
Техніко-економічні показники заготівлі сільськогосподарської біомаси для енергетичних потреб

Тетяна Желєзна

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

ORCID:0000-0002-9607-3022

Анотація: Біомаса сільськогосподарського походження складає найбільшу частину енергетичного потенціалу біомаси у багатьох регіонах світу. Її споживання дає можливість отримати широкий спектр твердих, рідких та газоподібних біопалив для виробництва енергії й застосування у транспортному секторі. Залучення аграрної біомаси до сектору енергетики сприяє виконанню національних цілей країн по частці відновлюваних джерел енергії у загальному постачанні первинної енергії. Особливий інтерес являють види біомаси, які забезпечують суттєве скорочення викидів парникових газів порівняно з викопними паливами і не створюють конкуренції з виробництвом продуктів харчування. До таких видів сільськогосподарської біомаси відносяться, серед іншого, проміжні культури та лігноцелюлозні рослинні рештки. Першим кроком на шляху енергетичного використання біомаси є її заготівля, яка має бути економічно ефективною. Отже, метою даного дослідження є оцінка питомих витрат на заготівлю різних видів сільськогосподарської біомаси. Задачі дослідження включають визначення структурних схем заготівлі та необхідного набору технічних засобів, а також оцінку питомих виробничих витрат по окремих статтях і технологічних операціях. Техніко-економічне обґрунтування заготівлі проміжних культур виконано на прикладі озимої пшениці і вико-вівсяної суміші, а рослинних решток – на прикладі соломи пшениці і побічних продуктів виробництва кукурудзи на зерно. Визначено, що для побічної продукції виробництва пшениці і кукурудзи основними статтями є витрати на паливно-мастильні матеріали, технічне обслуговування і ремонт, а також амортизація обладнання. У випадку проміжних культур додається ще одна велика стаття витрат на придбання насіння і засоби захисту рослин. Це пов'язано із включенням етапу вирощування у загальний ланцюг заготівлі. Подальші напрямки досліджень полягають у виконанні техніко-економічного обґрунтування заготівлі сільськогосподарської біомаси на регіональних рівнях із врахуванням відповідних місцевих умов.

Ключові слова: сільськогосподарська біомаса; лігноцелюлозна біомаса; солома; проміжні культури; рослинні рештки; заготівля біомаси.

1. Вступ

Біомаса сільськогосподарського (с/г) походження відіграє значну роль у забезпеченні сировинної бази світової біоенергетики. Сільськогосподарська біомаса включає відходи та залишки рослинництва, тваринництва, а також ту частку основних і проміжних культур, яка використовується для виробництва біопалив. Так, наприклад, кукурудза і цукрова тростина залишаються головними видами сировини для отримання біоетанолу. Світові лідери даного напрямку, США і Бразилія, забезпечують близько 80% глобального виробництва із внеском 59 млрд л/рік біоетанолу (основна сировина – зерно кукурудзи) та 35 млрд л/рік (основна сировина – стебла цукрової тростини), відповідно. Крупні виробники біодизелю (БД) використовують пальмову олію (Індонезія – світовий лідер, 13 млрд л БД/рік), ріпакову олію та відпрацьовану харчову олію (ЄС – 11 млрд л БД/рік) і соєву олію (Бразилія – 9 млрд л БД/рік) як основні види сировини. США лідирує з виробництва відновлюваного дизеля (HVO), переважно з соєвої олії, з рекордними 13 млрд л/рік у 2024 році (+20% порівняно з 2023 роком) [1].

Важливо відмітити, що із зазначених вище видів біомаси (сировини) отримують рідкі біопалива I-го покоління, виробництво яких створює певну конкуренцію продуктам харчування. Крім того, споживання цих палив призводить лише до відносно обмеженого скорочення викидів парникових газів (ПГ). При цьому солома, стебла та інші лігноцелюлозні побічні продукти (ПП) вирощування сільськогосподарських культур можуть використовуватися для отримання рідких біопалив II-го покоління (передових). Відповідні технології є більш складними і дорогими, сировина потребує значної попередньої обробки, але при цьому досягається суттєве скорочення емісії парникових газів порівняно з викопними паливами, і повністю відсутня конкуренція з виробництвом продуктів харчування [2, 3]. Крім того, досліджуються і впроваджуються заходи із здешевлення технологій отримання рідких біопалив II-го покоління для підвищення їх конкурентоспроможності на біоенергетичному ринку [4]. Оцінка глобального потенціалу сталої біомаси для потреб енергетики [5] показує, що рослинні рештки сільськогосподарських культур, за різними сценаріями, складають 55-73% цього потенціалу до 2050 р. Це відповідає близько 16800-18000 ТВт·год/рік, або 60-65 ЕДж/рік. Додатково, потенціал біогазу з гною сільськогосподарських тварин становить 830-917 ТВт·год/рік, або 2,4-3,2 ЕДж/рік.

