

Хмельницький національний університет
Гуманітарно-педагогічний факультет
Кафедра екології та біологічної освіти

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Оцінка енергетичного потенціалу агробіомаси Хмельницької області

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Галузь знань – 10 Природничі науки

Спеціальність – 101 Екологія

Освітня програма – «Екологія»

КвРЕКОЛ. 024028.01.10.00

Виконав здобувач 2 курсу група ЕКОЛм-24-1

Керівник кандидат технічних наук, доцент

Нормоконтролер



Анна МУХА



Ольга ЄФРЕМОВА

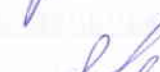


Сергій ШЕВЧЕНКО

До захисту допускаю:

завідувач кафедри екології

та біологічної освіти



Ольга ЄФРЕМОВА

18 грудня 2025 р.

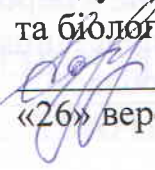
Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет – Гуманітарно-педагогічний
Кафедра – Екології та біологічної освіти
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Галузь знань – 10 Природничі науки
Спеціальність – 101 Екологія
Освітньо-професійна програма – «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри екології
та біологічної освіти

 Ольга ЄФРЕМОВА
«26» вересня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Мусі Анні Олександрівні

1 Тема роботи «Оцінка енергетичного потенціалу агробіомаси Хмельницької області»

керівник роботи Єфремова О. О., завідувач кафедри екології та біологічної освіти, кандидат технічних наук, доцент

Затверджено наказом ректора університету від 25 серпня 2025 р. № 65.

2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 15 грудня 2025 р.

3 Вихідні дані до роботи: довідники, статті, узагальнені дані про енергетичний потенціал альтернативних джерел енергії, статистичні дані щодо соціально-економічного розвитку Хмельницької області.

4 Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Теоретичні основи оцінки енергетичного потенціалу агробіомаси. 2. Аналіз енергетичного потенціалу аграрного виробництва. 3. Енергетичний потенціал агробіомаси та перспективи його використання в Хмельницькій області.

5 Дата видачі завдання 29 вересня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Примітка
1 Вступ	до 01.11	виконано
2 Теоретичні основи оцінки енергетичного потенціалу агробіомаси	до 10.11	виконано
3 Аналіз енергетичного потенціалу аграрного виробництва	до 25.11	виконано
4 Енергетичний потенціал агробіомаси та перспективи його використання в Хмельницькій області	до 01.12	виконано
5 Висновки	до 4.12	виконано
6 Перелік джерел посилання	до 6.12	виконано
7 Додатки	до 8.12	виконано

Здобувачка



Анна МУХА

Керівник

кваліфікаційної роботи



Ольга ЄФРЕМОВА

АНОТАЦІЯ

Тема – Оцінка енергетичного потенціалу агробіомаси Хмельницької області.

Автор – здобувачка ЕКОЛм-24-1 Анна МУХА.

Керівник – завідувач кафедри екології та біологічної освіти, кандидат технічних наук, доцент Ольга ЄФРЕМОВА.

Кваліфікаційна робота викладена на 79 сторінках, містить 1 рисунок, 15 таблиць та перелік джерел посилань, що містять 56 джерел, додаток.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АГРОБІОМАСА, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ, БІОЕНЕРГЕТИКА, РОСЛИННІ ВІДХОДИ, ТВАРИННИЦЬКІ ВІДХОДИ, ЕНЕРГЕТИЧНІ КУЛЬТУРИ, БІОГАЗ, ХМЕЛЬНИЦЬКА ОБЛАСТЬ.

У кваліфікаційній роботі проведено комплексну оцінку енергетичного потенціалу агробіомаси Хмельницької області. Узагальнено теоретичні засади класифікації та методів оцінювання енергетичного потенціалу агробіомаси, проаналізовано сучасний стан аграрного виробництва та визначено обсяги рослинних, тваринницьких відходів і потенціал енергетичних культур. Виконано розрахунок енергетичного потенціалу основних видів агробіомаси. Показано, що агробіомаса області формує значний енергетичний ресурс, придатний для виробництва теплової енергії та біогазу. Запропоновано шляхи підвищення ефективності її використання та розвитку регіональних біоенергетичних кластерів.

15.12.2025 р.



ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	5
1 Теоретичні основи оцінки енергетичного потенціалу агробіомаси....	8
1.1 Види та властивості агробіомаси.....	8
1.2 Підходи до оцінювання енергетичного потенціалу агробіомаси ...	20
2 Аналіз енергетичного потенціалу аграрного виробництва.....	28
2.1 Світовий та український досвід використання агробіомаси.....	28
2.2 Аналіз енергетичного ресурсу відходів рослинництва і тваринництва в системі аграрного виробництва.....	35
2.3 Аналіз енергетичного ресурсу енергетичних культур в системі аграрного виробництва.....	39
3 Енергетичний потенціал агробіомаси та перспективи його використання в Хмельницькій області	42
3.1 Оцінка енергетичного потенціалу відходів рослинництва	42
3.2 Оцінка енергетичного потенціалу відходів тваринництва	53
3.3 Оцінка енергетичного потенціалу енергетичних культур	58
3.4 Перспективи використання агробіомаси Хмельницької області.....	64
Висновки.....	69
Перелік джерел посилання.....	72
Додаток А Апробація результатів дослідження	80

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку енергетичного сектору світу характеризуються активним переходом до відновлюваних джерел енергії, що зумовлено глобальними екологічними викликами, необхідністю декарбонізації економіки та забезпечення енергетичної безпеки. Україна, прагнучи інтегруватися в європейський енергетичний простір і виконати міжнародні зобов'язання щодо зменшення викидів парникових газів, розглядає біоенергетику як один із ключових напрямів розвитку «зеленої» енергетики. Важливим компонентом біоенергетичного потенціалу країни є агробіомаса – відновлюваний ресурс, що широко доступний у регіонах з розвиненим агропромисловим виробництвом.

Хмельницька область належить до таких регіонів, адже її аграрний сектор є однією з провідних галузей економіки. Значні площі під зерновими та технічними культурами, а також наявність потужного тваринництва створюють вагомий потенціал утворення різних видів агробіомаси. Разом із тим, цей потенціал нині використовується нерівномірно й переважно на локальному рівні, а значна частина біомасних ресурсів залишається не залученою в енергетичний цикл. Такий стан речей актуалізує потребу в комплексній оцінці енергетичного потенціалу агробіомаси на регіональному рівні, що дозволить виявити можливості підвищення енергетичної самодостатності територіальних громад та економічної ефективності використання аграрних ресурсів. Метою даної магістерської роботи є здійснення еколого-гігієнічної оцінки якості води річки Південний Буг у межах Хмельницької міської територіальної громади, з ідентифікацією основних джерел забруднення та розробкою рекомендацій щодо покращення екологічного стану річки.

Метою даної кваліфікаційної роботи є комплексна оцінка енергетичного потенціалу агробіомаси Хмельницької області та визначення перспектив його ефективного використання.

Для досягнення мети сформульовано такі основні завдання:

- узагальнити теоретичні положення щодо класифікації, властивостей та оцінки агробіомаси;
- дослідити аграрний сектор Хмельницької області та визначити основні види агробіомаси, що утворюються на її території;
- здійснити оцінку енергетичного потенціалу ключових видів агробіомаси;
- проаналізувати сучасний стан використання агробіомаси та пов'язані економічні та екологічні аспекти;
- окреслити перспективи розвитку біоенергетики регіону та сформулювати практичні рекомендації.

Об'єктом дослідження є енергетичний потенціал агробіомаси як складова відновлюваної енергетики.

Предметом дослідження є сукупність теоретичних, методичних і практичних підходів до оцінки та використання агробіомаси Хмельницької області.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що за умови науково обґрунтованої оцінки, належної організації логістики та раціонального технологічного підходу агробіомаса Хмельницької області здатна забезпечити суттєвий внесок у регіональний енергетичний баланс і створити передумови для розвитку локальних біоенергетичних систем.

Методи дослідження. Теоретичні та методологічні розробки щодо оцінки енергетичного потенціалу біомаси. У роботі також було використано загальнонаукові методи дослідження: теоретичні, емпіричні, розрахункові.

Інноваційність дослідження полягає у комплексному підході до визначення енергетичного потенціалу агробіомаси Хмельницької області з

урахуванням регіональної специфіки та поєднанням ресурсного, енергетичного й просторово-економічного аналізу.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження, узагальнення та висновки про енергетичний потенціал агробіомаси можуть бути використані для розробки методичних матеріалів та для професійної підготовки екологів у вищих навчальних закладах за напрямом освіти «Екологія», зокрема в освітньому компоненті «Управління відходами». Крім того, результати роботи можуть бути використані у розробленні регіональних програм енергоефективності, управлінні аграрними ресурсами та плануванні біоенергетичних проєктів.

Апробація результатів дипломної роботи і публікації з теми дослідження. Результати дослідження опубліковано у збірнику матеріалів Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Екологічні виклики та інновації. Захист довкілля у сучасному світі» (м. Черкаси, 5 листопада, 2025 р.).

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ АГРОБІОМАСИ

1.3 Види та властивості агробіомаси

Людство звертається до біомаси як до енергетичного ресурсу відтоді, коли було опановано технологію добування вогню. І сьогодні деревні види палива залишаються одним із ключових джерел енергії в багатьох регіонах світу.

У сучасних умовах біомаса посідає важливе місце в паливно-енергетичному секторі, забезпечуючи потреби від побутового теплозабезпечення до виробництва електроенергії та моторних палив. З економічної та екологічної позицій найбільш раціональною сферою її застосування вважається генерація теплової енергії.

Біомаса є узагальненим терміном, що охоплює органічні матеріали природного походження, насамперед рослинного та тваринного. Її особливістю є здатність до відновлення у порівняно короткі часові проміжки, що забезпечує сталість та передбачуваність ресурсної бази. У контексті сучасних енергетичних трансформацій біомаса дедалі частіше розглядається не лише як вторинний продукт біологічних процесів, а як повноцінний енергетичний ресурс, здатний компенсувати частину попиту на традиційні види палива [1].

У рамках виконання взятих на себе зобов'язань перед Європейським енергетичним Співтовариством Україна влітку 2015 року інтегрувала до національного законодавства визначення поняття «біомаса», гармонізоване з нормативними вимогами Європейського Союзу.

Відповідно до трактування, поданого в Директиві Європейського парламенту та Ради ЄС 2009/28/ЕС, під біомасою розуміють органічні матеріали, здатні до біологічного розкладу: продукцію, відходи й залишки сільськогосподарського виробництва (у тому числі речовини рослинного та

тваринного походження), лісового сектору та суміжних галузей, включаючи рибальство та аквакультуру, а також біорозкладну частину промислових і побутових відходів [2].

Згідно чинної нормативної бази України, у профільних актах України термін «біомаса» трактується насамперед у контексті енергетичного використання та належить до групи відновлюваних ресурсів. Найбільш повне й формалізоване визначення наведено у Законі України «Про альтернативні види палива», де біомасу визначено як: «невикопну біологічно відновлювану речовину органічного походження, здатну до біологічного розкладу – у вигляді продуктів, відходів та залишків лісового та сільськогосподарського виробництва (рослинництва і тваринництва), рибного господарства і технологічно пов'язаних з ними галузей промисловості, а також складову промислових або побутових відходів, здатних до біологічного розкладу» [3].

Це визначення є базовим для усіх напрямів біоенергетики, оскільки охоплює як первинну (рослинну, тваринницьку, лісову), так і вторинну (переробну та побутову) біомасу. Таким чином, законодавець підкреслює універсальний характер біомаси як ресурсу, що може формуватися в різних секторах економіки.

У Законі України «Про альтернативні джерела енергії» термін «біомаса» прямо не визначений, однак він інтегрується у структуру поняття «відновлювані джерела енергії», що містить перелік ресурсів, серед яких і біомаса. Отже, у правовому полі України біомаса закріплена як один із видів відновлюваних енергетичних ресурсів, які можуть бути використані для виробництва теплової та електричної енергії [4].

Окреме уточнення стосується сфери лісового господарства. У нормативних довідниках термінології, інтегрованих до законодавства, подано визначення «лісової біомаси», під якою розуміють: «біомасу, вироблену в секторі лісового господарства» [5].

Це уточнення важливе для розмежування аграрної та лісової складових біоенергетичного потенціалу, оскільки їх характеристика, структура та можливості використання суттєво відрізняються.

Отже, біомаса розглядається виключно як відновлюваний ресурс, що принципово відрізняє її від традиційних енергетичних джерел (газу, вугілля, нафти). Законодавство чітко підкреслює її «невикопний» характер. Джерела утворення біомаси є надзвичайно широкими – від рослинної та тваринницької продукції до промислових і побутових біорозкладних відходів. Такий широкий підхід розширює спектр можливих шляхів переробки.

Правова база України узгоджується з європейськими принципами, зокрема з орієнтацією на декарбонізацію та використання біологічно відновлюваної сировини.

Попри те, що поняття «агробіомаса» не закріплено юридично як окремий термін, його активне використання у науковій літературі та практиці оцінювання ресурсного потенціалу є повністю обґрунтованим. З огляду на те, що законодавче визначення біомаси прямо включає «продукти, відходи та залишки сільськогосподарського виробництва», агробіомасу можна трактувати як функціонально виокремлену частину біомаси, сформовану саме у сфері аграрного виробництва та переробки.

Включення енергетичних культур до структури агробіомаси є особливо важливим, оскільки вони стали значущою складовою сучасної біоенергетики. До таких культур належать міскантус, сорго, енергетична верба, тополя, багаторічні злаки й інші рослини, вирощування яких має на меті отримання біологічної сировини з високою продуктивністю та стабільними енергетичними характеристиками. Хоча українське законодавство поки не надає цим культурам окремого правового визначення, вони повністю відповідають критеріям біомаси, оскільки є біологічно відновлюваними, органічними та придатними до енергетичного використання.

Виділення агробіомаси як окремої категорії є методично виправданим з кількох причин:

- структурна однорідність і прогнозованість утворення ресурсів аграрного походження;
- висока енергетична ефективність, особливо у випадку спеціалізованих енергетичних культур, які демонструють стабільно високі врожаї та низьку собівартість біопалива;
- логістична доступність, яка переважно зумовлена щільністю агровиробництва на локальних територіях;
- відповідність європейським класифікаціям, де аграрна та лісова біомаса традиційно розглядаються як окремі групи ресурсів.

Отже, під терміном «агробіомаса» розуміється сукупність органічних матеріалів сільськогосподарського походження – рослинних, тваринницьких, переробних та спеціально вирощених енергетичних культур, які відповідають законодавчому визначенню біомаси та можуть бути включені до енергетичного балансу регіону.

Агробіомаса як складова загальної біомаси формується безпосередньо в агропромисловому комплексі та охоплює різноманітні побічні продукти землеробства й тваринництва. Регіони з високою щільністю аграрного виробництва, зокрема Хмельницька область, володіють значними обсягами такої сировини, що робить її стратегічно важливою для регіональної енергетики [6].

Агробіомаса охоплює широкий спектр матеріалів, які різняться за походженням, властивостями та можливими напрямками використання. З огляду на це її умовно поділяють на такі групи [7]:

- рослинні рештки – побічна продукція вирощування зернових, технічних та кормових культур (солома, стебла, лушпиння, листя);
- тваринницькі відходи – продукти життєдіяльності худоби та птиці, які є цінною сировиною для анаеробного зброджування;

- відходи переробних підприємств – залишки виробництва олії, спирту, цукру, круп тощо;
- енергетичні культури – спеціально вирощувані рослини, що відзначаються високою продуктивністю (міскантус, енергетична верба, тополя) [8].

Біомаса може бути залучена до енергетичного виробництва як у формі прямого спалювання (зокрема деревини, соломи чи осадів стічних вод), так і після її перероблення на рідкі та газоподібні біопаливні продукти. До рідких форм належать, зокрема, естери ріпакової олії, спирти та рідкі продукти піролізу. Газоподібні біопаливні ресурси охоплюють біогаз, отриманий із відходів тваринництва й рослинництва, осаду стічних вод, твердих побутових відходів, а також газові суміші, сформовані внаслідок газифікації твердих видів палива.

Перетворення біомаси на інші види енергоносіїв або на кінцеві енергетичні продукти може здійснюватися шляхом застосування фізичних, хімічних або біохімічних технологій.

З огляду на специфіку походження та способи залучення, біомасу прийнято класифікувати на первинну та вторинну.

Первинна біомаса формується в результаті природних процесів життєдіяльності рослин і включає залишкові продукти (відходи) сільськогосподарського виробництва, а також урожай спеціально вирощуваних високопродуктивних енергетичних культур. До цієї категорії належать залишки рослинної маси, що утворюються безпосередньо під час вирощування та збирання врожаю, зокрема солома зернових культур, стебла кукурудзи та соняшнику.

Відходи переробки сільськогосподарської продукції (вторинні відходи) виникають у процесі первинної або глибшої обробки рослинної сировини після її збору. До найпоширеніших відносять лушпиння соняшнику, гречки та рису, кукурудзяні качани та інші подібні матеріали. У необробленому вигляді такі відходи майже не застосовують; зазвичай їх спрямовують на

виготовлення високоякісних твердих біопалив, зокрема пелет і брикетів. Для їх виготовлення може використовуватися майже будь-який різновид первинної біомаси. Завдяки застосовуваним технологічним процесам таке тверде біопаливо характеризується значно нижчим рівнем вологості, що забезпечує підвищений тепловий ефект під час спалювання. Окрім цього, вторинна біомаса має суттєво більшу об'ємну густину ($\text{кг}/\text{м}^3$), зазвичай у кілька разів вищу, ніж у необробленої сировини, що робить її значно зручнішою для транспортування, складування й використання в автоматизованих системах теплопостачання.

