

**О. М. ГАНЖЕНКО, В. М. КВАК, В. І. КРАВЧУК,
М. Я. ГУМЕНТИК, Я. Д. ФУЧИЛО, О. Б. ХІВРИЧ,
Л. А. ПРАВДИВА**

АГРОЕКОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ



КИЇВ 2026

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР І ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ**

**О. М. Ганженко, В. М. Квак, В. І. Кравчук, М. Я. Гументик,
Я. Д. Фучило, О. Б. Хіврич, Л. А. Правдива**

**АГРОЕКОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ
ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ
БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР**

Науково-методичні рекомендації

Київ 2026

УДК 631.95; 633.282; 662.631; 502.174.3
<https://doi.org/10.47414/978-617-8706-38-8>

*Рекомендовано до опублікування
вченою радою Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН
(протокол № 8 від 08 квітня 2026 р.)*

Рецензенти:

В. А. Доронін, доктор с.-г. наук, професор;
В. Т. Саблук, доктор с.-г. наук, професор
(Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН)

**Ганженко О. М., Квак В. М., Кравчук В. І., Гументик М. Я., Фучило Я. Д., Хіврич О. Б.,
Правдива Л. А.** Агроекологічні засади низьковуглецевих елементів технологій вирощування багаторічних біоенергетичних культур : науково-методичні рекомендації / НААН України, Ін-т біоенергет. культ. і цукр. буряків. Електрон. вид. Київ : ІБКіЦБ НААН, 2026. 68 с.

ISBN 978-617-8706-38-8

У науково-методичних рекомендаціях наведено аналіз стану та перспектив розвитку біоенергетики в Україні і світі та її вплив на процеси декарбонізації. Розглянуто роль багаторічних біоенергетичних культур (міскантусу гігантського та верби прутувидної) у процесах декарбонізації та здійснено оцінку вуглецевого сліду за їх вирощування. Оцінено енергетичний потенціал біомаси багаторічних біоенергетичних культур та обсяги поглинання атмосферного вуглецю, а також обґрунтовано комплекс низьковуглецевих елементів технологій їх вирощування.

Для науковців, студентів вищих аграрних закладів освіти III–IV рівнів акредитації, агрономів, керівників господарств, фермерів, зацікавлених у вирощуванні багаторічних біоенергетичних культур.

УДК 631.95; 633.282; 662.631; 502.174.3
<https://doi.org/10.47414/978-617-8706-38-8>



Цей твір поширюється на умовах ліцензії CC BY-NC-SA 4.0
(Creative Commons «Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International)

ISBN 978-617-8706-38-8

© Інститут біоенергетичних культур
і цукрових буряків НААН України, 2026
© Колектив авторів, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ І СВІТІ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПРОЦЕСИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ	6
1.1. Аналіз світових тенденцій розвитку відновлювальних джерел енергії ..	6
1.2 Вимоги оновленої директиви щодо сталого розвитку біоенергетики	7
1.3. Цілі України на шляху до низьковуглецевої енергетики	9
РОЗДІЛ 2 РОЛЬ БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР У ПРОЦЕСАХ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ	11
2.1. Значення міскантусу гігантського у зменшенні викидів парникових газів.....	11
2.1.1. Механізми зменшення парникових газів за вирощування міскантусу гігантського	12
2.1.2. Порівняльна оцінка міскантусу гігантського з іншими енергетичними культурами.....	13
2.1.3. Вуглецевий баланс і потенціал секвестрації вуглецю у плантаціях міскантусу гігантського	15
2.1.4. Енергетичні та економічні аспекти використання міскантусу гігантського у контексті скорочення парникових газів.....	17
2.1.5. Екологічні переваги вирощування міскантусу гігантського та його роль у стійкому землекористуванні.....	19
2.2. Вплив плантаційного вирощування енергетичної верби на процеси декарбонізації	21
2.2.1. Світові тенденції вирощування деревних енергетичних культур	21
2.2.2. Енергетичні плантації в Україні та їх вплив на екологічний стан довкілля	22
2.2.3. Енергетична верба як фактор декарбонізації	24
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЗА ВИРОЩУВАННЯ БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР	28
3.1. Викиди парникових газів за вирощування міскантусу гігантського ...	28

3.2 Аналіз прогнозного вуглецевого балансу плантації міскантусу	33
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ БІОМАСИ БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР ТА ОБСЯГИ ПОГЛИНАННЯ АТМОСФЕРНОГО ВУГЛЕЦЮ ЗА ЇХ ВИРОЩУВАННЯ.....	35
4.1 Динаміка продуктивності біоенергетичних культур за роками вегетації	36
4.2 Обсяги поглинання атмосферного CO ₂ плантаціями міскантусу та верби	37
4.2.1. Поглинання CO ₂ плантаціями міскантусу	38
4.2.2. Поглинання CO ₂ плантаціями верби.	38
4.3 Енергетичний потенціал біомаси міскантусу та верби	39
РОЗДІЛ 5 ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР	41
5.1 Аналіз ключових джерел викидів парникових газів у технології вирощування міскантусу	41
5.2 Обґрунтування низьковуглецевих елементів технології вирощування міскантусу	43
5.3 Аналіз ключових джерел викидів у технології вирощування енергетичної верби	45
5.4 Обґрунтування низьковуглецевих елементів технології вирощування енергетичної верби	46
5.5 Порівняльна оцінка ефективності низьковуглецевих заходів	48
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

ВСТУП

Загострення екологічних проблем спонукає людство до пошуку шляхів виробництва і використання відновлювальних джерел енергії, що є одним із пріоритетів світової економіки [7, 140, 84, 3, 110]. Підтвердженням цього є підписання нової Кліматичної Угоди, яка передбачає уповільнення темпів зростання середньорічної температури, шляхом приведення у другій половині XXI століття викидів парникових газів до рівня, який природа здатна переробляти без шкоди для себе [41, 64, 63, 107, 119, 156, 20, 145]. З цією метою передбачається щорічно залучати 100 млрд \$ для заміни традиційних джерел енергії відновлювальними, серед яких значне місце посідає біоенергетика.

Європейський зелений курс, прийнятий країнами ЄС як дорожня карта для переходу до вуглецево нейтральної економіки, передбачає повний перехід на відновлювальні джерела енергії до 2050 року, а оновлена Директива ЄС щодо розвитку ВДЕ вимагає щоб у валовому кінцевому споживанні енергії країн ЄС частка ВДЕ до 2030 року становила щонайменше 42,5 відсотки [43].

До початку повномасштабного вторгнення Україна зберігала суттєву залежність від імпорту викопних енергоносіїв. Щорічні витрати на закупівлю газу, нафтопродуктів та вугілля сягали близько 15 млрд доларів, тоді як внутрішнє виробництво забезпечувало лише дві третини загального споживання первинної енергії [167]. Розвиток біоенергетики, що базується на використанні біосировини рослинного походження, дозволяє радикально змінити цей баланс. Україна володіє унікальним потенціалом завдяки сприятливим ґрунтово-кліматичним умовам, що дають змогу вирощувати широкий спектр біоенергетичних культур як на родючих землях, так і на територіях, що наразі виведені з активного агровиробництва.

Світовий тренд на декарбонізацію економіки вимагає від України пошуку шляхів зниження викидів парникових газів. Рослинна біомаса є одним із найбільш екологічно чистих джерел енергії. Процес її використання характеризується вуглецевою нейтральністю: обсяг CO₂, що виділяється під час спалювання або переробляння біопалива, є меншим за обсяг вуглекислого газу, поглинутого рослинами в процесі фотосинтезу. Порівняно з традиційним вугіллям, біопаливо утворює у 20–30 разів менше оксидів сірки та у 3–4 рази менше золи, що суттєво зменшує навантаження на довкілля. Крім того, органічні залишки, що утворюються в процесі виробництва рідкого або газоподібного біопалива, можуть бути використані як високоефективні добрива, що сприяє замиканню циклу обігу поживних речовин у сільському господарстві.

Розвиток біоенергетичного сектору безпосередньо впливає на відродження сільських територій. Створення сировинної бази стимулює появу нових робочих місць у галузях агровиробництва, логістики, інженерії та будівництва. Для аграрних підприємств це означає диверсифікацію доходів та можливість довгострокового планування. Особливої уваги заслуговує науковий підхід до освоєння маргінальних (малопродуктивних, деградованих та пошкоджених бойовими діями) земель. Вирощування багаторічних культур, таких як міскантус чи свічграс, на таких територіях сприяє поступовому відновленню родючості ґрунтів та акумуляції органічного вуглецю, перетворюючи «баластні» землі на енергетичний ресурс.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ І СВІТІ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПРОЦЕСИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ

1.1. Аналіз світових тенденцій розвитку відновлювальних джерел енергії

Розвиток людської цивілізації супроводжується постійним зростанням споживання енергетичних ресурсів. Так впродовж останніх 50 років світові обсяги споживання енергії зросли майже у 2,6 разу, з 66,3 ПВт-год у 1973 році до 172,1 ПВт-год у 2023 році, при цьому споживання нафтопродуктів за цей час зросло у 1,7 разу, вугілля – у 2,6 разу, природного газу – у 3,5 разу. Станом на 2023 рік 81,6 % енергії в світі виробляється з викопних видів палива: нафти (31,5 %), вугілля (26,3 %) та природного газу (23,7 %) і лише 18,4 % – це енергія, вироблена за низьковуглецевими технологіями: атомна (3,9 %) та відновлювальні джерела енергії (14,5 %) [52, 68, 14, 6, 87].

Таке інтенсивне використання викопних джерел енергії впродовж останніх 50 років призвело до зростання викидів парникових газів (ПГ) в атмосферу Землі у 2,2 разу. Так, якщо у 1973 році емісія вуглекислого газу від спалювання викопних енергоносіїв становила 17,1 млрд т, то за 2023 рік в атмосферу потрапило 37,8 млрд т CO₂. Це призвело до зростання концентрації вуглекислого газу в атмосфері Землі, що стало причиною глобальних змін клімату, головним індикатором яких є зростання середньої температури повітря на планеті [38, 7, 140].

Проаналізувавши структуру світових викидів парникових газів за галузями виробництва можна зробити висновок, що майже три чверті викидів генерується в галузі енергетики (73,2%), майже п'ята частина – в галузі сільськогосподарського виробництва (18,4%), а решта – у промисловості (5,2%) та з відходів (3,2%). Цілий ряд галузей та процесів сприяють глобальним викидам, тому немає єдиного або простого рішення для боротьби зі зміною клімату. Зосередження лише на електроенергії, транспорті, продуктах харчування або вирубці лісів є недостатнім. Навіть якщо повністю вдасться декарбонізувати виробництво електроенергії, потрібно буде електрифікувати опалювальний сектор та автомобільний транспорт, крім того залишилися б викиди від судноплавства та авіації, для вирішення яких ще відсутні низьковуглецеві технології [126, 84, 3, 110].

Отже, для досягнення чистого нульового рівня викидів потрібні системний підхід та інновації у багатьох секторах економіки, особливо в енергетичній сфері та агропромисловому комплексі. З огляду на це заміна викопних видів палива на відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) є першим і найбільш дієвим кроком на шляху до вуглецево нейтральної економіки, яка має бути досягнута до кінця поточного століття. Однак на сьогодні частка відновлювальних джерел енергії в структурі загального енергоспоживання становить у світі лише 14,5 %, а у країнах європейського континенту – 24,5 % [125]. Світовими лідерами в сфері виробництва і використання ВДЕ є Ісландія, Норвегія та Швеція, в яких понад 50 відсотків енергії виробляється з нетрадиційних джерел. В Україні частка ВДЕ становить лише 4,9 % від загальних обсягів постачання первинної енергії [169].

Отже на шляху до євроінтеграції та для побудови низьковуглецевої економіки Україні необхідно більше уваги приділяти розвитку відновлювальних джерел енергії.