Сьогодні одним з найбільш перспективних і динамічних напрямків розвитку світової біоенергетики є виробництво та використання біометану, який є відновлюваним аналогом природного газу [6]. Вже у 2023 році виробництво біометану у світі перевищило 8 млрд м³/рік із прогнозом, принаймні, подвоїтися до 2027 року [7]. Особливо гостро питання заміщення природного газу біометаном стоїть в Євросоюзі після початку російсько-української війни у 2022 році. Згідно плану Єврокомісії REPowerEU, до 2030 року в ЄС заплановано збільшити виробництво біометану до 35 млрд м³/рік [8]. Поточний обсяг виробництва біометану становить близько 5 млрд м³/рік; основними видами сировини для біогазу/біометану є сільськогосподарські залишки, гній тварин і енергетичні культури. Нарощування виробництва біометану до 35 млрд м³/рік вимагає суттєвого збільшення обсягів споживання відповідної сировини. Розширення сировинної бази можливе, в першу чергу, за рахунок залучення біомаси проміжних (інший термін – покривних) культур. Проміжні культури – такі, що вирощуються в інтервалі часу, вільного від культивування основних сільськогосподарських культур сівозміни [9]. Іншим перспективним напрямком є збільшення обсягів виробництва біометану з лігноцелюлозних рослинних решток – соломи, побічної продукції виробництва кукурудзи на зерно (кукурудзиння) та інших (рис. 1). Сталий потенціал рослинних решток в ЄС, доступний для біоенергетики, оцінюється, в середньому, у 2162 ПДж/рік (124 млн т сухої речовини на рік) [10].

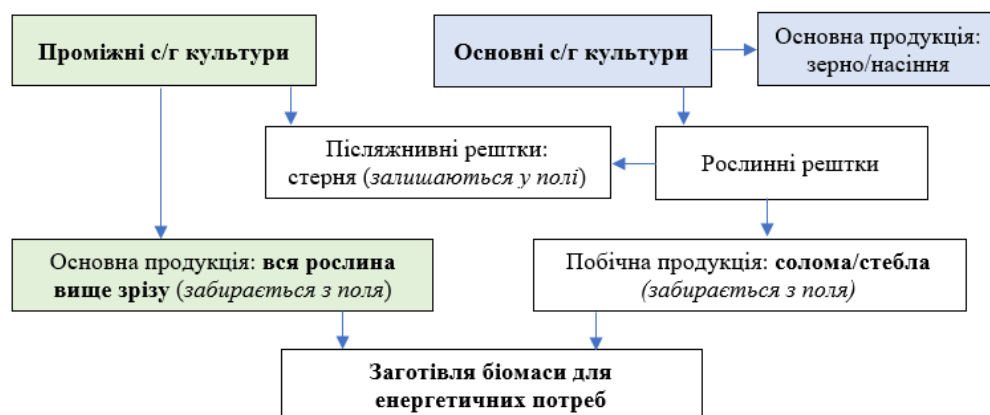


Рисунок 1. Основна і побічна продукція виробництва сільськогосподарських культур.

Сьогодні біогаз/біометан виробляють, зазвичай, не з якогось одного виду сировини (монозброджування), а із певної суміші. Це дає можливість вирішити кілька важливих проблем. По-

перше, поєднання різних видів сировини дозволяє досягти оптимального співвідношення вуглецю і азоту (C:N) у суміші. Для ефективного процесу бродіння це співвідношення рекомендується в діапазоні 15-30. Так, наприклад, у суміші силосу жита озимого, силосу кукурудзи, силосу вики/вівса і гною свиней можна забезпечити C:N на рівні 16,6 (табл. 1, суміш сировини 1), а у суміші соломи пшениці, кукурудзиння, силосу кукурудзи і гною свиней – 23,9 (див. табл. 1, суміш сировини 2). При цьому у гнойових відходах C:N, як правило, нижче рекомендованого (4-15), а у рослинних видах біомаси, навпаки, вище (30-100).

Таблиця 1. Орієнтовні показники виходу біогазу/біометану з різних видів сировини [9, 11].

Показник	Солома пшениці	Кукурудзиння	Силос жита озимого ¹⁾	Гній свиней	Силос вівсяної суміші ¹⁾ (30%/70%)	Силос кукурудзи	Суміш сировини 1 ²⁾	Суміш сировини 2 ³⁾
Біохімічний потенціал виходу метану:								
нм ³ CH ₄ /т СОР ⁴⁾	270	270	340	360	340	350	329	287
нм ³ CH ₄ /т	216	186	94	12,2	94	114	115	183
Вихід біогазу, нм ³ /т СОР	491	491	618	554	618	636	581	509
Склад біогазу:								
вміст CH ₄ , %	55	55	55	65	55	55	56,5	56,5
вміст CO ₂ , %	44	44	44	34	44	44	42,5	42,5
Вміст азоту загального в сировині, кг N/т	4,3	4,5	5,4	2,8	6,2	4,5	3,7	3,3
Співвідношення C:N в сировині	84,6	34,4	25,6	5,7	21,6	34,4	16,6	23,9

1. Проміжні (покривні) культури.

2. Суміш силосу жита озимого, силосу кукурудзи, силосу вики/вівса і гною свиней.

3. Суміш соломи пшениці, кукурудзиння, силосу кукурудзи і гною свиней.

4. Суха органічна речовина.

