вважати сталим підходом, оскільки з дигестатом повертаються практично всі макро- та мікроелементи, а також до 50% органічного карбону. При цьому органічний азот, що міститься в нативній соломі, повертається в мінералізованій амонійній формі, легко доступній рослинам.

РОЗДІЛ 7

За таким підходом, немає підстав обмежувати використання пожнивних решток на виробництво біогазу та біометану. Разом з тим, солома є ресурсом, який має значний конкурентний попит в інших сферах застосування. Відтак, частка соломи, яку можна відібрати з поля на виробництво біометану може визначатись для конкретного підприємства та регіону індивідуально. Аналіз можливих часток відбору пожнивних решток з полів, що застосовуються фермерами з різних країн світу⁸⁶, для енергетичних потреб показує, що може застосовуватись 15-50% теоретичного потенціалу їх утворення.

Екологічні аспекти

Використання пожнивних решток для виробництва біометану матиме вплив на баланс викидів парникових газів, однак буде цей баланс позитивним чи негативним і яка буде його величина буде залежати, зокрема: від застосованих технологій зброджування, утилізації CO₂ від збагачення біогазу, кліматичних умов в регіоні, типу та характеристик ґрунтів, застосовуваних технологій обробки ріллі та технологій внесення дигестату. Подальше внесення дигестату з пожнивних решток в поля також матиме вплив на запас вуглецю в ґрунті, на забруднення ґрунтових та поверхневих вод, а також емісії аміаку в атмосферу.

У дослідженні⁸⁷ було проаналізовано вплив повернення соломи на викиди парникових газів з кукурудзяних полів. Результати мета аналізу показали комплексний взаємозв'язок між поверненням соломи та викидами парникових газів, на який впливають регіон, тип газу, рівень

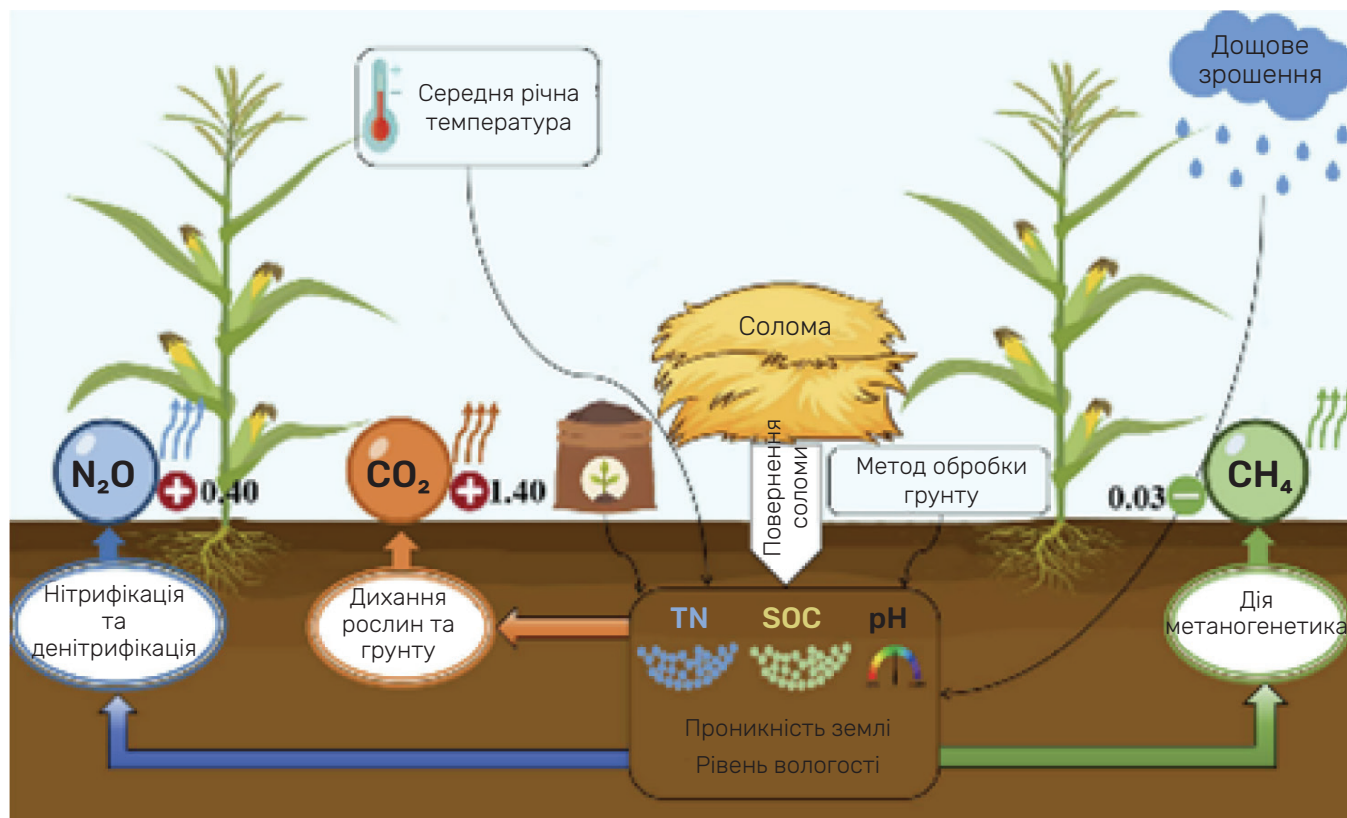


Рис. 7.1 – Концептуальна карта впливу повернення соломи на викиди парникових газів⁸⁹

Примітки: Знак плюс червоного кольору вказує на збільшення, а знак мінус зеленого кольору – на зменшення.
Число поруч зі знаком позначає відповідне значення ефекту

азоту, фактори навколишнього середовища та стан ґрунту. Повернення соломи на поле призвело до значного збільшення викидів CO_2 на 140%, причому рівень азоту був основним фактором, що впливав на це збільшення. Повернення соломи збільшило викиди CH_4 на 3%, причому вміст органічного вуглецю в ґрунті був найважливішим фактором, що впливав на викиди CH_4 . Кількість внесеного азоту була найважливішим фактором, що впливав на викиди N_2O при поверненні соломи. Повернення соломи на поля збільшило викиди N_2O на 40% порівняно з її неповерненням. **Рис. 7.1** ілюструє теоретичні засади для майбутніх обґрунтувань повернення соломи.

Внесення дигестату, отриманого з поживних решток, в поля також буде призводити до викидів парникових газів. Викиди закису азоту N_2O можуть виникати при нітрифікації – денітрифікації амонійного азоту⁸⁸. Рівень викидів N_2O може коливатися від 0,5% до 5% від загальної кількості внесеного азоту, залежно від типу ґрунту та його pH, вологості чи температури, а також, часу та способу внесення дигестату. Викиди закису азоту можуть збільшитися, якщо дигестат має високий вміст

амонію, коли після внесення мають місце вологі умови або йдуть дощі, або поле має погану аерацію або ущільнене⁸⁹.

Органічний азот в процесі зброджування трансформується в мінералізовану форму, легко доступну рослинам, тому вибір правильних технік та періодів внесення дигестату сприятиме максимально швидкому засвоєнню рослинами та мінімізації викидів в атмосферу. Частина незасвоєного азоту може далі інфільтруватись в ґрунт і потрапляти в ґрунтові води, спричиняючи їй забруднення. Для запобігання цьому, в багатьох європейських країнах суворо контролюють внесення азотних добрив, зокрема дигестату, що регулюється Нітратною Директивою. Директива про нітрати (Директива Ради 91/676/ЄЕС) зобов'язує держави-члени визначати зони, вразливі до нітратів, для зменшення забруднення води, спричиненого нітратами із сільськогосподарських джерел.

Внесення дигестату, що містить активну масу анаеробних бактерій, сприятиме також розкладу органічних решток, накопичених в ґрунті, з виділенням метану. Додаткові викиди CO_2 можуть виникати від окислення залишкового органічного карбону в дигестаті.

Негативний баланс викидів ПГ при використанні пожнивних решток для виробництва біометану буде формуватися за рахунок наступних факторів:

- зменшення викидів ПГ від не внесення пожнивних решток в ґрунти;*
- зменшення викидів ПГ від заміщення енергією біометану енергії викопних видів палив;*
- зменшення викидів ПГ від заміщення азотних добрив, при внесенні дигестату в ґрунти;*
- зменшення маси карбону, що повертається в ґрунти;*
- зменшення викидів за рахунок утилізації або захоронення CO₂ від збагачення біогазу.*

Позитивний баланс викидів ПГ буде формуватись за рахунок наступних факторів:

- використання викопних видів пального для операцій зі збору та логістики пожнивних решток;*
- використання електричної енергії з мережі, якщо застосовано;*
- виращування, збір та логістика біомаси, що використовується для виробництва електричної та теплової енергії на власні потреби біометанового комплексу, якщо застосовано;*
- викиди CH₄ з біогазом за рахунок витоків та виділення залишкового метану з місць накопичення та зберігання дигестату;*
- викиди ПГ, що утворюються при внесенні дигестату в ґрунти.*

Як буде показано на прикладі оцінки викидів ПГ, наведеному в **Розділі 8**, вироблений біометан з соломи пшениці та кукурудзиння матиме від'ємну карбонову інтенсивність за умови утилізації CO₂ від збагачення біогазу. Якщо ж CO₂ буде скинуто в атмосферу, карбонова інтенсивність буде позитивною, однак все ще буде задовольняти потрібний рівень зниження викидів ПГ в 65% для транспортних палив, що вимагається Директивою ЄС REDII.

Енергетичні аспекти

З точки зору енергетичного балансу, використання соломи та кукурудзиння для виробництва біометану є виправданим, оскільки дозволяє отримувати більше енергії в біометані, ніж було затрачено на його виробництво на усьому ланцюгу створення вартості.

Так, наприклад, з 1 т соломи пшениці вологістю 15% можна отримати орієнтовно 200–240 нм³CH₄, що еквівалентно 7180–8616 МДж енергії. На всьому ланцюгу постачання такої сировини до біогазової станції потрібно буде спожити 4,316 л/т дизельного палива, що еквівалентно 155 МДж/т енергії (**табл. 7.1**).

Для забезпечення власних потреб всього біометанового комплексу за рахунок когенерації на біогазі з силосу кукурудзи, потрібно буде ще спожити орієнтовно 2,94 л/т ДП. Таким чином, сумарне споживання енергії дизельного палива для забезпечення виробництва біогазу з соломи складе 261 МДж/т, а з кукурудзиння

Таблиця 7.1 – Розрахункові значення споживання дизелю при заготівлі соломи пшениці, кукурудзиння та силосу кукурудзи як сировини для виробництва біогазу

Витрати дизелю	Розм.	Солома пшениці (тюки)	Кукурудзиння (тюки)	Силос кукурудзи
ВСЬОГО, зокрема:	л/т	4,316	6,146	3,211
	МДж/т	155	221	116
Виращування (кукурудза) та заготівля	л/т	3,6	5,5	2,155
	МДж/т	130	198	78
Перевезення до складу і операції на складі	л/т	0,46	0,39	0,8
	МДж/т	117	14	29
Операції в межах біометанового комплексу	л/т	0,256	0,256	0,256
	МДж/т	9	9	9

– 327 МДж/т. Це відповідає 3,3% (для соломи) та 4,9% (для кукурудзиння) до обсягу енергії виробленого біометану з цих видів сировини.

За умови, коли електрична енергія буде споживатись з мережі, а власні потреби в тепловій енергії будуть покриватись за рахунок споживання іншої біомаси, сумарні витрати енергії складуть 3197 МДж/т суміші соломи та кукурудзиння (для прикладу, розглянутого в

Розділі 8). Таким чином це складе орієнтовно 44% енергії, що міститься в біометані, виробленому з суміші соломи та кукурудзиння.

Таким чином, можна вважати енергетичний баланс використання соломи пшениці та кукурудзиння для виробництва біометану позитивним, навіть за умови постачання електричної енергії для власних потреб біометанового комплексу з мережі.

ТЕО виробництва біометану з поживних решток

Для оцінки техніко-економічних показників проекту виробництва біометану з поживних решток розглянуто модель постачання сировини з агропідприємства, що має в обробітку загалом 10 тис. га землі в компактному розташуванні в межах одного району господарювання, а також свиноферму з середнім поголів'ям 18 тис. голів. При цьому розглядається сценарій, за якого, для виробництва біометану, заготовлюється 9600 т/рік соломи пшениці (85%СР) з площі 2400 га та 8550 т/рік кукурудзиння (75% СР) з площі 1900 га (*див. детальніше розділ 4*), а також використовується 90 тис. т/рік рідкого гною свиней (4% СР).

Використання гною в проектах виробництва передового біометану дозволяє додатково скоротити викиди парникових газів, а відтак і карбонову інтенсивність біометану. Це, відповідно, може збільшити попит на такий біометан та можливу ціну його реалізації при експорті на європейський ринок відновлюваних біопалив. Окрім цього, використання рідкої гноївки свиней є виправданим з технологічної точки зору, оскільки дозволяє компенсувати потребу в додаванні свіжої води при зброджуванні сухої маси поживних решток в біореакторах вологого типу, а також збалансовувати вміст карбону та нітрогену в суміші до оптимального рівня.