Усі перелічені групи мають власну специфіку формування, збирання та логістики, що впливає на можливості їх практичного застосування в енергетичній сфері [9].

Властивості агробіомаси визначають її придатність до певних енергетичних технологій. Найбільш суттєвими характеристиками є [10]:

- вологість, яка впливає на теплотворність та витрати на підготовку сировини;
- зольність, що визначає утворення шлаків та ефективність роботи обладнання;
- теплотворна здатність, яка визначає кількість енергії, що може бути отримана з одиниці маси;
- насипна щільність, що впливає на логістичні параметри;
- вміст летких речовин, від якого залежить інтенсивність і повнота згоряння.

Ці параметри варіюють залежно від виду культури, умов її вирощування, способу заготівлі та зберігання. Наприклад, солома й кукурудзяні рештки характеризуються легкозаймистістю та високим вмістом летких речовин, натомість гній і послід мають низьку теплотворність, але придатні для виробництва біогазу [11].

Насипна щільність визначається як співвідношення між масою біопаливного матеріалу та об'ємом простору, який він займає. Вона

формується під впливом фізичної форми біопалива та ступеня його технологічної обробки. Цей параметр є ключовим у розрахунку витрат на транспортування, зберігання та здійснення інших логістичних операцій.

Найнижчу насипну щільність має солома, що робить її переміщення та складування економічно менш вигідними. Саме тому солону зазвичай не спалюють у природному вигляді, а піддають пресуванню, утворюючи тюки різної маси й геометричної форми.

Для підвищення щільності твердих біопалив рослинну сировину переробляють у брикети або пелети (гранули). Наприклад, грануляція здатна збільшити насипну щільність матеріалу приблизно зі 100 кг/м^3 до 650 кг/м^3 [10]. Однак додаткова технологічна обробка зумовлює підвищення собівартості як самого біопалива, так і теплової енергії, що отримується з його використання

Вологість біомаси є показником, що кількісно визначає частку води, яку містить рослинна або інша органічна сировина. У науковій практиці розрізняють два основні види цього параметра: абсолютну та відносну вологість.

Абсолютна вологість характеризується співвідношенням маси води до маси абсолютно сухої речовини.

Відносна вологість визначається як частка маси вологи від загальної маси сировини (вологої) сировини.

Вологість біопалива не є стабільною величиною. Її значення залежить від умов заготівлі, способів транспортування, тривалості та параметрів зберігання, а також від особливостей технологічних процесів, яким піддається біомаса.

Вологість рослинної біомаси значною мірою визначається сезонними умовами. Наприклад, солома безпосередньо на полі може містити від 30 % до 60 % вологи. Оскільки для ефективного та безпечного спалювання її вологість повинна бути нижчою (переважно в межах від 20 % до 25 %), після збирання солону обов'язково підсушують. Зменшення вологості є важливим

не лише для забезпечення стабільного горіння. Низький рівень вмісту води також запобігає самонагріванню, розвитку мікробіологічних процесів і гниттю під час тривалого зберігання.

Вологість безпосередньо впливає на теплотворні властивості біопалива, адже частина енергії, що виділяється при згорянні, витрачається на випаровування води. Відповідно, підвищення її вмісту призводить до зниження теплоти згоряння, збільшення витрат палива та зменшення ефективності роботи теплогенерувальних установок [12].

Теплота згоряння визначається як кількість теплової енергії, що вивільняється під час повного окиснення певної маси палива. Цей параметр зазвичай подається в одиницях МДж/кг або кДж/кг, і його значення може розраховуватися як для вологого палива, так і для абсолютно сухої або сухої беззольної речовини. На величину теплоти згоряння безпосередньо впливають хімічний склад біопалива та співвідношення між його горючими компонентами і негорючими домішками.

Для соломи характерний вміст летких речовин на рівні приблизно від 60 % до 70 %, що дещо нижче, ніж у деревної біомаси. Хоча за сумарними енергетичними показниками солома традиційно вважається менш калорійним паливом порівняно з деревиною, її фактична теплота згоряння у робочому стані часто виявляється близькою до теплоти згоряння деревної тріски. Це пояснюється тим, що типова експлуатаційна вологість соломи зазвичай не перевищує 20 %, тоді як тріска має значно більший діапазон вологості – від 35 % до 55 %, що суттєво знижує її ефективну теплотворність [12].

Теплоту згоряння палива встановлюють експериментальним шляхом, використовуючи калориметричні методи. У теплотехніці розрізняють два основних показники – вищу та нижчу теплоту згоряння.

Вища теплота згоряння характеризує повний тепловий ефект, що виділяється при спалюванні одного кілограма біомаси за умов, коли вся водяна пара, яка утворюється в процесі горіння, переходить у рідку фазу. У

цьому випадку до загального енергетичного балансу включається і теплота, що повертається при конденсації пари, тобто прихована теплота пароутворення.

Нижча теплота згоряння відображає кількість енергії, що виділяється під час згорання одного кілограма біомаси, але без урахування енергійних затрат на випаровування води, яка утворилася внаслідок самого процесу горіння [13]. Таким чином, її значення завжди є нижчим порівняно з вищою теплотою згоряння.

Історично у теплотехнічних розрахунках існували різні підходи: в Україні енергетичні баланси традиційно будували на основі нижчої теплоти згоряння, тоді як у країнах Західної Європи та Північної Америки стандартом стало використання вищої теплоти згоряння.

Зольність. Зола становить собою негорючу мінеральну фракцію біопалива. Вона містить сполуки лужних і лужно-земельних металів, оксиди кремнію, заліза, алюмінію, а також сірку. Ці елементи природно присутні в рослинах або потрапляють до біомаси під час її збору й технологічної обробки внаслідок контакту із ґрунтом, піском чи іншими мінеральними домішками.

Показник зольності визначає частку твердого мінерального залишку, що утворюється після повного згоряння паливної речовини, і подається у відсотках. Оскільки зола не бере участі в процесі горіння, вона фактично зменшує частку корисної енергетичної складової палива. Тому чим нижчим є цей показник, тим вищою вважається якість біопалива (таблиця 1.1) [10].

Таблиця 1.1 – Порівняння різних видів палива за основними ознаками

Вид палива	Вологість, %	Нижча теплотворна здатність, МДж/кг	Насипна щільність, кг/м ³	Енергетична щільність, Гкал/м ³	Золь- ність,%
1	2	3	4	5	6
Дрова лісових порід	Повітряно- сухий стан	13,5	400-500	1,3-1,6	0,2-0,5
Тріска деревна, насіпом	40 %	10,2	240-300	0,58-0,73	0,3-1
Тріска деревна, утрамбова- на	40 %	10,2	360-390	0,88-0,95	0,3-1
Енергетичні рослини (деревина: верба, тополя)	Повітряно- сухий стан	12,5-13,5	-	-	2
Солома (великий тюк)	15	14,4	140-180	0,48-0,62	4-6,5
Солома (малий тюк)	15	14,4	90-135	0,31-0,46	4-6,5
Пелети з соломи	8-12	15,5-16	550-600	1,85-2,2	4-6,5
Пелети з деревини	8-12	17-17,5	550-680	2,2-2,6	0,2-0,5
Пелети з лушпиння соняшнику	8-12	18-18,5	630-650	2,4-2,8	4-6,5

Наявність мінеральних домішок у складі біомаси істотно ускладнює процес її спалювання, оскільки сприяє інтенсивному утворенню шлакових відкладень на колосникових решітках та інших елементах топкової камери котлів. Крім того, зола осідає на поверхнях нагрівання та в газоходах, що

погіршує теплопередачу і потребує регулярного очищення димових газів, а також організації збирання, транспортування та утилізації зольних решток. У сукупності ці фактори призводять до зниження ефективності роботи котлоагрегатів: коефіцієнт корисної дії може падати до рівня 65 %, 70 %, а на поверхнях нагрівання з часом з'являються осередки корозійного ураження [14].

Як свідчать дані таблиці 1.1, паливо, вироблене з аграрної біомаси, характеризується значно вищим рівнем зольності порівняно з деревними видами палива. У перерахунку на суху речовину цей показник коливається в межах від 4 % до 6,5 %. Важливо, що вміст мінеральних домішок практично не змінюється навіть після глибшої переробки біомаси у вигляді пелет.

Зольність біопалива суттєво впливає на вибір технологічної схеми перетворення енергії з біомаси, визначає тип і конструкцію обладнання, систему відведення золи, а також формує рівень викидів твердих частинок у димових газах. Від цього залежить і вибір технологій очистки, їхня продуктивність, а також необхідні обсяги золовідвалів для подальшого зберігання мінерального залишку.

Однією з ключових характеристик золи є її температура плавлення. У загальному вигляді процес відбувається так: після спалювання біомаси формується певна кількість зольного залишку, який за підвищених температур переходить у розплавлений стан і утворює шлакові відкладення. Накопичення шлаку на поверхнях котельного обладнання призводить до зниження теплопередачі й, відповідно, до падіння коефіцієнта корисної дії котельної установки [10].

Температура плавлення золи, що утворюється під час спалювання рослинної біомаси, зазвичай є нижчою, ніж температура плавлення зольних залишків деревного палива. Це необхідно обов'язково враховувати під час вибору технології спалювання, настроювання режимів горіння у топковому просторі та в процесі експлуатації котельних установок. Особливу увагу

цьому аспекту слід приділяти у випадку використання твердих видів біопалива, виготовлених із соломи [11].

Не менш важливим чинником є концентрація в біомасі таких хімічних елементів, як сірка, хлор і азот. Підвищений їхній вміст може спричинити корозійне пошкодження металевих поверхонь теплотехнічного обладнання, а також призводити до збільшення обсягів шкідливих викидів в атмосферне повітря. Відповідні дані наведено у таблиці 1.2 [12].

Таблиця 1.2 – Елементний склад сухої маси біопалива

Елемент, % на суху масу	Біомаса деревини		Солома	
	стовбур	кора	діапазон	середнє значення
1	2	3	4	5
C	48...50	51...66	45...47	46
H	6,0...6,5	5,9...8,4	5,8...6,0	5,9
O	38...42	24,3...40,2	39...41	40
N	0,5...2,3	0,3...0,8	0,4...0,6	0,5
S	0,05	0,05	0,1...0,13	0,08
Cl	< 0,01	0,01...0,03	0,14...0,97	0,31

Узагальнено можна зазначити, що тверда біомаса рослинного походження характеризується низкою специфічних властивостей: підвищеним вмістом вологи, потенційно значною концентрацією хлору, порівняно невисокою теплотворною здатністю та малою насипною щільністю.

Отже, енергетичні характеристики агробіомаси суттєво різняться між собою. Рослинна біомаса забезпечує ширший спектр варіантів термічної переробки й відзначається стабільно високою теплотою згоряння. Натомість тваринницькі відходи мають нижчу теплотворність, але є надзвичайно

ефективною сировиною для виробництва біогазу завдяки високому вмісту органічних речовин [15].

Окрему групу становлять енергетичні культури, що спеціально вирощуються для енергетичних цілей. Міскантус та енергетична верба демонструють вищий і стабільніший вихід біомаси з одиниці площі у порівнянні з традиційними агрокультурами, що робить їх перспективними для масштабного використання в регіонах із достатніми земельними ресурсами [6].

1.2 Підходи до оцінювання енергетичного потенціалу агробіомаси

Важливим чинником ефективного залучення біомаси до енергетичного сектору є коректне визначення її потенціалу. У науковій літературі виокремлюють три базові категорії потенціалу біомаси: теоретично можливий (теоретичний), технічно доступний (технічний) та економічно обґрунтований (економічний). Отже, загальноприйнято розрізняти кілька рівнів потенціалу агробіомаси:

- теоретичний – максимально можлива кількість біомаси незалежно від обмежень;
- технічний – частина теоретичного потенціалу, яку дозволяють використати існуючі технології;
- економічний – частина технічного потенціалу, використання якої є фінансово доцільним [17].

Теоретичний потенціал характеризує максимально можливу кількість наземної біомаси, яка за біофізичними умовами може бути спрямована на енергетичне виробництво. Для біомаси сільськогосподарського походження, енергетичних культур чи лісових ресурсів теоретичний потенціал відображає їхню граничну продуктивність за умов оптимального управління та з урахуванням природних обмежень, зумовлених температурним режимом, рівнем сонячної інсоляції та кількістю атмосферних опадів. У разі біовідходів

і залишків різного походження теоретичний потенціал дорівнює максимально можливому обсягу їх утворення.

Технічний потенціал являє собою ту частину теоретичного потенціалу біомаси, яка може бути реально залучена за існуючих технічних, інфраструктурних та технологічних умов. При його визначенні враховують також просторові обмеження, що виникають унаслідок конкуренції між альтернативними видами землекористування, а також певні екологічні та інші нетехнічні фактори, здатні впливати на доступність ресурсів [18].

Економічний потенціал становить ту частку технічного потенціалу, яка відповідає критеріям економічної обґрунтованості та може бути використана за наявних ринкових і виробничих умов [19].

Європейські фахівці у сфері біоенергетики виокремлюють два ключові підходи до визначення потенціалу біомаси: ресурсно орієнтований та орієнтований на енергетичний попит. Перший ґрунтується на аналізі доступної ресурсної бази та оцінці можливих напрямів конкурентного використання біомаси між різними споживачами, зокрема для енергетичних і неенергетичних цілей. Другий підхід передбачає порівняння ефективності технологій перетворення біомаси в енергію з альтернативними видами відновлюваних джерел та традиційними енергоносіями, орієнтуючись на найраціональніше задоволення потреб у енергії [20].

Технічний потенціал визначають на основі теоретичного, коригуючи його за допомогою коефіцієнта технічної доступності. У свою чергу, економічний потенціал отримують із технічного через застосування коефіцієнта енергетичного використання [21].

Коефіцієнт технічної доступності характеризує ту частину загального обсягу рослинних залишків, відходів та інших форм біомаси, яку можливо реально зібрати й підготувати до подальшої переробки або використання. Натомість коефіцієнт енергетичного використання визначає частку вже зібраної біомаси, що може бути безпосередньо залучена до процесів виробництва енергії.

Визначення фактичного потенціалу біомаси на певній території ґрунтується на оперативному зборі інформації шляхом опитування всіх можливих постачальників біопалива. До таких суб'єктів, що можуть забезпечувати ресурсами в межах зони заготівлі, належать: державні та приватні лісогосподарські підприємства, агрохолдинги, фермерські господарства, виробники пелет і брикетів з біомаси, деревообробні компанії, підприємства з переробки сільськогосподарської продукції, тваринницькі комплекси, а також підприємства харчової та переробної промисловості.

Оскільки державні лісогосподарські підприємства сьогодні реалізують усі види деревини через аукціонні торги, потенційним споживачам деревної біомаси для енергетичних потреб необхідно брати участь у таких торгах. Альтернативним шляхом є пряме звернення до керівництва відповідних підприємств із запитом щодо можливих обсягів біомаси, які можуть бути поставлені на енергетичний об'єкт.

На сучасному етапі більшість сільськогосподарських підприємств не демонструють значної зацікавленості у тюкуванні соломи, що зумовлено обмеженим попитом на цей вид продукції. Попри те, що окремі господарства мають власне обладнання для формування циліндричних тюків, солома здебільшого не розглядається ними як комерційний ресурс, хоча її потенційні обсяги є досить значними. Водночас, у разі появи реального покупця, який володіє власним або орендованим прес-підбирачем і звертається до агрокомпанії з наміром придбати солону у валках, існує висока ймовірність отримати позитивну відповідь від значної кількості таких підприємств.

Разом із тим під час аналізу ринку необхідно враховувати наявність конкуренції між різними споживачами біомаси в регіоні – зокрема виробниками тріски чи соломи, підприємствами, що використовують дрова (фанерні та МДФ-заводи, грибні господарства), а також іншими котельнями та теплоелектроцентралями. Важливо також брати до уваги рівень газифікації населених пунктів і пов'язаний із цим попит на альтернативні види палива [22].

Ефективність упровадження біоенергетичних проєктів, спрямованих на виробництво теплової енергії, значною мірою визначається коректним вибором типу біопалива та раціональною організацією його логістики. Підхід до добору паливної сировини має ґрунтуватися передусім на оцінці її доступності, придатності до технологічної обробки, можливості безпечного та економічно виправданого зберігання, транспортування, а також подальшого використання як енергоносія. Практика впровадження біоенергетичних ініціатив в Україні свідчить, що логістичні аспекти нерідко недооцінюються на етапі планування, що згодом зумовлює експлуатаційні труднощі.

Належна організація логістичного процесу повинна охоплювати ретельне планування, належне виконання та систематичний контроль усіх його складових.

Ефективність упровадження біоенергетичних проєктів, спрямованих на виробництво теплової енергії, значною мірою визначається обґрунтованим вибором типу біопалива та оптимально організованою логістикою його постачання. Добір паливної сировини має ґрунтуватися передусім на її доступності, придатності до технологічної обробки, можливостях належного зберігання та транспортування, а також на відповідності вимогам до використання як енергетичного ресурсу. Практичний досвід реалізації біоенергетичних проєктів в Україні свідчить про недостатню увагу до логістичних аспектів на стадії планування, що згодом призводить до експлуатаційних проблем.

Раціонально організована система логістики повинна охоплювати комплекс заходів, включно з плануванням, оперативною реалізацією та належним контролем усіх етапів постачання біопалива.

Специфіка організації логістичних процесів у сфері біопалива значною мірою визначається типом вихідної сировини – чи йдеться про аграрні залишки, зокрема солону або кукурудзяні рештки, про деревину та деревні відходи, чи про вже перероблене біопаливо у вигляді брикетів або гранул.