По-друге, використання сировинної суміші дає можливість досягти достатньо низьких питомих викидів парникових газів, аж до від'ємних значень. Зокрема, це забезпечується шляхом додавання гною. При виробництві біометану із суміші силосу жита озимого, силосу кукурудзи, силосу вики/вівса і гною свиней із уловленням та зрідженням діоксиду вуглецю, який виділяється при збагаченні біогазу, викиди ПГ протягом життєвого циклу біометану складають близько -13 г CO₂-екв/МДж для умов України [9]. Цей же показник при отриманні біометану із суміші соломи пшениці, кукурудзиння, силосу кукурудзи і гною свиней, також з уловленням та зрідженням CO₂, може становити від -14 до -17,3 г CO₂-екв/МДж [11]. Питомі викиди ПГ визначають рівень сталості біометану, що є особливо важливим при його експорті з України до країн ЄС. Досягнуте значення скорочення викидів парникових газів суттєво впливає на ціну біометану і його загальну конкурентоспроможність на біоенергетичному ринку Європи.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Життєздатність будь-якого проекту з виробництва біопалив з сільськогосподарської біомаси залежить, у тому числі, від вартості вхідної сировини, яка, в свою чергу, визначається організацією заготівлі біомаси. Об'єктом дослідження є технології вирощування і збирання біомаси проміжних культур, а також технології заготівлі побічної продукції основних сільськогосподарських культур. Предметом досліджень є технічні та економічні характеристики цих технологій, оскільки вони впливають на собівартість заготовленої біомаси.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – оцінити питомі витрати на заготівлю різних видів сільськогосподарської біомаси.

Задачі дослідження:

1. Визначити структурні схеми заготівлі та необхідний набір технічних засобів для заготівлі біомаси проміжних культур, соломи, кукурудзиння.
2. Оцінити питомі виробничі витрати по окремих статтях і технологічних операціях.

4. Аналіз літератури

Література з питань заготівлі сільськогосподарської біомаси для потреб енергетичного сектору висвітлює широкий спектр технічних, агроекологічних і економічних питань. Також значна увага приділяється проблемам сталості – впливу на ґрунт від відчуження рослинних решток з поля та шляхам компенсації можливого негативного впливу. Дослідження з питань заготівлі біомаси сільськогосподарського походження для енергетики часто мають регіональний характер, бо місцеві умови і особливості суттєво впливають на отримані результати. Наприклад, авторами дослідження [12] визначено, що у Франції можна збільшити обсяги заготівлі рослинних решток на 71-225 ПДж/рік без погіршення стану ґрунту. Це відповідає умовам використання біомаси у різних технологіях енергетичної конверсії (піроліз, газифікація, гідротермальне зрідження, анаеробне зброджування, виробництво біоетанолу другого покоління) й повернення на поле побічних продуктів, що містять вуглець. Прикладами таких побічних продуктів є вуглиста речовина від піролізу/газифікації біомаси і дигестат з біогазових установок.

В роботі [13] проаналізовано мотивацію шведських сільгоспвиробників для збільшення обсягів виробництва біомаси для використання як палива; ідентифіковано рушійні сили та бар'єри цього процесу. Визначено, що можливість вигідного продажу біомаси на ринку є одним з важливих стимулів для збирання рослинних решток і заготівлі біомаси проміжних культур. Зазначено, що наразі в Швеції немає конкуренції між виробництвом агробіомаси для енергетики і для харчової промисловості. В дослідженні [14], також для умов Швеції, представлено результати експериментальних досліджень по вирощуванню та заготівлі кількох видів проміжних культур як сировини для біогазової установки з подальшим отриманням біометану. Авторами виконано аналіз життєвого циклу біометану як моторного палива, проведено оцінку економічних показників. Встановлено, що собівартість сировини (біомаси проміжних культур) складає 80-160 євро/МВт·год біометану, або 180-395 євро/т с.р. (сухої речовини). Для умов Франції, згідно результатів роботи [15], собівартість виробництва біомаси проміжних культур нижче, ніж у Швеції, – 72-160 євро/т с.р. в залежності від виду культури та її врожайності.

В дослідженнях [16-18] розглянуто базові підходи до заготівлі побічної продукції основних сільськогосподарських культур для енергетичного використання для умов України. Ці підходи включають як технологічні аспекти, так і питання сталості, тобто визначено яку частку рослинних решток можна вилучати з поля для потреб енергетики. Проаналізовано можливості збирання соломи зернових культур, побічної продукції виробництва кукурудзи не зерно (кукурудзиння) і сояшнику. Виконано попередню оцінку вартості й структури витрат на заготівлю та транспортування стебел кукурудзи і сояшника. Рекомендації для організації ефективного ланцюга постачання соломи, від заготівлі до складування на енергетичному об'єкті, представлено в роботі [19]. Авторами [20] запропоновано створення в Україні торгівельно-логістичних центрів для забезпечення поставок біомаси, у тому числі аграрної, на біоенергетичні об'єкти. Успішні приклади роботи таких центрів в країнах Євросоюзу представлено в роботі.

В дослідженні [21] для умов Індії проаналізовано техніко-економічні показники роботи теплової електростанції на біопаливі з сільськогосподарських залишків, у тому числі оцінено витрати на збір, транспортування, вантаження-розвантаження біомаси. За припущень, прийнятих в дослідженні, отримано, що виробництво електроенергії з рисової соломи може бути економічно доцільним, а зі стебел бавовни – ні. Оптимальні види сільськогосподарської біомаси для виробництва електроенергії в Бразилії визначено в роботі [22]. Розглянуто побічні продукти вирощування/переробки кукурудзи на зерно, сої, цукрової тростини, кави, а також залишки біомаси евкаліпта. Аналіз проведено з використанням чотирьох основних груп критеріїв – економічного, технічного, екологічного, соціального – і додаткових 13 критеріїв, розподілених по цих групах. Економічний аналіз включав оцінку вартості біомаси із врахуванням заготівлі і повного ланцюга постачання на теплову електростанцію. За результатами дослідження, найбільш економічно доцільним біопаливом для виробництва електроенергії в Бразилії може бути біомаса евкаліпта, жом цукрової тростини і лушпайка кавових бобів.