РОЗДІЛ 8

Передбачається, що зібрана маса соломи пшениці та кукурудзиння в тюкованій формі буде доставлятися на основний склад в безпосередній близькості до комплексу виробництва біометану, де буде зберігатись та звідки буде постачатись на виробництво біогазу протягом року. Орієнтовна площа основного складу складає 6 га. Втрати маси СР соломи протягом періоду зберігання прийнято на рівні 3%, кукурудзиння – 5%.

Розглядаються 2 основних концепції попередньої обробки соломи та кукурудзиння. Дві основні концепції відрізняються методами та необхідним обладнанням для попередньої обробки соломи та кукурудзиння. **Концепція 1** передбачає попередню обробку з використанням біоекструдерів марки MSZ – B 110e виробництва компанії Lehmann – UMT GmbH, розглянутих в **Розділі 5**. Перед подачею в приймальний бункер лінії біоекструдера, передбачено попереднє розривання тюків та подрібнення соломи та кукурудзиння. **Концепція 2** передбачає виробництво пелет, як з соломи, так і з кукурудзиння. Для підсушування кукурудзиння до прийнятної для гранулятора вологості передбачено використання окремого сушильного комплексу. Сумарна потужність лінії гранулювання виробництва Radviliskis

Machine Factory складає 2 т/год. Продуктова концепція передбачає, що вироблений біометан буде подаватись в ГТС України з реалізацією гарантій походження (ГП) на європейському ринку відновлюваних біопалив, а харчова вуглекислота буде збуватись на внутрішньому ринку. Для оцінки впливу виробництва і збуту зрідженого CO₂ на рентабельність проекту, розглянуто додатково опцію на основі **концепції 1**, де CO₂ буде просто скинуто в атмосферу (далі – **концепція 3**).

Для забезпечення власних потреб усього біометанового комплексу в електричній та тепловій енергії, включно з лініями попередньої обробки поживних решток, передбачено виробництво частини біогазу з силосу кукурудзи з наступним спалюванням його в когенераційній установці. Для **концепції 1** проекту потрібно буде заготовити 16 994 т/рік силосу з вмістом СР 35%, для **концепції 2** – 22 738 т/рік. При урожайності зеленої маси кукурудзи 50 т/га, необхідно буде виділити близько 340 га та 455 га землі. Використання частини обсягу виробленого біогазу для забезпечення власних енергетичних потреб комплексу розглядається як спосіб зменшити карбоновий слід виробленого біометану, а відтак і збільшення можливої ціни гарантій походження на нього.

Концепція проекту виробництва біометану передбачає, що солома, кукурудзиння та силос кукурудзи буде постачатись окремим підрозділом агрокомпанії за ціною, що враховує рентабельність на рівні 25%. При цьому, витрати на зберігання поживних решток та силосування кукурудзи, а також витрати на постачання усіх видів сировини від місць зберігання до біогазової станції входять у витрати біометанового проекту. Утворений дигестат передбачається вносити на поля компанії під основні культури. Передбачається, що рідка фракція дигестату буде накопичуватись в лагуні протягом півроку і двічі на рік вноситись на поля. Витрати на транспортування та внесення дигестату не віднесено до витрат біометанового проекту.

Всі технологічні концепції проекту передбачають виробництво біогазу в біогазовій установці аграрного типу з циліндричними реакторами горизонтального типу, що включатиме основні ферментери та доброджувач. Частина виробленого біогазу,

після попереднього осушення та видалення сірководню, буде подаватись на когенераційну установку для вироблення електричної та теплової енергії. Решта, основна частина біогазу, буде подаватись на установку очищення та збагачення біогазу до біометану. В проекті розглядається опція доочищення до якості харчової вуглекислоти та зрідження виділеного в процесі збагачення біогазу CO₂. Передбачено котельню на агрогранулах, що забезпечуватиме розігрів біореакторів при біологічному запуску, а також резервування для випадків простою когенераційної установки на біогазі.

Оцінена еквівалентна вартість дигестату може складати 2,42 євро/т. В фінансовій моделі враховується ціна на дигестат для агрокомпанії на рівні 1,5 євро/т, без ПДВ.

Оцінений вихід біогазу для концепції 1 складає 10,84 млн нм³/рік (**табл. 8.1**), для **концепції 2** – 12,44 млн нм³/рік (**табл. 8.2**). Як видно з наведених показників, змішування поживних решток (14,1% по свіжій масі та 60,4% по СР) з гною свиней та силосом кукурудзи дозволяє досягти прийнятного співвідношення С:N в суміші на рівні 24, і разом з тим забезпечити прийнятний вміст СР в зброджуваній суміші в біореакторах – на рівні 8,3% для **концепції 1** та 7,8% – для **концепції 2**. Очікується, що розрахунковий вихід біогазу з суміші буде досягнуто за загальний час зброджування на рівні 57 діб (**концепція 1**) та 45 днів (**концепція 2**). Зменшення тривалості періоду гідравлічного утримання в **концепції 2**, у порівнянні з **концепцією 1**, обґрунтовується покращенням кінетики розпаду органічної речовини поживних решток в гранульованій формі. Це, відповідно, дозволяє зменшити необхідний робочий об'єм біореакторів до 20%.

Розрахункові виходи цільових продуктів в розглянутих проектних концепціях наведено в **табл. 8.3**.

В проектних концепціях враховано приєднання до електромережі, з тим щоб гарантувати безперебійну роботу усього обладнання біометанового комплексу, однак приймається, що всі потреби комплексу в електричній енергії будуть покриватись за рахунок роботи когенераційної установки на біогазі. Загальне приєднане електричне навантаження для **концепції 1** складає 1090 кВт_е, **концепції 2** – 1660 кВт_е, **концепції 3** – 880 кВт_е.

Таблиця 8.1 – Розрахункові показники виходу біогазу та складу сировини (концепція 1)

Показник	Розм.	Суміш, всього	Сировина:			
			Солома пшениці	Гній свиней	Кукурудзиння	Силос кукурудзи
Витрата сировини	т/рік	123 409	9 312	90 000	8 123	15 974
Прийнятний біохімічний потенціал виходу метану	нм ³ CH ₄ /т СОР	287,3	270	360	270	350
	нм ³ CH ₄ /т	183,2	215,7	12,2	186,3	113,9
Біогаз	нм ³ /т СОР	508,7	490,9	553,8	490,9	636,4
Ефективність	%	95,0	95	95	95	95
Виробництво CH ₄	нм ³ CH ₄ /добу	16 771	5 229	2 867	3 939	4 737
	нм ³ CH ₄ /рік	6 121 361	1 908 434	1 046 520	1 437 561	1 728 846
Виробництво біогазу	нм ³ /добу	29 690	9 507	4 411	7 161	8 612
	нм ³ /рік	10 837 014	3 469 880	1 610 031	2 613 747	3 143 356
Виробництво CO ₂	нм ³ CO ₂ /добу	12 623	4 183	1 500	3 151	3 789
% CH ₄	%	56,5	55	65	55	55
%CO ₂	%	42,5	44	34	44	44
Вміст азоту загального	кг N/т	3,3	4,3	2,8	5,6	4,5
C : N	-	23,9	84,6	5,7	55,2	34,4

Таблиця 8.2 – Розрахункові показники виходу біогазу та складу сировини (концепція 2)

Показник	Розм.	Суміш, всього	Сировина:			
			Солома пшениці (пелети)	Гній свиней	Кукурудзиння (пелети)	Силос кукурудзи
Витрата сировини	т/рік	126 626	8 619	90 000	6 633	21 374
Прийнятний біохімічний потенціал виходу метану	нм ³ CH ₄ /т СОР	307,1	300	360	300	350
	нм ³ CH ₄ /т	191,2	253,8	12,2	248,4	113,9
Біогаз	нм ³ /т СОР	545,6	545,5	553,8	545,5	636,4
Ефективність	%	95,0	95	95	95	95
Виробництво CH ₄	нм ³ CH ₄ /добу	19 187	5 693	2 867	4 289	6 338
	нм ³ CH ₄ /рік	7 003 218	2 078 072	1 046 520	1 565 344	2 313 281
Виробництво біогазу	нм ³ /добу	34 083	10 352	4 411	7 797	11 523
	нм ³ /рік	12 440 390	3 778 314	1 610 031	2 846 080	4 205 966
Виробництво CO ₂	нм ³ CO ₂ /добу	14 556	4 555	1 500	3 431	5 070
% CH ₄	%	56,3	55	65	55	55
%CO ₂	%	42,7	44	34	44	44
Вміст азоту загального	кг N/т	3,4	4,5	2,8	6,8	4,5
C : N	-	24,3	84,6	5,7	55,2	34,4

Таблиця 8.3 – Вихід цільових продуктів в розглянутих проєктних концепціях

Продукт	Розмірність	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%)	%	5 561	6 001	0
Дигестат, зокрема:	т/рік	109 760	110 928	107 344
рідка фракція	т/рік	21 952	22 186	21 469
тверда фракція	т/рік	87 808	88 742	85 875

Таблиця 8.4 – CAPEX розглянутих проєктних концепцій

Складова інвестицій	Вартість, тис. євро, з ПДВ та митними платежами		
	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
ВСЬОГО	13 928,2	13 908,5	11 950,0
Техніка та обладнання	8 964,1	8 780,3	7 234,6
Будівництво та монтаж	4 135,8	4 288,9	3 941,6
Інше	828,3	839,3	773,9
Комплекс виробництва біогазу	6 060,0	5 710,5	5 981,1
Обладнання та техніка для попередньої обробки соломи та кукурудзиння	736,2	800,5	736,2
Машини та техніка для силосування та транспортування силосу до біогазової станції	175,5	175,5	175,5
Силососховище	383,4	513,0	305,9
КГУ на біогазі	956,6	1 114,4	859,0
Резервна котельня	248,4	268,9	215,3
Комплекс збагачення біогазу до біометану	2 310,0	2 173,0	2 310,0
Комплекс зрідження CO ₂	1 485,5	1 485,5	-
Блок трансферу біометану в ГТС (основний + резервний компресор, газопровід 5 км, вузол обліку газу, хроматограф)	1 137,4	1 169,5	1 137,4
Машини та техніка для логістики CO ₂	195,1	195,1	-
Приєднання до електромережі	58,4	120,9	47,8
Машини та техніка для операцій з дигестатом	61,7	61,7	61,7
Проектування	120,0	120,0	120,0

Для підтримання необхідної температури в біореакторах необхідно буде подати 7,7-8,1 ГВт•год/рік теплової енергії. Ці потреби будуть повністю покриті за рахунок скидного тепла від когенераційної установки та скидного тепла від процесу збагачення біогазу.

Оцінені інвестиції в проєкт (CAPEX), включно з ПДВ та митними платежами, склали 13,93 млн євро для **концепції 1**, 13,91 млн євро – для **концепції 2**, і 11,95 млн євро – для **концепції 3 (табл. 8.4)**. Питомий розмір інвестицій в комплекс виробництва біогазу складає 2071 євро/кВт еквівалентної електричної потужності КГУ на біогазі – для **концепції 1**, та 1705 євро/кВт – для **концепції 2**, що відповідає середньому та нижче середнього рівню цін на ринку на установки подібного масштабу, відповідно. Зниження питомих інвестицій для **концепції 2** можливе за рахунок зменшення тривалості зброджування гранульованих поживних решток та збільшення інтенсивності виходу біогазу.

Лева частка інвестицій для усіх розглянутих проєктних концепцій припадає на комплекс виробництва біогазу (> 40%). Вагомими складовими інвестицій є також комплекс збагачення біогазу до біометану, комплекс зрідження CO₂, а також блок попередньої підготовки поживних решток. Затрати на обладнання для попередньої обробки склали 5,3% для **концепції 1** та 5,8% – для **концепції 2**.

Загальну суму річних операційних витрат (OPEX), без ПДВ, оцінено в 2,08 млн євро для **концепції 1**, 2,39 млн євро – для **концепції 2**, та 1,89 млн євро – для **концепції 3 (табл. 8.5)**. Основні витрати проєкту пов'язані з купівлею сировини та операціями по її заготівлі, транспортуванню та попередній обробці – сумарно 51 - 52%. Суттєву частку витрат проєкту складають також витрати на оплату праці – від 17,4% до 20,0%. Загальний штат персоналу для обслуговування всього біометанового комплексу, включно з логістикою сировини та попередньої обробки соломи і кукурудзиння, оцінено в 19-20 осіб.

Таблиця 8.5 – OPEX розглянутих проєктних концепцій

Складові операційних витрат	Вартість, тис. євро, без ПДВ		
	Концепція 1 біометан з соломи, після обробки біоекструдером + скраплення CO ₂	Концепція 2 біометан з пелет + скраплення CO ₂	Концепція 3 лише біометан з соломи, після обробки біоекструдером
ВСЬОГО	2 082,2	2 388,3	1 886,0
Сировина	873,9	873,9	806,3
Логістика сировини	99,2	72,4	89,0
Виробництво біогазу	70,6	67,0	70,6
Попередня обробка соломи та кукурудзиння	85,0	270,2	85,0
Комбіноване виробництво електричної та теплової енергії в КГУ на біогазі	47,8	46,4	47,8
Обслуговування резервної котельної	9,3	10,0	13,2
Збагачення біогазу до біометану	109,9	103,4	109,9
Зрідження CO ₂	30,9	30,9	-
Логістика зрідженого CO ₂	89,0	96,0	-
Логістика біометану	242,6	277,8	242,6
Операції з дигестатом	61,7	62,0	59,2
Фонд заробітної плати	362,4	478,2	362,4

Таблиця 8.6 – Базові тарифи та ціни, прийняті в фінансовій моделі (без ПДВ)

Показник	Розмірність	Величина
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 цільових 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

Примітки: 1 МВт•год енергії біометану = близько 100,28 нм³CH₄

Прийняті в фінансовій моделі базові величини тарифів та цін наведено в **табл. 8.6**. Базовий курс валют при перерахунку грн в євро прийнято 47,07 грн/євро.