Формування логістичної моделі також залежить від низки зовнішніх чинників, серед яких кліматичні умови, характер ґрунтів, рельєф території, масштаб заготівлі та протяжність транспортних маршрутів.

У сукупності ці параметри визначають конфігурацію логістичної системи біомаси, що може включати етапи заготівлі, зберігання та транспортування ресурсів [6].

Успішність упровадження біоенергетичних проєктів, орієнтованих на виробництво теплової енергії, значною мірою визначається раціональним вибором виду біопалива та ефективною організацією логістичних процесів. Добір паливної сировини має ґрунтуватися на оцінці її доступності, технологічної придатності, можливостей належного зберігання та транспортування, а також відповідності вимогам до енергетичного використання. Практика реалізації біоенергетичних проєктів в Україні свідчить про те, що питання логістики часто недооцінюються на ранніх етапах планування, що зумовлює подальші експлуатаційні труднощі та підвищення витрат.

Особливості побудови логістичних схем визначаються, передусім, видом біомаси: аграрними відходами (солома, кукурудзяні рештки), деревиною та деревними відходами, або ж паливом, яке пройшло попередню обробку (брикетами, гранулами). Формування логістичного ланцюга значною мірою залежить і від зовнішніх факторів – кліматичних умов, характеристики ґрунтів, рельєфу, масштабу діяльності та відстаней транспортування. Сукупність цих чинників визначає конфігурацію логістичної системи, що зазвичай включає етапи заготівлі, зберігання й транспортування біомаси [16].

На теперішньому етапі більшість схем логістики, що застосовуються виробниками теплової енергії з біомаси, обмежуються переважно транспортною складовою. Водночас недостатній розвиток ринку біопалива спонукає споживачів до самостійної організації заготівлі та складського забезпечення, що значно розширює їхню відповідальність у межах логістичного циклу. Залучення до логістичної структури додаткових етапів –

заготівлі, первинної переробки та зберігання – дає змогу не лише мінімізувати технічні й організаційні ризики, а й суттєво знизити витрати на паливо, що прямо впливає на собівартість теплової енергії [6].

Досвід реалізації біоенергетичних проєктів підтверджує значення повного контролю над логістичним ланцюгом. У межах модернізації системи теплозабезпечення міста було реалізовано модель, що передбачає використання місцевих деревних відходів як основного палива. Логістика проєкту включає визначення ресурсної бази, налагодження заготівлі та оптимізацію транспортування, що дало змогу перейти до часткового заміщення природного газу місцевою біомасою.

Ряд підприємств в Україні вже впровадили практику самостійної заготівлі сировини – деревної тріски, соломи, відходів переробки. Деякі компанії інвестують у власне обладнання для пресування соломи або виробництва гранул та брикетів. Це дозволяє зменшити витрати на закупівлю палива, стабілізувати його доступність і підвищити енергетичну незалежність об'єктів теплопостачання [23].

Європейські біоенергетичні проєкти активно застосовують комплексні моделі логістики, що базуються на оптимізації маршрутів доставки, створенні проміжних складів, сезонній підготовці сировини та багатокомпонентних ланцюгах постачання. Дослідження останніх років демонструють, що розширені логістичні системи забезпечують зниження собівартості теплової енергії від 10 % до 25 % залежно від типу біопалива та регіону.

Таким чином, ефективність біоенергетичних проєктів значною мірою залежить від здатності підприємства не лише коректно визначити доступні види біопалива, але й сформувавши оптимальну логістичну систему. Така система повинна охоплювати:

- планування заготівлі та прогнозування обсягів,
- організацію зберігання з урахуванням сезонності,
- вибір оптимальних маршрутів і способів транспортування,

- контроль витрат на всіх стадіях.

Застосування комплексних логістичних моделей дозволяє мінімізувати ризики, забезпечити стабільність постачання та зменшити фінансове навантаження на виробництво теплової енергії, що є необхідною умовою сталого розвитку біоенергетичної галузі.

Для оцінювання ресурсної бази агробіомаси застосовують кілька методичних підходів, серед яких найбільш поширені [15]:

- ресурсний, що базується на оцінці врожайності культур та обсягу побічної продукції;
- балансовий, який співвідносить обсяги утворення та фактичного використання;
- екологічний, що враховує необхідність збереження родючості ґрунтів та уникнення деградації земель;
- технологічний, орієнтований на можливості переробного обладнання.

У країнах ЄС застосування таких підходів закріплене на рівні директив RED II/III, що встановлюють стандарти сталості для всіх видів біомаси [24].

Оцінювання енергетичного потенціалу агробіомаси зазвичай ґрунтується на таких ключових принципах:

- застосування коефіцієнта виходу відходів RPR;
- використання нижчої теплоти згоряння (LHV) як базової характеристики;
- коригування результатів коефіцієнтом доступності;
- урахування технологічних втрат;
- просторовий аналіз із використанням ГІС-технологій [24].

Новітньою тенденцією є використання алгоритмів машинного навчання, які дозволяють враховувати значний обсяг просторових і кліматичних даних та формувати точніші прогнози щодо продуктивності агробіомаси [25].

На результати оцінювання впливають:

- варіативність кліматичних умов;
- різниця у технологіях вирощування;
- специфіка підготовки та зберігання сировини;
- нерівномірність статистичних даних;
- логістичні обмеження регіонів.

У комплексі ці чинники обумовлюють необхідність коригування базових оцінок залежно від регіональної специфіки.

2 АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ АГРАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1 Світовий та український досвід використання агробіомаси

Європейські держави, зокрема Данія, Німеччина, Швеція та Австрія, демонструють ефективні моделі інтеграції агробіомаси у локальні енергетичні системи, що розглядаються як еталонні приклади для країн, які розвивають власну біоенергетику. У цих країнах агробіомаса розглядається не як побічний продукт сільськогосподарської діяльності, а як стратегічний енергетичний ресурс, здатний зміцнювати енергетичну безпеку, зменшувати залежність від імпорту викопних енергоносіїв та сприяти екологічній модернізації економіки.

Одним із найпоширеніших напрямів використання агробіомаси є когенераційні установки, що одночасно виробляють теплову та електричну енергію. У Німеччині такі установки часто працюють на пресованій рослинній біомасі (соломі та кукурудзяних рештках), що дає змогу отримувати стабільну генерацію з відносно низькою собівартістю. Дослідження, проведені в європейських енергетичних центрах, свідчать, що застосування когенераційних технологій підвищує загальний ККД використання агробіомаси від 75 % до 85 %, що суттєво перевищує ефективність роздільного теплогенерування [26].

Особливо показовим є досвід Данії, де системи централізованого теплопостачання на основі соломи та інших видів рослинної агробіомаси забезпечують теплом значну частку сільських громад. Данська модель передбачає повну інтеграцію агровиробників у енергетичний ланцюг: фермери виступають не лише постачальниками біомаси, а й співвласниками теплових кооперативів. Це сприяє розвитку локальних економік та забезпечує високу соціальну прийнятність проєктів [27].

У Швеції та Австрії значного поширення набули біогазові комплекси, які працюють на тваринній біомасі та змішаних субстратах. Високий рівень технологічної автоматизації та оптимізовані алгоритми ферментації дозволяють досягати стабільного виходу біогазу навіть за використання високовологих субстратів, таких як гній ВРХ або пташиний послід. Європейські моделі підкреслюють важливість коферментації – змішування тваринних відходів із рослинними рештками або силосом, що збільшує вихід метану та покращує стабільність роботи біогазових установок [28].

Досвід країн ЄС демонструє, що саме комплексний підхід забезпечує найвищу ефективність регіональних енергетичних систем. У більшості держав-членів ЄС агробіомаса інтегрується у структуру розподіленої генерації, де невеликі або середні об'єкти забезпечують потреби окремих громад, промислових підприємств або агрокластерів. Це дає змогу досягти високого рівня енергетичної автономії та сприяє виконанню низьковуглецевих стратегій, визначених європейськими планами «Green Deal» і «Fit for 55».

Таким чином, практичний досвід Данії, Німеччини, Швеції та Австрії підтверджує, що агробіомаса є одним із найбільш гнучких та економічно ефективних відновлюваних ресурсів, придатних для інтеграції в регіональні енергетичні системи України. Механізми, використані в цих країнах, можуть бути адаптовані до умов Хмельницької області, яка має значну сировинну базу рослинної та тваринної біомаси та перспективи вирощування енергетичних культур.

Значний ефект у ЄС дають програми субсидування, «зелені» тарифи та заходи, спрямовані на стимулювання інвестицій у біоенергетичну інфраструктуру.

Україна має вагомий ресурс агробіомаси, однак її енергетичне використання все ще не досягає потенційних масштабів. Найбільш активно розвиваються напрямки твердопаливної енергетики та виробництва біогазу на базі агрокомпаній [15].

Разом із тим, аналіз наявних тенденцій засвідчує, що вітчизняний сектор біоенергетики перебуває на перехідному етапі. Попри суттєві природні передумови – великі площі сільськогосподарських угідь, розвинене рослинництво й значне поголів'я тварин – рівень технологічного залучення агробіомаси залишається нерівномірним. Більшість реалізованих проєктів зосереджені в окремих кластерах, переважно у великих агрохолдингах, тоді як малі та середні виробники часто не мають достатніх фінансових та організаційних можливостей для впровадження біоенергетичних технологій.

Додатковим стримувальним фактором є недостатній розвиток логістичної інфраструктури, що особливо актуально для рослинної біомаси: збирання, транспортування та зберігання значних обсягів соломи чи кукурудзяних решток потребує спеціалізованої техніки й інвестицій у регіональні логістичні хаби. У сегменті тваринної біомаси ключовим бар'єром є високі капітальні витрати на будівництво біогазових комплексів і потреба в кваліфікованому персоналі для їхнього обслуговування.

Однак, попри ці обмеження, в Україні спостерігається стійке зростання інтересу до проєктів у сфері агробіоенергетики. Значна частина аграрних підприємств уже розглядає можливість впровадження когенераційних систем на рослинній сировині або створення біогазових установок на відходах тваринництва. Крім того, у кількох регіонах, зокрема у західній Україні, почали з'являтися перші промислові плантації енергетичних культур, що свідчить про формування нового напрямку ресурсної бази.

З огляду на успішний європейський досвід, ефективний розвиток цього сектору в Україні потребує системного підходу: вдосконалення державної підтримки, забезпечення доступу до фінансових інструментів, формування сучасної логістичної інфраструктури та підвищення рівня технологічної готовності агровиробників. Саме поєднання цих чинників може забезпечити зростання частки агробіомаси в енергетичному балансі країни та розкрити її повний потенціал як стратегічного відновлюваного ресурсу.

Нещодавні тенденції свідчать про активізацію проєктів виробництва біометану з перспективою експорту до ЄС [29].

Українська нормативна база у сфері біоенергетики поступово адаптується до вимог європейського законодавства, у тому числі положень RED II і RED III, які визначають критерії сталості біомаси та обмеження щодо її використання [30]. Окрему увагу приділено питанням екологічної безпеки, що відображено в аналітичних документах WWF [31].

Сучасна політика Європейського Союзу щодо імпорту відновлюваних газів передбачає пріоритет саме для біометану, який відповідає чітко встановленим критеріям походження, простежуваності та вуглецевої нейтральності. Це створює нові можливості для України, яка володіє значним потенціалом аграрних ресурсів та зростаючим інтересом інвесторів до ринку біометану. Багато українських виробників розглядають біометан як більш економічно вигідний варіант порівняно з традиційним виробництвом біогазу, оскільки наявність доступу до єдиного європейського ринку збільшує шанси на окупність проєктів.

Адаптація українського законодавства до вимог RED II/III має стратегічне значення. Ці документи висувають вимоги щодо ефективного використання земельних ресурсів, зниження вуглецевого сліду, мінімізації негативного впливу на біорізноманіття, а також впровадження системи сертифікації сталості біомаси. У цьому контексті Україна поступово створює механізми для контролю за походженням агробіомаси, обліком викидів парникових газів та забезпеченням прозорості на всіх етапах виробничого ланцюга.

Важливо, що питання екологічної безпеки дедалі частіше стають предметом досліджень і рекомендацій від міжнародних організацій. WWF у своїх аналітичних оглядах підкреслює необхідність мінімізації тиску на природні екосистеми під час залучення біомаси до енергетичних процесів, особливо у випадках, коли йдеться про масштабне вилучення рослинних решток або розширення площ під енергетичні культури [31; 32].

Наголошується, що застосування агробіомаси має бути збалансованим і не створювати ризиків виснаження ґрунтів, деградації земель чи витіснення харчового виробництва.

У цьому контексті для України важливо забезпечити інтеграцію екологічних стандартів у процеси планування та розвитку біоенергетичних проєктів. Йдеться про необхідність проведення оцінок впливу на довкілля, визначення допустимих норм вилучення рослинних решток, моніторинг стану ґрунтів та впровадження практик сталого землеробства. Належна увага до цих питань не лише відповідає вимогам європейських директив, але й сприяє підвищенню довіри до українського біоенергетичного сектору з боку міжнародних партнерів та інвесторів.

Загалом, поєднання тенденцій розвитку біометанового сектору, гармонізації законодавства з європейськими нормами та зростаючої уваги до екологічної сталості формує сприятливі передумови для розширення енергетичного використання агробіомаси в Україні. Це відкриває шлях до створення конкурентоспроможного ринку відновлюваних газів, підвищення енергетичної безпеки та інтеграції України до європейського енергетичного простору.

На розвиток біоенергетики в Україні негативно впливають недосконалість логістики, сезонність утворення агробіомаси, недостатній рівень інфраструктури зберігання та транспортної доступності сировини, а також обмежені інвестиційні механізми [15; 29]. Ці чинники формують комплекс системних бар'єрів, що істотно сповільнюють масштабування проєктів у сфері агробіоенергетики та стримують залучення потенційних виробників до ринку.

Однією з ключових проблем є сезонність утворення рослинної біомаси, оскільки основні обсяги побічної продукції формуються впродовж декількох літньо-осінніх місяців. За відсутності спеціалізованих сховищ та логістичних центрів великі масиви біомаси не можуть бути накопичені та використані протягом року. Це призводить до нерівномірного забезпечення сировиною,

зростання втрат під час зберігання та підвищення собівартості кінцевої енергії.

Не менш серйозною проблемою є логістичні обмеження, пов'язані з транспортуванням низькоенергетичної та об'ємної сировини на значні відстані. В умовах відсутності локальних пунктів пресування, подрібнення або пелетування агробіомаси, витрати на логістику часто перевищують економічно виправданий рівень. Це особливо характерно для соломи та кукурудзяних решток, які потребують або ущільнення, або переробки безпосередньо поблизу місця утворення.

Крім того, недостатній доступ до фінансування та відсутність довгострокових гарантій для інвесторів обмежують можливість впровадження сучасних технологій переробки біомаси. Значна частина аграріїв, особливо малих та середніх господарств, не має можливості залучити кредити на будівництво біогазових установок чи твердопаливних котелень, а також не володіє необхідною технічною експертизою для їх експлуатації.

Також відчутними залишаються регуляторні та адміністративні бар'єри, пов'язані з процедурою підключення енергетичних об'єктів до мереж, отримання дозволів, проведення екологічних оцінок та узгодження проєктів на місцевому рівні. Нерідко саме складність нормативних процедур стає причиною затримки впровадження або повного згорання ініціатив.

У сукупності ці фактори створюють ситуацію, коли значний природний та економічний потенціал агробіомаси в Україні використовується лише частково. Подолання цих обмежень можливе шляхом формування спеціалізованих агробіоенергетичних кластерів, розвитку логістичних хабів, удосконалення державної підтримки та залучення приватного капіталу через фінансові стимули й механізми державно-приватного партнерства.

Глобальні тренди свідчать про активний розвиток виробництва біометану, збільшення кількості біогазових установок та поширення циркулярної економіки, у межах якої агровідходи повністю повертаються в

економічний цикл [33]. Для України перспективними напрямами є розвиток локальних енергетичних кластерів, використання нових технологій термічної переробки та масштабування виробництва біопалива [31].

Ці тенденції формують нову парадигму біоенергетики, у межах якої аграрний сектор перетворюється з постачальника сировини на активного учасника енергетичних процесів. У країнах ЄС біометан дедалі частіше розглядається як стратегічний відновлюваний газ, що здатний замінювати природний газ у транспортуванні, промисловості та комунальному секторі. Розвиток інфраструктури для очищення, компримування та інжекції біометану в газотранспортні мережі створює умови для його транскордонної торгівлі, що відкриває нові економічні можливості для виробників [34].

Зростання інтересу до циркулярної економіки є не випадковим: вона забезпечує мінімізацію відходів, зменшення навантаження на довкілля та підвищення енергоефективності аграрних систем. У моделі замкненого циклу рослинні та тваринницькі відходи перетворюються на біогаз, біометан, тверде паливо або органічні добрива, що дозволяє одночасно розв'язувати енергетичні, екологічні та агрономічні завдання. Ефективність циркулярного підходу підтверджують як європейські, так і світові приклади – від німецьких агроенергетичних кооперативів до датських кластерів повного енерго- та добривного циклу [24].

Для України одним із найбільш перспективних напрямів є створення локальних енергетичних кластерів, які об'єднуюватимуть аграрних виробників, переробні підприємства та енергетичні компанії. Така модель дозволить скоротити логістичні витрати, підвищити ефективність використання агробіомаси та мінімізувати технічні втрати. Кластери можуть функціонувати на основі біогазових установок, когенераційних систем, пунктів пресування соломи чи комбінованих енергетичних майданчиків, що використовують різні види сировини.