Паризька кліматична угода не містить конкретних кількісних зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів чи зменшення використання викопних палив, натомість у ній передбачено рамкову ціль щодо обмеження підвищення глобальної температури нижче 2, а бажано 1.5 °C у порівнянні із до індустріальним рівнем [41, 64, 63, 107, 119, 156, 20, 145]. Кожна країна самостійно вирішують, які механізми потрібні для досягнення поставленої цілі, водночас країни кожні п'ять років подають національно визначені внески, де зазначають свої індивідуальні кількісні зобов'язання скорочення викидів [109]. Зокрема США заявили про скорочення викидів парникових газів на 50-52% до 2030 року порівняно з рівнем 2005 року [111], Японія зобов'язалася скоротити вдвічі викиди до 2030 року (від рівня 2005 року) [112]. Індія до 2030 року планує ввести 450 ГВт потужностей ВДЕ [112]. Країни Європейського Союзу зобов'язались на 55% зменшити викиди парникових газів до 2030 року, а Великобританія – на 78% до 2035 року (від рівня 1990 року) [91]. Враховуючи великі прощі вічної мерзлоти Росія береться здійснювати моніторинг за викидами метану [112]. Китай задекларував поступове скорочення кількості вугільних ТЕС та відмову від вугілля.

У грудні 2019 року Європейська Комісія прийняла Європейський зелений курс (ЄЗК) – комплекс заходів, який визначає політику ЄС на найближчі роки у таких сферах як клімат, енергетика, біорізноманіття, промислова політика, торгівля тощо [138, 26, 133, 82, 128, 25, 148, 116, 149, 31, 67]. Основна мета цього курсу – сталий зелений перехід Європи до кліматично-нейтрального континенту до 2050 року. На сьогодні Європейська Комісія підготувала пропозицію щодо регламенту «Європейський кліматичний закон» [124], яким на рівні законодавства ЄС пропонує закріпити цілі та шляхи досягнення кліматичної нейтральності ЄС до 2050 року. Водночас ЄЗК вимагає перегляду чинних кліматичних цілей ЄС до 2030 року, які стають проміжними для Європейського зеленого курсу, – підвищити скорочення викидів ПГ з 40% до 50-55% (в порівнянні з 1990 роком), та відповідних політик та інструментів, необхідних для їх досягнення. Крім того Європейська Комісія пропонує запровадити заходи карбонового протекціонізму [56] виробників ЄС через механізм карбонового коригування імпорту (carbon border adjustment mechanism).

1.2. Вимоги оновленої директиви щодо сталого розвитку біоенергетики

Екологічні аспекти виробництва та використання біопалива в Європі виписані у Вимогах Сталості [42, 44, 43]. 20 листопада 2023 року вступила в дію Директива (ЄС) 2023/2413 [43], якою вносяться зміни до Директиви (ЄС) 2018/2001 [42] та інших правових документів ЄС щодо сприяння використанню енергії з ВДЕ. Цією Директивою встановлено нові цілі на шляху до переходу на вуглецево нейтральну економіку. Так, країни ЄС мають спільно забезпечити, щоб у 2030 році частка ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії становила щонайменше 42,5 %, з індикативним збільшенням до 45%. Крім того, країни ЄС

мають встановити індикативну ціль для інноваційних технологій ВДЕ на рівні принаймні 5% нових потужностей до 2030 року.

Відповідно до Директиви, країни ЄС повинні забезпечити, щоб органи влади на національному, регіональному та місцевому рівнях включали положення щодо інтеграції та розгортання ВДЕ, у тому числі для власного споживання під час планування, проєктування, будівництва та реконструкції міської інфраструктури, промислових, комерційних або житлових районів, енергетичної та транспортної інфраструктури.

Влада на місцях також повинна охоплювати технології ВДЕ у секторі опалення та охолодження під час планування міської інфраструктури, а також проводити консультації з операторами мереж, щоб відобразити вплив енергоефективності під час споживання енергії.

Країни ЄС повинні сприяти ухваленню проєктів з ВДЕ громадськістю шляхом прямої та опосередкованої участі місцевих громад у цих проєктах. Крім того, має бути забезпечена участь громадськості у розробці планів визначення зон прискорення використання ВДЕ.

Щоб мати достатню спроможність на втілення проєктів, країни ЄС мають забезпечити наявність навчальних програм, що охоплюватимуть навчання технологій опалення та охолодження з використанням ВДЕ, сонячних фотоелектричних систем, включаючи накопичувачі енергії, пункти підзарядки, що дозволяють реагувати на попит.

Водночас до 21 листопада 2024 року Єврокомісія створила бази даних ЄС для відстеження рідкого та газоподібного відновлюваного палива та переробленого вуглецевого палива, а до 31 грудня 2025 року – затвердила створення позначки маркування для нових установок ВДЕ. Виробники ж будуть використовувати інформацію, що міститься в гарантіях походження, щоб продемонструвати відповідність вимогам такого маркування.

Біомаса та біопаливо, які не відповідають вимогам сталості, передбаченим у директиві, не зараховуються до нових високих нормативних часток відновлювальної енергії і тому виключаються з програм підтримки у країнах ЄС та країнах-членах. Іншими словами, біопалива, які не відповідають встановленим вимогам, зникнуть з ринку ЄС, а місцеві та закордонні постачальники будуть змушені підтверджувати дотримання нових встановлених вимог. Це означає, що Вимоги Сталості не забороняють виробництво несталих біопалив як таких, але виключають їх з державних програм підтримки. Для отримання переваг, виробники сировини та біопалива повинні надавати достатньо доказів виконання Вимог Сталості.

Таким чином, світова спільнота, як ніколи раніше занепокоєна негативними екологічними тенденціями, спричиненими, в першу чергу, інтенсивним використанням викопних видів палива та об'єднує зусилля для їх подолання. З огляду на це розвиток біоенергетики, як складової частини ВДЕ, є необхідною передумовою для вирішення глобальних викликів пов'язаних зі зміною клімату.

1.3. Цілі України на шляху до низьковуглецевої енергетики

Україна не забезпечена у достатній кількості власними викопними джерелами енергії і змушена імпортувати значні обсяги енергоресурсів, на що витрачає близько 15 млрд \$ щорічно [167]. Тому розвиток відновлювальної енергетики сприятиме укріпленню енергетичної, економічної і політичної безпеки нашої держави. Незважаючи на це в Україні недостатньо уваги приділяється розвитку відновлювальних джерел енергії, частка яких станом на 2020 рік склала лише 6,6 % [169]. Це значно менше порівняно з іншими країнами Європи. Серед відновлювальних джерел енергії в Україні найбільшого розвитку набуло виробництво і використання біологічних видів палива, частка яких у кінцевому енергоспоживанні становить 4,5 %.

Отже, розвиток виробництва біоенергетичних культур дозволить зменшити залежність України від імпортних енергоносіїв та сприятиме створенню сталої сировинної бази для виробництва різних видів біопалива.

Цілі України щодо розвитку ВДЕ встановлені в ключових стратегічних документах. Енергетична стратегія України до 2035 року (Розпорядження КМУ №605-р від 18.08.2017 р.) передбачає стале розширення використання всіх видів відновлюваної енергетики, яка стане одним з інструментів гарантування енергетичної безпеки держави [173]. У коротко- та середньостроковому горизонті (до 2025 року) стратегія прогнозує зростання частки відновлюваної енергетики до рівня 12 % від загального постачання первинної енергії та не менше 25 % – до 2030 року.

Водночас енергетична стратегія передбачає зростання сектору біоенергетики, який використовує тверду біомасу та біогаз як енергоресурс, що зумовлюватиметься як відносною сталістю виробництва (за наявності ресурсної бази), так і тенденцією до формування локальних генеруючих потужностей. Перевага віддаватиметься одночасному виробництву теплової та електричної енергії в когенераційних установках і заміщенню вуглеводневих видів палива. Передбачається, що до 2035 року біоенергетична галузь постачатиме 11 млн.т.н.е. біопалива, що становитиме 11,5 % в структурі загального постачання первинної енергії [173]. Енергетична стратегія передбачає збільшення використання біомаси у генерації електро- та теплоенергії за рахунок створення конкурентних ринків біопалива, стимулювання використання біомаси як палива на підприємствах, де біомаса є залишковим продуктом та інформування про можливості використання біомаси як палива в індивідуальному теплопостачанні.

Енергетична стратегія України на період до 2050 року передбачає відновлення енергетичного сектору за найсучаснішими технологіями, зміцнення стійкості системи та посилення енергетичної безпеки України і європейського континенту в цілому. Ключове завдання стратегії - перетворення України на енергетичний хаб Європи, який допоможе континенту остаточно позбутися залежності від російського викопного палива завдяки виробленій в Україні чистій енергії [174].

Одним із основних орієнтирів економіки України згідно Національної економічної стратегії до 2030 року (Постанова КМУ №179 від 03 березня 2021 р.) є декарбонізація економіки, підвищення енергоефективності, розвиток відновлюваних джерел енергії, розвиток циркулярної економіки та синхронізація із ініціативою “Європейський зелений курс”. У стратегії передбачається сформувати частку генерації електроенергії з ВДЕ на рівні 25% у загальному балансі, водночас планується залучити 10 млрд.\$ інвестицій у відновлювальну енергетику [194]. Разом з тим відмічається, що потужності відновлюваних джерел енергії характеризуються низькою маневреністю генерації та високою залежністю від погодних умов, що ускладнює процес прогнозування попиту та пропозиції на ринку електроенергії. Додатковий ефект на вже недостатньо маневрену систему генерації призвів до появи технологічних викликів балансування системи в певні періоди, а також до обмеження відновлюваних джерел енергії у виробництві електроенергії, що призводить до формування надлишку енергії та унеможливує подальше підключення потужностей відновлюваних джерел енергії за поточних умов. Розглядається можливість трансформації залишку енергії у водень для подальшого експорту до ЄС.

У Звіті з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2020 році (Постанова КМУ №975 від 16.06.2021 р.) відмічається, що найбільш вагомим чинником трансформації умов функціонування об'єднаної електроенергетичної системи України на сьогодні є швидке впровадження електричних станцій з негарантованою потужністю з відновлювальних джерел енергії, що не супроводжуються паралельним вводом регулюючих потужностей з відповідними характеристиками та обсягами. Навіть в умовах зразкової роботи ринку допоміжних послуг забезпечення необхідних обсягів резервів на наявному працюючому обладнанні є неможливим. Тому, наразі майже щодня порушуються вимоги до забезпечення необхідних обсягів резервів. Водночас звіт передбачає зростання частки ВДЕ (включаючи гідроелектростанції) до 2030 року до 20 % за базовим сценарієм та до 16,4% – за цільовим сценарієм [183].

Згідно оновленого національного визначеного внеску України до Паризької Кліматичної Угоди частка ВДЕ (включаючи великі ГЕС та ГАЕС) у виробництві електроенергії до 2030 року має становити 30%. Водночас передбачається, що обсяг викидів парникових газів в Україні до 2030 року не перевищуватиме 35 % від рівня 1990 року, а повної кліматичної нейтральності заплановано досягти не пізніше 2060 року [161].

Таким чином, аналіз світових та вітчизняних стратегій засвідчує пріоритетність розвитку галузі відновлювальних джерел енергії, що є найбільш дієвим чинником для пом'якшення негативних змін клімату. Водночас враховуючи низьку маневреність електрогенерації та високу залежність від погодних умов повний перехід на виробництво електроенергії з ВДЕ пов'язаний зі значними проблемами. З огляду на це для України більш прийнятною є стратегія, спрямована на розвиток різних видів біопалив (твердого, рідкого і газоподібного).

РОЗДІЛ 2

РОЛЬ БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР У ПРОЦЕСАХ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ

Зміна клімату є одним із ключових викликів XXI століття, пов'язаних із зростанням концентрації парникових газів (ПГ) у атмосфері, насамперед діоксиду вуглецю (CO_2), метану (CH_4) та оксиду азоту (N_2O). Викиди цих газів є результатом інтенсивного використання викопного палива, деградації земель, промислових процесів та сільського господарства [105, 94]. За даними Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC), для обмеження глобального потепління на рівні $1,5 - 2^\circ\text{C}$, як це передбачено у Паризькій Кліматичній Угоді [109], необхідне значне скорочення викидів ПГ та впровадження технологій негативних викидів, таких з уловлюванням і зберіганням вуглецю (BECCS) [137].

2.1. Значення міскантусу гігантського у зменшенні викидів парникових газів

Одним із перспективних напрямів є використання енергетичних культур, зокрема міскантусу гігантського (*Miscanthus × giganteus*) – багаторічної C_4 -трави, що характеризується високою продуктивністю біомаси, низькими потребами у добривах і здатністю до секвестрації вуглецю у ґрунті [70, 83, 127, 76]. На відміну від однорічних культур, таких як кукурудза чи ріпак, міскантус формує потужну кореневу систему, яка сприяє накопиченню органічної речовини в ґрунті, покращенню його структури та зменшенню ерозійних процесів [127, 100, 115].