Авторами роботи [23] проаналізовано технологію заготівлі кукурудзиння як сировини для отримання передового біоетанолу і оцінено мінімальну ціну продажу такої сировини в Мексиці. Визначено, що повна мінімальна ціна становить близько 48 дол. США/т (табл. 2). Її найбільшими складовими є вартість заготівлі, транспортування й компенсації винесених з поля поживних речовин. Останнє є важливим заходом для запобігання погіршення якості ґрунту й негативного впливу на подальшу врожайність сільськогосподарських культур (табл. 3). Даний аспект детально розглянуто в роботі [24]. Наголошено, що питання сталості є першочерговими при використанні рослинних решток для сектору енергетики і потребує аналізу й дослідження на регіональному рівні для прийняття правильних рішень.

Таблиця 2. Ціна продажу кукурудзиння як сировини для біоетанолу в Мексиці [23].

Складові ціни	Мінімальна ціна продажу сировини		
	дол. США/т (частка від загального)	дол. США/тюк (частка від загального)	дол. США/га (частка від загального)
Менеджмент	3,02 (6%)	1,51 (6%)	13,58 (6%)
Заготівля	12,91 (27%)	6,45 (27%)	58,09 (27%)
Вантаження	1,06 (2%)	0,53 (2%)	4,76 (2%)
Транспортування	9,55 (20%)	4,77 (20%)	42,97 (20%)
Розвантаження	1,95 (4%)	0,98 (4%)	8,78 (4%)
Зберігання	2,67 (6%)	1,33 (6%)	12,00 (6%)
Компенсація поживних речовин у ґрунті	16,99 (35%)	8,49 (35%)	76,43 (35%)
Всього	48,14 (100%)	24,07 (100%)	216,62 (100%)

Таблиця 3. Вміст поживних речовин у кукурудзинні і соломі цукрової тростини [24].

Вид біомаси	Вміст, к/кг сухої речовини					
	N	P	K	Ca	Mg	S
ПП виробництва кукурудзи на зерно	5,9-6,5	0,5-0,7	7,9-12,8	1,8-2,2	1,4-1,8	0,4-0,7
Солома цукрової тростини	4,4-12,3	0,8-1,3	3,1-17,2	3,3-13,1	1,1-6,0	0,7-4,0

5. Методи досліджень

Методи досліджень полягають у виконанні техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) з оцінкою необхідних економічних показників. Такий аналіз включає визначення всіх технологічних операцій, пов'язаних із заготівлею біомаси, оцінку необхідних матеріально-технічних ресурсів і розрахунок собівартості отримання певного виду біомасової сировини. Для проміжних культур, порівняно з соломою і кукурудзинням, в розрахунки додається етап вирощування.

6. Результати досліджень

Вибір видів проміжних (покривних) культур залежить від місцевих природно-кліматичних умов і застосованих сівозмін основних сільськогосподарських культур. В залежності від біологічних особливостей та технології вирощування, зокрема, періоду посадки/збирання, проміжні культури (ПК) поділяються на післяжнивні, післяукісні, озимі, підсівні.

Для Лісостепової зони України можна запропонувати вирощування післяжнивних і озимих проміжних культур між озимим ріпаком та кукурудзою. ТЕО виконано на прикладі вирощування і збирання вико-вівсяної суміші як післяжнивної культури й жита як озимої проміжної культури на загальній площі у 2000 га. Розглядається сівозмінна, в якій перша ПК (післяжнивна) висівається у липні на 1000 га після озимого ріпаку, зібраного у червні-липні; друга ПК (озима) висівається у серпні на інших 1000 га після озимого ріпаку. Післяжнивна культура збирається у жовтні-листопаді того ж року, а озима – у травні наступного року до початку сівби кукурудзи. Вибір проміжних культур обумовлений їх здатністю швидко нарощувати зелену масу у період з липня до листопада для післяжнивних культур та з серпня до травня для озимих ПК.

У вихідних даних для ТЕО прийнято, що врожайність зеленої маси вико-вівсяної суміші становить 4 т с.р./га (13,3 т/га біомаси вологістю 70%), а зеленої маси озимого жита – 8 т с.р./га (26,7 т/га біомаси вологістю 70%); тривалість збирання проміжних культур – до 2 тижнів. Орієнтовна відстань транспортування біомаси – до 20 км; зібрана зелена маса підлягає силосуванню, оскільки буде використана як сировина для виробництва біогазу/біометану.

Технологічні операції вирощування і збирання озимого жита на силос включають дискування, посів, навантаження й транспортування добрив, підживлення по мерзлоталому ґрунту, обприскування засобами захисту рослин, скошування з плющенням, ворущіння, збирання у валки, підбирання самохідним кормозбиральним комбайном, транспортування. Для ярої вико-вівсяної суміші набір необхідних технологічних операцій дещо коротший, а саме: дискування, посів з внесенням міңдобрив, скошування з плющенням, ворущіння, збирання у валки, підбирання самохідним кормозбиральним комбайном, транспортування.