Окремої уваги потребує розвиток інноваційних технологій термічної переробки – газифікації, піролізу та високотемпературного спалювання з

рекуперацією тепла. На відміну від традиційних котелень, ці технології забезпечують високий рівень енергетичної конверсії та дозволяють використовувати навіть високовологу або неоднорідну біомасу. У перспективі саме газифікація може створити основу для виробництва синтетичних газів, рідких біопалив та біовугілля, що відкриває додаткові ринки збуту.

Масштабування виробництва рідкого та твердого біопалива – ще один вектор розвитку. Зокрема, перспективними є пелетування нетрадиційних видів агробіомаси, виробництво біоетанолу з побічної продукції або екстракція цінних компонентів для біохімічної промисловості. Наявність значної сировинної бази у Хмельницькій області робить цей напрям надзвичайно привабливим для інвестицій і створення нових виробничих ланцюгів.

Узагальнюючи, глобальні тенденції підкреслюють, що майбутнє агробіоенергетики лежить у площині технологічної диверсифікації, сталого управління ресурсами та інтеграції в міжнародні енергетичні ринки. Для України це означає необхідність комплексного розвитку інфраструктури, підвищення технологічної готовності аграрного сектору та активної підтримки інновацій, здатних забезпечити конкурентоспроможність на європейському ринку відновлюваної енергії.

2.2 Аналіз енергетичного ресурсу відходів рослинництва і тваринництва в системі аграрного виробництва

Тенденції світового економічного та промислового розвитку зумовлюють необхідність упровадження заходів, спрямованих на диверсифікацію енергетичних ресурсів України. В умовах постійного зростання вартості паливно-енергетичних ресурсів особливого значення набуває максимально ефективне використання як енергозберігальних технологій, так і електричної та теплової енергії, виробленої з відновлюваних

джерел. Для України одним із ключових стратегічних напрямів виступає розвиток біоенергетики.

Сучасні тенденції в Європейському Союзі свідчать, що комплексне використання агробіомаси є одним із найефективніших шляхів побудови стійких регіональних енергетичних систем. Згідно зі статистичним звітом Bioenergy Europe за 2023 рік, тверда біомаса залишається основним джерелом біоенергії, досягаючи майже 70 % від загальної внутрішньої споживаної біомаси в ЄС [35].

Такий підхід дає змогу забезпечити енергетичну автономію на рівні малих і середніх громад: місцеві котельні на твердому паливі, біогазові станції для підприємств або сільських об'єднань, комбіновані когенераційні установки – усе це дозволяє максимально адаптувати доступні ресурси до потреб конкретної території. Аналітичний звіт IEA Bioenergy за 2024 р. зазначає, що біомаса (тверда, рідка або газоподібна) забезпечує близько 60 % від загального обсягу відновлюваної енергії в ЄС, що підкреслює вагомість агробіомаси як локального, недорогого імпортозалежного ресурсу [36].

Однією з переваг такої системи є зменшення залежності від імпортованих викопних палив і більша енергетична безпека. Адже біомаса – це внутрішній ресурс, часто вже доступний на агропідприємствах або у форматі агровідходів. Згідно з оглядом IEA Bioenergy, країни ЄС, що активно використовують біомасу, мають нижчу залежність від імпорту в порівнянні з тими, хто орієнтується на газ або нафту [24].

Економічна ефективність також підтверджується тим, що за умов стабільного постачання сировини, локальної переробки та підтримки «зелених» тарифів або субсидій, біоенергетичні проєкти стають конкурентоспроможними. Сучасні котельні на біомасі (з відновленням тепла) мають потенціал стати економічно вигідними навіть у довгостроковій перспективі, особливо якщо комбінувати різні види біомаси. Програми субсидій, «зелені» тарифи, стимули інвесторам – все це стимулює розвиток біоенергетичних ринків. Якщо біомаса сертифікована як стійка, а її

походження і використання контролюється, така модель стає прийнятною і ефективною.

Для України, з її значною сировинною базою агровідходів та потенційними площами під енергетичні культури, адаптація такого європейського досвіду може стати ефективним шляхом розвитку. Особливо доцільним є створення локальних або регіональних енергетичних кластерів, де агропідприємства, фермерські господарства та невеликі переробні підприємства об'єднують зусилля для виробництва тепла, електроенергії та біогазу. Це не лише підвищить енергетичну незалежність громад, а й створить нові робочі місця в сільській місцевості. Хмельницька область має значні посівні площі. За останні роки загальна посівна площа по всіх категоріях господарств становила приблизно 1,197 млн гектарів. У структурі посівів переважають зернові культури (понад 615 тис. га) та технічні культури (понад 400 тис. га), що створює сприятливі умови для утворення значних обсягів побічної продукції рослинництва: соломи, стебел, обгорток та лушпиння [37].

Останні статистичні огляди свідчать, що Хмельниччина стабільно входить до регіонів з найвищою в Україні врожайністю зернових культур, що, відповідно, збільшує потенціал формування агробіомаси як енергетичного ресурсу [38].

З огляду на таку продуктивність, можна очікувати значний обсяг побічної продукції після збирання врожаю, яка може бути використана як тверда біомаса в енергетичних цілях.

За аналітичними даними Київської школи економіки, у 2025 році Хмельницька область входить до переліку регіонів із найбільшим поголів'ям великої рогатої худоби в Україні [39]. Цей факт свідчить про суттєвий потенціал тваринницьких відходів (гною, посліду, підстилкових матеріалів) для використання в анаеробному зброджуванні та виробництві біогазу або біометану. Це відкриває можливості впровадження біогазових технологій на

фермах, тваринницьких комплексах та агровиробничих підприємствах області.

Поєднання значних посівних площ, високої продуктивності рослинництва та наявності тваринницьких комплексів формує унікальну передумову для створення локальних біоенергетичних кластерів на території області.

Подібні моделі активно застосовуються у країнах ЄС, де агровиробники об'єднують ресурси та інфраструктуру для виробництва тепла, електроенергії та біогазу, забезпечуючи енергетичну автономію громад [40].

Для Хмельницької області найбільший потенціал мають:

- використання соломи, кукурудзяних решток, лушпиння соняшнику, відходів ріпаку як твердої біомаси;
- виробництво біогазу на основі гною, посліду та компостованих органічних залишків;
- коферментація рослинних і тваринних відходів, що дає змогу суттєво підвищити вихід метану.

Такі технології дозволяють не лише ефективно використовувати локальні ресурси, а й значно підвищити рівень енергетичної незалежності фермерських господарств, підприємств та громад.

Розвиток біоенергетики неможливий без урахування екологічних та технологічних чинників. Вилучення надмірної кількості рослинних решток може призвести до зниження вмісту органічної речовини в ґрунтах та підвищення ризику ерозії, що підтверджується аналітичними висновками ЄС щодо сталого використання біомаси [41]. Проблемою також є логістика, адже агровідходи характеризуються значним об'ємом та низькою питомою щільністю. Для їх ефективного використання необхідне створення пунктів пресування, пелетування або складів тривалого зберігання.

Біогазові та котельні установки вимагають великої початкової інвестиції та технічної підготовки, а також підтримки на інституційному рівні, включно з грантовими або кредитними механізмами [16].

2.3 Аналіз енергетичного ресурсу енергетичних культур в системі аграрного виробництва

Енергетичні культури посідають важливе місце в сучасних біоенергетичних системах завдяки здатності забезпечувати стабільний та прогнозований вихід біомаси, що вигідно відрізняє їх від побічної продукції рослинництва та тваринництва. У країнах Європейського Союзу вирощування енергетичних рослин розглядається як стратегічний напрям формування низьковуглецевої економіки та енергетичної незалежності аграрного сектору [42; 40]. Для України, зокрема Хмельницької області, енергетичні культури відкривають можливості створення нових стабільних джерел біомаси, що доповнюють потенціал рослинних і тваринних відходів.

До найбільш перспективних енергетичних культур належать міскантус (*Miscanthus giganteus*), свічграс (*Panicum virgatum*), енергетична верба (*Salix viminalis* L.) та тополя (*Populus spp.*). Міскантус демонструє урожайність сухої маси на рівні від 15 т/га до 25 т/га, що підтверджено в аналітичних звітах Bioenergy Europe [42]. Верба та тополя за сприятливих умов забезпечують від 8 т/га до 14 т/га біомаси, а їхня теплота згоряння сягає від 17 МДж/кг до 19 МДж/кг, що є конкурентним показником для твердого біопалива [40].

Енергетичні культури характеризуються стабільним багаторічним циклом. Міскантус та енергетична верба можуть використовуватися від 15 років до 20 років без поновлення плантацій [42], а це забезпечує довгострокову прогнозованість сировини для біоенергетичних підприємств.

Це також дозволяє зменшувати витрати на підготовку ґрунту й закладення плантацій, що підвищує економічну ефективність агровиробництва.

У системі аграрного виробництва енергетичні культури виконують важливі екологічні функції. Вони здатні покращувати структуру ґрунту, стримувати ерозійні процеси та виконувати роль природного фільтра, зменшуючи втрати поживних речовин із ґрунтовими водами. У звіті Material Economics та Climate-KIC зазначається, що багаторічні енергетичні культури є одним із найбільш ефективних природних механізмів акумуляції вуглецю в ґрунті, що робить їх перспективними у контексті виконання кліматичних цілей ЄС [41].

Для Хмельницької області енергетичні культури можуть бути розміщені на малопродуктивних землях, ділянках із ризиком ерозії або на територіях, що тривалий час не використовувалися в інтенсивному виробництві. Вирощування енергокультур на таких площах дозволяє збільшити загальний обсяг біомаси, не конкуруючи з виробництвом продовольських культур [40].

З економічної точки зору, впровадження енергетичних культур здатне забезпечити високу додану вартість у регіонах із низькою рентабельністю традиційних культур. Виробництво пелет, брикетів або використання біомаси в когенераційних системах може формувати основу локальних енергетичних кластерів [43].

З огляду на те, що рослинні та тваринні відходи мають сезонний характер, впровадження енергетичних культур дозволяє сформувати збалансований трикомпонентний ресурсний комплекс:

- рослинні відходи (соллома, стебла кукурудзи тощо);
- тваринні відходи (гній, послід);
- багаторічні енергетичні культури (міскантус, верба).

Такий підхід мінімізує сезонність постачання біомаси та сприяє безперервній роботі енергетичних підприємств протягом року, що повністю відповідає рекомендаціям Європейської біоенергетичної платформи [40; 42].

3 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ АГРОБІОМАСИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ В ХМЕЛЬНИЦЬКІЙ ОБЛАСТІ

Хмельницька область належить до регіонів із високою часткою орних земель та сприятливим поєднанням кліматичних і ґрунтових умов. Територія розташована у межах Лісостепу, де переважають чорноземи та сірі лісові ґрунти, що забезпечують високі врожаї основних сільськогосподарських культур [44; 45].

Помірно континентальний клімат, достатня кількість опадів (від 500 мм/рік до 600 мм/рік) та тривалий період активної вегетації створюють природні передумови для розвитку як рослинництва, так і тваринництва. Ці фактори безпосередньо впливають на обсяги утворення агробіомаси та визначають її стабільність у часовому вимірі.

Структура аграрного виробництва області є досить збалансованою: розвинуте землеробство доповнюється інтенсивним тваринництвом, а наявність переробних підприємств формує потоки вторинної біомаси, які можуть бути ефективно залучені до енергетичного використання [46]. Таким чином, саме комплексність аграрної системи регіону створює підґрунтя для формування значного потенціалу агробіомаси

3.1 Оцінка енергетичного потенціалу відходів рослинництва

Україна характеризується високим рівнем розвитку інтенсивного сільського господарства, у структурі якого домінують дві ключові галузі – рослинництво та тваринництво. Формування спеціалізації та територіальної організації аграрного виробництва значною мірою зумовлюється впливом природних чинників, серед яких вирішальне значення мають кліматичні умови, особливості ґрунтового покриву та забезпеченість водними

ресурсами.

Сільськогосподарське виробництво є одним із головних джерел утворення різноманітних органічних відходів, що становлять собою біомасу, придатну для подальшого енергетичного використання. До категорії аграрних відходів належать:

- залишкові частини сільськогосподарських культур, такі як стебла, лушпиння та інші фрагменти рослин;
- рослинна продукція, пошкоджена під час вирощування, збирання або зберігання.

Відходи поділяють на два основні типи: первинні, що формуються безпосередньо в процесі збирання врожаю відповідних культур, та вторинні, які виникають у ході переробки продукції на спеціалізованих підприємствах.

Базою для оцінювання енергетичного потенціалу первинних аграрних відходів слугують статистичні дані щодо валового збору сільськогосподарських культур [47]. У межах оцінювання зернові культури класифікуються на пшеницю, ячмінь та інші зернові.

Оцінювання технічно доступного теплоенергетичного потенціалу соломи зернових, технічних і круп'яних культур здійснюється з урахуванням низки вихідних припущень [48]:

- розрахунки проводяться для найбільш розповсюджених сільськогосподарських культур, зокрема пшениці, інших зернових (жита, ячменю, вівса, проса), кукурудзи на зерно, технічних культур (сої, соняшнику), круп'яних (гречки, рису) та зернобобових (гороху);
- уся отримана солома тюкується та використовується шляхом спалювання у котельних або теплогенеруючих установках, тобто передбачається виробництво виключно теплової енергії для потреб системи тепlopостачання.

Такий підхід дозволяє сформувавши консервативну та водночас реалістичну оцінку технічно-досяжного потенціалу аграрної біомаси для теплової енергетики.

Обсяг утворення відходів визначається з використанням коефіцієнта відходів, значення якого відрізняється залежно від типу сільськогосподарської культури.

Коефіцієнт відходів (K_r) трактується як співвідношення між масою сухих наземних рослинних залишків та масою врожаю, зібраного за умов природної вологості. Для зернових культур такими залишками виступає солома, тоді як основною продукцією є зерно.

Рекомендовані значення коефіцієнтів відходів, які ґрунтуються на даних Української академії аграрних наук і літературних джерелах [47], наведені у таблиці 3.1 та використовуються для розрахунку теоретичного потенціалу агробіомаси.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів виходу соломи

Сільськогосподарська культура	K_r – коефіцієнт виходу соломи
Пшениця	1,0
Ячмінь	0,8
Інші зернові	1,0
Ріпак	2,0
Кукурудза на зерно	1,3
Соя	1,4
Соняшник	1,9

Отримані в описаний спосіб обсяги відходів, сформовані під час вирощування пшениці, ячменю, інших зернових культур, ріпаку, сої, соняшнику та кукурудзи на зерно, відображають теоретично можливий потенціал агробіомаси, що може бути використана для виробництва енергії. Подальше уточнення цього показника здійснюється шляхом визначення технічно досяжного та економічно доцільного потенціалів, які розраховуються з використанням відповідних коригувальних коефіцієнтів – коефіцієнта технічної доступності та коефіцієнта енергетичного

використання.

Узагальнений вираз для розрахунку економічного потенціалу відходів певної сільськогосподарської культури має такий вигляд:

$$P_e = C_r \cdot K_r \cdot K_t \cdot K_e \cdot K_{ce}, \quad (3.1)$$

де P_e – економічно доцільний потенціал, тис. т у. п.;

C_r – валовий збір сільськогосподарської культури, тис. т;

K_r – коефіцієнт відходів, що є різним для кожного виду рослин, при аналізі використовувалися коефіцієнти, наведені в обраній методиці розрахунку;

K_t – коефіцієнт технічної доступності відходів сільськогосподарських рослин, який характеризує кількість соломи, що може бути отримана при існуючій технології збирання сільськогосподарських культур. Коефіцієнт технічної досяжності для всіх видів сільськогосподарських рослин може бути прийнятий рівним 0,8 [48];

K_e – коефіцієнт енергетичного використання відходів, що характеризує частину відходів (соломи), яку можливо використати з метою отримання енергії. Приймається згідно даних, наведених у роботах [49];

K_{ce} – коефіцієнт перерахунку в умовне паливо.

Якщо в формулі 3.1 не враховувати коефіцієнт технічної доступності K_t і коефіцієнт енергетичного використання K_e , то матимемо теоретично можливий потенціал біомаси:

$$P_e = C_r \cdot K_r \cdot K_{ce}, \quad (3.2)$$

Якщо не враховувати тільки коефіцієнт енергетичного використання, маємо технічно доступний потенціал:

$$P_e = C_r \cdot K_r \cdot K_t \cdot K_{ce}, \quad (3.3)$$

У разі, якщо не застосовувати коефіцієнт перерахунку в умовне паливо (K_{se}), усі види потенціалу біомаси визначатимуться в натуральних одиницях – у тисячах тонн. Такий підхід дає можливість оцінити фізичні обсяги ресурсів без приведення їх до єдиної енергетичної бази.

Окрім первинних рослинних залишків, у сільському господарстві формуються також вторинні відходи, що виникають на підприємствах, які здійснюють переробку сільськогосподарської продукції. Як правило, їх кількість є меншою, ніж обсяг первинних відходів, однак ці ресурси також мають певний енергетичний потенціал і можуть розглядатися як додаткове джерело біомаси.

Серед вторинних відходів сільського господарства найбільше практичне значення має лушпиння соняшникового насіння. Розрахунок технічно досяжного теплоенергетичного потенціалу цього виду біомаси здійснюється за умови дотримання кількох ключових припущень:

- лушпиння соняшника використовується виключно для виробництва теплоти у системах тепlopостачання;
- на підприємствах олійно-жирової промисловості України переробляється близько 70 % усього валового обсягу соняшникового насіння.