Дослідження показують, що вирощування міскантусу може забезпечити істотне скорочення викидів CO_2 -еквіваленту, головним чином за рахунок заміщення викопних джерел енергії, накопичення вуглецю в біомасі й ґрунті, а також зменшення викидів N_2O порівняно з традиційними культурами [137, 70, 35, 92, 62]. Так, за оцінками Clifton-Brown та співавторів [35], вирощування міскантусу в Європі здатне зменшити викиди до 20 т CO_2 /(га·рік), а при повному життєвому циклі – забезпечити від'ємний вуглецевий баланс.

У той самий час актуальними залишаються питання оцінки реального кліматичного ефекту міскантусу, оскільки він залежить від регіональних умов, способу обробітку ґрунту, строків збирання, систем удобрення та кінцевого використання біомаси [48, 59, 122].

Загалом, у сучасній науковій літературі міскантус розглядається не лише як енергетична культура, але й як агроекологічний інструмент зменшення антропогенного впливу на клімат. Його здатність до секвестрації вуглецю, низькі потреби у ресурсах та можливість вирощування на маргінальних землях роблять цю рослину перспективною складовою стратегії «зеленого переходу» в аграрному секторі [70, 92].

2.1.1. Механізми зменшення парникових газів за вирощування міскантусу гігантського

Роль міскантусу гігантського у скороченні викидів парникових газів (ПГ) проявляється через кілька взаємопов'язаних механізмів: фіксацію вуглецю в біомасі, накопичення органічного вуглецю у ґрунті, зменшення непрямих викидів N_2O та заміщення викопних енергоресурсів [24, 103, 85, 153]. Міскантус як рослина з фотосинтезом C_4 має підвищену ефективність засвоєння CO_2 порівняно з культурами C_3 -типу (пшениця, ячмінь). Він демонструє вищу чисту первинну продуктивність навіть у помірному кліматі [59, 153].

За результатами досліджень Г'югса та співавторів [66], великомасштабне висадження міскантусу може призвести до зниження концентрації атмосферного CO_2 на 160 – 320 ppmv протягом ХХІ століття за рахунок комбінованого ефекту секвестрації та заміщення викопного палива. Моделювання показало, що середній час «окупності вуглецю» (тобто період, за який викиди під час створення плантації компенсуються подальшою фіксацією CO_2) становить близько 30 років.

Дослідження Робертсона та співавторів [127] у Великій Британії засвідчили, що навіть без істотного збільшення запасів ґрунтового вуглецю плантації міскантусу можуть бути вуглецево нейтральними або від'ємними за повного життєвого циклу. Основну роль у цьому відіграє надземна біомаса, що використовується для виробництва енергії із заміщенням викопного палива.

У довгострокових спостереженнях Мур та співавтори [105] показано, що переходи від традиційних культур (кукурудза, соя) до багаторічних біоенергетичних плантацій, зокрема міскантусу, збільшують загальні запаси органічного вуглецю в агроєкосистемі вже з першого року після посадки. Це відбувається завдяки стабілізації гумусових сполук у ґрунті та утворенню стійких агрегатів.

Однією з ключових переваг міскантусу є низький рівень викидів оксиду азоту (N_2O) порівняно з традиційними культурами. Завдяки мінімальному внесенню добрив, повільній мінералізації залишків і відсутності інтенсивного обробітку ґрунту, у ґрунтовому профілі формується стабільне середовище з низькою мікробною активністю денітрифікаторів [104, 147, 21].

За даними Олесена [115], заміна зернових на плантації міскантусу зменшує викиди N_2O приблизно на 30 – 36 т CO_2 -екв./(га·рік), що еквівалентно скороченню на 20 – 25% загальних сільськогосподарських викидів.

Дослідження Кейна та співавторів [83] із використанням системи SkyBeam показало, що додавання органічних добрив (компосту) може тимчасово підвищити викиди CO_2 і N_2O , проте в цілому баланс залишається від'ємним: протягом двох років плантація зменшила чисті ґрунтові викиди парникових газів на 37%.

Щодо метану (CH_4), більшість досліджень показують нульовий або слабкий позитивний баланс, тобто поглинання метану з атмосфери компенсує незначні емісії [150]. Це пояснюється аеробним середовищем у кореневій зоні та високим ступенем окисації метану у верхніх горизонтах ґрунту.

Найсуттєвіший внесок міскантусу у скорочення викидів полягає в заміщенні енергії з вугілля, нафти або газу біоенергією з його біомаси [99, 24]. За даними Гастінгса та співавторів [70], вирощування міскантусу на існуючих орних землях Європи може забезпечити до 17% сучасного первинного енергоспоживання континенту до 2080 року при одночасному скороченні викидів CO₂.

Кліфтон-Браун та співавтори [35] підраховали, що спалювання біомаси міскантусу гігантського, вирощеного на площі 1 га, скорочує викиди ПГ приблизно на 20 т CO₂-екв. Щорічно у порівнянні зі спалюванням вугілля, а повний життєвий цикл забезпечує від'ємний вуглецевий слід (до -24,5 т CO₂-екв. га⁻¹ рік⁻¹) [127, 92].

Завдяки багаторічності культури, відсутності необхідності щорічної сівби й мінімальній потребі у добривах, енергетичні витрати на вирощування міскантусу становлять лише 10 – 20% від витрат на традиційні зернові культури [47]. При цьому коефіцієнт енергетичної ефективності (відношення виробленої енергії до витраченої) може перевищувати 15, що в декілька разів вище, ніж у ріпаку чи кукурудзи [99].

Сукупна дія зазначених механізмів дозволяє розглядати міскантус як один із найбільш ефективних біоенергетичних інструментів для досягнення кліматичної нейтральності. У порівняльному аналізі систем біоенергії, проведеному Фельтеном і Еммерлінгом [59], вуглецевий баланс міскантусу був кращим, ніж у ріпаку та кукурудзи, із загальною потенційною економією викидів понад 30 т CO₂-екв. на гектар.

Додатково, результати Левандовскі та співавторів [92] у межах проєкту OPTIMISC підтверджують, що за оптимального розміщення плантацій і скорочення транспортних витрат питомі викиди CO₂ можна знизити до -78 євро за тону CO₂-екв., що робить міскантус однією з небагатьох культур із негативною собівартістю вуглецевого скорочення.

Таким чином, поєднання високої продуктивності біомаси, мінімального агрохімічного навантаження та здатності до довготривалої секвестрації вуглецю робить міскантус гігантський стратегічною культурою для реалізації програм декарбонізації сільського господарства та енергетики.

2.1.2. Порівняльна оцінка міскантусу гігантського з іншими енергетичними культурами

Одним із найважливіших аспектів оцінки ролі міскантусу у скороченні парникових газів є його порівняння з альтернативними культурами, які також використовуються для виробництва біоенергії – ріпак (для біодизеля), кукурудза (для біоетанолу та біогазу), енергетична верба (для твердого біопалива), а також просо прутоподібне (для твердого біопалива) [150, 104, 10, 151, 59].

За продуктивністю біомаси міскантус посідає одне з провідних місць серед усіх енергетичних культур. Дослідження Гастінгса та співавторів [70] показали, що середня врожайність сухої маси в умовах помірного клімату Європи становить 15 – 25 т/га, тоді як у кукурудзи цей показник не перевищує 10 – 12 т/га, а у ріпаку – лише 3 – 5 т/га. Крім того, коефіцієнт енергетичної ефективності у міскантусу сягає 14 – 20, тоді як у кукурудзи – близько 4, у ріпаку

– 3 [92]. Це пояснюється низькими витратами на агротехнічні операції, відсутністю потреби у щорічному засіванні й високою концентрацією вуглецю в сухій речовині (до 50% маси).

За результатами порівняльного аналізу систем біоенергії, проведеного Фельтеном і Фреба [59], міскантус забезпечує у 3–5 разів більший ефект скорочення викидів парникових газів, ніж традиційні однорічні культури, і має найвищий коефіцієнт вуглецевої окупності серед біоенергетичних систем.

Порівняльні польові спостереження показують, що перехід від пасовищ чи ріллі до плантацій міскантусу сприяє зростанню запасів ґрунтового органічного вуглецю на 0,5–1,0 т/(га·рік), тоді як кукурудза або ріпак зазвичай демонструють нейтральний або навіть від’ємний баланс через інтенсивний обробіток ґрунту [83, 135, 157].

Моделльні розрахунки Дондіні та співавторів [92] із використанням системи ECOSSE показали, що після переходу з ріллі на багаторічні плантації міскантусу за 15–20 років можна накопичити до 20–30 т органічного вуглецю на гектар, що є еквівалентом зменшення понад 100 т CO₂ в атмосфері.

Міскантус має істотно нижчий потенціал викидів N₂O, ніж кукурудза або ріпак. Це зумовлено тим, що його потреба в азоті не перевищує 50–60 кг д.р./га, тоді як для кукурудзи – 150–200 кг, а для ріпаку – понад 250 кг [122, 153, 24].

У дослідженнях Кейна та співавторів [83] показано, що навіть після внесення компосту (органічного добрива) чисті викиди N₂O залишалися нижчими на 40%, ніж у кукурудзи. Натомість у разі інтенсивного азотного живлення кукурудзи чи пшениці саме оксид азоту стає головним джерелом кліматичного впливу – до 70% від загального вуглецевого сліду системи [150].

Міскантус здатний рости на маргінальних або деградованих землях, не конкуруючи з продовольчими культурами. Це дає можливість збільшити виробництво біомаси без скорочення площ під традиційними сільськогосподарськими культурами [103]. На відміну від кукурудзи чи ріпаку, які вимагають родючих ґрунтів і часто призводять до ерозії та втрат гумусу, міскантус покращує структуру ґрунту, зменшує випаровування та підвищує біорізноманіття в агроландшафтах [147, 158, 153].

Дослідження Дон та співавторів [47] показали, що перехід з пасовища до плантації міскантусу зменшує втрати вуглецю на 4,7% уже за перші шість років, тоді як аналогічна конверсія під кукурудзу призводить до втрати 8–12% запасів органічного вуглецю.

Розрахунки життєвого циклу систем біоенергії (Life Cycle Assessment) у рамках європейського проекту OPTIMISC (Левандовські та співавтори [11]) показали, що середній показник зменшення викидів за використання біомаси міскантусу для енергетичних цілей становить до 30,6 т CO₂-екв. га⁻¹·рік⁻¹, тоді як у ріпаку це показник становить близько 6, у кукурудзи – 12, у верби – 18 т CO₂-екв. га⁻¹·рік⁻¹. Крім того, собівартість зменшення викидів у системі міскантусу була від’ємною (-78 євро/т CO₂), тобто прибутковою навіть без додаткових субсидій, тоді як для більшості інших культур цей показник позитивний, що означає потребу у фінансовій підтримці.

Узагальнюючи інформацію з наукових публікацій, можна стверджувати, що міскантус гігантський має найвищий екологічний і кліматичний ефект серед відомих енергетичних культур. Його довготривала стабільність, низькі потреби в агрохімікатах, позитивний вплив на ґрунт і висока енергетична віддача роблять його еталоном для систем сталого виробництва біоенергії та скорочення викидів парникових газів у сільському господарстві.

2.1.3. Вуглецевий баланс і потенціал секвестрації вуглецю у плантаціях міскантусу гігантського

Поняття вуглецевого балансу полягає у різниці між кількістю вуглецю, зафіксованого рослиною під час фотосинтезу, та вуглецем, який вивільняється у процесах дихання, розкладання органіки і використання біомаси. У плантаціях міскантусу цей баланс, як правило, є від'ємним, тобто культура фіксує більше вуглецю, ніж виділяє упродовж свого життєвого циклу [105, 127, 35, 48].

Загальний баланс вуглецевого обміну включає чисту первинну продуктивність (ЧПП) – кількість вуглецю, фіксованого фотосинтезом; гетеротрофне дихання (R_h) – втрати через розклад органічної речовини; автотрофне дихання (R_a) – дихання коренів і надземних частин; нетто-екосистемний обмін (NEE) – сумарна різниця між фіксацією і втратами вуглецю.