Оцінку очікуваної ціни біометану зроблено на основі даних трейдерів біометану, з врахуванням оціненої величини карбонового сліду такого біометану.

Розрахунок скорочень викидів парникових газів (ПГ) проведено у відповідності до положень Директиви RED II, зокрема методології розрахунку скорочень викидів, викладеній в Додатку VI В (палива з біомаси). При розрахунку скорочень викидів ПГ застосовано один з дозволених підходів, а саме комбінація розрахункових значень та розподілених значень

за замовчуванням. Розподілені значення за замовчуванням використовувались частково для гною та силосу кукурудзи. Оцінку величин скорочення викидів ПГ по кожному виду сировини для усіх розглянутих концепцій наведено в **табл. 8.7**.

Як видно з результатів розрахунку, всі види сировини забезпечують потрібний рівень зниження викидів ПГ в 65% для транспортних палив, окрім силосу кукурудзи в проєктній концепції 3 без утилізації CO₂ від збагачення біогазу. Усереднені сумарні викиди (E) для всього кінцевого продукту (БІОМЕТАН) склали: для **концепції 1** (-17,33) гCO_{2-екв}/МДж, для **концепції 2** (-14,05) гCO_{2-екв}/МДж, для **концепції 3** (+14,94) гCO_{2-екв}/МДж.

Таблиця 8.7 – Сумарні викиди для кінцевого продукту за видами сировини, $\text{гCO}_{2\text{-екв}}/\text{МДж}$ кінцевого продукту (біометан)

Складова оцінки викидів	Солома пшениці			Кукурудзиння			Гноївка свиней			Силос кукурудзи		
	К - 1	К - 2	К - 3	К - 1	К - 2	К - 3	К - 1	К - 2	К - 3	К - 1	К - 2	К - 3
Викиди при видобутку та вирощуванні [eес,n+etd,n+el,n - esca,n]	2,3	3,6	2,3	3,6	5,2	3,5	0,0	0,0	0,0	18,1	18,1	18,1
Кредити для гною	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	- 107,9			0,0	0,0	0,0
Застосування бонусу eВ (відновлення деградованих земель), $\text{г CO}_{2\text{екв}}/\text{МДж}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Викиди при виробництві (ep)	13,2	13,9	12,3	13,2	13,9	12,3	13,2	13,9	12,3	13,2	13,9	12,3
Викиди при транспортуванні та розподіленні готового продукту (etd, product)	4,5	4,6	4,4	4,5	4,6	4,4	4,5	4,6	4,4	4,5	4,6	4,4
Викиди від кінцевого використання (eu)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Зниження викидів від уловлення і заміщення CO_2 (eесr)	- 34,6	- 34,8	0,0	- 34,6	- 34,8	0,0	- 34,6	- 34,8	0,0	- 34,6	- 34,8	0,0
Сумарні викиди (E) для всього кінцевого продукту (БІОМЕТАН)	- 14,2	- 12,4	19,3	- 13,0	- 10,8	20,6	- 124,4	- 123,9	- 90,9	1,6	2,2	35,1
Потенціал скорочення викидів ПГ для кінцевого продукту, %	115	113	79	114	111	78	232	232	197	98	98	63

Примітки: К - 1 – для проєктної концепції 1; К - 2 – для проєктної концепції 2; К - 3 – для проєктної концепції 3

Таблиця 8.8 – Ключові показники ефективності проєкту

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	$\text{МВт}_{\text{біометан}}$	4,97	5,31	4,97
Питомий CAPEX	тис. євро/ $\text{МВт}_{\text{біометан}}$	2 802	2 614	2 404
Питомий OPEX	євро/ $\text{МВт} \cdot \text{год}_{\text{біометан}}$	45,5	48,1	43,3
LCOE* 15 років	євро/ $\text{МВт} \cdot \text{год}_{\text{біометан}}$	53,8	55,8	50,4
Сумарне споживання електроенергії	$\text{МВт} \cdot \text{год}/\text{рік}$	7 482	9 973	5 981
Питомі витрати електроенергії	$\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{МВт} \cdot \text{год}_{\text{біометан}}$	171,8	214,5	137,4
Карбонова інтенсивність біометану	$\text{гCO}_{2\text{екв}}/\text{МДж}_{\text{біометан}}$	- 17,33	- 14,05	14,94

Примітки: *LCOE – levelized cost of energy (приведена собівартість енергії біометану)

Таблиця 8.9 – Умови фінансування проєкту

Показник	Розмірність	Значення
Ставка кредитування	%	8,0%
Відтермінування сплати кредиту	років	1
Термін кредитування	років	7
Ставка корпоративного податку	%	18%
Ставка дисконтування	%	10%
Власний капітал	%	40%

Таблиця 8.10 – Показники економічної ефективності розглянутих 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
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), в т.ч.:		1,98	2,24	1,89
Сировина	млн євро/рік (без ПДВ)	0,97	0,95	0,90
Операційні витрати		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 (без ПДВ)	3,96	4,18	3,57
Зріджений CO ₂		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

В **табл. 8.8** наведено ключові показники ефективності проєктних концепцій. Можна бачити, що при виробництві гранул з соломи, у порівнянні з попередньою обробкою в біоекструдерах, помітно (на 25%) збільшується показник питомого споживання електричної енергії на 1 МВт·год виробленого біометану. Приведена собівартість виробленого біометану (LCOE – levelized cost of energy) склала 53,8 євро/МВт·год для **концепції 1**, 55,8 євро/МВт·год – для **концепції 2**, і 50,4 євро/МВт·год – для **концепції 3**.

В **табл. 8.9** наведено прийняті умови фінансування проєкту. Частку позикових коштів прийнято 60% під 8,0% річних. Амортизацію обладнання прийнято на період 15 років, споруд – на 50 років. Фактор інфляції в фінансовій моделі не враховувався. Результати оцінки основних фінансових показників представлено в **табл. 8.10**.

Проєктні **концепції 1 та 2**, що передбачають скраплення та реалізацію CO₂ від збагачення біогазу за ціною 133 євро/т, без ПДВ, показали прийнятний рівень рентабельності з IRR 20,6% та 20,9% та дисконтованим терміном окупності 7,6 років та 7,5 років, відповідно. Таким чином, обидва розглянутих технологічних рішення попередньої обробки соломи та кукурудзиння є співмірними з економічної точки зору. Очевидною перевагою **концепції 2** з виробництвом пелет є можливість роботи лінії гранулювання як окремої виробничої ланки, з постачанням пелет на ринок, навіть якщо складуться обставини для перебоїв з роботою біометанового комплексу. При цьому, на нашу думку, виробництво біогазу

з гранульованих поживних решток несе в собі менше технологічних ризиків, у порівнянні з будь-яким іншим методом попередньої механічної обробки, за рахунок швидкого набирання вологи та втрати плавучості в технологічних ємностях.

Розглянута проєктна **концепція 3**, в якій CO₂ від збагачення просто скидається в атмосферу, суттєво програє двом базовим концепціям за рівнем рентабельності. Так, IRR проєкту склав всього 12,5% при дисконтованому терміні окупності 12,1 років, що не є інвестиційно привабливими показниками в умовах України. Для досягнення того ж рівня рентабельності, що і в проєктній **концепції 1**, рівень ціни на вироблений біометан повинен складати 97 євро/МВт·год, що при карбоновій інтенсивності такого біометану 14,94 гCO₂_{2екв}/МДж та за поточних умов на ринку відновлюваних біопалив в європейських країнах є малоімовірним.

Аналіз чутливості показника IRR від ціни реалізації основних цільових продуктів показує, що на рентабельність проєкту значно впливає ціна продажу біометану (**рис. 8.1**), меншою мірою – ціна продажу зрідженого CO₂ (**рис. 8.2**). Вартість сировини також суттєво впливає на рентабельність проєкту (**рис. 8.3**).

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.

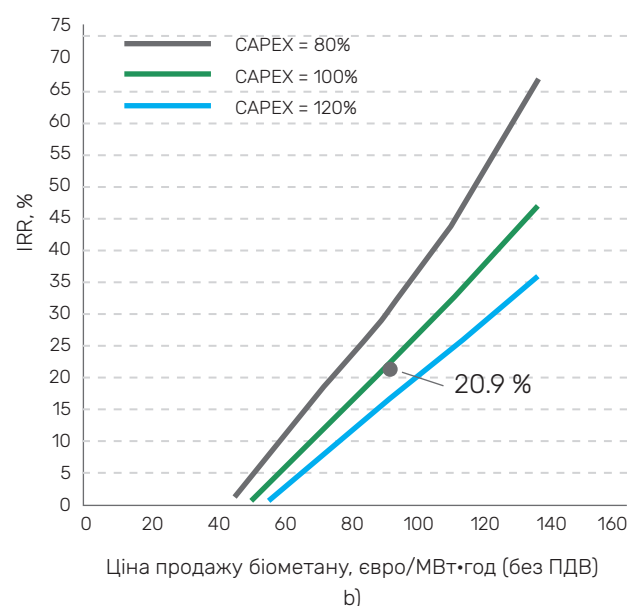
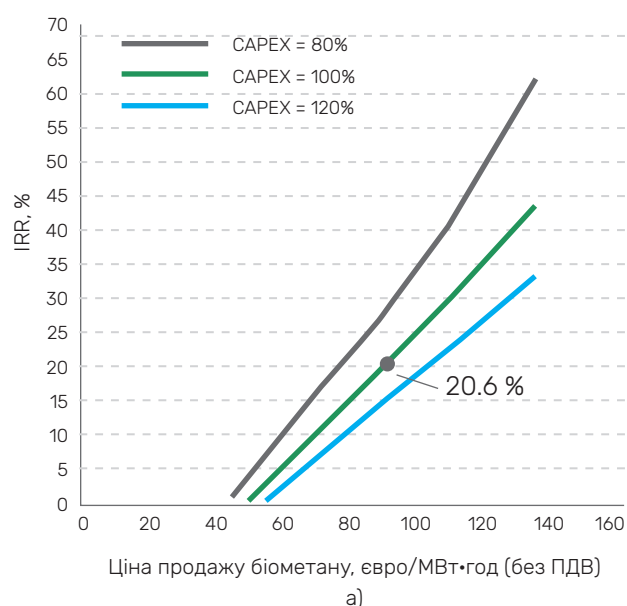


Рис. 8.1 – Залежність величини IRR від ціни на біометан: а) для проєктної концепції 1; б) для проєктної концепції 2

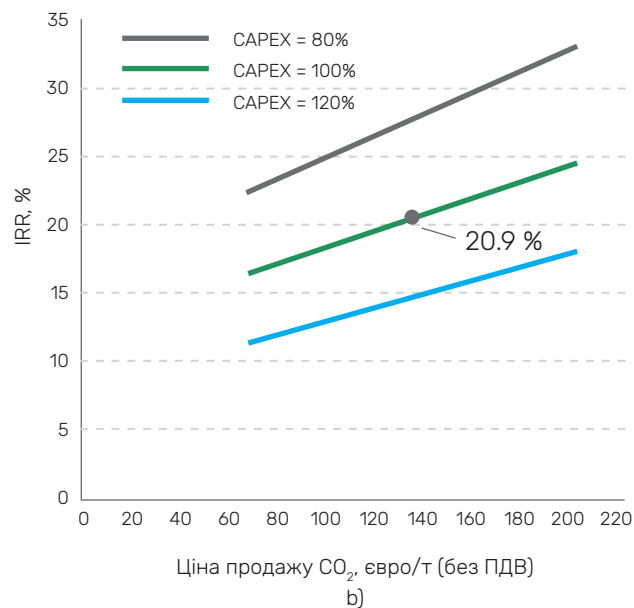
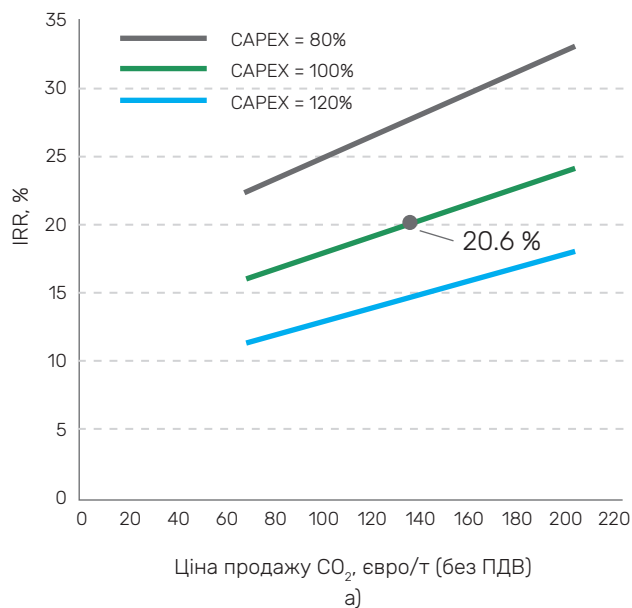