Такі вихідні умови дають змогу сформувати реалістичну оцінку доступного ресурсу лушпиння, що може бути залучений до енергетичної генерації. З урахуванням зазначеного, технічно досяжний теплоенергетичний потенціал лушпиння соняшника розраховується за наступною формулою:

$$E = (M_{\text{соняш}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Q_{\text{лушп}}) / Q_{\text{y.п.}} \cdot 1000, \text{ (кГ/Т)} \quad (3.4)$$

де $M_{\text{соняш}}$ – валовий збір насіння соняшника. Визначається за статистичними даними;

K_1 – коефіцієнт, що визначає кількість лушпиння, яку можливо отримати з 1 тони насіння соняшника, даний коефіцієнт становить 15 % або 0,15;

K_2 – коефіцієнт, що врахує частку соняшникового насіння, яка переробляється на олійно-жирових комбінатах України. Дорівнює 0,7. По своїй суті є коефіцієнтом технічної доступності (без його врахування маємо теоретичний потенціал лушпиння соняшника);

Q_g лушп. – теплота згоряння лушпиння соняшника. Приймається рівною 16 МДж/кг (3850 ккал/кг), згідно [48];

Q_g у.п. – теплота згоряння умовного палива. Приймається рівною 29,3 МДж/кг (7000 ккал/кг), згідно [48].

У випадку лушпиння соняшника економічний потенціал дорівнює технічному, оскільки коефіцієнт енергетичного використання (КЕВ) приймається рівним 1. Це означає, що для виробництва енергії може бути раціонально залучено весь обсяг утворених відходів без обмежень.

Для подальших енергетичних розрахунків отриману величину потенціалу переводять в умовне паливо шляхом множення на коефіцієнт перерахунку в умовне паливо, що забезпечує можливість порівняння біомаси з традиційними видами палива за теплотворною здатністю.

Відповідно до статистичних даних за 2024 рік, валовий збір основних сільськогосподарських культур у Хмельницькій області становив: пшениці – 1466,2 тис. т, ячменю – 460,34 тис. т, інших зернових – 56,13 тис. т, ріпаку – 314,98 тис. т, кукурудзи на зерно – 2002,66 тис. т, сої – 844,98 тис. т, соняшника – 377,21 тис. т [50].

Для визначення обсягів утворення первинних відходів використовуються рекомендовані коефіцієнти виходу соломи та інших рослинних залишків, що ґрунтуються на дослідженнях Української академії аграрних наук і літературних джерелах [47].

Таким чином, для кожної культури кількість відходів визначається як добуток величини валового збору та відповідного коефіцієнта утворення соломи чи іншої побічної продукції. Такий підхід дозволяє отримати базову оцінку теоретичного потенціалу агробіомаси в регіоні.

Технічно досяжний та економічно доцільний потенціали аграрної

біомаси визначаються шляхом застосування відповідних коригувальних коефіцієнтів – коефіцієнта технічної доступності (КТД) та коефіцієнта енергетичного використання. Рекомендовані значення КТД для соломи ріпаку, відходів кукурудзи на зерно та соняшнику ґрунтуються на даних, представлених у дослідженні [48].

Разом із тим величина цього коефіцієнта може бути уточнена для кожного окремого району з урахуванням актуальної інформації щодо фактичної висоти рослин, особливостей їх збирання, а також наявності чи відсутності технічних засобів для тюкування під час жнив. Такий підхід забезпечує більш точну оцінку доступної для заготівлі біомаси та дозволяє адаптувати методику розрахунків до конкретних виробничих умов.

Обсяги надлишкової соломи зернових культур, придатної для енергетичного використання, істотно варіюють залежно від регіону України, а подекуди й між окремими районами однієї області. Відповідно, значно змінюється й коефіцієнт енергетичного використання соломи (КЕВ), який є індикатором доступності цієї біомаси для виробництва енергії. Основним чинником, що визначає величину КЕВ, виступає потреба сільського господарства у соломі, насамперед на забезпечення потреб тваринництва. Найбільшу частку споживання становить використання соломи як підстилки та грубого корму для великої рогатої худоби та свиней.

Методика розрахунку КЕВ передбачає віднімання від фактичного обсягу зібраної соломи зернових культур тієї кількості, яка необхідна для утримання поголів'я ВРХ (0,9 т соломи на голову на рік) та свиней (1 кг соломи на голову на добу). Отриманий залишок співвідносять із загальним обсягом фактичного збору соломи, що і дозволяє визначити величину коефіцієнта енергетичного використання [51].

Для формування консервативної оцінки біоенергетичного потенціалу приймається припущення, що лише половина обсягу соломи, не задіяної у тваринництві, може бути реально використана для виробництва енергії. Відповідно, розрахований зазначеним способом КЕВ додатково ділять на

два.

Приклад розрахунку КЕВ для Хмельницької області.

У 2024 році в регіоні було зібрано 1982,67 тис. т соломи, отриманої від вирощування пшениці, ячменю та інших зернових культур. Поголів'я великої рогатої худоби на цей період становило 212,4 тис. голів, а поголів'я свиней – 377,5 тис. голів [52].

Для забезпечення потреб тваринництва у підстилці та кормових добавках розраховують необхідну кількість соломи:

Для ВРХ:

$$212,4 \text{ тис. гол.} \cdot 0,9 \text{ т/гол.} = 191,16 \text{ тис. т}$$

Для свиней:

$$377,5 \text{ тис. гол.} \cdot 0,365 \text{ т/гол.} = 137,788 \text{ тис. т [48]}$$

Склавши ці величини, отримуємо загальний обсяг соломи, необхідний для забезпечення потреб тваринництва. Віднімаючи цей обсяг від загальної кількості технічно доступної соломи зернових культур, визначають кількість надлишкової соломи, яка може бути використана як потенційний енергетичний ресурс для виробництва теплової чи електричної енергії.

$$\text{Надлишок соломи: } 1982,67 - (191,16 + 137,788) = 1653,722 \text{ (тис. т).}$$

Співвідношення обсягу надлишкової соломи до загальної кількості технічно доступної соломи зернових культур дозволяє оцінити коефіцієнт її енергетичного використання на початковому етапі аналізу. У даному випадку значення коефіцієнта становить:

$$K_e = 1653,722 / 1982,67 = 0,834.$$

З огляду на принципи консервативного підходу до оцінювання біоенергетичного потенціалу отримане значення додатково коригується шляхом поділу навпіл: $0,834 / 2 = 0,417$.

Окремо визначають коефіцієнт перерахунку біомаси в умовне паливо (КУП). Він характеризує відношення теплоти згоряння конкретного виду біомаси (МДж/кг) до теплоти згоряння умовного пального, що становить 29,3 МДж/кг. Значення цього коефіцієнта для різних видів

сільськогосподарських відходів наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок коефіцієнту перерахунку в умовне паливо

С/г культура	Теплота згорання, МДж/кг [50]	КУП
Пшениця	17,2	0,59
Ячмінь	15,9	0,54
Інші зернові	15	0,51
Ріпак	17,5	0,60
Кукурудза на зерно	13,7	0,47
Соя	15,9	0,54
Соняшник	13,7	0,47
Лушпиння соняшника	16,0	0,55

До ключових характеристик рослинних залишків, які вирізняються відносною однорідністю складу, належать розмір часток, щільність, а також показники вологості та зольності. Відходи зернових культур, як правило, відзначаються низьким рівнем вологості, що робить їх придатними для енергетичного використання без додаткової підготовки. Солома, яка є одним із найпоширеніших видів біопалива в Україні, характеризується екологічною нейтральністю, адже під час її спалювання не відбувається додаткового приросту викидів парникових газів у глобальному масштабі, як і при використанні інших видів біомаси [53].

У таблиці 3.3 подано узагальнені результати розрахунків теоретичного, технічного та економічного потенціалів первинних сільськогосподарських відходів Хмельницької області за 2024 рік, виконаних відповідно до методики, описаної вище.

Найвагомішу частку економічного потенціалу становлять відходи, що утворюються під час вирощування пшениці, кукурудзи та сої. Це пояснюється тим, що зазначені культури характеризуються високими коефіцієнтами утворення відходів і значними показниками енергетичного

використання, а також мають найбільші обсяги валового виробництва [48].

Таблиця 3.3 – Енергетичний потенціал відходів сільського господарства Хмельницької області за 2024 рік

С/г культура	Валовий збір, тис. т	КВ	Теоретичний потенціал, тис. т	КУП	Теоретичний потенціал, тис. т у. п.	КТД	Технічний потенціал тис. т у. п.	КЕВ	Економічний потенціал, тис. т у. п.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пшениця	1466,20	1,0	1466,20	0,59	865,058	0,8	692,046	0,83	574,4
Ячмінь	460,34	0,8	368,272	0,54	198,87	0,8	159,09	0,83	132,05
Інші зернові	56,13	0,8	44,9	0,51	22,9	0,8	18,32	0,83	15,21
Ріпак	314,98	2,0	629,96	0,6	377,98	0,8	302,38	1	302,38
Кукурудза на зерно	2002,66	1,5	3003,99	0,47	1411,87	0,8	1129,5	0,7	790,65
Соя	844,98	1,4	1182,97	0,54	638,80	0,8	511,05	1	511,04
Соняшник	377,21	2,0	754,42	0,47	354,58	0,8	283,66	1	283,66
Всього	5522,5		7450,712		3870,058		3096,036		2609,39

Окрім того, у сільськогосподарському секторі формуються так звані вторинні відходи, які виникають на підприємствах, що здійснюють переробку рослинницької продукції. Як правило, їхній обсяг є меншим порівняно з первинними відходами, що утворюються безпосередньо на полях під час збирання врожаю. Проте ці ресурси також можуть бути важливими для формування регіонального біоенергетичного потенціалу.

У випадку вторинних відходів сільськогосподарського виробництва, таких як лушпиння соняшника чи жом цукрового буряку, теоретичний, технічний та економічний потенціали визначаються шляхом застосування відповідних коефіцієнтів: коефіцієнта утворення вторинних відходів, коефіцієнта технічної доступності та коефіцієнта енергетичного

використання [47, 48]. При цьому коефіцієнт технічної доступності інтерпретується як частка обсягу продукції, що надходить на переробні підприємства (зокрема бурякопереробні та олієекстракційні заводи), у загальному обсязі виробництва відповідних культур. Саме на цих підприємствах і формується основний масив вторинних відходів, придатних для енергетичного використання. Оцінку технічно досяжного теплоенергетичного потенціалу виконували за формулою 3.4, а результати розрахунку наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Енергетичний потенціал вторинних відходів сільського господарства в Хмельницькій області за 2024 рік

	Валовий збір, тис. т	КВВ	Теоретичний потенціал, тис. т у.п.	КТД	Технічний потенціал, тис. т у.п	КЕВ	Економічний потенціал, тис. т. у. п
Цукровий буряк	2314,72	0,64	1481,42	0,91	1348,09	0,5	674,05
Лушпиння соняшника	377,21	0,15	56,58	0,55	31,12	1,0	31,12
Всього	2691,93		1538,0		1424,87		705,17

Отримані результати свідчать, що порівняно з економічним потенціалом первинних відходів сільського господарства, який становить 1,55 млн т у.п. на рік, енергетичний потенціал вторинних відходів є значно меншим – лише 0,048 млн т у.п. на рік. Попри відносно незначні обсяги, ця категорія біомаси має важливе практичне значення. Зокрема, чимало олієекстракційних заводів в Україні повністю або частково забезпечують власні енергетичні потреби за рахунок спалювання лушпиння соняшника у спеціалізованих котельних установках [51].

Результати проведених розрахунків засвідчують, що серед проаналізованих видів біомаси найвищий економічний потенціал як

паливного ресурсу мають відходи кукурудзи. Водночас фахівці не рекомендують використовувати кукурудзяні стебла як біопаливо з огляду на кліматичні умови України. Через недостатнє природне висихання після завершення вегетації стебла зберігають надмірну вологість і не можуть бути ефективно спалені без додаткового етапу досушування. Такий процес потребує значних енергетичних і фінансових витрат, що істотно підвищує собівартість отриманого біопалива та робить його застосування економічно невиправданим. Крім того, в Україні практично відсутня спеціалізована техніка для тюкування кукурудзяних стебел, хоча саме ця операція є необхідною для їх подальшого енергетичного використання. Це додатково ускладнює їх залучення до біопаливних технологій та обмежує можливості формування стабільного ланцюга постачання такої сировини

На другому місці за величиною економічного потенціалу як біопаливного ресурсу перебувають відходи зернових культур. За валового збору 1982,67 тис. т економічно доцільний енергетичний потенціал становить 721,65 тис. т у.п. Цей ресурс може бути ефективно залучений для покриття паливно-енергетичних потреб Хмельницької області, що робить зернові відходи значущим компонентом регіонального біоенергетичного балансу.

3.2 Оцінка енергетичного потенціалу відходів тваринництва

Важливим місцевим ресурсом для отримання органічних добрив є гній та послід, у яких також містяться біогенні елементи (N, P, K), що сприяє зменшенню доз внесення мінеральних добрив у рослинництві [53]. Поруч із цим використання свіжого гною або посліду неприпустимо, а його розкладання при утриманні у відкритих сховищах призводить до емісії у атмосферу парникових газів. При зброджуванні гною у біогазових установках відбувається його знезараження, при цьому зберігаються біогенні елементи, що необхідні рослинам. Поживні речовини знаходяться у доступнішій формі – це забезпечує досить високу біологічну активність

шламу і дозволяє використовувати як органічне добриво. Крім цього утворюється біогаз, який містить до 70 % метану, а тому є цінним енергоносієм [53].

Для оцінки потенціалу відходів тваринництва здійснювали статистичним методом. За допомогою даного методу розраховується лише теоретичний потенціал біомаси і використовуються статистичні дані по області. Необхідні вихідні дані: кількість голів, кількість гною, вихід біогазу з гною. Для умов Хмельницької області розрахунок проводили для гною таких категорій:

- велика рогата худоба (ВРХ);
- свинарство;
- птахівництво.

Гній худоби та птиці може використовуватися для виробництва біогазу, але необхідно налагодити збирання та доставку сировини до біогазової установки. Враховуючи відсутність централізованого збирання гною у населення, економічний енергетичний потенціал відходів тваринництва буде базуватися на припущенні, що доцільним будівництво біогазових установок буде за умов потужності 200 кВте когенераційної установки [51]. З огляду на те, що вівці і кози переважно утримуються у господарствах населення та більшість часу знаходяться на пасовищах, їх гній не буде враховуватися у оцінці економічного енергетичного потенціалу біогазу. Поголів'я худоби та птиці в Хмельницькій області за 2024 рік наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Поголів'я худоби та птиці в Хмельницькій області [52]

Вид худоби / птиці	2024 рік
Велика рогата худоба, тис. голів	212,4
Свині, тис. голів	377,5
Птиця, тис. голів	7685,4

Залежність для розрахунку теоретичного потенціалу біогазу (т н.е.) з гною/послідом великої рогатої худоби (ВРХ), свиней та птиці [51]:

$$E_{LS} = \sum_{i=1}^n \frac{365 \cdot N_i \cdot q_{mi} \cdot \frac{TS_i}{100} \cdot \frac{VS_i}{100} \cdot q_i^{bg} \cdot Q_{LHV}^{bg}}{Q_{LHV}^{oe} \cdot 1000}, \quad (3.5)$$

де N_i – загальна кількість тварин i -го виду, голів;

q_{mi} – питомий вихід гною/послідом для тварин/птиці i -го виду, кг/(гол.·день);

TS_i – вміст сухої речовини у гної/послідом тварин/птиці i -го виду, %;

VS_i – частка органічної речовини у сухому залишку гною/послідом тварин/птиці i -го виду, %;

q_i^{bg} – очікуваний питомий вихід біогазу з гною/послідом тварин/птиці i -го виду, м³/кг СОР (суха органічна речовина);

Q_{LHV}^{bg} – очікувана нижча теплота згорання біогазу (LHV), утвореного з гною/послідом тварин/птиці i -го виду, МДж/нм³;

$Q_{LHV}^{oe} = 41,868$ МДж/кг – нижча теплота згорання мовного палива.

Значення величин для розрахунку теоретичного потенціалу біогазу з гною сільськогосподарських тварин наведено у таблиці 3.6 [51].

Таблиця 3.6 – Значення величин для розрахунку теоретичного потенціалу біогазу з гною сільськогосподарських тварин

Вид гною/послідом	q_{mi} , кг/(гол.·день)	TS_i , %	VS_i , %	q_i^{bg} , м ³ /кг СОР	Q_{LHV}^{bg} , МДж/нм ³
Гній ВРХ	29,08	86,7	16,0	0,35	23
Гній свиней	5,5	88,6	16,0	0,42	21
Послід курей	0,13	70,0	20,0	0,40	21

Для визначення технічного потенціалу біогазу необхідно теоретичний помножити на коефіцієнт технічної доступності гною/послідом K_t (значення у

таблиці 3.7). K_t характеризує частку гною/посліду, який може бути реально зібраним, при цьому враховується існуюча система утримання тварин/птиці.