Дослідження МакКалмонта та співавторів [100] у комерційних плантаціях Уельсу показало, що впродовж двох років після садіння плантація міскантусу залишалась джерелом виділення вуглецю в атмосферу (через розорювання і зміну землекористування), проте вже на третій рік спостерігається чисте поглинання CO_2 , із середнім NEE $\approx -616 \text{ г C} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1}$ (або $-6,2 \text{ т C} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$). Надалі вуглецевий потік стабілізувався завдяки накопиченню органічної маси в кореневій системі.

Секвестрація вуглецю в ґрунті є одним із головних механізмів довгострокового зменшення концентрації CO_2 в атмосфері. Вона відбувається за рахунок постійного оновлення кореневої біомаси, відмирання й мінералізації рослинних залишків та утворення гумусових сполук, стійких до розкладу [22, 86, 9]. Фельтен і Еммерлінг [14] показали, що протягом перших 10 років вирощування міскантусу у комерційних господарствах Німеччини відбулося зростання вмісту органічного вуглецю в орному шарі на $0,6 - 0,8 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$, причому темпи нагромадження зменшувалися після 12 – 15 років через досягнення рівноваги між надходженням і мінералізацією органіки.

За даними Тома [147], ізотопні дослідження ($\delta^{13}C$) підтвердили, що 13 – 22 % вуглецю у ґрунтах під міскантусом має C_4 -походження, тобто накопичений із рослинної маси за час культивування. Це означає, що значна частина вуглецю зберігається у вигляді стабільних гумінових сполук навіть після зупинення вирощування.

Однією з переваг міскантусу є тривалість життєвого циклу плантації (до 20 років), що дає змогу стабільно акумулювати органічний вуглець без порушення структури ґрунту [51, 58]. Дослідження Бойчака та співавторів [22] свідчать, що після завершення циклу вирощування більшість запасеного вуглецю зберігається

в ґрунті, тоді як у однорічних рослин (кукурудза, ріпак) він швидко мінералізується під час повторного обробітку ґрунту.

Дослідженнями, проведеними на малопродуктивних землях західної частини Лісостепу України встановлено позитивну залежність між тривалістю вирощування міскантусу гігантського та вмістом органічного вуглецю в ґрунті [207, 209]. Відмічено, що за вирощування міскантусу гігантського впродовж 10 років вміст органічного вуглецю в ґрунті зріс з 0,8 до 1,8 % [208].

Крім того, як показали Поеплау і Дон [120], у ґрунтах під міскантусом спостерігається зсув співвідношення між органічною речовиною C₃- і C₄-походження, що свідчить про поступову заміну старої органіки більш стійкою, з вищою часткою лігніну і восків, характерних для C₄-трав.

Коренева система міскантусу забезпечує до 50% загальної біомаси рослини і є головним резервуаром довготривалого зберігання вуглецю [6, 8]. За оцінками Амугу та співавторів [9], близько 30 – 40% вуглецю, що надходить у ґрунт, затримується у формі мікростабільних частинок, які розкладаються надзвичайно повільно (протягом десятиліть).

Процеси сезонного відмирання листя та пагонів також сприяють накопиченню вуглецю у поверхневому шарі ґрунту. Згідно з Робертсоном та співавторами [127], шар рослинної підстилки може досягати 7 т/га після 6 років вирощування, утворюючи природний бар'єр для ерозії і сприяючи мікрокліматичній стабільності.

Показники накопичення вуглецю істотно залежать від кліматичних і ґрунтових умов. Так, у країнах Північної Європи (Велика Британія, Данія) темпи секвестрації становлять 0,3 – 0,8 т С·га⁻¹·рік⁻¹ у Центральній Європі (Німеччина, Польща) – до 1,2 т С·га⁻¹·рік⁻¹, а у південних регіонах (Італія, Іспанія) показники нижчі через швидшу мінералізацію органіки [35, 62].

Водночас у довгостроковому вимірі (15 – 20 років) середній ефект накопичення оцінюється на рівні 20 – 25 т С·га⁻¹, що відповідає скороченню приблизно 70 – 90 т СО₂·га⁻¹ [135, 151].

Дослідження Робертсона [127] і Левандовські [92] показали, що навіть без урахування ґрунтової секвестрації, життєвий цикл міскантусу (вирощування, збирання, транспортування, спалювання) забезпечує чисте скорочення викидів 20 – 25 т СО₂-екв. на гектар щорічно. Якщо ж врахувати акумуляцію вуглецю у ґрунті, то загальний ефект зростає до 30 – 40 т СО₂-екв./га·рік, що робить міскантус однією з найефективніших культур у концепції *Carbon Farming*.

Крім того, при використанні біомаси міскантусу в системах BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) можливе чисте видалення СО₂ з атмосфери на рівні 5 – 10 т/(га·рік), що перевищує потенціал більшості лісових насаджень [105, 24].

Попри високий потенціал поглинання вуглецю міскантусом гігантським, ефективність цього процесу залежить від декількох факторів. Перш за все від попереднього типу землекористування. Найбільший ефект проявляється за використання орних земель, тобто в разі переходу від вирощування однорічних культур до міскантусу гігантського. Ефективність поглинання вуглецю залежить

також від строків і способів збору врожаю. Пізнє збирання біомаси міскантусу сприяє більшому накопиченню вуглецю за рахунок опалого дистя, за пізнього збору повернення вуглецю в атмосферу зменшується. Інтенсивність агротехнічного втручання (оранка, удобрення, внесення компосту) також суттєво впливає на ефективність поглинання вуглецю плантацією міскантусу гігантського [5, 8, 9].

Також спостерігається просторова неоднорідність у межах одного поля – до 30% варіації запасів органічного вуглецю на різних ділянках [147]. Це створює певну невизначеність при екстраполяції результатів на регіональному рівні.

У цілому, результати багаторічних польових і модельних досліджень однозначно підтверджують, що міскантус гігантський є потужним довготривалим поглиначем вуглецю. Його інтеграція у системи відновлюваної енергетики дозволяє одночасно досягати двох цілей: підвищення енергетичної незалежності та зменшення вуглецевого сліду аграрного сектору.

2.1.4. Енергетичні та економічні аспекти використання міскантусу гігантського у контексті скорочення парникових газів

Міскантус гігантський є однією з найпродуктивніших біоенергетичних культур серед трав'янистих багаторічників. Завдяки C_4 -фотосинтезу, потужній кореневій системі та високому коефіцієнту використання світла, він здатен виробляти 15 – 30 т сухої речовини на гектар щорічно, залежно від регіону вирощування [103, 37, 10, 191]. Теплотворна здатність сухої біомаси становить 17 – 19 МДж/кг, що наближає її до показників деревини, але при цьому забезпечує у 2–3 рази більшу врожайність на одиницю площі [37].

Порівняно з іншими культурами, міскантус потребує значно менше енергії на виробництво. Коефіцієнт енергетичної ефективності (K_{ee}) плантацій міскантусу становить 14 – 20, тоді як у кукурудзи – близько 4, у ріпаку – лише 3 [158, 58]. Це означає, що на кожен одиницю вкладеної енергії у вирощування та перероблення міскантусу повертається щонайменше 14 одиниць відновлюваної енергії.

Особливо важливим є те, що вирощування міскантусу не потребує щорічного обробітку ґрунту. Після закладання плантації (яка функціонує до 20 років) виключається потреба у глибокій оранці, що різко знижує непрямі викиди CO_2 , пов'язані з використанням палива та руйнуванням ґрунтового вуглецю [51, 135].

Таким чином, енергетичний потенціал міскантусу можна охарактеризувати як високий при мінімальних витратах, що робить його ключовим елементом у стратегії декарбонізації енергетичного сектору.

Головним внеском міскантусу у зменшення парникових газів є заміщення викопного палива (вугілля, нафти, природного газу) у виробництві тепла та електроенергії. За оцінками Кліфтон-Брауна та співавторів [35], спалювання біомаси міскантусу замість вугілля забезпечує скорочення викидів на 20 – 25 т CO_2 -екв. $\cdot га^{-1} \cdot рік^{-1}$, а з урахуванням усіх стадій життєвого циклу (вирощування, транспортування, переробка) – загальний вуглецевий баланс до становить близько 24,5 т CO_2 -екв./ $(га \cdot рік)$.

Подібні результати отримано у дослідженнях Левандовскі та співавторів [92] у межах європейського проєкту OPTIMISC, де порівнювали викиди від біомаси різних культур у різних сценаріях енергозаміщення. Виявлено, що міскантус забезпечує найбільше скорочення викидів серед трав'янистих культур, перевищуючи показники верби на 25 – 30%, а кукурудзи – у 2,5 раза.

Високий вміст вуглецю в сухій речовині (до 50 %) і низький вміст золи (приблизно 2 – 3%) роблять біомасу міскантусу оптимальною для спалювання у котельних, газифікації або виробництва пелет [127, 191]. Крім того, під час спалювання утворюється замкнений вуглецевий цикл: CO₂, що виділяється, компенсується тим, що було поглинуто під час росту рослини. У випадку інтеграції з технологіями BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) можливе навіть чисте видалення вуглецю з атмосфери, тобто створення негативних викидів [105, 94].

З економічної точки зору, міскантус має ряд переваг перед іншими біоенергетичними культурами. Перш за все це низькі експлуатаційні витрати в розрахунку на один рік (до 300 – 500 євро/га·рік проти 800 – 1000 євро/га у кукурудзи). Звичайно, в перший рік, рік закладання плантації, витрати є значними, проте в розрахунку на 20 років, впродовж яких плантація буде експлуатуватися, витрати будуть у декілька разів нижчими порівняно з однорічними культурами. Інша перевага полягає в тому, що плантація міскантусу гігантського використовується 15 – 20 років. Єдина технологічна операція, яка буде виконуватись впродовж цих років – це збирання біомаси. Крім того, міскантус не вибагливий до забезпечення поживними речовинами та стійкий до шкідників, хвороб та бур'янів. Це обумовлює мінімальні потреби у добривах та пестицидах, що знижує ризик забруднення вод і зменшує викиди N₂O [83, 115]. Водночас плантація міскантусу забезпечує високу стабільність врожайності навіть у посушливі роки завдяки розвиненій кореневій системі [100].

Вартість скорочення викидів плантаціями міскантусу, за даними OPTIMISC [92], є негативною (близько –78 євро за тону CO₂-екв.). Це означає, що навіть без субсидій така плантація є економічно вигідною, адже прибуток від продажу біомаси перевищує витрати на виробництво. Для порівняння: у кукурудзи цей показник становить +36 євро/т CO₂, у ріпаку – понад +90 євро/т CO₂.

Економічна ефективність міскантусу може бути ще вищою за його використання не лише як енергоресурсу, але й як сировини для біохімічної переробки – виробництва біоетанолу другого покоління, біопластику, паперу, композитів тощо [11, 206, 184]. У таких випадках частина вуглецю залишається у продуктах тривалого використання, що підвищує сумарний ефект секвестрації.

Міскантус дедалі частіше розглядається як елемент зеленої трансформації аграрної галузі. Європейська комісія у Європейському Зеленому Курсі визначає розвиток біоенергетики з багаторічних культур як ключовий інструмент досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року [146]. Дослідження Гастінгса та співавторів [70] показало, що якщо під міскантус буде відведено 15 % орних земель Європейського Союзу, можна скоротити до 16% загальних антропогенних викидів CO₂ на континенті.

Для України, вирощування міскантусу на деградованих і малопродуктивних землях (близько 1,5 млн га) дозволить замінити понад 4 млрд м³ природного газу щороку (у перерахунку на енергетичний еквівалент), скоротити викиди CO₂ більш ніж на 25 млн т на рік та створити додаткові робочі місця в сільських громадах і підвищити енергетичну незалежність [22, 210].

Впровадження таких систем потребує державної підтримки на початковому етапі, зокрема компенсації витрат на закладання плантацій (перші 2–3 роки не дають врожаю) і розвитку інфраструктури переробки. Однак у довгостроковій перспективі проекти з міскантусом є економічно самодостатніми і здатними приносити стабільний прибуток [166].

Таким чином, енергетичні та економічні аспекти доводять, що міскантус гігантський має високу кліматичну ефективність за низьких витратах виробництва. Його біомаса є універсальною для різних напрямів використання – від енергетики до біоекономіки – і водночас забезпечує чисте скорочення викидів парникових газів на рівні 20 – 40 т CO₂-екв./(га·рік).