Питомі витрати на заготівлю біомаси проміжних культур представлено в таблиці 4. Найбільшими складовими є витрати на насіння і паливно-мастильні матеріали, а також амортизація техніки. Загальні витрати на заготівлю становлять 13,38 євро/т (44,7 євро/т с.р.) для озимого жита і 17,95 євро/т (60 євро/т с.р.) для вико-вівсяної суміші. Треба зазначити, що врожайність проміжних культур може бути значно вище прийнятої в ТЕО – до майже 28 т/га для вико-вівсяної суміші і до 42 т/га для гібридів жита озимого. Для отримання високого виходу зеленої маси з одиниці площі доцільно провести пробні посіви різних видів ПК та підібрати сорти, оптимальні для місцевих умов. Чим вище врожайність проміжних культур, тим нижче питома собівартість їх заготівлі.

Таблиця 4. Питомі витрати на вирощування та збирання проміжних культур на силос на площі 1000 га кожна.

Стаття витрат	ПК: I*, II**	Витрати,		Коментар
		євро/т	частка, %	
Оплата праці	I	0,26	2,0%	4 євро/год або 32 євро/змінa (8 годин); 0,22 нормозміни/га
	II	0,35	2,0%	4 євро/год або 32 євро/змінa 8 годин; 0,15 нормозміни/га
Паливо і мастильні матеріали	I	3,26	24,3%	Дизельне паливо (ДП): 74,9 л/га. Мастильні матеріали: 15% від вартості ДП
	II	4,52	25,2%	Дизельне паливо: 52 л/га. Мастильні матеріали: 15% від вартості ДП
Технічне обслуговування і ремонт	I	1,75	13,0%	5% від вартості техніки
	II	2,02	11,3%	

Продовження таблиці 1

Амортизація техніки	I	4,36	32,6%	8 років
	II	5,05	28,2%	
Насіння і засоби захисту рослин	I	3,75	28,0%	Насіння: 2 посівні одиниці/га. Засоби захисту рослин
	II	6,00	33,4%	Насіння: 2 млн од./га вики та 1,5 млн од./га вівса
Всього	I	13,38 євро/т (44,7 євро/т с.р.)		
	II	17,95 євро/т (60 євро/т с.р.)		

* I – озиме жито, ** II – вико-вівсяна суміш.

ТЕО заготівлі лігноцелюлозних рослинних решток виконано на прикладі соломи пшениці і кукурудзиння. Озима пшениця в Україні збирається у липні, зазвичай за хороших погодних умов, тому соломі можна тюкувати відразу після формування комбайном валків у полі. Для великих обсягів соломи (понад 4-5 тис. т/рік) найбільшого розповсюдження набула заготівля у великих прямокутних тюках. Це передбачає наступні операції (рис. 2): формування валків соломи комбайном, підбір біомаси з валків та її пресування у тюки, збирання тюків по полю трактором із самозавантажувальним причепом та укладання тюків у штабелі, тимчасове зберігання тюків на локальному складі поблизу поля, завантаження тюків навантажувачом на транспортні засоби, транспортування соломи на центральний склад для основного зберігання, розвантаження та складування тюків, довготривале зберігання соломи.



Рисунок 2. Структурна схема заготівлі соломи у великих прямокутних тюках.

Описана схема заготівлі соломи може бути спрощена, якщо тюки збирати навантажувачом і завантажувати у транспортні засоби безпосередньо у полі. Це виключає технологічні операції 2 і 3 (див. рис. 2). Однак, аналіз такої спрощеної схеми показує, що вона має недоліки, зокрема, більшу тривалість завантаження тюків. Тому її застосування є обмеженим і взагалі не рекомендується за дощової погоди. Розташування ділянок для тимчасових складів при заготівлі з використанням самозавантажувальних причепів краще вибирати біля доріг та на підвищенні для стікання води під час опадів.

На відміну від озимої пшениці, кукурудза на зерно збирається у вересні-листопаді, коли погода може бути холодною з дощами. За таких умов важко спрогнозувати якою буде вологість кукурудзиння, тому доцільно визначити дві стратегії його заготівлі і зберігання. Варіант А – це ланцюжок постачання сухої біомаси. Кукурудзиння з вологістю до 25% можна тюкувати у прямокутні або круглі тюки і зберігати під гнучким накриттям аналогічно до застосованої у сільськогосподарської компанії практики зберігання соломи. При цьому прес-підбирачі повинні бути розраховані на тюкування саме такої біомаси. Варіант Б – це ланцюжок постачання вологої біомаси. Кукурудзиння з вологістю більше 25% збирають у подрібненому вигляді і силосують. Тюкування в цьому випадку не виконують, оскільки біомаса в тюках може почати гнити під час зберігання.

ТЕО заготівлі рослинних решток кукурудзи проведено на прикладі варіанту А – ланцюжка постачання сухої біомаси у великих прямокутних тюках. Основна відмінність від випадку заготівлі соломи полягає у необхідності використанні додаткових машин для формування валків кукурудзиння. При збиранні кукурудзи на зерно через комбайн проходить менша

частина рослинних решток, а основна частина розкидається жаткою, і звичайний зернозбиральний комбайн не може сформувати валки з біомаси. Тому пропонується використовувати мульчувач-валкоутворювач для формування валків кукурудзиння. Цей агрегат підбирає рослинні рештки, підрізає стерню, подрібнює біомасу та укладає її у валки. При заготівлі соломи зернозбиральний комбайн зразу укладає її у валки і немає потреби у додатковому застосуванні мульчувачів-валкоутворювачів.