Рис. 8.2 – Залежність величини IRR від ціни на зріджений CO₂:
а) для проектної концепції 1; б) для проектної концепції 2

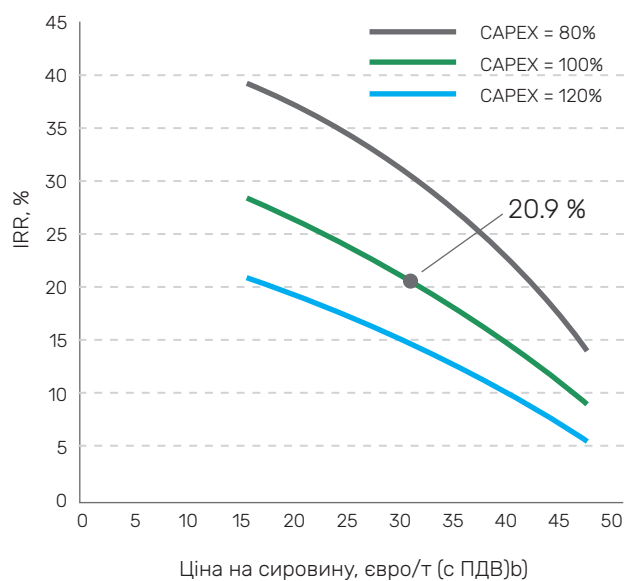
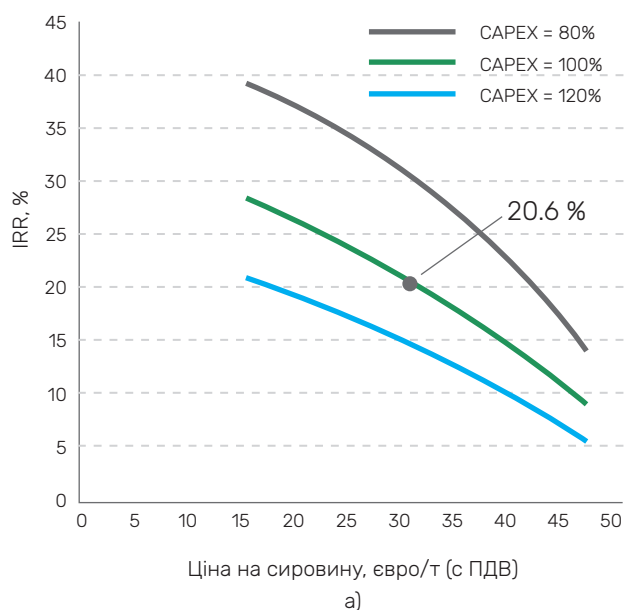


Рис. 8.3 – Залежність величини IRR від вартості сировини:
а) для проектної концепції 1; б) для проектної концепції 2

Проект виробництва біометану з поживних решток, за розглянутих умов та прийнятих припущень, можна вважати інвестиційно привабливим. Разом з тим, він є достатньо чутливим до зміни ціни на біометан, скраплений CO₂ та вартості сировини. Запорукою успішної реалізації подібних проектів може стати гарантування задовільної ціни продажу біометану на довгостроковий період та пошук ринків збуту зрідженої

вуглекислоти з більшою дохідністю. При цьому, корисна утилізація CO₂ за прийнятною ціною є необхідною передумовою отримання достатньої ціни на вироблений біометан та забезпечення прийнятних економічних показників проекту. Зменшення інвестицій в проект також дозволить зробити його більш економічно стійким, втім імовірність істотного (на 15 – 20%) зменшення розміру інвестицій оцінюється як відносно невисока.

Приклади та аналіз існуючих проєктів з виробництва біометану з лігноцелюлозної агросировини

РОЗДІЛ 9

У цьому розділі наведено найбільш відомі приклади використання лігноцелюлозної сировини для виробництва біогазу. Розглянуті проєкти показують значний прогрес, досягнутий протягом останніх 15 років, починаючи з піонерських проєктів компаній HoSt, VERBIO, C.F. Nielsen, BioFuel Technology у таких країнах, як Данія, Німеччина, Нідерланди, США, а останні роки у Франції та Китаї.

Біогазова станція в м. Черноземен, Болгарія

Голландська компанія HoSt експлуатує біогазову установку в Болгарії потужністю 1,5 МВт_{ел.}, де використовується гній ВРХ та окрема система подачі соломи⁹⁰. Це була перша біогазова установка, на яку подається велика кількість соломи. Установка використовує близько 50 тис. тонн гною ВРХ на рік, що зброджується разом з силосом кукурудзи та соломкою.

Біогазова станція у м. Черноземен включає в себе спеціальну систему подачі твердих субстратів, системи подачі рідких субстратів

(насос з подрібнювачем), двох біореакторів об'ємом 2174 м³, одного доброджувача об'ємом 2174 м³, сепаратора дигестату та резервуарів для подальшого його зберігання, будівлі з вузлом контролю обігріву, когенераційної установки потужністю 1,5 МВт_{ел.}

Однією з ключових особливостей станції є її спеціальна система подачі соломи (рис. 9.1). Тюки соломи розміщуються на великому конвеєрі, яким подаються до розривача тюків. На цьому етапі відбувається попереднє подрібнення перед подачею на молоткову дробарку. Подрібнення соломи в молотковій дробарці дозволяє зруйнувати її трубчасту структуру та запобігти флотації. Були проведені випробування з ситами різного розміру, щоб знайти оптимальний розмір частинок для процесу зброджування.

На доповнення до системи подачі оптимізовано також самі реактори для зброджування соломи. Спеціальна технологія з використанням лопатевих міксерів, у поєднанні з пропелерними міксерами, гарантує відсутність утворення плаваючого шару.



Рис. 9.1 – Лінія подачі та попередньої обробки соломи (фото HoSt)



Рис. 9.2 – Установка з брикетування соломи та подачі брикетів

Демонстраційна біогазова установка у Фоулумі, Данія

Ще одним прикладом успішного використання соломи пшениці при виробництві біогазу є пілотний демонстраційний проєкт в м. Фоулум, Данія. Проєкт є спільною розробкою компаній C.F. Nielsen, BioFuel Technology та університету м. Орхус (Данія). Особливістю даного проєкту є демонстрація можливості та переваг використання сумісного зброджування рідкої гноївки свиней та брикетованої соломи пшениці.

Демонстраційну БГУ було встановлено та запущено для відпрацювання технологічних режимів в 2012 р. При біогазовій установці запущено в дію лінію з брикетування соломи (рис. 9.2).

Авторами проєкту накопичено дані про ефективність запропонованої технології, згідно яких робиться висновок про доцільність сумісного зброджування гною з брикетованою соломкою зернових культур. Показано, що брикетування соломи дозволяє знижувати в'язкість зброджуваної маси в реакторі, що, в свою чергу, дозволяє більш повно та рівномірно змішувати уміст біореактора. Автори відзначають, що проблем з перемішуванням умісту реактора та коркоутворенням не виникало навіть при доведенні концентрації сухих речовин до 14%.

Окрім цього, брикетування соломи призводить до збільшення на 35% показника питомого виходу CH_4 ($0,277 \text{ м}^3 \text{CH}_4 / \text{кгСОР}$ або $235 \text{ м}^3 \text{CH}_4 / \text{т}$ соломи), у порівнянні з необробленою соломкою⁹¹. Додавання соломи до гноївки

дозволило також суттєво знизити концентрацію H_2S – з 1900 до 365 ppm.

Споживання енергії при брикетуванні на експериментальному обладнанні склало близько 90 кВт•год/т соломи, хоча відмічається, що у разі брикетування в режимі промислової експлуатації енергозатрати можна скоротити вдвічі. Окремо, витрати на нарізання та подрібнення соломи склали ще близько 40 кВт•год/т соломи, що також можуть бути суттєво знижені при використанні енергоефективного промислового обладнання.

Біометановий завод VERBIO Schwedt, Німеччина

Біометановий завод Verbio^{92, 93, 94} було введено в експлуатацію у 2010 році як перший у світі великомасштабний інноваційний завод для моно-зброджування соломи. Він базується на біометановому заводі у Швеції (Бранденбург). Перший етап проєкту було введено в експлуатацію у 2014 році.

Планувалося розширити завод до 16,5 МВт до 2019 року, виробляючи з приблизно 40 000 тон соломи 140 ГВт•год біометану щорічно для продажу як біопалива. Для цього було інвестовано 25 млн євро.

Робочий об'єм ферментерів становить 8 000 – 10 000 м³. Сировина постачається місцевими фермерами в обмін на вироблене органічне добриво (дигестат), що забезпечує «оплату» за соломку. Солома попередньо обробляється



Рис. 9.3 – Біометанова установка VERBIO Schwedt

механічно та термічно. Біометан закачується в місцеву газову мережу.

Тюки соломи, що використовуються як сировина для станції, збираються в радіусі 80 км, що забезпечує найбільшу економічну та екологічну ефективність. Натомість дигестат повертається фермерам як органічне добриво. Цей місцевий виробничий ланцюг створює робочі місця в сільськогосподарському секторі регіону та забезпечує максимальне зниження викидів CO₂.

Біометановий завод VERBIO Nevada Biorefinery, США

Проект Verbio в м. Невада, штат Айова, з грудня 2021 року виробляє відновлюваний природний газ (ВПГ або біометан) з пожнивних решток кукурудзи у промислових масштабах^{95, 96, 97}.

^{98, 99}. Проект реалізовувався із двох етапів, з введенням в експлуатацію 1-го етапу у 2021 році та другого – у 2022 році. Загальний обсяг інвестицій склав 35 млн доларів США (1-й етап) та 80 млн доларів США (2-й етап). Повна річна виробнича продуктивність по біометану оцінюється в 680 ГВт•год.

В склад станції входять 16 ферментерів ємністю 10 600 м³ кожен. Основною сировиною є тюковане кукурудзиння обсягом 75-100 тис. т/рік. Попередня обробка включає подрібнення та термічну обробку гарячою водою. Вода подається з підвищеною температурою (160–240 °C) та під високим тиском. Прямокутні тюки кукурудзиння, придбані у місцевих фермерів, подрібнюються на біогазовій станції. Відразу після подачі тюків кукурудзиння на склад та перевірки їх вологості, її завантажують на одну з двох конвеєрних ліній



Рис. 9.4 – Біометановий завод VERBIO Nevada Biorefinery



Рис. 9.5 – Біогазова установка на кукурудзинні в окрузі Фую

та пропускають через молоткову дробарку, де крупні частки подрібнюються, фільтруються через сито, додається вода, відбувається змішування та подача суміші до біореакторів.

Завод у Неваді побудовано на 55 акрах землі та має штат працівників, що налічує близько 100 осіб. Через значні ризики, пов'язані з доступністю сировини для анаеробного зброджування, було створено компанію VERBIO Agriculture (VA), LLC (раніше VERBIO Farm Services, LLC). Основним завданням створеної компанії є забезпечення постачання тьюкованого кукурудзиння з територій в радіусі 80-120 км.

Біогазова станція на кукурудзинні в окрузі Фую, провінція Хейлунцзян, Китай

Біогазова станція, розташована на державному господарстві в північному регіоні Китаю (ферма тваринництва Фанжун, округ Фую, місто Ціцяхар, провінція Хейлунцзян), є першою біогазовою когенераційною установкою, на якій як сировина використовується виключно жовте кукурудзиння¹⁰⁰. На станції потужністю 2 МВт_{ел} споживається 30 тис. тонн кукурудзиння. Станцію було побудовано компанією Nanjing General New Energy Power Co. Ltd. із загальною інвестиційною вартістю 55 млн юанів. Проект розпочався в листопаді 2016 року та безперервно працював понад 30 тис. годин у 2021 році.

Спочатку солому подрібнюють до фракції менше 3 см. Потім її закладають у силососховища, де вміст вологи в ній доводиться приблизно до 60%

шляхом додавання води. Ущільнення соломи виконується пошарово, з покриттям плівкою для видалення повітря. Це дозволяє зменшити втрати сухої речовини до 80% (типово), порівняно з відкритим зберіганням. Під час силосування утворюються органічні кислоти, які скорочують необхідний гідралічний час утримання під час зброджування до менш ніж 35 діб.

Кожен ферментер має об'єм близько 4000 м³. Загальна концентрація сухих речовин у ферментерах підтримується в діапазоні від 8 до 10%. Комбіноване змішування з використанням міксерів з довгим валом, занурених міксерів та рециркуляції дигестату покращує гомогенізацію та запобігає утворенню плаваючої кірки. Вихід біогазу досягає 320-350 м³/т сухої речовини при гідралічному часі утримання 35 діб.

На станції щороку виробляється близько 16 ГВт•год електроенергії. Скидне тепло КГУ використовується для нагрівання субстрату та підтримки постійної температури в ферментерах. Проект дозволяє скорочувати викиди вуглекислого газу на 17 000 тонн на рік.

Когенераційна установка на біогазі Дерун (провінція Учан), Китай

Будівництво проекту в Учані розпочалося у серпні 2019 року. В склад проекту входить 12 біореакторів типу CSTR¹⁰¹. У проекті як сировина використовується суха солома з вмістом сухих речовин понад 80%. Сировина складається з суміші кукурудзиння та соломи рису. Проект було реалізовано у два етапи. Загальна



Рис. 9.6 – Когенераційна установка на біогазі Дерун (провінція Учан)

електрична потужність проєкту складає 8 МВт. Плановий обсяг подачі сировини становить 260 тонн на день, що забезпечує щоденне виробництво біогазу 80 000 м³ та щоденне виробництво електроенергії 160 МВт•год.