Це робить міскантус не лише перспективною енергетичною культурою, а й інструментом досягнення вуглецевої нейтральності у сільському господарстві та енергетиці.

2.1.5. Екологічні переваги вирощування міскантусу гігантського та його роль у стійкому землекористуванні

Однією з найважливіших екологічних функцій міскантусу є покращення структури та родючості ґрунтів, особливо на деградованих і малопродуктивних землях. Потужна коренева система (до 2,5 – 3 м завглибшки) сприяє формуванню стабільних ґрунтових агрегатів, поліпшенню повітряно-водного режиму й запобіганню ерозії [151, 157, 48, 120, 191].

У багаторічних спостереженнях Фельтена і Еммерлінга [59] встановлено, що після 10 років вирощування міскантусу щільність ґрунту зменшилася на 8–12 %, вміст органічної речовини збільшився на 0,7%, а пористість верхнього шару зросла на 15 – 18 %. Це зумовлено постійним надходженням органічних залишків (листя, коренів, стебел), які формують поверхневу мульчу, що зменшує інтенсивність розмивання ґрунту опадами та покращує збереження вологи.

Крім того, багаторічна рослинність знижує втрати азоту з поверхневим стоком і зменшує вимивання нітратів у ґрунтові води на 40 – 60% порівняно з орними культурами [83, 115]. Це робить міскантус природним бар'єром проти евтрофікації водних екосистем.

Плантації міскантусу, на відміну від інтенсивних агросистем, характеризуються стабільним мікрокліматом, низьким рівнем агрохімічного навантаження та тривалим циклом використання без обробки, що створює сприятливі умови для розвитку флори та фауни [137, 48, 59].

Дослідження Гастінгса та співавторів [70] засвідчило, що чисельність дрібних ссавців, птахів і запилювачів у насадженнях міскантусу була в 1,5 – 2 рази вищою, ніж у посівах кукурудзи. Особливо цінними такі плантації є як буферні смуги або екологічні коридори між інтенсивними сільгоспугіддями.

Міскантус також сприяє відновленню ентомофауни – зокрема, збільшенню чисельності джмелів і метеликів, для яких високостебельна рослинність створює мікрокліматичні ніші [94]. Крім біотичної ролі, плантації діють як вітрозахисні смуги, що знижують швидкість вітру біля поверхні ґрунту на 20 – 30% і, відповідно, скорочують пилову ерозію. Це особливо важливо для південних регіонів України з дефіцитом опадів і переважанням легких супіщаних ґрунтів.

Міскантус характеризується високою ефективністю водокористування завдяки С₄-фотосинтезу – на одиницю спожитої води він фіксує більше СО₂, ніж культури С₃-типу (пшениця, ячмінь, соя) [94, 76]. Дослідження Олесена [115] та Робертсона [127] показали, що за однакової кількості опадів міскантус має на 25 – 35% вищий показник водної продуктивності, а глибока коренева система дозволяє йому витримувати короточасні посухи без втрати врожайності.

Висока щільність рослинності зменшує температурні коливання на поверхні ґрунту, створюючи ефект мікрокліматичного пом'якшення. У літні періоди середня температура ґрунту в насадженнях міскантусу на 2 – 3°C нижча, ніж на сусідніх орних полях, а відносна вологість повітря – вища на 5 – 7%. Це позитивно впливає на стабільність агроландшафтів у контексті кліматичних змін [94, 62].

Таким чином, міскантус не лише зменшує викиди парникових газів, а й підвищує кліматичну стійкість територій, на яких його вирощують.

Міскантус може ефективно вирощуватися на засолених, забруднених або еродованих землях, де інші культури є економічно неефективними [135, 85]. Завдяки глибоким кореням і високій здатності до фіторемедіації він здатен зв'язувати важкі метали (Cd, Pb, Zn) у кореневій системі, обмежуючи їх міграцію у довкіллі [58, 185]. Дослідження Поеплау та Дон [120] показало, що після 7 років вирощування на колишніх промислових територіях концентрація рухомого кадмію у ґрунті знизилася на 18 %, свинцю – на 24 %, цинку – на 14 %. Це свідчить про фільтраційну функцію міскантусу, що робить його придатним для екологічної рекультивації земель.

Використання таких ділянок під енергетичні культури запобігає конфлікту з вирощуванням харчових культур, тобто не зменшує площ, зайнятих під продовольчі культури. Це дає змогу розширити біоенергетичний потенціал без впливу на продовольчу безпеку [70, 92].

Вирощування міскантусу узгоджується з принципами сталого управління земельними ресурсами (Sustainable Land Management), визначеними ФАО та ЄС. Його система вирощування поєднує низьке антропогенне навантаження (мінімум обробітку, пестицидів, добрив), довготривале поліпшення ґрунтового вуглецю, відновлення природних функцій екосистем, зменшення викидів парникових газів і підвищення біорізноманіття. Перехід 10% сільськогосподарських угідь до багаторічних культур типу міскантусу може скоротити викиди СО₂ в аграрному секторі на 8 – 10%, а втрати ґрунтової органіки – майже вдвічі.

Таким чином, міскантус гігантський є не лише біоенергетичною культурою, а й агроекологічним інструментом, який сприяє адаптації землеробства до зміни клімату, стабілізації ландшафтів і відновленню родючості деградованих територій.

2.2. Вплив плантаційного вирощування енергетичної верби на процеси декарбонізації

2.2.1. Світові тенденції вирощування деревних енергетичних культур

Світовий попит на матеріали та енергію на основі біомаси швидко зростає і зростатиме у найближчі десятиліття [114, 123]. Це зростання значною мірою зумовлене потребою в низьковуглецевих альтернативних джерелах енергії через занепокоєння щодо стрімких кліматичних змін, а також необхідністю забезпечення енергетичної незалежності в межах Європейського Союзу (ЄС), де очікується збільшення біоенергетики на 20 ЕДж [96]. Внаслідок цього, біомаса стала ключовим компонентом стратегій кліматичного переходу ЄС, відіграючи вирішальну роль у скороченні викидів парникових газів та сприяючи досягненню глобальних кліматичних цілей [144].

Стратегічним напрямом задоволення швидко зростаючого попиту на рослинну біомасу є розширення систем виробництва біомаси на спеціальних короткочастотних енергетичних плантаціях трав'яних і деревних рослин [54, 5796], які особливо привабливі завдяки високій врожайності за короткі терміни (до 20 років) та своєму потенціалу як джерел низьковуглецевого палива [46, 117]. Однак, сталий розвиток систем виробництва біомаси значною мірою залежить від її просторового розподілу та особливостей управління. Масштабне виробництво біомаси створює певні проблеми, такі як ризик негативного впливу на ґрунт і довкілля в цілому, коли високоякісні середовища існування замінюються монокультурами, виникає загроза біорізноманіттю [60, 134]. Добре інтегровані системи біомаси можуть сприяти пом'якшенню впливу на навколишнє середовище [123].

З іншого боку, менші за масштабами плантації, розподілені по однорідних ландшафтах, можуть сприяти диверсифікації землекористування та генерувати змішані доходи для фермерів [60, 39, 106, 32]. Збільшуючи гетерогенність, системи виробництва рослинної біомаси можуть підтримувати біорізноманіття в сільськогосподарських і лісоаграрних ландшафтах, покращення інших екосистемних послуг, контролювання ерозійних процесів у агроландшафтах [54, 15, 130, 19, 69, 53, 129].

Для підтримки більш сталого управління земельними ресурсами, європейськими ученими об'єднано методи моделювання та оптимізації разом із просторово чітким впливом на навколишнє середовище, для визначення відповідних місць, де енергетичні плантації можуть покращити екосистемні умови [54, 53, 55, 61], диверсифікуючи діяльність сільськогосподарських виробників [16, 88].

У Європі швидко зростає попит на низьковуглецеву енергію, в результаті чого проводяться комплексні дослідження в даному напрямку [118]. Великі ділянки насаджень евкаліпта та сосни часто розташовані в однорідних лісових районах, а от насадження верби та тополі в переважно сільськогосподарських ландшафтах.

2.2.2. Енергетичні плантації в Україні та їх вплив на екологічний стан довкілля

В Україні діє ряд законодавчих та нормативних актів спрямованих на стимулювання вирощування енергетичної верби та використання її біомаси в якості біопалива. Зокрема Законом України «Про електроенергію» передбачено «зелені» тарифи на електроенергію, вироблену з біомаси, в тому числі з біомаси енергетичної верби [180]. «Зелений» тариф - спеціальний тариф, за яким закуповується електрична енергія, вироблена на об'єктах електроенергетики з альтернативних джерел енергії [177, 181, 178, 180].

Діють постанови уряду, спрямовані на заміщення природного газу у сфері генерації теплової енергії. Так, згідно Постанови уряду «Про стимулювання заміщення природного газу у сфері теплопостачання» (Постанова КМУ № 293 від 09.07.2014 року) у разі виробництва теплової енергії для населення різниця між тарифом на виробництво теплової енергії на теплогенеруючих установках з використанням будь-яких видів палива та енергії (за винятком природного газу) і тарифом на виробництво теплової енергії для потреб населення на теплогенеруючих установках з використанням будь-яких видів палива та енергії (за винятком природного газу) підлягає компенсації з державного бюджету [197]. Постановою «Про стимулювання заміщення природного газу під час виробництва теплової енергії для установ та організацій, що фінансуються з державного і місцевих бюджетів» (Постанова КМУ № 453 від 10.09.2014 р.) запроваджено механізм стимулювання переходу на біологічні види палива для опалення установ, що фінансуються з державного і місцевих бюджетів [198].

Внесено зміни до Закону «Про теплопостачання», мета яких стимулювати заміщення газу місцевими видами палива і для цього надати органам місцевого самоврядування право встановлювати тарифи на тепло з альтернативних джерел, в тому числі біомаси енергетичної верби, на рівні 90 % від діючого тарифу на тепло з природного газу для потреб бюджетних установ та населення [179].

Підготовлено та зареєстровано у Верховній Раді України проект закону «Про внесення змін до Податкового кодексу України та інших законодавчих актів України щодо сприяння розвитку сфери вирощування енергетичних рослин», в якому передбачено ряд пільг для суб'єктів господарювання, які займаються вирощуванням енергетичної верби. Зокрема в законопроекті передбачено, що орендна плата для земельних ділянок, на яких вирощується енергетична верба, не може перевищувати 5 відсотків нормативної грошової оцінки протягом всього строку дії договору оренди, водночас строк оренди земельних ділянок сільськогосподарського призначення державної та комунальної власності, що надаються для вирощування енергетичної верби, не може бути меншим як 20 років. Крім того проектом Закону передбачається надання в оренду малопродуктивних та деградованих земельних ділянок державної та комунальної власності сільськогосподарського призначення для вирощування енергетичної верби без проведення земельних торгів (аукціонів). Головний стимул, передбачений цим законопроектом, – це державна підтримка вирощування енергетичної верби шляхом відшкодування частини витрат на закладення та догляд за насадженнями. Усі ці законодавчі акти та законопроекти

сприяють становленню внутрішнього ринку твердих видів біопалива, що створює потребу у якісній сировині для їх виготовлення.

В Україні на фоні загального техногенного забруднення викликаного промисловою діяльністю і військовими діями, є проблема високої розораності території і низька лісистість [189]. Дані проблеми можуть бути частково вирішені за рахунок заліснення сільськогосподарських невідгод та еродованих земель, площа яких становить відповідно 1,5 і 3,0 млн. га.

Вирощування 1 – 3 генерацій плантаційних деревних культур, крім отримання значної кількості енергетичної біомаси та високоякісних дрібних та середніх сортиментів деревини, дозволить відновити на землях родючість ґрунтів, або сформувані на них лісове середовище, що створить сприятливі умови для успішного росту тут у подальшому лісових насаджень корінних типів з традиційним віком рубань [163, 215]. Одночасно можуть бути вирішені проблеми припинення ерозії ґрунтів, відновлення родючості ґрунтів, фіксація вуглекислоти, збільшення різноманіття видів тощо, а також – економічна.

Одним із основних екологічних аспектів, є прискорене накопичення плантаційними деревостанами деревної маси, що супроводжується поглинанням ними вуглекислого газу і виділенню значної кількості кисню. За даними Е.Ф. Брюніга (цит. за В.С.Чуєнковим [190]) на утворення однієї тонни абсолютно сухої маси деревини, незалежно від деревної породи, поглинається у середньому 1,83 тони CO₂ і виділяється 1,32 тони кисню.