Вихідні умови для ТЕО заготівлі лігноцелюлозних рослинних решток наступні. Заготовлюється солома пшениці з базовою вологістю 15% у великих прямокутних тюках; обсяг – 4,0 т/га з площі 2400 га; тюки перевозяться автотранспортом з поля до центрального складу на відстань 20 км. Продуктивність тюкування прийнято 6,0 га/год, що відповідає часу виконання необхідних операцій – 400 год; очікувана тривалість тюкування протягом робочого дня – 10 год. Загальний перелік технічних засобів включає два трактора із прес-підбирачами великих прямокутних тюків; трактор із самозавантажувальним причепом-тюковозом; чотири телескопічні навантажувачі; шість автомобілів-тягачів із напівприцепом-платформою. Сумарна вартість зазначеної техніки оцінюється у 2032 тис. євро.

Вихідні умови для рослинних решток кукурудзи: заготовлюється 4,5 т/га кукурудзиння базової вологості 25% у великих прямокутних тюках з площі 1900 га з транспортуванням тюків автотранспортом на відстань 20 км з поля до центрального складу. Прийнято продуктивність тюкування 5,0 га/год, що дозволяє виконати необхідні операції за 380 год. Повний перелік технічних засобів включає три трактора із мульчувачами-валкоутворювачами; два трактора із прес-підбирачами великих прямокутних тюків (рекомендована кількість з огляду на обмежений термін збиральної компанії); трактор із самозавантажувальним причепом-тюковозом; чотири телескопічні навантажувачі; шість автомобілів-тягачів із напівприцепом-платформою. Загальна вартість цієї техніки становить 2812 тис. євро.

Повні питомі виробничі витрати на заготівлю лігноцелюлозної біомаси оцінюються у 16,3 євро/т для соломи пшениці і 25,3 євро/т для кукурудзиння. Перелік відповідних статей витрат наведено у таблиці 5. Найбільшими статтями у структурі витрат є амортизація техніки, витрати на паливно-мастильні матеріали, технічне обслуговування і ремонт. За технологічними операціями, найбільш затратними є тюкування для соломи (рис. 3а) й формування валків та тюкування для кукурудзиння (рис. 3б). За прийнятих умов, для окупності техніки в межах 7 років рекомендується ціна продажу великих тюків соломи на рівні 25 євро/т (без ПДВ), а тюків кукурудзиння – 35 євро/т (без ПДВ). Ця ціна включає доставку до місць зберігання на центральному складі.

Таблиця 5. Питомі виробничі витрати на заготівлю соломи пшениці та кукурудзиння.

Стаття витрат	Рослинні рештки: I*, II**	Витрати,		Коментарі
		євро/т	частка, %	
Оплата праці	I	1,05	6,4	160 грн/год, 7 механізаторів на тракторах і навантажувачах; 6 водіїв.
	II	1,14	4,5	160 грн/год, 10 механізаторів на тракторах і навантажувачах; 6 водіїв.
Витрати на паливо і мастильні матеріали	I	3,83	23,5	Дизельне паливо (ДП): 3,6 л/т соломи. Мастильні матеріали: 15% від вартості ДП.
	II	5,89	23,3	Дизельне паливо: 5,5 л/т кукурудзиння. Мастильні матеріали: 15% від вартості ДП.
Витрати на технічне обслуговування і ремонт	I	3,11	19,1	5% від вартості техніки з врахуванням завантаження
	II	5,50	21,8	
Витрати на матеріали	I	2,08	12,8	Шпагат: 123 грн/кг без ПДВ
	II	1,76	7,0	

Продовження таблиці 2

Амортизація техніки	I	6,21	38,2	10 років із врахуванням умовного завантаження техніки
	II	11,00	43,5	
Всього:	I	16,28 (10,07 без амортизації, на центральному складі)		
	II	25,29 (14,29 без амортизації, на центральному складі)		

* I – солома озимої пшениці (загалом 9600 т), ** II – кукурудзиння (загалом 8550 т).

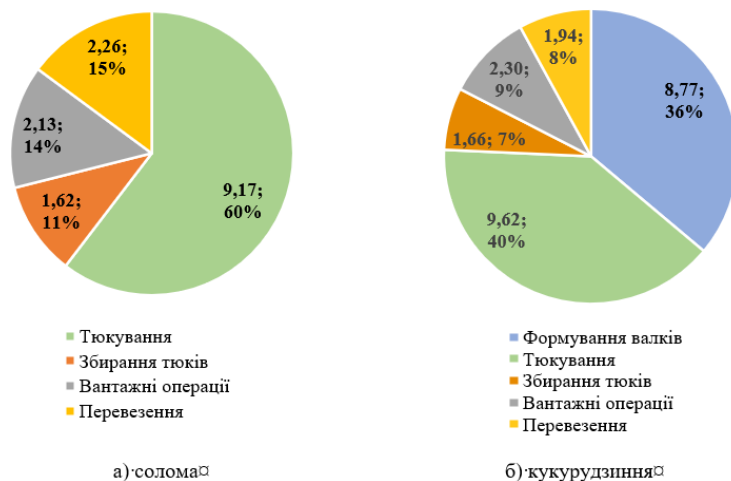


Рисунок 3. Структура витрат на заготівлю рослинних решток у великих прямокутних тюках за технологічними операціями, євро/т.