Найбільша комерційна біометанова станція на соломі, Китай

Дану біометанову станцію було побудовано у Харбіні у 2022 році. На станції використовується 58 000 т кукурудзиння та 58 000 т рисової соломи на рік. Розташована вона на приблизно 13 гектарах землі, половина якої призначено для зберігання сировини. Це найбільша у світі біогазова установка на сьогоднішній день, на якій використовується лише кукурудзиння та рисова солома. Встановлена електрична потужність установки складає 30 МВт.

За даними WABIO, постачальника технології, очікуваний вихід біогазу з кукурудзиння складає до 600 нм³/т, при вмісті метану 65%. З отриманого біометану в подальшому виробляється біо-CNG. За інформацією з відкритих джерел, загальні інвестиції в проєкт склали 43 млн євро.

Агро-енергетичний парк, Данія

Цей енергетичний парк включає данську кооперативну біометанову станцію, що належить понад 100 приватним фермерам, його співзасновником є компанія Stiesdal SkyClean. Основна концепція енергетичного парку Agri Energy передбачає використання біогазової технології Sauter, що дозволяє переробляти на біогаз переважно соломку, а не гній^{104, 105, 106, 107}.



Рис. 9.7 – Харбінський завод з виробництва біометану з соломи

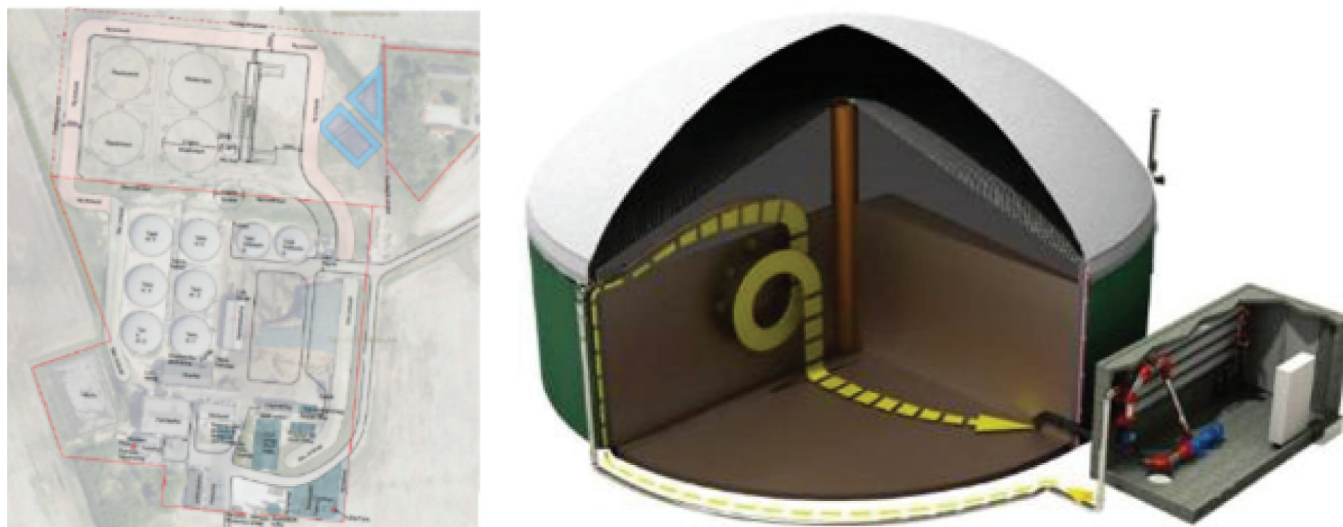


Рис. 9.8 – Енергетичний парк Agri Energy: схема установки (ліворуч) та принцип подачі та змішування сировини в біореакторі і зовнішній теплообмінник (праворуч)

Біогазова установка переробляє 196 тис. т біомаси на рік (**таблиця 9.1**), виробляючи приблизно 13 млн nm^3CH_4 /рік. Біомаса складається переважно із побічних продуктів сільськогосподарського виробництва, таких як солома, ботвина буряків, картопляний жом, підстилковий гній та гноївка. В реакторах використовується нетиповий спосіб перемішування з використанням розпилюючих форсунок, як показано на **рис. 9.8**. Даний спосіб застосовується через високу волокнистість сировини, що ускладнює застосування традиційних міксерів.

Таблиця 9.1 – Сировина, що використовується для зброджування

Сировина	Вміст СР, % _{см}	Ступінь розпаду, %
Солома	85	52
Гній ВРХ	7	46
Гній з глибокою підстилкою	30	48
Картопляний жом	18	70
Трава	30	70
Ботвина буряків	17	83

Збагачення біогазу здійснюється за допомогою амінного скрубера. Отриманий біометан подається в газову систему. Другий етап

проекту включає масштабування установки для переробки 600 000 т біомаси щорічно, що дозволяє виробляти майже 40 млн nm^3CH_4 /рік.

Виробництво біометану інтегровано з технологією піролізу SkyClean від Stiesdal. Результатом є вкрай ефективна утилізація рослинного вуглецю в біомасі, оскільки залишкові волокна від виробництва біогазу переробляються для створення двох додаткових цінних продуктів: «зеленого» піролізного палива та біовугілля для уловлювання та зберігання CO_2 .

Біогазова установка в м. Kværs, Данія

Нова біогазова установка в м. Kværs (**рис. 9.9**), Данія – це великомасштабний об'єкт, побудований компанією Nature Energy, на якому вироблятиметься відновлювальний природний газ (ВПГ або біометан)¹⁰⁸. Будівництво розпочалося у 2020 році, виробництво розпочалося у 2022 році. Установка дозволяє переробляти 800 тис. т біомаси щорічно з очікуваним виробництвом понад 20 млн m^3 ВПГ, що замінюватиме природний газ в данській енергетичній системі.

У цьому проекті використовується комплексна система обробки соломи від Linka Energy та EUROmilling. Система включає установку



Рис. 9.9 – Біогазова установка в м. Kværs: загальний вигляд (ліворуч)
та лінія попередньої обробки соломи LinKa (праворуч)

термічної та механічної обробки соломи, що дозволяє руйнувати її структуру, і згодом використовувати на наступному етапі процесу. Солома подрібнюється в барабанах, в яких ріжуться та відокремлюються волокна соломи, перш ніж вони потраплять у збірний бункер. Барабани працюють на низькій швидкості, що зменшує споживання енергії та знижує ризик займання від іскри. Наступною системою є подрібнювальна установка EUROmilling для обробки подрібненої соломи та яка включає дробарку попередньо подрібнення, молоткову дробарку та передзмішувач.

Біометановий завод Шарпантьє, Франція

Будівництво біометанового заводу Шарпантьє у Франції (рис. 9.10), розташованого в Шайї-ан-Брі, розпочалося у серпні 2020 року, а введення

в експлуатацію газоочисної установки було здійснено у червні 2021 року¹⁰⁹. Проєкт самого біогазового заводу було розроблено французькою компанією «CPL Biogaz», біореактори було зведено французьким інженерним бюро SAS ASTECA, а встановлення всієї лінії подачі сировини та ферментації реалізувалось компанією BioConstruct. Введення в експлуатацію установки зі збагачення біогазу відбулося у 2021 році.

Сировиною, що використовується для виробництва біометану, є переважно сільськогосподарські відходи, включаючи жом цукрових буряків, відходи зернових культур та деякі енергетичні культури, такі як силос жита та силос кукурудзи. Із загальної кількості сировини 17 000 т/рік виробляється близько 180 нм³CH₄/год (1,57 млн нм³CH₄/рік). Вироблений біометан подається в місцеву газову мережу.



Рис. 9.10 – Біометановий завод Шарпантьє

Біометановий завод Alliance Berry Energies Vertes, Франція

Будівельні роботи на біометановій установці офіційно розпочалися восени 2022 року. В проєкті приймають участь 51 місцевих фермерів з Люсе-ле-Маль, Франція. Сировина збирається та постачається з радіусу 12 км від біогазової установки в обсязі 80 000 т/рік^{110, 111}. Основною сировиною є рідкий гній та пожнивні рештки пшениці (весь матеріал, що виходить з решіт комбайна, включаючи лушпиння, полови, бите зерно, дрібну солому та бур'яни). Очікується, що виробництво дигестату становитиме 73 000 т/рік.

Біометан виробляється у обсязі 620 нм³CH₄/год (5,4 млн нм³CH₄/рік) та подається в місцеву газову мережу. Щорічно установка знижує викиди парникових газів на 13 600 т CO₂. Наразі власники проєкту шукають можливості оптимізації виробництва шляхом утилізації CO₂ (культивування мікродводоростей, теплиці, тощо). Окрім ключових статей інвестицій у біометанову установку, витрати включають також 500 000 євро, вкладених у повітроочисну установку, біофільтр та герметизацію, з тим щоб позбутися будь-яких потенційно проблемних запахів під час експлуатації. Загальні інвестиції становлять 22 млн євро.

Виробництво біометану з сільськогосподарських відходів є швидкозростаючим сектором, що обумовлено глобальним переходом на відновлювану енергію, покращенням управління відходами, а також пом'якшенням наслідків зміни клімату. Інформація щодо перелічених вище прикладів проєктів зведена в **таблицю 9.2**.

Наразі акцент зміщено на використання сільськогосподарських відходів (соломи пшениці та кукурудзиння, лушпиння, овочевих відходів),

а не спеціалізованих енергетичних культур, які можуть конкурувати з виробництвом продуктів харчування. Це відповідає критеріям сталого розвитку та принципам циркулярної економіки.

Сільськогосподарські відходи, особливо лігноцелюлозні матеріали (такі як солома), як відомо, важко розкладаються. Існує тенденція до поглиблення досліджень та впровадження методів попередньої обробки (фізичних, хімічних, біологічних або комбінованих) для розщеплення цих складних матеріалів, покращення гідролізу та збільшення виходу біометану. Найбільш використовуваним підходом є поєднання механічної та термічної обробки.

Піонерські проєкти було реалізовано в Німеччині та США з використанням технологічного рішення VERBIO.

Данія є провідною країною у великих кооперативних проєктах з виробництва біометану на основі сільськогосподарських відходів. Хоча великі централізовані заводи є більш вигідними за рахунок масштабу, існує також потреба будівництва менших біогазових станцій рівня окремих ферм або громад, для управління місцевими відходами та забезпечення енергією самих ферм або локальних мереж. Такий децентралізований підхід забезпечує гнучкість та знижує витрати на транспортування сировини. Він розроблений у Франції, де малі та середні проєкти виробляють біометан із суміші відходів тваринництва та рослинних решток.

Маючи великі сільськогосподарські угіддя та поголів'я худоби, Китай має величезний потенціал для виробництва біогазу на основі сільськогосподарських відходів. Поточні проєкти варіюються від побутових біореакторів до великих промислових заводів у північній частині країни для переробки 100% кукурудзиння.



Рис. 9.11 – Біометановий завод Alliance Berry Energies Vertes: схема установки (ліворуч), загальний вигляд (праворуч)

Таблиця 9.2 – Додаткова інформація щодо наведених прикладів проєктів

Назва об'єкту/проєкту	Сировина, т/рік	Тип сировини	Обробка сировини	Виробництво CH ₄ , млн м ³	Старт проєкту	Ціна, млн EUR	Країна
Chernozemen	50 000	Гній ВРХ, силос кукурудзи, солома	Молоткова дробарка	3,8*	н.д	н.д	Болгарія
Foulum	17 000 (8,5% солома)	Солома, гній свиней	Брикетування	>1,7 (біогаз)	2012	н.д	Данія
VERBIO	40 000	Солома	Механічне подрібнення	14	2014	25	Німеччина
VERBIO	75 000 – 100 000	Кукурудзиння	Подрібнення та термічна обробка гарячою водою	68	2021	115	США
Fuyu county	30 000	Кукурудзиння	Подрібнення (менше 3 см) та силосування	~ 4,6*	2016	55 млн юань (~ 7 МЄ)	Китай
Harbin 1	95 000	Кукурудзиння та рисова солома	Ферментація (гідроліз) та перемішування	29	2019	н.д.	Китай
Harbin 2	116 000	Кукурудзиння та рисова солома	Ферментація та перемішування	45	2022	43	Китай
Agri biogenic energy park	196 000	Гноївка, солома, підстиловий гній, трава, картопляний жом, листя	Біогазова технологія Sauter	13	2016	н.д.	Данія
Kværs	800 000	Гній та солома	Термічна та механічне подрібнення соломи	20	2022	н.д.	Данія
Charpentier	17 000	Жом, пожнивні рештки зернових та енергетичні культури	Змішувач, насос, включаючи подрібнювач	1,6	2021	н.д	Франція
Alliance Berry	80 000	Гній + пожнивні рештки пшениці	Стандартна обробка	5,4	2022	22	Франція

Примітки: * Розраховано на основі коефіцієнта корисної дії електроенергії ТЕЦ 0,35.

Оцінка потенціалу виробництва біометану з пожнивних решток в Україні

РОЗДІЛ 10

Методологія

Оцінка потенціалу утворення пожнивних решток базується на даних ДССУ щодо виробництва основних сільськогосподарських культур на підприємствах у 2021 році. Виробництво сільськогосподарських культур у господарствах населення не враховувалося.