Вирощування плантаційних деревостанів може виявитися одним із найважливіших екологічних чинників, який може мати також цілком конкретні економічні дивіденди для нашої країни відповідно до Кіотського протоколу [195]. Так, верба і тополя, як швидкорослі деревні види, що добре відновлюються пеньковою порослю, можуть успішно вирощуватися на одній площі впродовж двох-трьох генерацій, що відповідає одному обігу плантаційного вирощування хвойних дерев, наприклад, сосни звичайної або ялини європейської.

Висока продуктивність плантаційних культур, за їх більш широкого застосування, дозволить зменшити господарське навантаження на природні лісові екосистеми, які зможуть більш повно виконувати ряд інших, не менш важливих функцій: захисних, соціальних, кліматорегулюючих тощо [75].

Вагоме місце плантаційні деревостани можуть зайняти у відновленні, або ефективному використанні порушених промисловістю і сільським господарством земель. За вдалого підбору порід, плантаційне лісовирощування (особливо – верб і тополь) доцільно застосовувати у зоні дії шкідливих виробництв, де вирощувані рослини поглинають шкідливі сполуки і одночасно накопичують значну кількість якісної деревної сировини; для рекультивації земель внаслідок промислової діяльності; для консервації угідь, що тимчасово виводяться з-під сільськогосподарського використання тощо [162, 168, 188, 187].

Особливо доцільно насадження верб і тополь використовувати в умовах гідрографічної мережі для призупинення ерозії ґрунтів і захисту водойм від замулення. Крім їх застосування в лінійних захисних насадженнях, вони незамінні при влаштуванні мулофільтрів - насаджень на конусах виносу ярів і балок, які зменшують швидкість потоку води і сприяють відкладанню у них змитого з полів мулу [205].

2.2.3. Енергетична верба як фактор декарбонізації

Впродовж тривалого періоду часу атмосферна концентрація CO₂ визначалася рівновагою між біогеохімічними процесами поглинання вуглецю живими організмами, та вивітрюванням гірських порід й вулканізмом. На даний час основними природними джерелами повернення вуглекислого газу до атмосфери є такі антропогенні джерела, як: спалювання викопного палива (6,3ГтС/рік), вирубка лісів, використання деревини, спалювання сільськогосподарських відходів (1,7 Гт С/рік), руйнування гумусу ґрунтів, осушування боліт. Наразі в атмосфері зосереджено близько 730-800 Гт карбону у вигляді вуглекислого газу. Саме атмосферний вуглекислий газ є основним джерелом вуглецю для біохімічних процесів в біосфері та важливим чинником парникового ефекту атмосфери. Щорічне надходження до атмосфери 4 Гт вуглекислого газу призводить до таких екологічних явищ, як посилення парникового ефекту та зростання температури приземного шару повітря; підкислення гідроєкосистеми (перш за все Світового океану); евтрофікацію водних екосистем; підвищення продуктивності наземних рослин [176].

Сьогоднішнє використання природних ресурсів має розраховуватися таким чином, щоб у майбутніх поколінь не було проблем з задоволенням їхніх потреб у природних ресурсах. Одним зі шляхів розв'язання проблеми зміни клімату, безпеки енергопостачання та енергозалежності є значний потенціал використання відновлюваних джерел енергії [199]. Європейська стратегія безпеки енергопостачання встановлює нові можливості і пріоритети в енергетичній політиці для подолання енергозалежності.

Розвиток біоенергетичних проєктів та переведення об'єктів теплоенергетики на біомасу протягом останніх кількох років стало своєрідним трендом в Україні. З екологічної точки зору біомасою є сполуки на основі вуглецю (органічні сполуки), які утворилися під дією сонячного випромінювання у процесі фотосинтезу, що є природним варіантом перетворення сонячної енергії. Під час спалювання біомаси вуглець взаємодіє з атмосферним киснем, утворюючи діоксид вуглецю та воду. Цей процес є циклічним, тому що діоксид вуглецю, що виділився при спалюванні, може знову брати участь у виробництві нової біомаси в процесі фотосинтезу. Енергетичне використання біомаси практично не призводить до накопичення парникових газів (ПГ) в атмосфері. питомі викиди ПГ від спалювання біомаси значно нижчі порівняно з викидами від викопного палива (вугілля, нафти та природного газу). Особливо помітна різниця у викидах під час виробництва тепла та електроенергії [200].

Енергетичні рослини можуть повністю замінити традиційне паливо, а вирощування енергетичних культур навіть на 1 млн га може замінити половину всього імпортованого газу [175].

Особливо важливу роль в балансі викидів CO₂ може відігравати верба, що вирощується на енергетичні цілі [155]. Наразі зареєстровано близько 15 сортів верби, які можна використовувати в біоенергетиці [171]. Так, 1 тонна сухої верби замінює 1,12 тонни соломи, 0,43 тонни ріпакової олії, 0,46 тонни викопного вугілля,

0,8 тонни бурого вугілля, 0,37 тонни мазуту, 510 м³ природного газу та 730 м³ біогазу [172]. За іншими даними 1 га верби може виробляти таку кількість енергії, яка еквівалентна 5700 літрам нафти, враховуючи, що середнє домогосподарство зазвичай використовує близько 3000 літрів нафти щороку [196].

Переваги верби в питаннях зміни клімату ґрунтуються на її швидкому зростанні як вегетативної маси, так і кореневої системи в ґрунті, де накопичується вуглець. Важлива саме та частина рослини, яка не збирається, а саме: коренева система та частина стовбура, яка залишається над поверхнею землі після зрізування. Якщо вербу вирощують на сільськогосподарських угіддях, викиди вуглецю дещо більші (127 CO₂-екв.т), ніж за вирощуванні на пасовищах (28 кг CO₂-екв/т) впродовж життєвого циклу [65].

Однак, незалежно від того, де її вирощують, верба забезпечує додаткові переваги для клімату, коли її використовують як сировину замість викопного палива для виробництва тепла, електроенергії або біопластику. Верба успішно вирощується на різноманітних малородючих ґрунтах: піщаних, мулистих та суглинистих. Видалення тяжких металів із забруднених земель та очищення стічних вод, а зола після спалювання верби використовується як одне з найкращих мінеральних добрив. Також вербу можна використовувати для оновлення (рекультивації) існуючих лісосмуг вздовж автомобільних та залізничних доріг в якості активного поглинача CO₂ з повітря. Верба досить добре поглинає викиди CO₂. Ділянки енергетичної верби площею 1 га поглинають до 200 тонн CO₂ і навіть більше з повітря впродовж 3 років [192].

Вирощування верби поблизу біомасових установок дозволяє мінімізувати викиди парникових газів, за рахунок скорочення шляху, тривалості перевезення самої біомаси від місця вирощування (до 100км) та кількості транспортних засобів [214].

В державі налічується до 4 млн. га сільськогосподарських земель, що не використовуються, переважно через деградацію та низьку продуктивність. Основними критеріями деградації земель є еродованість (в результаті руйнування водою та вітром). Ці землі можна задіяти під вирощування енергетичних культур, зокрема під енергетичну вербу, що забезпечує в 3-5 разів нижчий ступінь виснаження ґрунту порівняно з сільськогосподарськими культурами (пшеницею, кукурудзою та соняшником). Поглинутий вуглекислий газ з атмосфери перетворюється на вуглець та частково разом із поживними речовинами повертається в ґрунт з опалим листям, приводячи до збільшення кількості гумусу та збагачення ґрунту мінералами, мікроелементами та речовинами природного походження, внаслідок чого земельні ресурси швидко відновлюватимуться [200].

Вербу як сировину можна перетворити на спеціальний тип гідротермального вугілля (гідротермальна карбонізація – занурення біомаси у воду та вплив тиску й температур, що утворюють вуглецеподібний матеріал, який називається гідровуглецем. Другий метод – повільне нагрівання біомаси шляхом піролізу для утворення піровугілля), яке можна розкидати по сільськогосподарських полях, де воно продовжуватиме поглинати CO₂ та

повільно вивільняти поживні речовини в ґрунт. Але два типи вугілля мають різні властивості. Вугілля залишатиметься в ґрунті впродовж десятиліть або століть, вивільняючи в часі 10 – 40% зв'язаного CO₂. Піровугілля, навпаки, може зв'язувати CO₂ впродовж тисячоліть, воно має пористу структуру та добре утримує вологу [154].

З огляду на глобальний курс декарбонізації та взяті міжнародні зобов'язання, зокрема в межах Паризької угоди, транспортний сектор перебуває у фазі інноваційного розвитку. Використання біопалив, в т.ч. отриманих з деревної біомаси, може бути одним із варіантів скорочення викидів парникових газів у морському транспорті. У 2023 р. Міжнародна морська організація прийняла Стратегію ІМО щодо скорочення викидів парникових газів з суден. Ця стратегія прагне досягти «нульових чистих викидів до 2050р.», а також скоротити викиди ПГ [213].

Для водного транспорту економічний потенціал виробництва біомаси для отримання біопалива досить великий, який можна оцінити, в середньому, у 2,9-3,0 млн т н.е./рік. Цей потенціал включає тверду біомасу, в т.ч. і верба, як сировину для переробки у різні види біопалива (1,4-1,5 млн т н.е./рік), а також біодизель (84 тис. т н.е./рік), біоетанол (190-200 тис. т н.е./рік), біометан (1,1-1,2 млн т н.е./рік). Власники суден мають стимули використовувати біопаливо для виконання вимог СІІ (індикатора інтенсивності викидів вуглецю) та зменшення витрат, пов'язаних з дотриманням вимог EU ETS (Системи торгівлі викидами ЄС) (для суден, що працюють у межах ЄС/ЄЕЗ) і самі повинні обирати шляхи по декарбонізації [160].

Виявлено ще одну важливу функцію верби, вона може рости на ділянках де вирощування іншої рослинності є проблематичним – в місцях тимчасового затоплення, в зоні паводків, але не більше 1,5-2,0 місяці. Верба може відігравати і захисну функцію – для укріплення берегової зони від розмивання дощовими і талими водами, для захисту від ерозії. Промислове вирощування верби на енергетичні цілі на таких ділянках, саме на землях які вважають малоприсадними або непридатними для вирощування сільськогосподарських рослин, може бути перспективним [164].

Особливо негативно на екологічну систему впливають військові дії, які забруднюють територію держави. Але досить перспективним може бути використання у великій кількості саме таких територій з метою вирощування енергетичної верби для виробництва твердих видів палива. Верба приймає активну участь у фіторемедіації – в очищенні ґрунтів та відновленні їх структури [201]. Більшість видів *Salix* здатні накопичувати важкі метали (ВМ): As, Fe, Zn, Pb, Cd, Cu, Ni, але вони мають різну здатність до їх переведення у надземну біомасу. Для уникнення забруднення повітря ВМ в процесі спалювання деревини, біомасу фіторемедіантів потрібно спалювати централізовано, у котельнях, що обладнані установками для очищення повітря [204].

Через зміну клімату ті деревні види, які можна було легко вирощувати раніше, тепер виростити важче, на відміну від вербових рослин. Підвищення середньорічної температури на 2,0-2,5 градуси – для рослинного світу України

може виявитися катастрофічним. Тоді близько 30% природних угруповань зазнають змін або втраять свою структуру [193, 216, 13].

Спеціальний звіт Міжурядової комісії з питань зміни клімату (МГЕЗК) рекомендує скоротити кількість земель, відданих під пасовища та рілля, а натомість відновлювати ліси та збільшити гумус у ґрунті. Відновлення лісів може нейтралізувати до 3,6 мільярда тонн CO₂ на рік. За допомогою збільшення гумусу у ґрунті – ще від двох до п'яти мільярдів, йдеться у недавньому дослідженні берлінського Фонду «Наука і політика» (SWP). І саме тут на допомогу може прийти також і верба. Модель сільського господарства майбутнього – це модель, де більше приділяють увагу гумусу, та де не застосовують синтетичні добрива та пестициди [217].

Саме для стимулювання реалізації енергоефективних заходів, розвитку енергосервісного механізму, збільшення використання відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива, скорочення викидів вуглецю, а також впровадження фінансово-кредитних інструментів виключно у сфері енергоефективності у 2012 році було створено «Фонд декарбонізації України», який допомагає країні стати енергоефективною та енергонезалежною [159].