Аналіз чутливості показує, що питома собівартість заготівлі сільськогосподарської біомаси помірно залежить від ціни дизельного палива. Оскільки витрати на паливно-мастильні матеріали складають близько 23-25% повної собівартості, зміна ціни ДП на $\pm 10\%$ змінює загальні витрати лише на 2,3-2,5% (близько $\pm 0,4$ євро/т для соломи і $\pm 0,6$ євро/т для кукурудзиння). Навіть подорожчання дизпалива на 25% підвищує собівартість заготівлі не більше ніж на 0,9-1,5 євро/т, тому рекомендовані ціни продажу тюків (25 євро/т для соломи і 35 євро/т для кукурудзиння) зберігають достатній запас для покриття реалістичних коливань цін на пальне.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Подальші дослідження можуть включати кілька напрямків, перший з яких стосується проміжних культур. Необхідно визначити види ПК, найбільш придатні для різних природно-кліматичних умов України, й підібрати оптимальні схеми їх включення до існуючих сівозмін. Наступним кроком має бути виконання ТЕО на регіональних рівнях з урахуванням місцевих умов. Після цього треба оцінити чи забезпечує отримана собівартість біомаси проміжних культур економічно ефективні показники відповідних біогазових/біометанових проєктів. Даний напрямок досліджень також має бути доповнений оцінкою потенціалу біомаси ПК по районах областей України. Інший напрямок подальших робіт полягає у виконанні ТЕО заготівлі лігноцелюлозних рослинних решток на регіональних рівнях з урахуванням врожайності зернових та інших особливостей, характерних для певного регіону. В цій сфері також необхідно досліджувати й вдосконалювати технології попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси перед анаеробним зброджуванням.

8. Висновки

Біомаса сільськогосподарського походження являє собою потужний сировинний ресурс для різних технологій енергетичної конверсії. Правильний підхід до використання цього ресурсу вимагає врахування аспектів сталості, таких як викиди парникових газів й конкуренція з виробництвом продуктів харчування. Споживання біомаси проміжних культур та лігноцелюлозних рослинних решток для потреб енергетики дозволяє суттєво скоротити емісію парникових газів і не викликає конкуренції з харчовою промисловістю. Раціональний підхід до заготівлі зазначених видів біомаси також дає можливість уникнути негативного впливу на якість ґрунту. Перспективним напрямком є виробництво біометану з проміжних культур і рослинних решток. По-перше, біометан може бути прямим замінником природного газу, а також використовуватися як моторне паливо. По-друге, повернення дигестату з біогазових установок на поле сприяє підтримці родючості ґрунту.

Список літератури.....

- 1) Global Bioenergy Statistics Report. WBA, 2025 [Online]. Available at: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/251118%20GBSR.pdf> – (last accessed on 30.06.2026)
- 2) Arijana Bušić, Nenad Mardetko, S. P. Kundas et al. (2018). Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and its Separation and Purification: A Review. Food Technology and Biotechnology, v. 56. N 3, pp. 289-311. doi: 10.17113/ftb.56.03.18.5546
- 3) Anjani Devi Chintagunta, Gaetano Zuccaro, Mahesh Kumar et al. (2021). Biodiesel Production from Lignocellulosic Biomass Using Oleaginous Microbes: Prospects for Integrated Biofuel Production. Frontiers in Microbiology, v. 12:658284. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.658284>
- 4) Zheliezna T.A., Drahnev S.V. (2023). Analiz napriamkiv pidvyshchennia konkurentospromozhnosti ridkykh biopalyv drugoho pokolinnia. Teplofizyka ta teploenerhetyka, v. 45, N 3, p. 78-87. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2023.9> (in Ukrainian)
- 5) Theophilus Nii Odai Mensah, Ayobami Solomon Oyewo, Christian Breyer. The global sustainable bioenergy potential until 2050 in global-national resolution. Applied Energy, v. 400:126464. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126464>
- 6) Felipe Solferini de Carvalho, Luiz Carlos Bevilacqua dos Santos Reis, Pedro Teixeira Lacava (2023). Substitution of Natural Gas by Biomethane: Operational Aspects in Industrial Equipment. Energies, 16(2):839. <https://doi.org/10.3390/en16020839>
- 7) Gergely Molnar. Biomethane: a global stocktake. IEA, 2024 [Online]. Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/33c29a6e-a2f2-4e20-9fa1-e057263c893a/IEA_Biomethanewebinar_GergelyMOLNAR.pdf – (last accessed on 30.06.2026)
- 8) Pietro Marconi and Lorenzo Rosa (2023). Role of biomethane to offset natural gas. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 187:113697. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113697>
- 9) Georgii Geletukha, Tetiana Zheliezna, Semen Drahnev et al. (2025). Advanced biomethane production from intermediate and cover crops. Analytical Note N 1, UABIO [Online]. Available at: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2025/05/Analytical-Note-1-2025-EN.pdf> – (last accessed on 30.06.2026)
- 10) Nicolae Scarlat, Fernando Fahl, Emanuele Lugato et al (2019). Integrated and spatially explicit assessment of sustainable crop residues potential in Europe. Biomass and Bioenergy, v. 122, pp. 257-269. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.021>
- 11) Georgii Geletukha, Yuri Matveev, Petro Kucheruk et al. (2025). Advanced biomethane production from ligno-cellulose materials. Analytical Note N 2, UABIO [Online]. Available at: https://uabio.org/wp-content/uploads/2025/07/Analit_Zapiska2_2025_EN.pdf – (last accessed on 30.06.2026)