Таблиця 3.7 – Коефіцієнт технічної доступності гною/посліду [51]

K_t	Вид гною / посліду
0,898	Гній ВРХ на сільськогосподарських підприємствах
0,95	Гній свиней
0,9	Послід птиці на сільськогосподарських підприємствах

Розрахунок теоретичного потенціалу біогазу (тис. т у.п.) з гною/послідом проводили згідно формули 3.5, окремо для:

– великої рогатої худоби:

$$E_{LS} = \sum_{i=1}^n \frac{365 \cdot 212400 \cdot 29,08 \cdot \frac{86,7}{100} \cdot \frac{16}{100} \cdot 0,35 \cdot 23}{41,868 \cdot 1000} = 60,13 \text{ (тис. т у.п.);}$$

– свиней:

$$E_{LS} = \sum_{i=1}^n \frac{365 \cdot 377500 \cdot 5,5 \cdot \frac{88,6}{100} \cdot \frac{16}{100} \cdot 0,42 \cdot 21}{41,868 \cdot 1000} = 22,63 \text{ (тис. т у.п.);}$$

– птиці:

$$E_{LS} = \sum_{i=1}^n \frac{365 \cdot 7685400 \cdot 0,13 \cdot \frac{70,0}{100} \cdot \frac{20,0}{100} \cdot 0,4 \cdot 21}{41,868 \cdot 1000} = 10,24 \text{ (тис. т у.п.).}$$

Теоретичний потенціал біогазу з відходів тваринництва в Хмельницькій області за 2024 р. становить 60,13 тис. т у.п. з гною ВРХ, 22,63 тис. т у.п. з гною свиней, 10,24 тис. т у.п. з послідом птиці, або в загальному 93,00 тис. т у.п.

Враховуючи коефіцієнт технічної доступності технічний потенціал біогазу становитиме: з гною ВРХ – 53,99 тис. т у.п.; з гною свиней – 21,49 тис. т у.п.; з послідом птиці – 9,22 тис. т у.п., або в загальному 84,7 тис. т у.п.

Економічний потенціал біогазу з відходів тваринництва в Хмельницькій області за 2016 р. становитиме: з гною ВРХ – 26,995 тис. т у.п.; з гною свиней – 10,745 тис. т у.п.; з посліду птиці – 4,61 тис. т у.п., або в загальному 42,35 тис. т у.п.

Для узагальнення оцінки економічного потенціалу відходів сільського господарства Хмельницької області за 2024 рік попередні розрахунки зведемо до таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Енергетичний потенціал біомаси Хмельницької області, 2024 рік

Вид біомаси	Енергетичний потенціал, тис. т у. п.		
	теоретичний	технічний	економічний
1	2	3	4
Пшениця	865,058	692,046	574,4
Ячмінь	198,87	159,09	132,05
Інші зернові	22,9	18,32	15,21
Ріпак	377,98	302,38	302,38
Кукурудза на зерно	1411,87	1129,5	790,65
Соя	638,8	511,05	511,04
Соняшник	354,58	283,66	283,66
Цукровий буряк	1481,42	1348,09	674,05
Лушпиння соняшника	56,58	31,12	31,12
Відходи тваринництва	93	84,7	42,35
Всього	4636	3867,91	2782,51

3.3 Оцінка енергетичного потенціалу енергетичних культур

Оцінка потенціалу енергетичних культур проводиться на основі природно-кліматичних умов різних регіонів та наявності вільних земель. Спочатку вивчається потенціал класичних енергетичних культур, які можуть бути доцільно вирощені на території Хмельницької області.

Оскільки Хмельницька область знаходиться в лісостеповій природно-кліматичній зоні, то на її території вирощування таких енергетичних культур, як тополя, верба, вільха і міскантус, є доцільним (таблиця 3.9). Припускається, що ці культури займатимуть близько половини вільної площі ріллі. Інша частина площі ріллі може бути задіяна для вирощування традиційних сільськогосподарських культур для виробництва біопалива, таких як ріпак для біодизеля та кукурудза для біогазу.

При виборі енергетичних культур важливим фактором є їх потенціал. Важливим аспектом, який необхідно враховувати під час оцінювання можливостей вирощування енергетичних культур, є питання збереження біорізноманіття регіону фактор, що нині перебуває у центрі уваги європейської екологічної політики [54].

Таблиця 3.9 – Врожайність та нижча теплота згоряння енергетичних культур

Енергетична культура	Врожайність, т сухої маси/га в рік	$Q_{н}^p$ сухої маси, МДж/кг
Тополя	9,5	18,5
Верба	9	18,5
Вільха	7	20
Міскантус	12	17

Прийняття рішення щодо доцільності висадження тієї чи іншої культури потребує аналізу низки додаткових параметрів, серед яких:

просторове розташування земельної ділянки в межах району, тип і якість ґрунтів, рельєф території, специфіка місцевого агровиробництва, а також інші природні та господарські умови, що можуть впливати на вибір культури та ефективність її культивування.

Вибравши міскантус як культуру, ми обираємо трав'янисту багаторічну енергетичну культуру з найвищою врожайністю. Цю культуру використовують як для виробництва твердого біопалива, так і для виробництва біогазу. Однією з її особливостей є покращення якості ґрунту, на якому вона вирощується, завдяки накопиченню органічної речовини (до 10 тонн сухої маси на гектар за 4 роки) [55]. Це дозволяє використовувати для її вирощування землі, які не використовуються для сільського господарства через поганий стан ґрунтів.

Площа вільних земель під вирощування міскантусу становить 43,95 тисяч гектарів. Економічний потенціал міскантусу:

$$43,95 \cdot 12 \cdot 17 / 29,3 \cdot 0,85 \cdot 1 = 260,1 \text{ тис. т у. п.}$$

Результати розрахунку теоретичного потенціалу з вирощування енергетичної культури міскантусу у Хмельницькій області наведені в таблиці 3.10.

Міскантус – це дуже економічна і екологічно чиста культура. На етапі від посадки до появи сходів культура не потребує додаткового догляду, зокрема й щодо обробітку ґрунту. Крім того, відсутня необхідність у щорічному придбанні посівного матеріалу, що істотно знижує експлуатаційні витрати. За наявними оцінками, міскантус здатний забезпечувати стабільні врожаї від 20 років до 25 років. Для його вирощування не потрібно застосовувати мінеральні добрива, а оптимальні умови росту забезпечуються на ґрунтах, придатних для культивування кукурудзи [56]. Варто наголосити, що біомаса енергетичних культур становить значний і перспективний енергетичний ресурс, який потребує подальшого вивчення та активного залучення до системи відновлюваної енергетики.

Таблиця 3.10 – Енергетичний потенціал вирощування міскантусу в Хмельницькій області

Енергетична культура	Врожайність, т сухої маси / га в рік	Q _{нр} сухої маси, МДж/кг	Площа посіву, тис. га	Теоретич. потенціал, тис. т у. п.	Техніч. потенціал, тис. т у. п.	Економічний потенціал, тис. т у. п.
Міскантус	12	17	43,95	306,0	260,1	260,1

Для визначення потенціалу ріпаку як енергетичної культури для виробництва біодизеля було зроблено припущення, що його вирощування здійснюється на вільних сільськогосподарських угіддях, які можуть використовуватися також для культивування кукурудзи, призначеної для виробництва біогазу. Такий підхід дає змогу оцінити можливість оптимального розподілу земельних ресурсів між різними напрямками біоенергетичного виробництва. Площа була розділена між ріпаком для біодизеля та кукурудзою для біогазу у пропорції приблизно 50 на 50, що складає по 21,98 тисяч гектарів кожна [56]. За даними 2024 року, середня врожайність ріпаку в Хмельницькій області становила 28,3 центнера з гектара [56]. Для оцінки потенційного обсягу виробництва біодизеля використовувався показник виходу біодизеля, який складав 0,78 тонн з гектара [48], що відповідає цій врожайності.

Зрозуміло, коефіцієнт технічної доступності приймається рівним 1,0, оскільки розрахунок відбувається через показник виходу біодизеля з одного гектара. Коефіцієнт енергетичного використання у цьому розрахунку приймається рівним 1,0, оскільки ріпак вирощується цілеспрямовано для подальшого перероблення на біодизель, а отже, уся отримана біомаса може бути використана за призначенням. Відповідно, узагальнений вираз для визначення економічно доцільного енергетичного потенціалу виробництва

біодизеля з ріпаку (у тис. т умовних паливних одиниць) набуває такого вигляду:

$$P_e = (21,98 \cdot 0,78 \cdot 37 \cdot 1,0 \cdot 1,0) / 29,3 = 21,65 \text{ (тис. т у. п.)}$$

Розрахунки потенціалу виробництва біодизеля з ріпаку за формулою 3.3 представлено у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Розрахунок потенціалу вирощування ріпаку на біодизель у Хмельницькій області

	Показник	Розмірність	Хмельницька область
1	Площа вільних земель під вирощування ріпаку на біодизель, S	тис. га	21,98
2	Врожайність ріпаку	ц/га	28,3
3	Вихід біодизеля, ВБд	т/га	0,78
4	Потенціал біодизель ПБд	тис. т	14,2
5	Теоретичний потенціал біодизеля, P_e	тис. т у. п.	21,65
6	$Q_{н^p}$ біодизеля	МДж/кг	37
7	$Q_{н^p}$ умовного палива	МДж/кг	29,3

Розрахунок економічного потенціалу соломи ріпаку (P_{Pe}) здійснюється на основі вихідних даних, поданих у таблиці 3.11, та з використанням коефіцієнтів $K_B = 2$, $K_{TD} = 0,8$, $K_{EB} = 1,0$. Значення Q_R для соломи ріпаку складає 17,5 МДж/кг.

$$P_{Pe} = 21,98 \cdot 28,3/10 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 17,5 / 29,3 = 59,44 \text{ (тис. т у. п.)}$$

Важливо відзначити, що технічно-досяжний потенціал рослинної біомаси, яка утворюється під час вирощування ріпаку, включається до технічно-досяжного теплоенергетичного потенціалу соломи зернових, технічних і круп'яних культур.

Отже, зазначений теоретичний потенціал ріпаку як енергетичної

культури становить 21,65 тисяч умовних паливних одиниць. Такий потенціал збігається з технічним і економічним, оскільки ріпак вирощується з метою виробництва біодизеля. Економічний потенціал соломи ріпаку оцінюється у 59,44 тисяч умовних паливних одиниць.

Кукурудза як енергетична культура, що використовується для виробництва біопалива, вирощується на вільних сільськогосподарських угіддях, не задіяних у виробництві основних продовольчих чи технічних культур. Для Хмельницької області відведено 21,98 тисяч гектарів під кукурудзу. Разом з площею, призначеною під вирощування міскантусу (43,95 тисяч гектарів) та ріпаку для виробництва біодизелю (21,98 тисяч гектарів), це становить 87,9 тисяч гектарів. Вільна площа ріллі частково або повністю може бути використана для вирощування кукурудзи з метою подальшого виробництва біогазу (21,98 тисяч гектарів). Для виробництва біогазу кукурудза вирощується за тією ж технологією, як і для силосу. Сировиною для отримання біогазу служить вся наземна частина рослини.

Обсяг біогазу, що виробляється з кукурудзи, оцінюється за допомогою показника виходу біогазу на рівні $185 \text{ м}^3/\text{т}$ і середньої врожайності 15 тон зеленої маси з 1 гектара. Коефіцієнт технічної доступності для кукурудзи становить 0,7. Коефіцієнт енергетичного використання приймається рівним 1,0, оскільки кукурудза вирощується спеціально для виробництва біогазу.

За формулою 3.3 обсяг біогазу з кукурудзи розраховується як економічно доцільний потенціал.

$$21,98 \cdot 15 \cdot 185 \cdot 20 \cdot 0,7 \cdot 1 / 29,3 = 29,14 \text{ (тис. т у. п.)}$$

Таблиця 3.12 – Економічний потенціал кукурудзи на виробництво біогазу Хмельницької області

Регіон	Енергетичний потенціал, тис. т у. п.		
	теоретичний	технічний	економічний
Хмельницька область	41,62	29,14	29,14

Для узагальнення оцінки економічного потенціалу енергетичних культур Хмельницької області за 2024 рік попередні розрахунки зведемо до таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Енергетичний потенціал енергетичних культур у Хмельницької області, 2024 рік

Вид біомаси	Енергетичний потенціал, тис. т у. п.		
	теоретичний	технічний	економічний
1	2	3	4
Солома зернових (в т.ч. солома ріпаку)	1466,28	1173,02	1026,25
Відходи виробництва кукурудзи на зерно	1407,53	1126,03	788,22
Відходи виробництва соняшника	526,4	421,12	421,12
Цукровий буряк	39,58	36,02	18,01
Лушпиння соняшника	58,81	32,35	32,35
Міскантус	306,0	260,1	260,1
Ріпак (біодизель)	21,65	21,65	21,65
Кукурудза (біогаз)	41,62	29,14	29,14
Всього	3867,87	3099,43	2596,84

Після аналізу розрахунків економічного потенціалу енергетичних культур у Хмельницькій області, можна зазначити, що основну частку для використання в якості біопалива складають відходи зернових, включаючи соломку ріпаку, що становить 39,52 % від загального потенціалу біомаси в області. Економічний потенціал відходів кукурудзи складає 30,35 % від загального потенціалу біомаси області або 788,22 тисяч тонн умовних одиниць. Загальний економічно доцільний потенціал енергетичних культур у області становить 2596,84 тисяч тонн умовних одиниць.

Розподіл економічного потенціалу енергокультур у відсотках від загально можливого для Хмельницької області наведено на рисунку 3.1.

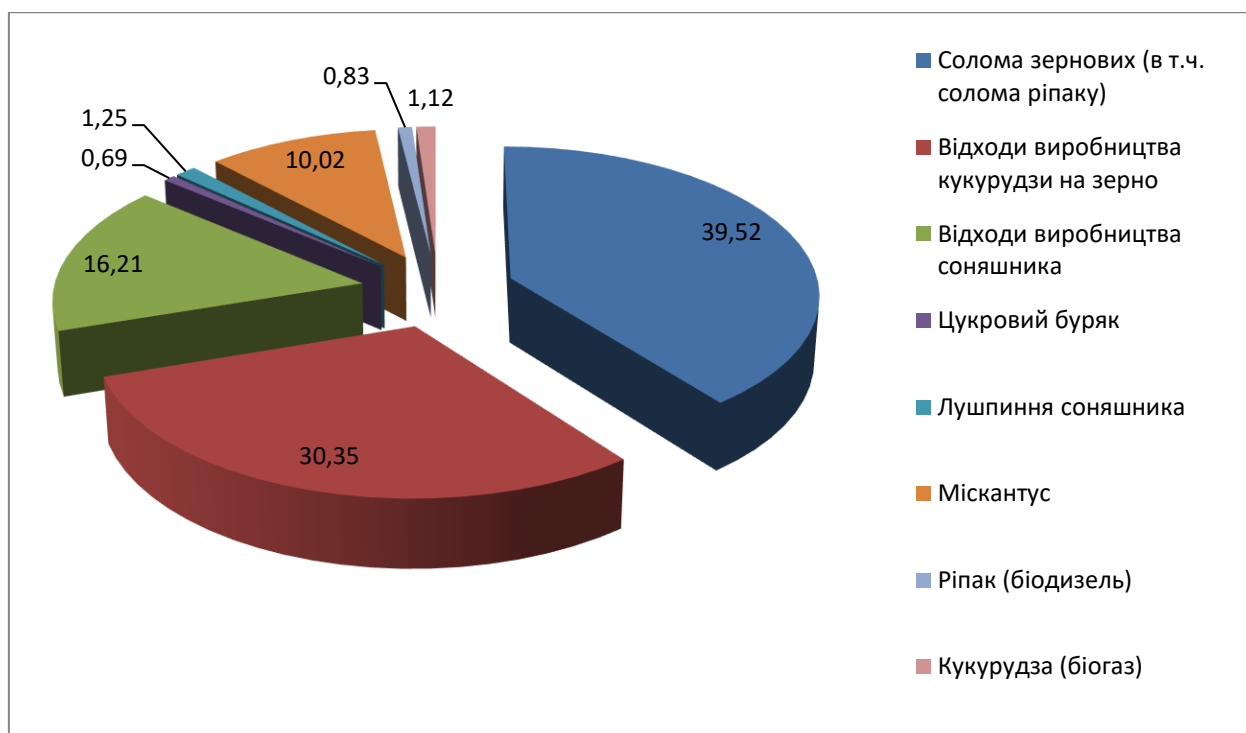


Рисунок 3.1 – Структура економічного потенціалу енергетичних культур (у відсотках) Хмельницької області, 2024 р.

3.4 Перспективи використання агробіомаси Хмельницької області

Проведена оцінка енергетичного потенціалу відходів рослинництва, тваринництва та енергетичних культур дає підстави стверджувати, що агробіомаса Хмельницької області може відігравати вагомую роль у формуванні регіонального паливно-енергетичного балансу. Згідно з узагальненими даними (таблиця 3.8), сумарний економічний потенціал біомаси в області за 2024 рік становить близько 2,78 млн т у. п., а для енергетичних культур (таблиця 3.13) – майже 2,6 млн т у. п. Такий рівень ресурсів дає змогу розглядати агробіомасу як стратегічний енергетичний резерв, здатний частково замінити традиційні види викопного палива.

Одним із ключових напрямів подальшого використання є залучення соломи зернових та ріпаку як твердого біопалива для потреб теплопостачання. Розрахунки показують, що економічний потенціал соломи зернових культур (включаючи солону ріпаку) перевищує 1 млн т у. п. на рік, що створює реальну можливість заміщення значної частки вугілля та природного газу в котельнях комунального та аграрного секторів. Враховуючи відносну рівномірність просторового розподілу по території області, перспективною є модель децентралізованого використання соломи (у вигляді тюків, брикетів або пелет) для опалення сільських шкіл, адмінбудівель громад, а також виробничих об'єктів сільськогосподарських підприємств. Перехід таких об'єктів на місцеве біопаливо дозволяє зменшити витрати місцевих бюджетів на енергоносії та підвищити енергетичну автономію громад.