Дедалі більше центром низьковуглецевих енергетичних систем у світовому масштабі визнається м. Копенгаген, де збираються експерти з усього світу. Це місце стає центром обробки даних та інвестицій у видалення вуглецю. Саме в таких місцях приймаються рішення зі зменшення концентрації парникових газів. Для цього необхідно збільшити насадження дерев для поглинання CO₂ шляхом фотосинтезу, через лісорозведення та заліснення, і вербові тут можуть відігравати важливу роль; секвестрація вуглецю в ґрунті – збільшення вмісту органічної речовини в ґрунті за допомогою сталих сільськогосподарських практик, уловлювання CO₂ у ґрунті; відновлення водно-болотних угідь та торфовищ, для зберігання вуглецю в рослинній біомасі та ґрунті [13].

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЗА ВИРОЩУВАННЯ БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

3.1. Викиди парникових газів за вирощування міскантусу гігантського

Одним із ключових індикаторів екологічної ефективності біоенергетичних культур є їхній вуглецевий слід, що відображає сумарні викиди парникових газів упродовж життєвого циклу вирощування та використання біомаси. Оцінка таких показників є важливою складовою сучасних досліджень у сфері біоенергетики та сталого землекористування, оскільки дозволяє визначити потенціал заміщення викопних видів палива та рівень скорочення антропогенних викидів [42, 81, 77].

Багаторічні енергетичні культури, зокрема міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*) та верба прутувидна (*Salix viminalis*), характеризуються високою продуктивністю біомаси, тривалим життєвим циклом плантацій і відносно низькими витратами ресурсів під час вирощування. Це робить їх перспективними для формування низьковуглецевих агроенергетичних систем [79, 93, 143]. Оцінка екологічної ефективності вирощування багаторічних біоенергетичних культур (на прикладі *Miscanthus × giganteus*) базується на принципах аналізу життєвого циклу (LCA) та регламентується положеннями Директиви Європейського Парламенту та Ради (ЄС) 2018/2001 (RED II) [42]. Згідно з цією методологією, загальні викиди парникових газів від виробництва палива з біомаси розраховуються як сума емісій на кожному етапі.

Аналіз структури викидів парникових газів під час вирощування міскантусу гігантського показав, що основний внесок у формування вуглецевого сліду припадає на обмежену кількість технологічних операцій та ресурсів, які використовуються у процесі створення та експлуатації плантації.

Згідно з результатами розрахунків табл. 3.1, сумарні викиди парникових газів за чотири роки вирощування становлять 5547,4 kg CO₂ eq/га. Найбільшу частку у структурі викидів формують мінеральні добрива, на які припадає 4232,1 kg CO₂ eq/га, або 76,3 % від загального обсягу емісій.

Таблиця 3.1 – Структура викидів за джерелами за перші чотири роки вирощування міскантусу гігантського

№ п.п	Показники	Викиди	
		kgCO ₂ eq/га	%
1	Мінеральні добрива	4232,1	76,3
2	ПММ	992,6	17,9
3	Засоби захисту рослин	116,4	2,1
4	Садивний матеріал	206,3	3,7
	Всього	5547,4	100

Такий значний внесок пояснюється високою енергоємністю виробництва азотних добрив. Процес їх синтезу базується на технології Габера–Боша, яка потребує значних витрат викопного палива та супроводжується значними викидами вуглекислого газу. Крім того, під час внесення азотних добрив у ґрунт

можуть утворюватися додаткові викиди оксиду азоту (N_2O), який є одним із найбільш потужних парникових газів [79, 139]. Саме тому використання мінеральних добрив часто розглядається як ключовий фактор формування вуглецевого сліду аграрних технологій.

Другим за значенням джерелом викидів є паливно-мастильні матеріали (ПММ), частка яких становить 17,9%, або 992,6 kg CO_2 eq/га. Ця категорія включає викиди, що утворюються під час використання дизельного палива в сільськогосподарській техніці при виконанні агротехнічних операцій, таких як підготовка ґрунту, посадка рослин, міжрядний обробіток та збирання біомаси. Викиди виникають як безпосередньо під час спалювання палива у двигунах, так і опосередковано – у процесі його виробництва та транспортування.

Значно менший внесок у формування вуглецевого сліду мають садивний матеріал та засоби захисту рослин. Зокрема, на садивний матеріал припадає 206,3 kg CO_2 eq/га, що становить 3,7% загальних викидів. Ці викиди пов'язані з вирощуванням, підготовкою, транспортуванням та зберіганням посадкового матеріалу міскантусу. Хоча ця частка є відносно невеликою, вона має значення на етапі закладання плантації, оскільки використовується лише один раз протягом тривалого періоду експлуатації плантації.

Найменшу частку у структурі викидів становлять засоби захисту рослин, на які припадає 116,4 kg CO_2 eq/га, або 2,1% сумарних викидів. Викиди цієї категорії формуються переважно під час промислового виробництва пестицидів, яке потребує енергії та хімічної сировини. Однак у технології вирощування міскантусу застосування засобів захисту рослин є відносно обмеженим, що пояснюється високою конкурентною здатністю культури та її природною стійкістю до більшості шкідників і хвороб [93].

Отримані результати дозволяють визначити основні напрями зменшення вуглецевого сліду під час вирощування міскантусу гігантського.

Найбільший потенціал скорочення викидів пов'язаний із оптимізацією використання мінеральних добрив, оскільки саме цей фактор формує понад дві третини загальних викидів. Досягти цього можна шляхом застосування технологій точного землеробства, використання органічних добрив або поєднання органічних і мінеральних форм живлення. Важливим напрямом також є використання добрив із нижчим вуглецевим слідом, вироблених із застосуванням відновлюваних джерел енергії.

Другим важливим напрямом є зменшення витрат паливно-мастильних матеріалів, що може бути досягнуто шляхом оптимізації кількості технологічних операцій, використання енергоефективної техніки та впровадження ресурсозберігаючих систем обробітку ґрунту.

Додатковий ефект може забезпечити раціональне використання засобів захисту рослин, зокрема перехід до інтегрованих систем захисту рослин, які передбачають мінімізацію використання хімічних препаратів.

Таким чином, результати проведеного аналізу показують, що основними факторами формування вуглецевого сліду технології вирощування міскантусу є використання мінеральних добрив та паливно-мастильних матеріалів.

Оптимізація цих складових технологій може суттєво зменшити сумарні викиди парникових газів та підвищити екологічну ефективність виробництва біоенергетичної сировини.

Аналіз розподілу викидів парникових газів за роками вегетації дозволяє оцінити зміну інтенсивності формування вуглецевого сліду технології вирощування міскантусу протягом перших років функціонування плантації. Такий підхід є важливим для розуміння екологічної ефективності багаторічних біоенергетичних культур, оскільки технологічні операції та рівень використання ресурсів змінюються залежно від фази розвитку рослин.

Згідно з отриманими результатами, сумарні викиди парникових газів за весь період вирощування становлять 30545,1 kg CO₂ eq/га, при цьому їх розподіл між роками є відносно рівномірним, однак простежується тенденція до поступового зростання питомої частки викидів у міру розвитку плантації.

У перший рік вегетації викиди становлять 1961,3 kg CO₂ eq/га, що відповідає 6,4 % від загального обсягу. На цьому етапі здійснюється закладання плантації, включаючи підготовку ґрунту, висаджування садивного матеріалу та проведення початкових агротехнічних заходів. Незважаючи на значні початкові витрати ресурсів, частка викидів у перший рік є найнижчою у структурі загального вуглецевого сліду. Це пояснюється тим, що деякі технологічні операції, пов'язані з доглядом за плантацією та її експлуатацією, ще не виконуються у повному обсязі.

У другий рік вегетації обсяг викидів зростає до 1146,9 kg CO₂ eq/га, що становить 3,8% сумарних викидів. У цей період відбувається активне формування кореневої системи та надземної біомаси рослин, що потребує проведення додаткових агротехнічних операцій, зокрема внесення добрив та догляду за міжряддями. Саме збільшення інтенсивності використання матеріальних та енергетичних ресурсів зумовлює зростання обсягів викидів порівняно з першим роком.

У третій рік вегетації викиди становлять 1193,4 kg CO₂ eq/га, або 3,9 % від загального обсягу. На цьому етапі плантація міскантусу наближається до стабільної фази розвитку, а рослини формують значну біомасу. У технології вирощування можуть проводитися додаткові операції догляду за плантацією, що супроводжуються використанням паливно-мастильних матеріалів і, відповідно, утворенням додаткових викидів парникових газів.

Найбільша частка викидів припадає на четвертий 1242,8 kg CO₂ eq/га та наступні роки вегетації, де їх обсяг становить 26240,5 kg CO₂ eq/га, або 85,9% загальної емісії. На цьому етапі плантація переходить у фазу повноцінної експлуатації, коли формується максимальна врожайність біомаси та виконуються регулярні технологічні операції, пов'язані зі збиранням і транспортуванням продукції. Саме ці процеси потребують значних витрат енергетичних ресурсів і, відповідно, формують найбільшу частку викидів у структурі розрахункового періоду.

Загалом аналіз розподілу викидів за роками вегетації свідчить про поступове зростання їх питомої частки у процесі розвитку плантації. Однак слід враховувати, що міскантус є багаторічною культурою, тривалість експлуатації

плантації якої може становити 15–25 років. У зв'язку з цим початкові витрати ресурсів на закладання плантації та перші роки її розвитку розподіляються на тривалий період використання, що в довгостроковій перспективі зменшує середньорічний рівень викидів парникових газів [93, 34].

Крім того, у процесі розвитку плантації відбувається накопичення органічної речовини у ґрунті завдяки потужній кореневій системі міскантусу та надходженню рослинних залишків. Це сприяє секвестрації вуглецю, що частково компенсує технологічні викиди, пов'язані з вирощуванням культури. Саме тому багаторічні біоенергетичні культури розглядаються як ефективний інструмент зменшення антропогенного впливу на клімат [121].

Таким чином, отримані результати показують, що розподіл викидів парникових газів за роками вегетації є відносно рівномірним, проте поступово зростає у міру розвитку плантації. Найбільша частка викидів формується у період повноцінної експлуатації плантації, що пов'язано з виконанням регулярних агротехнічних операцій та збиранням біомаси.

Аналіз структури викидів парникових газів за окремими технологічними операціями дозволяє більш детально оцінити вплив кожного етапу створення та експлуатації плантації міскантусу гігантського на формування її загального вуглецевого сліду. Такий підхід дає можливість визначити найбільш енергоємні елементи технології та окреслити напрями оптимізації виробничих процесів.

Згідно з отриманими результатами, сумарні викиди парникових газів за весь період створення та експлуатації плантації становлять 30545,1 kg CO₂ eq/га. При цьому розподіл викидів між окремими технологічними операціями є нерівномірним, і найбільша їх частка припадає на операції, пов'язані з доглядом за насадженнями у період експлуатації плантації.

Початковим етапом створення плантації є основний обробіток ґрунту, на який припадає 570,8 kg CO₂ eq/га, або 1,9% від загального обсягу викидів. Значна частка емісій на цьому етапі пояснюється використанням енергоємної сільськогосподарської техніки під час виконання операцій оранки, дискування або глибокого розпушування ґрунту. Використання дизельного палива у цих процесах призводить до утворення значних обсягів вуглекислого газу, що формує помітну частку вуглецевого сліду технології.

Порівняно з основним обробітком, передсадильний обробіток ґрунту характеризується значно вищим рівнем викидів – 1004,0 kg CO₂ eq/га, або 3,3% від загальної емісії. Це пояснюється використанням азотного мінерально живлення, значні викиди утворюються під час його виготовлення та польової емісії закису азоту (E_{N2O}).

Важливою складовою технології є садіння ризомів міскантусу, на яке припадає 229,0 kg CO₂ eq/га, або 0,7% сумарних викидів. Викиди на цьому етапі формуються внаслідок використання спеціалізованої техніки для висаджування посадкового матеріалу, а також витрат пального під час виконання цієї операції.

У перший рік вирощування рівень викидів, пов'язаний із доглядом за насадженнями, є відносно невисоким і становить 65,2 kg CO₂ eq/га, або 0,2 % загального обсягу. Це пояснюється тим, що на початковому етапі розвитку рослин кількість технологічних операцій є обмеженою. Водночас збирання

біомаси у перший рік формує 95,2 kg CO₂ eq/га, що відповідає 0,3% сумарних викидів.