- 12) Christhel Andrade Díaz, Hugues Clivot, Ariane Albers et al. (2023). The crop residue conundrum: Maintaining long-term soil organic carbon stocks while reinforcing the bioeconomy, compatible endeavors? *Applied Energy*, v. 329:120192. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120192>
- 13) Hedda Thomson Ek, Jagdeep Singh, Josefin Winberg et al. (2024). Farmers' motivations to cultivate biomass for energy and implications. *Energy Policy*, v. 193:114295. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114295>
- 14) Sven-Erik Svensson, Eva Johansson, Emma Kreuger, Thomas Prade (2025). Evaluating intermediate crops for biogas production – Effects of nitrogen fertilization and harvest timing on biomass yield, methane output and economic viability. *Biomass and Bioenergy*, v. 192:107497. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107497>
- 15) Sylvain Marsac, C. Quod, V. Leveau et al. (2019). Optimisation of French energy cover crop production in double cropping systems for on-farm biogas use. *Proceedings of 7th European Biomass Conference and Exhibition*, 27-30 May 2019, Lisbon, Portugal. DOI: 10.5071/27thEUBCE2019-1AO.4.5
- 16) Georgii Geletukha, Tetiana Zheliezna. (2014). Prospects for the use of agricultural residues for energy production in Ukraine. Position Paper N 7, UABIO [Online]. Available at: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-7-en.pdf> – (last accessed on 30.06.2026)
- 17) Semen Drahnev, Tetiana Zheliezna, Georgii Geletukha (2016). Opportunities for harvesting by-products of grain corn for energy production in Ukraine. Position Paper N 16, UABIO [Online]. Available at: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/position-paper-uabio-16-en.pdf> – (last accessed on 30.06.2026)
- 18) Georgii Geletukha, Semen Drahnev, Tetiana Zheliezna, Anatolii Bashtovyi (2020). Prospects of sunflower residues use for energy. Position Paper N 25, UABIO [Online]. Available at: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/10/uabio-position-paper-25-en-1.pdf> – (last accessed on 30.06.2026)
- 19) G.G. Geletukha, E.M. Oliynyk, V.O. Antonenko et al. (2020). Agricultural residues for energy. What you should know about organizational and technical solutions. Position Paper N 24, UABIO [Online]. Available at: https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/09/Analitika_UABIO_energetychny-vykorystannia_agrovidhodiv_en.pdf – (last accessed on 30.06.2026)
- 20) Zheliezna T.A., Drahnev S.V. (2024). Analiz napriamkiv optymizatsii logistyky postachannia biopalyv na energetychni obiekty. *Teplofizyka ta teploenerhetyka*, v. 46, N 1, pp. 66-75. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.9> (in Ukrainian)
- 21) Anil Khima Gojiya, Dipankar Deb (2017). On Feasibility of Biomass Power Plant with Agricultural Waste Processing. *Proceedings of 6th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances*. DOI: 10.1109/CERA.2017.8343315
- 22) Fernando Bruno Dovichi Filho, Laura Vieira Maia de Sousa, Electro Eduardo Silva Lora (2025). A Methodology for the Feasibility Assessment of Using Crop Residues for Electricity Production Through GIS-MCD and Its Application in a Case Study. *Agriculture*, v. 15, issue 3, 334. <https://doi.org/10.3390/agriculture15030334>
- 23) Luis Armando Becerra-Pérez, Luis Rincón, A. Posada-Duque (2022). Logistics and Costs of Agricultural Residues for Cellulosic Ethanol Production. *Energies*, v. 15, issue 12, 4480. <https://doi.org/10.3390/en15124480>
- 24) Maurício Roberto Cherubin, Dener Oliveira, Brigitte Josefine Feigl et al. (2018). Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. *Scientia Agricola*, v. 75, N 3, pp. 255-272. DOI: 10.1590/1678-992X-2016-0459

Technical and economical values of harvesting agricultural biomass for energy

Tetiana Zheliezna

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: 0000-0002-9607-3022

Abstract: Agricultural biomass accounts for the largest part of the bioenergy potential in many regions of the world. Its consumption enables the production of a wide range of solid, liquid, and gaseous biofuels for energy and use in the transportation sector. The involvement of agricultural biomass in the energy sector contributes to the implementation of countries' national goals for the share of renewable energy sources in the total primary energy supply. Types of biomasses that provide a significant reduction in greenhouse gas emissions compared to fossil fuels and do not compete with food production are of particular interest. Such types of agricultural biomass include, among others, intermediate crops and lignocellulosic crop residues. The first step towards using biomass for energy is its harvesting, which should be cost-effective. Therefore, the purpose of this study is to estimate the specific costs of harvesting different types of agricultural biomass. The tasks of the study include determining the structural schemes of harvesting and the required set of technical means, as well as estimating specific production costs for individual expenditures and technological operations. The feasibility study of harvesting intermediate crops was carried out using the example of winter wheat and vetch-oat mixture, and that for crop residues was done based on wheat straw and corn stover. It was determined that for by-products of wheat and corn production, the main expenditures are costs for fuel and lubricants, maintenance and repair, as well as depreciation of equipment. In the case of intermediate crops, another large area of spending is the purchase of seeds and plant protection products. This is due to the inclusion of the cultivation stage in the general chain of harvesting. Further research directions lie in carrying out a feasibility study of harvesting agricultural biomass at regional levels, taking into account relevant local conditions.

Keywords: agricultural biomass; lignocellulosic biomass; straw; intermediate crops; crop residues; biomass harvesting.