Значний економічний потенціал мають відходи кукурудзи на зерно та соняшнику, які за своїми обсягами посідають друге місце після соломи зернових. Попри технологічні обмеження щодо прямого використання кукурудзяних стебел як палива (висока вологість, складності тюкування), вони можуть бути розглянуті як сировина для виробництва паливних гранул чи сумішевих біопалив за умови впровадження сучасних технологій збирання, подрібнення та досушування. Відходи соняшнику, зокрема стебла та кошики, мають нижчу щільність і можуть ефективно використовуватись у суміші з соломою ріпаку чи пшениці, що підвищує гнучкість паливного балансу на біокотельнях.

Окремої уваги заслуговують вторинні відходи – лушпиння соняшнику та жом цукрового буряку. Хоча їхній сумарний економічний потенціал (близько 0,7 млн т у. п. за даними таблиці 3.4) є меншим порівняно з первинними відходами, їх цінність полягає у концентрації біомаси в точках переробки – на цукрових та олієекстракційних заводах. Це суттєво здешевлює логістику та спрощує організацію енергетичного використання. Уже сьогодні низка олієекстракційних підприємств України частково або

повністю забезпечують свої енергетичні потреби за рахунок спалювання лушпиння соняшнику в енергетичних котлах. Для Хмельницької області доцільним є подальший розвиток цієї практики, а також інтеграція надлишкової теплової та електричної енергії в локальні енергетичні системи.

Перспективним напрямом є використання відходів тваринництва для виробництва біогазу. Теоретичний потенціал біогазу з гною та посліду в області оцінюється на рівні близько 93 тис. т у. п. на рік, а економічний – понад 42 тис. т у. п. Такий обсяг ресурсу може бути залучений до створення мережі біогазових установок, прив'язаних до найбільших тваринницьких комплексів. Біогаз, що виробляється, може бути використаний для когенерації тепла й електроенергії, а у перспективі – для очищення до якості біометану та подачі в газорозподільні мережі або використання як моторного палива. При цьому дигестат, що утворюється після анаеробного зброджування, повертається в ґрунт як високоякісне органічне добриво, замінюючи частину мінеральних добрив та підвищуючи вміст органічної речовини в агроландшафтах.

Особливо перспективним ресурсом є енергетичні культури, насамперед міскантус, для якого економічний потенціал в області оцінено на рівні понад 260 тис. т у. п. на рік (таблиця 3.10), а також ріпак для виробництва біодизеля і кукурудза для біогазу. Створення спеціалізованих плантацій міскантусу на деградованих, малопродуктивних або тимчасово невикористовуваних землях дозволить отримувати стабільне джерело біомаси з довготривалим циклом використання (від 20 до 25 років), не конкуруючи з продовольчим виробництвом. Ріпак, вирощений під біодизель, створює передумови для формування власного ринку рідких біопалив, що може бути особливо актуально для аграрної техніки, тоді як кукурудза для біогазу забезпечує високий вихід метану та може доповнювати тваринницькі відходи у сировинній базі біогазових заводів.

На підставі отриманих даних доцільним є формування в області локальних агробіоенергетичних кластерів, які об'єднуюватимуть виробників

сировини (агропідприємства, фермерські господарства, тваринницькі комплекси), переробників (цукрові, олієкстракційні заводи) та споживачів енергії (комунальні котельні, промислові об'єкти, соціальна інфраструктура). У межах таких кластерів відходи рослинництва можуть спрямовуватися на виробництво твердого біопалива, відходи тваринництва – на біогазові установки, а енергетичні культури можуть стати базовим ресурсом для довгострокового планування. Це дозволить оптимізувати логістику, зменшити собівартість енергії та підвищити інвестиційну привабливість біоенергетичних проєктів.

Важливою перспективою є також інтеграція агробіоенергетики у регіональну політику декарбонізації. З огляду на те, що спалювання біомаси вважається вуглецево нейтральним у довгостроковому балансі, заміщення частини природного газу та вугілля місцевими біопаливами дасть можливість знизити викиди парникових газів, одночасно зменшуючи імпортозалежність. Використання біогазу й біометану як замітника природного газу в системах теплопостачання та на транспорті може стати одним із ключових інструментів досягнення цілей кліматичної політики на рівні області.

Разом з тим, реалізація зазначених перспектив потребує подолання низки бар'єрів. До основних з них належать: недостатній розвиток логістичної інфраструктури для збирання та транспортування біомаси; обмежені фінансові ресурси сільськогосподарських виробників для інвестування в біоенергетичне обладнання; потреба в навчанні персоналу для експлуатації котелень на біомасі та біогазових установок; а також необхідність удосконалення нормативно-правової бази та механізмів підтримки відновлюваної енергетики. Вирішення цих питань можливе шляхом поєднання державних і регіональних програм підтримки, залучення приватних інвестицій, розвитку енергетичних кооперативів, а також інтеграції проєктів з використання агробіомаси у стратегії розвитку територіальних громад.

Таким чином, агробіомаса Хмельницької області має не лише значний розрахунковий енергетичний потенціал, а й реальні передумови практичної реалізації. Системний підхід, що передбачає комплексне використання первинних і вторинних відходів рослинництва, відходів тваринництва та енергетичних культур, дозволяє розглядати агробіоенергетику як один із ключових напрямів сталого розвитку регіону, здатний одночасно вирішувати енергетичні, економічні та екологічні завдання.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження підтверджує, що агробіомаса є одним із найперспективніших відновлюваних енергетичних ресурсів Хмельницької області, здатним забезпечити вагомий внесок у регіональний паливно-енергетичний баланс, стимулювати розвиток місцевої економіки та сприяти досягненню цілей сталого розвитку. Аналіз природно-ресурсного потенціалу, аграрної структури та обсягів утворення побічної продукції сільського господарства засвідчив, що область володіє значними ресурсами рослинної, тваринної та спеціально вирощеної енергетичної біомаси.

Розрахунки показали, що економічний потенціал первинних відходів рослинництва (соломи пшениці, ячменю, інших зернових, ріпаку, кукурудзи на зерно, сої та соняшника) для Хмельницької області становить близько 2609,39 тис. т у.п. Найбільшу частку цього ресурсу формують відходи вирощування кукурудзи на зерно (понад 790,65 тис. т у.п.), пшениці (574,4 тис. т у.п.) та сої (511,04 тис. т у.п.), що зумовлено значними площами посівів і високими коефіцієнтами виходу побічної продукції. Частка соломи зернових (включно з соломою ріпаку) в структурі економічно доцільного потенціалу біомаси енергетичних культур становить орієнтовно 39,52 %, а відходів кукурудзи – 30,35 %, що підтверджує їх домінуючу роль у ресурсній базі.

Вторинні відходи сільського господарства, насамперед жом цукрового буряку та лушпиння соняшника, формують додатковий енергетичний ресурс з економічним потенціалом близько 705,17 тис. т у.п. При цьому жом цукрового буряку забезпечує приблизно 674,05 тис. т у.п., а лушпиння соняшника – 31,12 тис. т у.п. Хоча цей ресурс є меншим порівняно з потенціалом первинних відходів, його важливою перевагою є висока

концентрація біомаси безпосередньо на переробних підприємствах, що суттєво знижує логістичні витрати й створює передумови для ефективного використання на цукрових і олієекстракційних заводах.

Відходи тваринництва (гній ВРХ, свиней та послід птиці) забезпечують додатковий енергетичний ресурс у вигляді біогазу. Теоретичний потенціал біогазу з гною та посліду в Хмельницькій області оцінено на рівні близько 93,0 тис. т у.п., технічний – 84,7 тис. т у.п., а економічний – близько 42,35 тис. т у.п.. Хоча ця величина є меншою порівняно з потенціалом рослинних відходів, саме тваринницька біомаса є базою для безперервної роботи біогазових установок, оскільки забезпечує відносно стабільне надходження сировини протягом року.

Узагальнюючи розрахунки, можна стверджувати, що загальний економічно доцільний потенціал біомаси Хмельницької області за рахунок первинних і вторинних відходів рослинництва та відходів тваринництва становить орієнтовно 2782,51 тис. т у.п. на рік, тобто близько 2,8 млн т умовного палива. Цей показник свідчить про реальну можливість часткового заміщення традиційних видів палива (природного газу, вугілля) у системах теплопостачання та на окремих промислових об'єктах.

Оцінка енергетичних культур підтвердила, що вони є додатковим стратегічним напрямом розвитку біоенергетики. Для міскантусу економічний потенціал було визначено на рівні 260,1 тис. т у.п., для ріпаку, вирощеного з метою виробництва біодизеля, – 21,65 тис. т у.п., а для кукурудзи, вирощеної під виробництво біогазу, – 29,14 тис. т у.п.. Сукупний економічний потенціал енергетичних культур за розрахунками становить близько 2596,84 тис. т у.п., що порівнянно з потенціалом агровідходів і підтверджує доцільність розвитку окремих плантацій енергетичних культур на вільних або малопродуктивних землях.

Таким чином, розрахункові дані показують, що агробіомаса Хмельницької області має значний енергетичний ресурс, який може бути використаний як для створення мережі локальних біоенергетичних об'єктів, так і для формування повноцінних регіональних біоенергетичних кластерів. За умови раціонального використання соломи зернових і ріпаку, залучення вторинних відходів переробки, впровадження біогазових технологій на базі тваринницьких комплексів та розвитку плантацій міскантусу, ріпаку й кукурудзи для енергетичних цілей Хмельницька область здатна сформувати збалансовану модель агробіоенергетики.

Гіпотеза дослідження про те, що агробіомаса регіону має достатній ресурсний та економічний потенціал для формування локальної біоенергетичної системи, підтверджена кількісно: сукупний економічно доцільний потенціал відходів сільського господарства та енергетичних культур вимірюється мільйонами тонн умовного палива і може становити фундамент для довгострокової стратегії енергетичної незалежності Хмельницької області.

Отже, агробіомаса може і повинна стати ключовим ресурсом сталого енергетичного розвитку регіону. Реалізація запропонованих у роботі підходів – розвиток логістики, створення біоенергетичних кластерів, залучення інвестицій, узгодження практик використання біомаси з європейськими екологічними та енергетичними стандартами – здатна забезпечити перехід Хмельниччини до енергоефективної моделі господарювання, орієнтованої на довгострокову екологічну й економічну стабільність.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гелету́ха Г. Г. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / Г. Г. Гелету́ха, Т. А. Железна, В. І. Дешко. – Київ : Академперіодика, 2022. – 373 с.
2. Про затвердження плану заходів з імплементації Директиви Європейського Парламенту та Ради 2009/28/ЄС : розпорядження Кабінету Міністрів України від 03.09.2014 р. № 791-р // Урядовий кур'єр. – 2014. – № 165.
3. Україна. Закони. Про альтернативні види палива : закон України від 14 січня 2000 р. № 1391-XIV // Офіційний вісник України. – 2000. – № 7. – С. 18.
4. Україна. Закони. Про альтернативні джерела енергії : закон України від 20.02.2003 р. № 555-IV // Відомості Верховної Ради України. – 2003. – № 24. – С. 25.
5. Довідник термінів законодавства України. Термін «Лісова біомаса» // Термінологічний словник законодавства України [Електронний ресурс]. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/term/55824> (дата звернення: 22.10.2025).
6. Agrobiomass of Ukraine – Energy Potential for Central and Eastern Europe / T. Hutsol, S. Glowacki, K. Mudryk, V. Oleshko, V. Kyurchev. – Warsaw : SGGW Press, 2021. – 136 p. – DOI: 10.22630/SGGW.IIM.9788382370201.
7. Assessment of agrobiomass potential of agriculture of Ukraine for the production of biofuels [Електронний ресурс] // Topical Issues of Science and Practical Activity. – 2023. – URL: <https://efm.vsau.org/en/particles/assessment-of-agrobiomas-potential-of-agriculture-of-ukraine-for-the-production-of-biofuels> (date of access: 22.10.2025).
8. Bioenergy Association of Ukraine (UABIO). Agrobiomass for Energy: Opportunities and Barriers. – Kyiv, 2021. – 28 p. – URL: <https://uabio.org/materials> (date of access: 22.10.2025).

9. Кулик М. Агровідходи як енергетичний ресурс України / М. Кулик, С. Онищенко // Відновлювана енергетика. – 2022. – № 4. – С. 33–45. – DOI: 10.36296/1819-8058.2022.4.33.

10. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / Ін-т технічної теплофізики НАН України ; за ред. Г. Гелетухи. – Київ : Академперіодика, 2022. – 373 с.

11. Eissa M. O. S. Potential Biomass Energy Generation from Agricultural Production in South Sudan / M. O. S. Eissa // Energy Systems Research. – 2024. – URL: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4143076> (date of access: 25.11.2025).

12. Снежкін Ю. Ф. Теплотехнічні характеристики твердих біопалив з торфу і біомаси як енергетичного ресурсу малої енергетики [Електронний ресурс] / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук. – URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60270/10-SnezhkinNEW.pdf?sequence=1> (дата звернення: 27.11.2025).

13. Application of Economic and Legal Instruments at the Stage of Transition to Bioeconomy / V. Yakubiv, O. Panukhnyk, S. Shults et al. // Advances in Artificial Intelligence, Software and Systems Engineering. – AHFE 2019. – Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 965. – Springer, Cham. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-20454-9_64 (date of access: 25.11.2025).

14. Гайденко О. Тверде біопаливо: технологічні вимоги, властивості компонентів та технологія виробництва [Електронний ресурс] / О. Гайденко // Агробізнес сьогодні. – URL: <http://www.agro-business.com.ua/ideii-i-trendy/2424-tverde-biopalyvo-tekhnologichni-vymogy-vlastyvosti-komponentiv-ta-tekhnologiia-vyrobnytstva.html> (дата звернення: 15.11.2025).

15. Transforming Agriculture into Energy: Unlocking Ukraine’s Bioenergy Potential for Sustainable Post-Conflict Recovery / S. Pimenov, S. Yermakov, H. Holub, et al. // Energies. – 2025. – Vol. 18, № 5. – Article 1212. – DOI: 10.3390/en18051212.

16. UABIO – Bioenergy Association of Ukraine. Біоенергетика України до 2030 року: аналітичний огляд. – Київ, 2024. – URL: <https://uabio.org/materials/16524/> (дата звернення: 25.11.2025).

17. Unlocking the potential of biomass resources: a review on sustainable process design and intensification / H. Alcocer-García et al. // *Resources*. – 2025. – Vol. 14, № 9. – P. 143. – URL: <https://doi.org/10.3390/resources14090143> (date of access: 09.12.2025).

18. Temporal and spatial mapping of theoretical biomass potential across the European Union / S. Günther et al. // *Earth System Science Data*. – 2024. – Vol. 16, № 1. – P. 59–74. – URL: <https://doi.org/10.5194/essd-16-59-2024> (date of access: 08.12.2025).

19. Honcharuk I. V. Assessing the bioenergy potential of the agro-industrial complex to ensure the energy independence of the industry / I. V. Honcharuk, H. V. Pantsyreva, V. Y. Vovk // *The Problems of Economy*. – 2023. – Vol. 3, № 57. – P. 71–80. – URL: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2023-3-71-80> (date of access: 09.12.2025).

20. Відновлювані джерела енергії : навч. посіб. : вид. 2-ге, допов. / за заг. ред. С. О. Кудрі. – Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. – 492 с.

21. Correction to: Biomass and bioenergy potentials of bioresidues: assessment methodology development and application to the region of Lafões / A. d'Espiney et al. // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2024. – URL: <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05673-4> (date of access: 08.12.2025).

22. Optimizing transportation cost for biomass supply chain / S. Kousar et al. // *Thermal Science*. – 2023. – Vol. 27, Spec. issue 1. – P. 245–251. – URL: <https://doi.org/10.2298/tsci23s1245k> (date of access: 08.12.2025).

23. A review of biomass-to-bioenergy supply chain research using bibliometric analysis and visualization / M. A. Helal et al. // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, no. 3. – P. 1187. – URL: <https://doi.org/10.3390/en16031187> (date of access: 09.12.2025).

24. IEA Bioenergy. Implementation of Bioenergy in the European Union. Country Report 2021. – Paris : IEA, 2021. – 54 p. – URL: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/CountryReport2021_EU28_final.pdf (date of access: 26.11.2025).

25. Pence I. Detailed analysis of Türkiye’s agricultural biomass-based energy potential with machine learning algorithms / I. Pence // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2024. – DOI: 10.1007/s10098-024-02822-1.

26. Bioenergy Europe. Statistical Report 2023 – Biomass for Energy. – Brussels : Bioenergy Europe, 2023. – 72 p. – URL: <https://bioenergyeurope.org/statistical-report> (дата звернення: 26.11.2025).

27. Scarlat N. Bioenergy production and use in Europe / N. Scarlat, J.-F. Dallemand, F. Monforti // Renewable Energy. – 2015. – Vol. 80. – P. 3–13. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115006346> (дата звернення: 26.11.2025).

28. Danish Energy Agency. Denmark’s Heating Sector and the Role of Biomass. – Copenhagen : DEA, 2022. – 44 p. – URL: <https://ens.dk/en> (date of access: 26.11.2025).

29. Motola V. Bioenergy in the European Union / V. Motola, M. Padella, R. Edwards. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. – 112 p. – URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135079> (date of access: 26.11.2025).

30. Bioenergy Association of Ukraine (UABIO). Agrobiomass for Energy: Opportunities and Barriers. – Kyiv, 2021. – 28 p. – URL: <https://uabio.org/materials> (date of access: 26.11.2025).

31. WWF-Україна. Критерії сталості використання деревної біомаси : аналітичний звіт. – Київ : WWF, 2025. – 52 с. – URL: https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/sustainability_criteria_for_the_use_of_wooden_biomass_analytical_report_final.pdf (дата звернення: 26.11.2025).