Утворення біомаси пожнивних решток пов'язано з виробництвом сільськогосподарських культур за допомогою відповідних коефіцієнтів, наведених у **табл. 10.1**. Теоретичний вихід пожнивних решток та технічно доступні частини були використані з ^{112, 113}, а потенціал виходу метану – з ^{114, 115, 116}.

Вихід пожнивних решток показує питому теоретичну масу рослини, яка утворюється під

час збору врожаю на одиницю маси цільового продукту (зерна, коренеплоди). Технічний потенціал збору враховує лише ту частину рослини, яку можна зібрати традиційними технічними засобами збору. Решта незібраної маси рослини фактично залишається в полі та заорюється. Оцінка потенціалу використання пожнивних решток для виробництва біогазу враховує лише частину технічно доступної біомаси, як наведено в **табл. 10.1**.

Цей підхід є консервативним і враховує потенційне альтернативне споживання пожнивних решток (як підстилковий матеріал для тваринницьких ферм, як субстрат для вирощування грибів, як будівельний або промисловий матеріал, як тверде відновлюване паливо тощо) або їх безпосереднє внесення на поля для поповнення балансу гумусу.

Таблиця 10.1 – Параметри, використані для пожнивних залишків

Тип сировини	Теоретичний вихід пожнивних решток, тон сирової маси на тону товарної маси культури	Технічно доступний для збору вихід пожнивних решток, % теоретичного виходу	Частка, що враховано для виробництва біогазу, % від технічно доступного для збору виходу пожнивних решток	Потенціал виходу метану, $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{т сирової маси}$
Солома пшениці	1	60	33	230
Солома жита	1	60	33	230
Солома ячменю	0.8	60	33	230
Кукурудзиння	1.3	70	43	140
Стебла та кошики соняшнику	1.9	67	40	53
Солома сої	1	70	43	191
Солома ріпаку	2	70	43	135
Ботвина цукрових буряків	0.45	90	100	38

Однак, зрештою вся маса зібраних поживних решток може бути використана для виробництва біогазу без будь-якого суттєвого впливу на вирощування сільськогосподарських культур. Відомо, що органічна речовина перетворюється в процесі анаеробного зброджування, що призводить до виділення біогазу, що складається переважно з метану та вуглекислого газу. Отже, майже вся маса поживних речовин та приблизно половина органічного вуглецю в сировині міститься в дигестаті та, як правило, повертається на поля в перетворених формах, готових до використання рослинами. Використання такого підходу забезпечить ще вищий потенціал виробництва біометану з поживних решток – до 12,9 млрд м³ CH₄ на рік.

Оцінений потенціал біометану був додатково помножений на прогнозовані коефіцієнти росту до 2050 року для кожної розглянутої культури. Коефіцієнт росту 1,2 застосовувався для пшениці, ячменю та жита, 1,25 – для кукурудзи та 1,0 – для решти культур.

Оцінка обсягів вирощування сільськогосподарських культур у районах, позначених Державним комітетом статистики України (ДКСУ) як конфіденційні, була

проведена на основі підходу, за яким від відомого загального обсягу товарних культур у всьому регіоні (області) віднімали суму відомого обсягу товарних культур у районах, а решту перерозподіляли між рештою районів пропорційно до посівної площі в районах.

Потенціал біометану

Національний рівень

Оцінений потенціал біометану з поживних решток становить 5,2 млрд нм³CH₄ на рік. Значна частина потенціалу пов'язана з кукурудзинням (48,0%) та соломом пшениці (27,3%) (рис. 10.1).

Регіональний рівень

На регіональному рівні потенціал біометану з рослинних залишків у кожній області становить від 10 до 447 млн нм³CH₄/рік (табл. 10.2), і найбільш сконцентрований у центральній та північній частинах України, а найменш – у західній частині України (рис. 10.2).

Районний рівень

Розподіл потенціалу біометану з поживних решток по районах України показано на рис. 10.3.

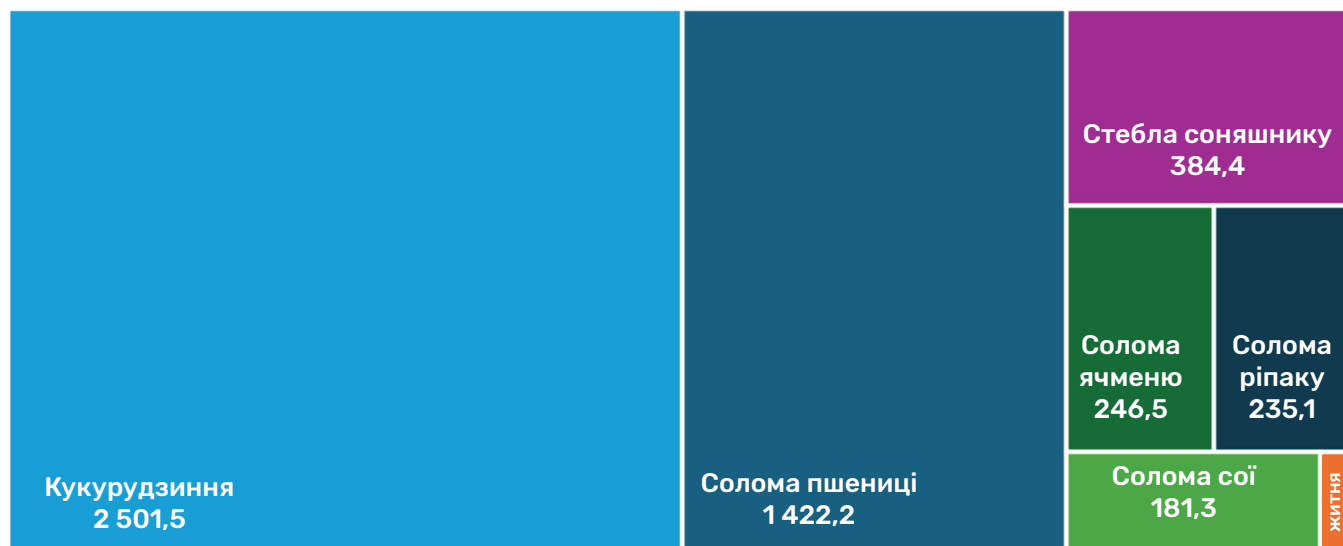


Рис. 10.1 – Структура потенціалу виробництва біометану з поживних решток в Україні (млн нм³CH₄/рік)

Таблиця 10.2 – Потенціал виробництва біометану з пожнивних решток в регіонах України

Область України	Потенціал біометану, млн $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{рік}$		
	Солома пшениці	Кукурудзиння	Пожнивні рештки, всього
ВСЬОГО	1 422,2	2 501,5	5 214,8
АР Крим	н.д.	н.д.	н.д.
Вінницька обл.	81,8	261,6	447,1
Волинська обл.	26,1	33,1	96,7
Дніпропетровська обл.	116,9	55,1	241,8
Донецька обл.	72,8	5,1	102,8
Житомирська обл.	35,6	146,1	232,4
Закарпатська обл.	0,7	7,6	10,4
Запорізька обл.	111,2	16,4	187,3
Івано-Франківська обл.	7,3	35,6	60,7
Київська обл.	50,2	204,6	320,2
Кіровоградська обл.	85,9	136,6	291,0
Луганська обл.	51,7	6,8	80,5
Львівська обл.	26,8	48,9	132,8
Миколаївська обл.	96,7	22,4	188,0
Одеська обл.	108,8	37,8	240,5
Полтавська обл.	54,8	256,8	377,6
Рівненська обл.	18,0	58,4	113,5
Сумська обл.	45,6	204,4	289,3
Тернопільська обл.	46,1	111,4	227,8
Харківська обл.	135,2	71,1	259,6
Херсонська обл.	77,8	27,6	172,6
Хмельницька обл.	64,2	202,0	369,5
Черкаська обл.	54,9	225,2	331,4
Чернівецька обл.	6,4	11,0	27,5
Чернігівська обл.	47,0	315,9	414,0

Примітки: н.д – немає даних

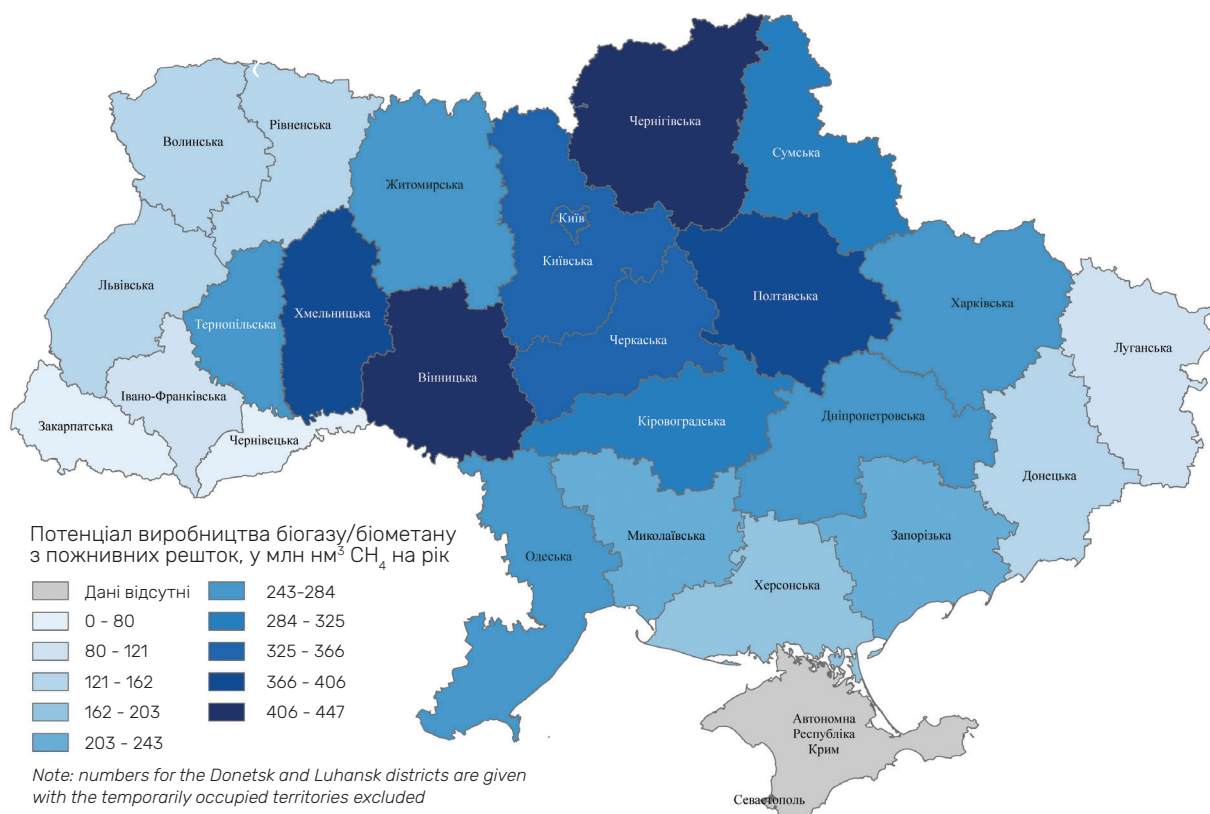


Рис. 10.2 – Потенціал виробництва біогазу/біометану з поживних решток, у млн $\text{nm}^3 \text{CH}_4$ на рік (розподіл по областях)

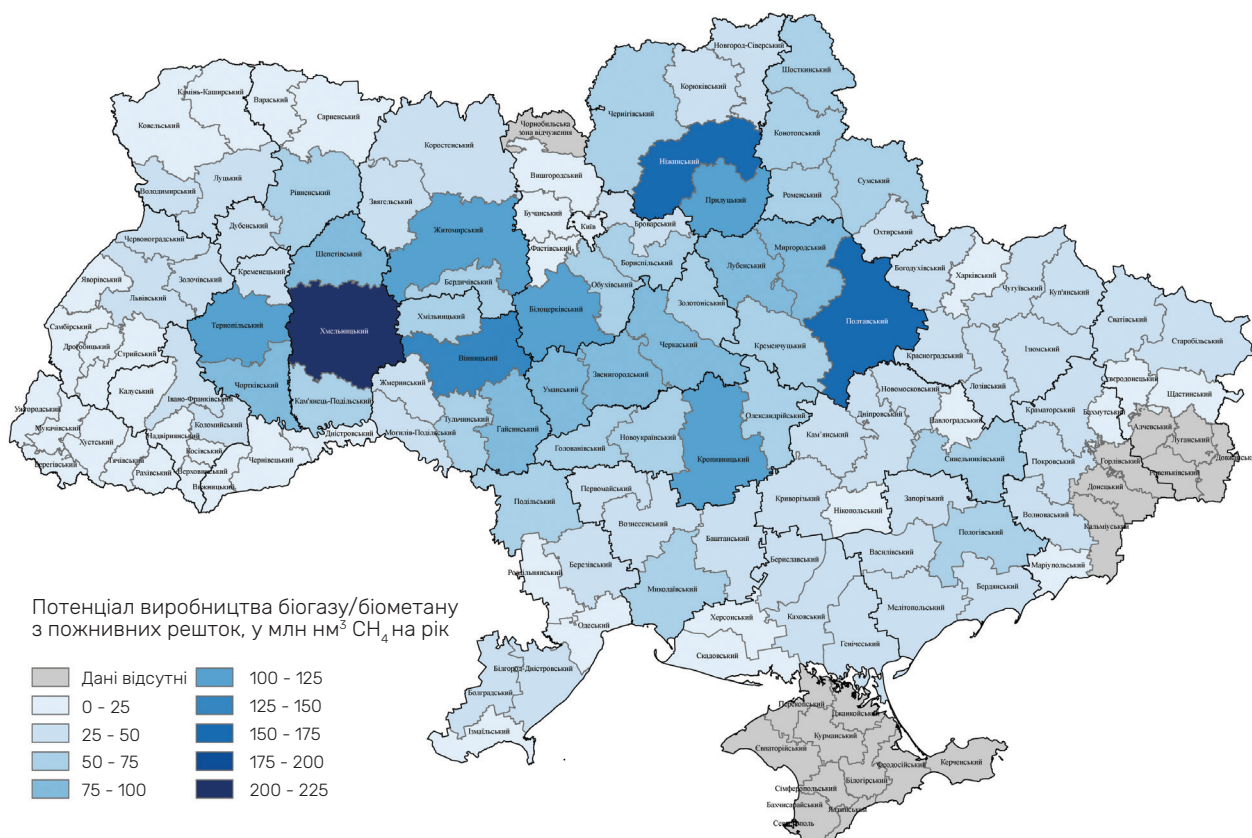


Рис. 10.3 – Потенціал виробництва біогазу/біометану з поживних решток, у млн $\text{nm}^3 \text{CH}_4$ на рік (розподіл по районам)