32. Zheliezna T. Agrobiomass: types, characteristics and energy potential : training materials / T. Zheliezna. – Kyiv : UABIO, 2022. – 40 p. – URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/03/ABH_D6.3_Training_AgroBM_Zheliezna_full.pdf (date of access: 26.11.2025).

33. Biomass Energy Potential of Agricultural Residues in the Dominican Republic / H. Guzmán-Bello, L. García-Sánchez, A. Rodríguez-Mata, et al. // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, no. 22. – Article 15847. – DOI: 10.3390/su152215847.

34. Ruggeri G. Provincial Assessment of Agricultural Biomass Residues for Energy in Italy / G. Ruggeri, A. Colantoni, D. Monarca // Journal of Cleaner Production. – 2025. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725001064> (date of access: 26.11.2025).

35. European Commission : Joint Research Centre. Clean Energy Technology Observatory. Bioenergy in the European Union – Status report on technology development, trends, value chains and markets – 2023. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. – URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/327569> (date of access: 26.11.2025).

36. Kircher M. EU Bioenergy – Status and Potential / M. Kircher // Energies. – 2025. – Vol. 18, no. 18. – Article 4857. – URL: <https://doi.org/10.3390/en18184857> (date of access: 26.11.2025).

37. Хмельницька обласна державна адміністрація. Стан агропромислового комплексу області. – 2024. – URL: <https://www.adm-km.gov.ua> (дата звернення: 26.11.2025).

38. SuperAgronom. Хмельниччина є лідером з урожайності зернових культур. – 2023. – URL: <https://superagronom.com/news/15812-hmelnichchina-ye-liderom-z-urojajnosti-zernovih-kultur> (date of access: 26.11.2025).

39. Kyiv School of Economics. Cattle Statistics in Ukraine 2025. – Kyiv : KSE Institute, 2025. – URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/Cattle_UA.pdf (date of access: 26.11.2025).

40. IEA Bioenergy. Country Report EU27 – Bioenergy in the European Union 2024. – Paris : International Energy Agency, 2024. – URL: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/01/CountryReport2024_EU27_final_v2.pdf (date of access: 26.11.2025).

41. Material Economics ; Climate-KIC. EU Biomass Use in a Net-Zero Economy. – Stockholm : Material Economics, 2021. – URL: <https://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2021/06/MATERIAL-ECONOMICS-EU-BIOMASS-USE-IN-A-NET-ZERO-ECONOMY-ONLINE-VERSION.pdf> (date of access: 26.11.2025).

42. Bioenergy Europe. Statistical Report 2023 – Bioenergy Landscape. – Brussels : Bioenergy Europe, 2023. – URL: <https://bioenergyeurope.org/insights/statistical-reports> (date of access: 26.11.2025).

43. Ukrainian Bioenergy Association (UABIO). Bioenergy Landscape: Policy Brief 2023. – Kyiv : UABIO, 2023. – URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2024/01/Bioenergy-Landscape_Policy-Brief23.pdf (date of access: 28.11.2025).

44. Держгеокадастр України. Характеристика ґрунтових ресурсів України. – Київ, 2023. – URL: <https://land.gov.ua/> (дата звернення: 27.01.2025).

45. Національний атлас України. Природні умови та ресурси. – Київ : НАН України, 2022. – URL: <http://www.atlasukraine.org.ua/> (дата звернення: 27.11.2025).

46. Державна служба статистики України. Сільське господарство України : статистичний збірник 2023. – Київ, 2023. – URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/08/zb_sg2023.pdf (дата звернення: 27.11.2025).

47. Мороз Р. В. Оцінка біоенергетичного потенціалу рослинних відходів та енергетичних культур у сільському господарстві Херсонської області / Р. В. Мороз, Є. М. Федорчук // Науковий вісник Херсонського державного університету. – 2015. – Вип. 10, ч. 3. – С. 111–117.

48. Методика узагальненої оцінки технічно-досяжного енергетичного потенціалу біомаси [Електронний ресурс]. – Київ : ТОВ «Віол-принт», 2013. – 25 с. – URL: <http://saee.gov.ua/wp-content/uploads/2012/04/Методика.pdf> (дата звернення: 08.10.2025).

49. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / Ін-т технічної теплофізики НАН України ; за ред. Г. Гелетухи. – Київ : Академперіодика, 2022. – 373 с.

50. Літвак О. А. Біоекономічні пріоритети у розвитку аграрного сектора / О. А. Літвак // Глобальні та національні проблеми економіки. – 2015. – Вип. 8. – С. 200–205.

51. Оцінка потенціалу біомаси в Одеській області (на прикладі двох районів) : фінальний звіт : вибір видів біомасової сировини та технологій її енергетичного використання в умовах Кілійського та Ширяївського районів. Рекомендації щодо найбільш ефективних біоенергетичних проектів [Електронний ресурс]. – Київ : Біомаса Карбон ; Інститут місцевого розвитку, 2017. – 134 с. – URL: <http://myrgorod.pl.ua/files/images/Madem/2.pdf> (дата звернення: 01.12.2025).

52. Статистичний щорічник Хмельницької області за 2024 рік / за ред. Л. О. Хамської. – Хмельницький : Головне управління статистики у Хмельницькій області, 2024. – 395 с. – URL: <http://www.km.ukrstat.gov.ua/ukr/index.htm> (дата звернення: 01.12.2025).

53. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. : розпорядження Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 1071-р [Електронний ресурс]. – URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13/para3#n3> (дата звернення: 01.12.2025).

54. Єрмаков О.Ю. Розвиток і використання біоенергетичного потенціалу сільськогосподарських підприємств : монографія / О.Ю. Єрмаков, В. В. Мельниченко. – Київ : ЦП «Компринт», 2019. – 242 с.

55. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії : курс лекцій : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М. П. Кузнєцов, О. А. Мельник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 304 с.

56. Посівна онлайн 2023/24 / Головний сайт про агробізнес Latifundist.com [Електронний ресурс]. – URL: <https://latifundist.com/posevnaaya-online-2023> (дата звернення: 02.12.2025).

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ



**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІКИ, ДОВКІЛЛЯ ТА СІЛЬСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА УСТАНОВА «УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ» (УКРНДІЕП)
КП «САНЕПІДСЕРВІС»
ТОВ НТВК «УКРАЇНА»**



*Навчально-науковий інститут
інженерної та спеціальної підготовки*

***Екологічні виклики та інновації.
Захист довкілля у сучасному світі***

***Матеріали
Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції***

5 листопада 2025 року

***Черкаси
2025***

<i>ЄФРЕМОВА О. О., МУХА А. О.</i>	
ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ АГРОБІОМАСИ У ХМЕЛЬНИЦЬКІЙ ОБЛАСТІ	138
<i>КРАСУЛЯ Б. О.</i>	
МАЛІ СОНЯЧНІ БАТАРЕЇ НА БАЛКОНАХ БАГАТОКВАРТИРНИХ БУДИНКІВ – ШЛЯХ ДО ЕКОЛОГІЧНОГО МАЙБУТНЬОГО. ПРИКЛАДИ ПІДХОДІВ З ПРАКТИКИ ФРН	140
<i>КРИВОМАЗ Т. І., ЦИБА А. М., ГАМОЦЬКИЙ Р. О.</i>	
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БАГАТОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕТРАДИЦІЙНИХ І ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	142
<i>НЕКЛОНСЬКИЙ І. М.</i>	
ПРОБЛЕМИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ОБ'ЄКТАХ І СПОРУДАХ ІЗ НАЯВНІСТЮ СОНЯЧНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	144
<i>РЕВЕНКО С. І., КОЛІСНИК Н. М., ІЛЬІНСЬКИЙ О. В.</i>	
ВОДОРОСТІ ЯК ПРИРОДНІ ОЧИСНИКИ ВОДИ І ПОВІТРЯ ТА ДЖЕРЕЛО БІОПАЛИВА	146
<i>СТАСЬ С. В., КОЛІЩАК В. Р.</i>	
ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРИ ПЕРЕКАЧУВАННІ ВЕЛИКИХ ОБ'ЄМІВ ВОДИ ПІД ЧАС НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ	148
<i>ЧЕГОЛЯ А. В., ДЕМЕНТ М. О.</i>	
ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГІЇ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	149
<i>ШВЕДОВ В. О.</i>	
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ. РОЗВИТОК НЕТРАДИЦІЙНИХ ТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	151
 <i>Секція 6. Вплив воєнних дій на стан довкілля та природно-заповідний фонд України</i>	
<i>АНИЩЕНКО Л. Я., ПІСНЯ Л. А., СВЕРДЛОВ Б. С.</i>	
ВИЗНАЧЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВІДСТУПІВ ВІД ПРАВИЛ СТРАТЕГІЧНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ДЛЯ ПОДОЛАННЯ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ	154
<i>БЕРЕШКО І. М., ГОЛЬТМАН А. В.</i>	
РОЗРОБКА ПРОГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ ШКОДИ ГРУНТАМ ТА ПІДЗЕМНИМ ВОДАМ ВІД БОЙОВИХ ДІЙ НА ОСНОВІ ІНТЕНСИВНОСТІ БОЙОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ	156
<i>БРИКОВСЬКИЙ А. Г.</i>	
ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕКОСИСТЕМ ПІД ВПЛИВОМ ВОЄННИХ ДІЙ: СТАН, ЗАГРОЗИ ТА ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИРОДИ УКРАЇНИ	157
<i>БУРАКОВА С. Д., КОЛІСНИК Н. М., ІЛЬІНСЬКИЙ О. В.</i>	
РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКА ВІЙНА: ВИКЛИКИ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ	158
<i>ДІДОВЕЦЬ Ю. Ю., СТЕПАНЧУК С. О.</i>	
РУЙНУВАННЯ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ УНАСЛІДОК БОЙОВИХ ДІЙ В УКРАЇНІ	160
<i>ЗЕМЛЯНСЬКИЙ О. М., ЯЩЕНКО О. А.</i>	
ВОЄННИЙ ВПЛИВ НА ПРИРОДНІ ЗАПОВІДНИКИ УКРАЇНИ	161
<i>ІВАНЕНКО С. Є., ШУЛІКА Б. О.</i>	
АЛГОРИТМ ГЕОПРОСТОРОВОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ВОЄННИХ ДІЙ НА ЛАНДШАФТИ	162

матимемо майже 50% резервної електроенергії, проте треба запасатись додатковим паливом.

Акумуляторна батарея (рис. 1б) має схожі параметри та може заряджатися або від мережі змінного струму, або від сонячної фотоелектричної батареї, тобто виглядає більш мобільною, але потребує діючої електричної мережі та сонячного світла, ще не завжди можливо забезпечити в умовах НС.

ЛІТЕРАТУРА

1. Урядовий портал. Держенергонагляд. Державна інспекція енергетичного нагляду. URL: www.gmu.gov.ua.

2. Постанова Кабміну від 6 серпня 2014 р. № 409 «Про встановлення державних соціальних стандартів у сфері житлово-комунального обслуговування». URL: www.gmu.gov.ua.

УДК 620.9:662.63(477.43)

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ АГРОБІОМАСИ У ХМЕЛЬНИЦЬКІЙ ОБЛАСТІ

Єфремова О. О., канд. техн. наук, доц.

Муха А. І., магістр

Хмельницький національний університет

Зростання енергетичних потреб та обмеженість традиційних паливно-енергетичних ресурсів зумовлюють необхідність пошуку альтернативних джерел енергії. В умовах енергетичної кризи, кліматичних змін та зобов'язань України щодо скорочення викидів парникових газів важливого значення набуває розвиток біоенергетики. Залучення (нетрадиційних або альтернативних) джерел енергії до процесу формування необхідного рівня енергетичної безпеки України є об'єктивним і необхідним як з економічної, так із екологічної точки зору. Найважливішу роль серед цих видів джерел енергії в умовах України на найближчу перспективу може відіграти агробіомаса. Використання агробіомаси (побічної продукції сільськогосподарського виробництва, рослинних залишків і спеціально вирощених енергетичних культур) створює передумови для підвищення енергетичної незалежності регіонів та формування замкненого циклу використання ресурсів у сільському господарстві. Хмельницька область, маючи значний аграрний потенціал, є перспективним регіоном для розвитку біоенергетики.

Для умов розвитку сільського та лісового господарства Хмельницької області основними складовими енергетичного потенціалу ми обрали: соломі зернових (в т.ч. соломі ріпаку), відходи виробництва кукурудзи на зерно, відходи виробництва соняшника, цукровий буряк, лущиння соняшника,

деревну біомасу, енергетичну культуру – міскантус, ріпак (на виробництво біодизеля), кукурудзу (для виробництва біогазу).

Оскільки Хмельницька область належить до лісостепової природно-кліматичної зони, то на її території доцільно вирощувати такі енергетичні культури як: тополя, верба, вільха, міскантус. В якості енергокультури обрали міскантус, який має найвищу врожайність.

За розрахунками для умов Хмельницької області енергетичний потенціал вирощування: міскантусу становить 260,1 тис. т у. п.; ріпаку на біодизель – 21,65 тис. т у. п.; кукурудзи на виробництво біогазу – 29,14 тис. т у. п. Загальний економічно доцільний потенціал енергокультур та фітомаси Хмельницької області становить 2596,84 тис. т у. п. відповідно. Найбільшу частку для використання в якості біопалива мають відходи зернових, в тому числі солома ріпаку – 39,52 % від загального потенціалу біомаси в області. Друге місце займають відходи кукурудзи 30,35 %. Третє місце посідають відходи соняшника (стебел та лущиння), 16,21 % від загального потенціалу біомаси в області.

Вирощування енергетичних культур, таких як ріпак, міскантус, кукурудза з метою їх подальшого використання для отримання біопалива знаходиться наразі тільки в перспективі. Але, враховуючи значні площі вільних земель, частка потенційного біопалива із зазначених культур в загальному потенціалі біомаси складе 12 % для умов Хмельницької області. При цьому частка міскантусу (як найвигіднішої енергокультури) складе 10,02 %.

Таким чином можна дійти висновку, що наявного економічного потенціалу енергокультур та фітомаси Хмельницької області достатньо, щоб замінити споживання природного газу на місцеві види палива в системах опалення житлових, виробничих, адміністративних будинків та об'єктах соціальної інфраструктури. Крім того, енергокультури мають ряд переваг, які за сучасних умов можуть стати ключовими, особливо для територій України, які зазнали значного пошкодження внаслідок війни. Основні з них – розвиток економіки, зниження викидів парникових газів, відтворення родючості ґрунтів.

Отже, регіон має достатні можливості для розвитку біоенергетики, що, в свою чергу, може сприяти зниженню залежності від традиційних енергетичних ресурсів, підвищенню рівня енергетичної безпеки області та сприяти екологічній стабільності та економічному процвітанню регіону за умови системного підходу та належної підтримки з боку держави та інвесторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / Ін-т технічної теплофізики НАН України; за ред. Г. Гелетухи. Київ: Академперіодика, 2022. 373 с. URL: http://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/02/block_geletukha_web.pdf (дата звернення: 15.05.2024).

2. Недільська У.І. Особливості вирощування та потенціал урожайності енергетичної культури / У.І. Недільська // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. № 34, 2021. С. 45 – 51. URL: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2021-1-6> (дата звернення: 16.05.2024).

3. Посівна онлайн 2023/24 / Головний сайт про агробізнес. Latifundist.com. URL: <https://latifundist.com/posevnaya-online-2023>. (дата звернення: 18.05.2024).

4. Григорук І.І. Оцінювання енергетичного потенціалу рослинних відходів сільськогосподарського походження / Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України: зб. наук. пр. 2019. Вип. 6(140). С. 57 – 62.

УДК 504.05

МАЛІ СОНЯЧНІ БАТАРЕЇ НА БАЛКОНАХ БАГАТОКВАРТИРНИХ БУДИНКІВ – ШЛЯХ ДО ЕКОЛОГІЧНОГО МАЙБУТЬОГО. ПРИКЛАДИ ПІДХОДІВ З ПРАКТИКИ ФРН

Красуля Б. О., аспірант

Сумський Державний Університет

Сонячні батареї вже давно зайняли помітну частку на ринку відновлювальної електроенергії. Їх поширення в Україні пов'язане як із спрощенням технологій, так і з послідовною державною політикою у цьому секторі. Наприклад, позитивну роль у розвитку відновлюваної енергетики відіграла програма «ГрінДім», через яку приватні домогосподарства могли отримати часткову компенсацію витрат на встановлення локальних сонячних електростанцій.

Як відомо, сонячні електростанції (СЕС) отримали особливо широке поширення у приватному секторі, оскільки потребують менш складної процедури встановлення. Це стосується батарей потужністю до 30 кВт включно.

Ситуація з встановленням СЕС у багатоквартирних будинках стикається з набагато більшими юридичними обмеженнями. Культура сталого розвитку охоплює також екологічне право, формуючи його та розвиваючи правосвідомість громадян. Тому, на нашу думку, доцільно розглянути приклади впорядкування процесу встановлення СЕС на дахах багатоквартирних будинків у країнах – членах Європейського Союзу. Ця тема є особливо актуальною з огляду на прагнення України до інтеграції в ЄС.

Наразі в Україні для встановлення СЕС у багатоквартирному будинку необхідно виконати три основні умови. По-перше, отримати згоду більшості співвласників на загальних зборах ОСББ. По-друге, витратити час на виготовлення технічної документації, що підтверджує безпечність конструкції. І, нарешті, отримати технічний висновок щодо можливості встановлення сонячних панелей на даху будинку.

Загалом, можна сказати, що чинні норми українського екологічного законодавства, як складової екологічної культури, є відносно простими та