Висновки та рекомендації

Пожнивні рештки разом із гноєм тварин є найбільшими джерелами сировини для біогазу для всіх регіонів світу, особливо в країнах, що розвиваються, де агросектор часто відіграє провідну роль в економіці. В країнах Європи внесок поживних решток в загальне виробництво біогазу і біометану в 2023 році склав близько 30%, і є найбільшим серед інших видів сировини. За прогнозом Європейської біогазової асоціації, потенціал виробництва енергії біогазу з аграрних решток складатиме сумарно 20%, і є другим після потенціалу біогазу з покривних/проміжних культур.

Лігноцелюлозні типи поживних решток можуть стати вагомим джерелом сировини для виробництва біометану і в Україні, з потенціалом 5,2 млн nm^3CH_4 /рік, левова частина якого відноситься до соломи пшениці та кукурудзиння (близько 75%). Таку сировину можна отримати практично в будь-якому регіоні України, хоча концентрація потенціалу є більшою в центральних та північних регіонах.

Існуючі технології та обладнання для заготівлі поживних решток дозволяють технічно зібрати цю біомасу з поля. Разом з тим, останнім часом в Україні переважно збирають соломку пшениці, рідше – соломку сої та ріпаку, а також кукурудзиння. Особливістю заготівлі кукурудзиння як сировини для біогазового заводу є відносно висока її вологість та непрогнозованість, залежно від погодних умов при збиранні в осінній період.

Серед основних видів поживних решток, для виробництва біогазу потенційно найбільш доступною є біомаса кукурудзиння, а також соломи сої, соломи ріпаку та стебел соняшнику. Солома пшениці, через досить високий конкурентний попит в цілому ряді інших сфер, може бути обмеженим ресурсом на рівні окремих господарств або районів.

Головними особливостями поживних решток як сировини для виробництва біогазу є високий вміст сухої речовини, не оптимальне для анаеробного зброджування співвідношення C:N, порівняно високий вміст лігніну та лігноцелюлозних комплексів, низька змочуваність та низька об'ємна вага в неущільненому стані.

Існує цілий ряд фізичних, хімічних, біологічних та комбінованих методів попередньої обробки лігноцелюлозної сировини, як то солома чи кукурудзиння. Усі методи дозволяють в різній мірі підвищити біодоступність целюлози та підвищувати питомий вихід метану. Деякі методи дозволяють також розкладати лігнін, однак можуть призводити при цьому до утворення речовини інгібіторів процесу анаеробного зброджування, наприклад, фурфуролу. Більшість методів дозволяють отримати більше енергії в додатково виробленому біометані, ніж споживається у процесі їх реалізації.

Комерційно доступні технології та обладнання для попередньої обробки лігноцелюлозних видів агросировини представлені, переважно, механічними дробарками молоткового або ножового типу, екструдерами, установками кавітаційної або паро-вибухової обробки. Одним з комерційно доступних рішень для підготовки соломи для зброджування є також використання ліній гранулювання з виробництва пелет ринкової якості. Є також приклади спеціалізованого виробництва енергетичних пелет для біогазу з підвищеним виходом метану.

Після відповідної попередньої обробки, поживні рештки можна використовувати як сировину для виробництва біогазу практично в будь-яких існуючих конфігураціях біогазових установок. Найбільш поширеним рішенням для переробки агросировини та відходів, зокрема

і поживних решток, є технологічні схеми на основі біореакторів змішувачів з квазіпроточним режимом роботи (типу CSTR). Застосування інших типів анаеробних біореакторів є також можливим, однак досі не є поширеним рішенням, і потребуватиме відповідного обґрунтування.

Використання поживних решток для виробництва біогазу та біометану, за умови повернення дигестату на поля, звідки таку біомасу було зібрано, є обґрунтованим і виправданим рішенням, як з агрономічної, так і з екологічної та енергетичної точок зору. Такий підхід не призводитиме до виснаження ґрунтів та збільшення викидів парникових газів в атмосферу.

Витрати енергії дизельного палива на заготівлю і логістику поживних решток до біогазової станції, враховуючи також витрати на вирощування, заготівлю та операції з логістики силосу кукурудзи, що використовується для забезпечення власних потреб біометанового комплексу в енергії, складають всього 3,3–4,9% енергії виробленого біометану. При споживанні електричної енергії з мережі частка витрат енергії на виробництво біометану може зрости до 25%.

Економічний аналіз показав, що виробництво біометану з поживних решток, за умови використання гноівки як додаткової сировини (5,2 тонни гною з вмістом СР 4% на 1 тонну суміші соломи та кукурудзиння), за умови, що власні потреби комплексу в енергії забезпечуються за рахунок біогазу з силосу

кукурудзи, а також за умови корисної утилізації CO_2 від збагачення біогазу до біометану, може бути рентабельним з IRR на рівні 21%. Разом з тим, такий проєкт буде досить чутливим до зміни ціни на біометан та вартості сировини.

Показано також, що виробництво біометану з гранульованої соломи та кукурудзиння, за умови, що лінія гранулювання є частиною біометанового проєкту як блок попередньої обробки, за рентабельністю є співмірним з виробництвом біометану з соломи та кукурудзиння, оброблених в біоекструдері.

Використання поживних решток для виробництва біогазу набуває поширення в світі. Біогазові та біометанові проєкти будуються як європейських країнах, так і в країнах Азії, зокрема Китаю. Відомо також про проєкт виробництва біометану з кукурудзиння в США. Солома та кукурудзиння використовуються як сировина для виробництва біогазу та біометану в проєктах потужністю від 1 до більше 68 млн m^3CH_4 на рік.

Резюмуючи, можна сказати, що поживні рештки доцільно розглядати як сировину для виробництва біометану в Україні, за умови реалізації його на ринку відновлюваних біопалив в європейських країнах. Стратегією підвищення економічної стійкості проєкту може бути гарантування прийнятної ціни на вироблений біометан на рівні не нижче 90 євро/МВт та пошуку ринків збуту або споживання CO_2 від збагачення біогазу з ціною такої вуглекислоти на рівні 110 євро/т, без ПДВ.

Перелік використаних джерел:

1. https://commission.europa.eu/topics/energy/repowerEU_en
2. REPowerEU Plan, 2022. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF
3. Directive (EU) 2018/2001. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20240716>
4. Application of straw and crop residues as organic fertilizers to improve the humus state of soils: (recommendations) / O.A. Demidov [et al.]; National Acad. of Agrarian Sciences of Ukraine, National Scientific Center «Institute of Soil Science and Agrochemistry named after O.N. Sokolovsky» [et al.]. – Kh.: Miskdruk, 2012. – 38 p. (in Ukrainian)
5. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3769-20#Text>
6. Outlook for Biogas and Biomethane. A global geospatial assessment. IEA, 2025. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane>
7. EBA 2024. “European Biogas Association Statistical Report 2024”. Brussels, Belgium, December 2024.
8. Gas for Climate, Biomethane production potentials in the EU, 2022. https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2023/12/Guidehouse_GfC_report_design_final_v3.pdf
9. Biogases towards 2040 and beyond. Biogases towards 2040 and beyond. Guidehouse, EBA, 2024 April 2024. <https://www.europeanbiogas.eu/biogases-towards-2040-and-beyond/>
10. Biogases towards 2040 and beyond. Guidehouse, EBA, 2024. <https://guidehouse.com/-/media/new-library/services/sustainability/documents/2024/biogases-towards-2040-and-beyond.ashx>
11. https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/04/Maize-residues-to-Energy_ukr-web.pdf
12. Richey CB, Liljedahl JB, Lechtenberg VL. Corn stover harvest for energy production. Transactions of the ASAE 1982;25:834–839,844.
13. https://www.researchgate.net/publication/43267414_Comparison_of_wet_and_dry_corn_stover_harvest_and_storage
14. https://www.researchgate.net/publication/43267414_Comparison_of_wet_and_dry_corn_stover_harvest_and_storage
15. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/10/uabio-position-paper-25-ua.pdf>
16. https://www.researchgate.net/publication/303317549_Comparative_pulping_of_sunflower_stalks
17. <https://www.feedipedia.org/node/143>
18. <https://sunfloromash.com/ua/news/zbiranna-soi-stroki-sposobi-pristosuvanna>
19. https://tetra-agro.com.ua/news/vse_pro_viroshhuvannya_ripaku_abo_yak_pidvishhiti_iogo_vrozainist?
20. Zhao, X., Zhang, L., & Liu, D. (2008). Biomass recalcitrance. Part I: The chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(4), 465–482.
21. Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 100(1), 10–18.
22. Carrere, H., Antonopoulou, G., Affes, R., Passos, F., Battimelli, A., Lyberatos, G., & Ferrer, I. (2016). Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: From lab-scale research to full-scale application. *Bioresource Technology*, 199, 386–397.
23. Stark, RE and Tian, S (2006) The cutin biopolymer matrix. In: Riederer, M & Müller, C (2006) *Biology of the Plant Cuticle*. Blackwell Publishing
24. <https://lifelib.info/botany/water/104.html>
25. Ballesteros, I., Negro, M. J., Oliva, J. M., Cabañas, A., Manzanares, P., & Ballesteros, M. (2006). Ethanol production from steam-explosion pretreated wheat straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 129–132, 496–508.
26. Wan, C., & Li, Y. (2012). Fungal pretreatment of lignocellulosic biomass. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1447–1457.
27. Gievers, F., Walz, M., Loewe, K., & Loewen, A. (2024). Pelletized Straw for Biogas Production—Substrate Characterization and Methane Formation Potential. *Processes*, 12(8), 1549.
28. Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., & Astals, S. (2011). Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology*, 31(2), 99–111
29. Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., & Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques – A review. *Bioresource Technology*, 95(1), 1–10.
30. Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928–7940.
31. Xi, B., et al. (2021). Enhanced Anaerobic Biogas Production From Wheat Straw by Co-Digestion With High-Protein Residues. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 623594.
32. Yuan, H., Zhu, N., Song, F., Wang, H., & Lu, X. (2023). Co-digestion of corn stover and pig manure:

Improvement of methane production and microbial mechanism. *Bioresource Technology*, 368, 128372.

33. Shan, L., Sun, X., Wang, K., & Zhang, C. (2022). Enhancing methane production from sunflower stalks by pretreatment and co-digestion: Performance and microbial analysis. *Renewable Energy*, 187, 1008–1018.

34. Krafft, M., Meurer, R., & Hahn, J. (2021). Biogas production potential of oilseed rape straw: Influence of substrate characteristics and process parameters. *Renewable Energy*, 178, 973–982.

35. Chen, J., Zhang, L., Li, W., & Wang, X. (2022). Biogas production potential of soybean straw and its co-digestion with dairy manure. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101160.

36. Sun, Y., & Cheng, J. J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials: A review. *Bioresource Technology*, 83(1), 1–11

37. Bobleter, O. (1994). Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. *Progress in Polymer Science*, 19(5), 797–841.

38. Qiao, W., Takayanagi, K., Oshiki, M., & Yamamoto, T. (2011). Improvement of methane production from wheat straw by NaOH pretreatment and solid–liquid separation. *Bioresource Technology*, 102(3), 3141–3146.

39. Zhang, X., Li, X., & Liu, J. (2023). Characterization of wheat straw and its structural transformation during alkaline pretreatment. *Industrial Crops and Products*, 200, 116823.

40. Li, R., Liu, G., Zhao, M., & Zhou, C. (2021). Evaluation of methane production from leguminous and cereal crop residues. *Renewable Energy*, 176, 734–743.

41. Luo, S., Feng, Y., Li, C., & Xu, F. (2021). Effect of structural carbohydrates on methane production from sunflower stalks. *Bioresource Technology*, 336, 125279.

42. Senechal, N. P., De Martino, S., & Zabolina, O. A. (2009). Cell wall composition of rapeseed straw and its effect on bioenergy production. *BioEnergy Research*, 2(3), 139–149.

43. Carrere, H., Antonopoulou, G., Affes, R., Passos, F., Battimelli, A., Lyberatos, G., & Ferrer, I. (2016). Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 199, 386–397.

44. Experimental study of biogas yield indicators in the process of periodic methane fermentation of straw / P. P. Kucheruk, Yu. B. Matveev, V. O. Rudska // *Renewable Energy*. – 2018. – No. 2. – P. 88–97. – Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2018_2_12 (in Ukrainian)

45. FAO. (2022). Technical guide on crop residue management. Retrieved from <https://www.fao.org>

46. FAO. (2022). Technical profile of maize residues for bioenergy applications. Retrieved from <https://www.fao.org>

47. Geletukha G.G., Dragnev S.V., Zhelezna T.A., Bashtoviy A.I. Analysis of the production of pellets and briquettes from corn by-products. Analytical note of the UAB No. 23 – Bioenergy Association of Ukraine, 2020. –

42 p. (in Ukrainian) <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-23-ua.pdf>

48. FAO. (2022). Sunflower residue management and energy use. Retrieved from <https://www.fao.org>

49. Li, R., Liu, G., Zhao, M., & Zhou, C. (2021). Evaluation of methane production from leguminous and cereal crop residues: Influence of chemical composition and C:N ratio. *Renewable Energy*, 176, 734–743.

50. Xiaowei Peng, Ivo Achu Nges, Jing Liu, Improving methane production from wheat straw by digestate liquor recirculation in continuous stirred tank processes, *Renewable Energy*, Volume 85, 2016, Pages 12–18, ISSN 0960-1481,

51. Fernández-Rodríguez MJ, Mushtaq M, Tian L, et al. Evaluation and modelling of methane production from corn stover pretreated with various physicochemical techniques. *Waste Management & Research*. 2021;40(6):698–705. doi:10.1177/0734242X211038185

52. Grabovskiy, M., Kucheruk, P., Pavlichenko, K. et al. Influence of macronutrients and micronutrients on maize hybrids for biogas production. *Environ Sci Pollut Res* 30, 70022–70038 (2023).

53. Marinela Zhurka, Apostolos Spyridonidis, Ioanna A. Vasiliadou and Katerina Stamatelatos Biogas Production from Sunflower Head and Stalk Residues: Effect of Alkaline Pretreatment / *Molecules* 2020 Jan; 25(1): 164.

54. Szwarc, D.; Głowacka, K. Increasing the Biogas Potential of Rapeseed Straw Using Pulsed Electric Field Pre-Treatment. *Energies* 2021, 14, 8307.

55. Jiading Xiong, Muhammad Hassan, Wenxin Wang, Weimin Ding. Methane enhancement by the co-digestion of soybean straw and farm wastewater under different thermo-chemical pretreatments, *Renewable Energy*, Volume 145, 2020, Pages 116–123, ISSN 0960-1481,

56. Biomass energy production in Ukraine: technologies, development, prospects / Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine; edited by G. Geletukha. — Kyiv: Academperiodika, 2022. – 373 p.

57. Shah, A., Darr. MJ 2014. Corn stover storage losses. Iowa State University Extension and Outreach, PM 3051E.

58. Booklet “Supply of solid biofuels for medium-power boiler plants”. / Project “Bioenergy for Business” (B 4 B), 2016. – 23 p.

59. https://uabio.org/wp-content/uploads/2021/02/Straw-to-Energy_AgroBioHeat_Ukrainian.pdf

60. Vertical Mass and Moisture Distribution in Standing Corn Stalks / C. Igathinathane, Alvin R. Womac, Shahab Sokhansanj, Lester O. Pordesimo // 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting (Ottawa, Ontario, Canada, August 1–4, 2004). – 20 p.

61. Wozniak, A., Kuligowski, K., Swierczek, L., Cenian, A. Review of Lignocellulosic Biomass Pretreatment Using Physical, Thermal and Chemical Methods for Higher Yields in Bioethanol Production. *Sustainability* 2025, 17, 287.

62. Lucy F. R. MONTGOMERY, Günther BOCHMANN. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production / IEA Bioenergy, 2014
63. Schell, D., Harwood, C., 1994. Milling of lignocellulosic biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 45–46, 159–168.
64. Y. Sun, J. Cheng, *Bioresour. Technol.* 2002, 83, 1.
65. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-020-00740-y>
66. Chen, J., Zhang, L., Li, W., & Wang, X. (2022). Optimization of straw disintegration for anaerobic digestion. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101160.
67. Kratky, L., Jirout, T., 2011. Biomass size reduction machines for enhancing biogas production. *Chemical Engineering & Technology* 34, 391–399.
68. Garrote, G., Dominguez, H., Parajo, J.C., 1999. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz als Rohund Werkstoff* 57, 191–202.
69. Bochmann, G., Drosig, B., Ortner, M., Schönlieb, M., Andres-Lainez, S., Kirchmayr, R., Braun, R., 2010. Influence of thermal pre-treatment to increase digestibility of brewers' spent grains, in: *Proceedings of the International Water Association, 12th World Congress on Anaerobic Digestion*. Presented at the 12th World Congress on Anaerobic Digestion, Guadalajara, Mexico.
70. Zhang, Q., Tang, L., Zhang, J., Mao, Z., Jiang, L., 2011. Optimization of thermal-dilute sulfuric acid pretreatment for enhancement of methane production from cassava residues. *Bioresource Technology* 102, 3958–3965.
71. Ardic, I., Taner, F. Effects of Thermal, Chemical and Thermochemical Pretreatments to Increase Biogas Production Yield of Chicken Manure // *Fresenius Environmental Bulletin*. – 2005. – vol.14, no 5. – p. 373.
72. Feijoo, G., Soto, M., Mendez, R., Lema, J. Sodium Inhibition in the Anaerobic Digestion Process: Antagonism and Adaptation Phenomena // *Enzyme and Microbial Technology*. – 1995. – 17. – p. 180.
73. Mazzanti, G.; Demichelis, F.; Fino, D.; Tommasi, T. A Closed-Loop Valorization of the Waste Biomass Through Two-Stage Anaerobic Digestion and Digestate Exploitation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2025, 207, 114938.
74. Dias, B.; Lopes, M.; Fernandes, H.; Marques, S.; Gírio, F.; Belo, I. Biomass and Microbial Lipids Production by *Yarrowia Lipolytica* W29 from Eucalyptus Bark Hydrolysate. *Renew. Energy* 2024, 224, 120173.
75. Pérez-Pérez, A.; Del-Río, P.G.; Lobato-Rodríguez, Á.; Garrote, G.; Gullón, B. Synergetic Effect of Hydrothermal and Deep Eutectic Solvents (DES) Pretreatments on Robinia Wood Fractionation for the Manufacture of Bioethanol and Cellulose Nanocrystals. *Ind. Crops Prod.* 2023, 203, 117157.
76. Barr, D.P., Aust, S.D., 1994. Pollutant degradation by white rot fungi, in: Ware, G.W. (Ed.), *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. Springer New York, pp. 49–72.
77. Zhou, Y., Wang, X., & Liu, J. (2021). Effect of pretreatment methods on straw digestibility and methane yield. *Waste Management*, 122, 156–164
78. Kumar P., Barrett D.M., Delwiche M.J., Stroeve P. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production// *Industrial & Engineering Chemistry Research* is published by the American Chemical Society, Washington, DC 20036, March, 2009
79. Vivekanand V. et al. Improvement of lignocellulosic biomass in planta: a review of feedstocks, biomass recalcitrance and strategic manipulation of ideal plant as designed for ethanol production and processability. *Biom. Bioen.*; 2013;58. p. 390–405.
80. Bauer A. et al. Analysis of methane potentials of steam-exploded wheat straw and estimation of energy yields of combined ethanol and methane production. *Journ. Biotech.*; 2009;142. p. 50–55.
81. Karthikeyan, P.K.; Bandulasena, H.C.H.; Radu, T. A Comparative Analysis of Pre-Treatment Technologies for Enhanced Biogas Production from Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Waste. *Ind. Crops Prod.* 2024, 215, 118591.
82. Paul, S.K.; Das, A.J. A Novel Experimental Approach for the Catalytic Conversion of Lignocellulosic Bambusa Bambos to Bioethanol. *Curr. Res. Microb. Sci.* 2024, 7, 100267
83. Lehmann, 2011. Bio-extrusion, Lehmann Maschinenbau GmbH [WWW Document]. URL <http://www.lehmann-maschinenbau.de/>
84. Algirdas Raila et al. Evaluation Of Straw Pellet Production Process.// Aleksandras Stulginskis University, Lithuania. http://tf.ltu.lv/conference/proceedings2012/Papers/050_Raila_A.pdf
85. Geletukha H.G., Zheleznyaya T.A., Triboy A.V. PROSPECTS OF USING AGRICULTURAL WASTE FOR ENERGY PRODUCTION IN UKRAINE. PART 1 (in Russian)
86. Geletukha H.G., Zheleznyaya T.A., Triboy A.V. PROSPECTS OF USING AGRICULTURAL WASTE FOR ENERGY PRODUCTION IN UKRAINE PART (in Russian)
87. Sun Q, Gu X-j, Wang Y-f, Gao H-s, Wang X-j, Chen X-l and Sun S-m (2025) Impact of straw return on greenhouse gas emissions from maize fields in China: meta-analysis. *Front. Plant Sci.* 16:1493357. doi: 10.3389/fpls.2025.1493357
88. Sánchez-Rodríguez, A. R., van Groenigen, J. W., & García-Torres, L. (2021). Environmental consequences of digestate application: N₂O emissions and nutrient leaching. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 319, 107528. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107528>
89. Meers, E., Velghe, F., & Ronsse, F. (2022). Greenhouse gas emissions from digestate-treated soils: A review of management strategies. *Journal of Environmental Management*, 314, 115086. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115086>
90. <https://saf.org.ua>

91. Henrik B. Møller, Mogens Møller Hansen. Briquettes of straw and dry grass double biogas production / FiB no. 47, March 2014. – p. 3-5.
92. <https://www.verbio.de/en/group/company-structure/verbio-schwedt/>
93. https://www.gaz-mobilite.fr/docs/upload/doc_2015055010215.pdf
94. https://www.verbio.de/fileadmin/user_upload/verbio/presse/artikel/2018/VERBIO_PM_BPK_2017_18_EN_01.pdf
95. <https://www.verbio.de/en/press/news/press-releases/detail/wachstum-und-innovation-in-nordamerika-verbio-erreicht-neuen-meilenstein/>
96. <https://www.verbio-north-america.com/press/details/verbio-launches-ethanol-production-at-its-biorefinery-plant-in-nevada-iowa>
97. https://www.verbio.de/fileadmin/user_upload/verbio/presse/artikel/2022/PM_VNA_GrandOpeningNevadaBiorefinery/VERBIO_NevadaGrandOpening_May6_PressRelease.pdf
98. <https://nevadaiaowaedc.com/wp-content/uploads/2021/12/Fact-Sheet-VNB-Phase-I-II-12-7-2021.pdf>
99. <https://www.verbio-agriculture.com/our-biorefinery/biogas-rng>
100. <http://task37.ieabioenergy.com/>
101. <https://en.yhri.cn/ssm/info.html?id=20>
102. <https://wabio.de/harbin-china-project/>
103. <https://274418.selcdn.ru/cv08300-33250f0d-0664-43fc-9dbf-9d89738d114e/uploads/317438/0d4e04cd-6ce2-4b30-aa0f-00b4e71abced.pdf>
104. <https://vraa.agrienergy.dk/wp-content/uploads/2024/09/Projektbeskrivelse.pdf>
105. https://vraa.agrienergy.dk/wp-content/uploads/2024/09/20240923_Infomode_i_Vraa.pdf
106. <https://www.stiesdal.com/skyclean/agri-energy/>
107. https://www.stiesdal.com/wp-content/uploads/2024/01/Company-statement_Sauter-Danmark-and-Stiesdal-SkyClean-Collaborate-to-Establish-Agri-Energy-24.01.24.pdf
108. <https://linkaenergy.com/en/nature-energy-kvaers/>
109. <https://www.bioconstruct.com/references/biogas-plant-charpentier/>
110. <https://www.naskeo.com/en/projet/alliance-berry-energies-vertes/>
111. <https://www.abev-methanisation.fr/wp-content/uploads/2021/05/DOSSIER-DE-PRESSE-ABEV-METHANISATIONweb.pdf>
112. Georgiy Geletukha, Tetiana Zheliezna. Prospects for the use of agricultural residues for energy production in Ukraine // UABio Position Paper N7. – 2014. – 33 p.
113. Kolchina L.M. Technologies and equipment for the cultivation and harvesting of sugar beet: a reference book. – M.: FGBNU «Rosinformagrotech», 2012. – 80 p. (in Russian)
114. Kucheruk P., Matveev Yu., Rudskaya V. Experimental study of biogas yield from straw in anaerobic digestion process // Renew. Energy. – 2018. – №2. – p. 88-97. (In Ukrainian)
115. Moset V., et al. 2015. Optimization of methane yield by using straw briquettes- influence of additives and mold size. Industrial Crops and Products, vol. 74, 925–932.
116. Kaldis F., et al. 2020. Anaerobic digestion of steam-exploded wheat straw and co-digestion strategies for enhanced biogas production. Applied Sciences, 10(22):8284, 1-12..

2025



UABIO