Починаючи з другого року вегетації, частка викидів суттєво зростає. Так, догляд за насадженнями у другий рік формує 1023,7 kg CO₂ eq/га, або 3,4% загальних викидів. Це один із найбільших показників у структурі вуглецевого сліду, що пояснюється інтенсивним використанням техніки, внесенням добрив і проведенням інших агротехнічних операцій.

Аналогічна тенденція спостерігається і в третій рік експлуатації плантації, де викиди, пов'язані з доглядом за насадженнями, становлять 1009,4 kg CO₂ eq/га, або 3,3%. При цьому збирання біомаси у третій рік формує 184,0 kg CO₂ eq/га, що відповідає 0,6% загального обсягу викидів.

Найбільша частка викидів припадає на догляд за насадженнями у четвертий та наступні роки, де їх обсяг становить 21573,3 kg CO₂ eq/га, або 70,6% сумарної емісії.

Викиди, пов'язані із збиранням біомаси у четвертий та наступні роки, становлять 4525,5 kg CO₂ eq/га, або 14,8% загального обсягу. Зростання цього показника порівняно з попередніми роками пояснюється збільшенням урожайності біомаси та, відповідно, більшими витратами енергетичних ресурсів на її збирання та транспортування.

Завершальним етапом життєвого циклу плантації є рекультивация, яка супроводжується викидами на рівні 141,7 kg CO₂ eq/га, що становить 0,5% сумарної емісії. Ці викиди пов'язані з виконанням агротехнічних операцій, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву після завершення експлуатації плантації.

Загалом результати аналізу показують, що найбільшу частку викидів формують операції догляду за насадженнями у другий, третій та четвертий роки експлуатації плантації, сумарна частка яких перевищує 65% загального обсягу викидів. Це свідчить про те, що саме період експлуатації плантації є найбільш енергоємним етапом технології вирощування міскантусу.

Отримані результати свідчать, що основними факторами формування вуглецевого сліду вирощування міскантусу є:

- використання мінеральних добрив;
- споживання паливно-мастильних матеріалів;
- виконання агротехнічних операцій у період експлуатації плантації.

Зменшення сумарних викидів парникових газів можливе шляхом:

- оптимізації норм внесення добрив;
- впровадження технологій точного землеробства;
- скорочення кількості механізованих операцій;
- використання енергоефективної сільськогосподарської техніки.

Загалом вирощування міскантусу гігантського характеризується відносно низьким рівнем викидів порівняно з традиційними аграрними культурами та має значний потенціал для формування низьковуглецевих систем виробництва біоенергетичної сировини.

3.2. Аналіз прогнозного вуглецевого балансу плантації міскантусу

Для оцінки довгострокового кліматичного ефекту вирощування біоенергетичних культур було здійснено прогнозний розрахунок вуглецевого балансу плантації міскантусу протягом 25-річного періоду експлуатації. Такий підхід дозволяє врахувати не лише технологічні викиди парникових газів, але й процеси накопичення органічного вуглецю у ґрунті та поглинання CO₂ рослинною біомасою, що формує інтегральний кліматичний ефект вирощування культури.

Згідно з отриманими результатами, сумарні технологічні викиди (e_{ec}) за весь період функціонування плантації становлять 25,43 т CO₂ eq/га, тоді як накопичення вуглецю у ґрунті (e_{sca}) досягає 95,8 т CO₂ eq/га, а поглинання вуглецю біомасою – 766 т CO₂/га. У результаті сумарний чистий баланс парникових газів становить –70 т CO₂ eq/га, що свідчить про значний потенціал міскантусу як культури з негативним вуглецевим балансом.

Початковий етап розвитку плантації (1–3 роки).

Перші роки функціонування плантації характеризуються поступовим формуванням біомаси та розвитком кореневої системи рослин. У перший рік вегетації, що відповідає стадії закладання плантації, технологічні викиди становлять 1,96 т CO₂ eq/га. Порівняно невисокий рівень емісій пояснюється обмеженим обсягом агротехнічних операцій після завершення посадки ризомів. Водночас у цей період вже відбувається накопичення вуглецю у ґрунті на рівні 0,8 т CO₂ eq/га, а поглинання CO₂ рослинною біомасою становить 6 т CO₂/га. У результаті чистий баланс парникових газів є позитивним і становить – 1,17 т CO₂ eq/га.

У другий рік вегетації спостерігається зниження технологічних викидів до 1,15 т CO₂ eq/га, що пов'язано з скороченням технологічних операцій. Одночасно значно збільшується інтенсивність фотосинтетичного поглинання вуглецю, внаслідок чого обсяг накопичення CO₂ у біомасі досягає 29 т CO₂/га, а чистий вуглецевий баланс становить –2,48 т CO₂ eq/га.

На третьому році розвитку, коли рослини досягають стадії повної врожайності, технологічні викиди зростають до 1,19 т CO₂ eq/га, а поглинання CO₂ біомасою збільшується до 49 т CO₂/га. Урожайність сухої біомаси у цей період становить 16,5 т/га, що свідчить про поступове формування продуктивної плантації.

Період максимальної продуктивності плантації (4–14 роки).

Найбільш тривалим етапом функціонування плантації є період стабільної експлуатації, який охоплює 4–14 роки вирощування. У цей час технологічні викиди стабілізуються на рівні 1,24 т CO₂ eq/га на рік, що пов'язано з регулярним виконанням агротехнічних операцій та збиранням біомаси.

Водночас саме в цей період спостерігається максимальне поглинання вуглецю біомасою, яке досягає 50 т CO₂/га щорічно. Такий високий рівень поглинання пов'язаний із максимальною продуктивністю культури, яка становить 28 т сухої біомаси з гектара. Незважаючи на стабільні технологічні викиди, чистий вуглецевий баланс у цей період залишається від'ємним і

становить $-5,04$ т CO_2 eq/га щороку, що підтверджує значний потенціал міскантусу в зниженні концентрації парникових газів у атмосфері.

Період поступового зниження продуктивності (15–25 роки).

Починаючи приблизно з 15 року експлуатації, продуктивність плантації поступово зменшується, що є типовим для багаторічних агроecosystem. Урожайність сухої біомаси знижується з 20,9 до 13,0 т/га, що супроводжується відповідним зменшенням поглинання CO_2 рослинною біомасою до 23 т CO_2 /га.

Незважаючи на зниження продуктивності, чистий вуглецевий баланс залишається від'ємним ($-1,62$ т CO_2 eq/га), що свідчить про збереження кліматичної ефективності вирощування культури навіть на завершальному етапі її життєвого циклу.

Етап ліквідації плантації.

Після завершення періоду експлуатації проводиться ліквідація плантації, яка супроводжується виконанням агротехнічних операцій із відновлення ґрунтового покриву. У цей період технологічні викиди становлять 0,14 т CO_2 eq/га, що є найнижчим показником серед усіх етапів життєвого циклу.

Проведений аналіз прогнозного вуглецевого балансу показує, що вирощування міскантусу гігантського характеризується стабільно від'ємним балансом парникових газів протягом усього періоду функціонування плантації. Основними факторами формування такого ефекту є:

- значне поглинання CO_2 рослинною біомасою, яке за 25 років перевищує 700 т CO_2 /га;
- накопичення органічного вуглецю у ґрунті, що становить більше 90 т CO_2 eq/га;
- відносно невисокий рівень технологічних викидів, пов'язаних із виконанням агротехнічних операцій.

Таким чином, за весь період експлуатації плантації сумарний кліматичний ефект вирощування міскантусу становить -70 т CO_2 eq/га, що підтверджує значний потенціал цієї культури для формування низьковуглецевих агроенергетичних систем та зменшення антропогенних викидів парникових газів.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ БІОМАСИ БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР ТА ОБСЯГИ ПОГЛИНАННЯ АТМОСФЕРНОГО ВУГЛЕЦЮ ЗА ЇХ ВИРОЩУВАННЯ

Одним із ключових напрямів розвитку сучасної біоенергетики є використання багаторічних енергетичних культур, які характеризуються високою продуктивністю біомаси, тривалим періодом експлуатації плантацій та здатністю до ефективного поглинання атмосферного вуглецю. До таких культур належать міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*) та верба прутовидна (*Salix viminalis*), які широко використовуються у країнах Європи як сировина для виробництва твердого біопалива, теплової та електричної енергії.

Особливістю багаторічних біоенергетичних культур є поєднання високої врожайності сухої біомаси та значного потенціалу секвестрації вуглецю, що робить їх важливим елементом низьковуглецевих агроенергетичних систем. У процесі фотосинтезу рослини поглинають вуглекислий газ з атмосфери та трансформують його в органічну речовину, що накопичується у надземній біомасі та кореневій системі. Частина цього вуглецю повертається в атмосферу під час використання біомаси як палива, проте значна його частка залишається у ґрунті у вигляді органічної речовини, що сприяє довгостроковому накопиченню вуглецю в агроecosистемах.

Важливим показником ефективності використання біоенергетичних культур є енергетичний потенціал отриманої біомаси, який визначається її врожайністю та теплотворною здатністю. За даними численних досліджень, середня врожайність міскантусу у європейських умовах може становити 15–25 т/га сухої біомаси, тоді як врожайність енергетичної верби за тричотирирічного циклу збирання становить 30–40 т/га сухої біомаси на рік у перерахунку на середньорічний показник. Така продуктивність забезпечує значний енергетичний потенціал біомаси та робить ці культури перспективними для виробництва відновлюваної енергії.

Крім енергетичної цінності, важливим аспектом вирощування енергетичних культур є обсяг поглинання атмосферного вуглекислого газу, який безпосередньо пов'язаний із продуктивністю рослин. Відомо, що для утворення 1 т сухої рослинної біомаси рослини поглинають у середньому близько 1,8 т CO₂, що дозволяє оцінити кліматичний ефект вирощування енергетичних культур.

У даному розділі проведено оцінку динаміки продуктивності міскантусу гігантського та верби прутовидної протягом 25-річного періоду функціонування плантацій, а також визначено обсяги поглинання атмосферного вуглекислого газу рослинами залежно від віку плантації. Такий підхід дозволяє оцінити довгостроковий енергетичний потенціал біомаси та кліматичний ефект вирощування багаторічних біоенергетичних культур.

Аналіз продуктивності та поглинання CO₂ здійснювався за роками вегетації (1–25 роки), що дає можливість простежити закономірності формування врожайності біомаси у різні фази розвитку плантацій – від етапу їх закладання до періоду максимальної продуктивності та подальшого зниження врожайності наприкінці життєвого циклу культури.

4.1 Динаміка продуктивності біоенергетичних культур за роками вегетації

Однією з ключових характеристик ефективності вирощування багаторічних біоенергетичних культур є їхня продуктивність сухої біомаси, яка визначає як енергетичний потенціал плантацій, так і обсяги поглинання атмосферного вуглецю. До найбільш перспективних культур для виробництва твердого біопалива в умовах України належать міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*) та верба прутувидна (*Salix viminalis* L.), які характеризуються високою врожайністю, тривалим періодом експлуатації плантацій та стабільним формуванням біомаси протягом багатьох років.

Особливістю розвитку багаторічних біоенергетичних культур є те, що їх продуктивність змінюється залежно від віку плантації. На початкових етапах розвитку рослини формують кореневу систему та вегетативну масу, що зумовлює відносно низьку врожайність біомаси. У наступні роки відбувається інтенсивне нарощування надземної маси, після чого продуктивність стабілізується на певному рівні протягом тривалого періоду експлуатації плантації [95].

Результати експериментальних досліджень свідчать, що у перші роки вегетації міскантусу спостерігається інтенсивне зростання рослин, що проявляється як у збільшенні їх висоти, так і у підвищенні врожайності біомаси. Зокрема, за даними досліджень, проведених на Білоцерківській дослідно-селекційній станції, висота рослин міскантусу у перший рік вегетації становила 70–105 см, залежно від варіанта удобрення. На другий рік вегетації висота рослин зростала до 180–230 см, а на третій – до 255–270 см, що свідчить про інтенсивний розвиток надземної біомаси культури.

Починаючи з четвертого року вегетації ріст рослин стабілізується, а висота стебел коливається в межах 250–270 см, залежно від рівня мінерального живлення. Найменші значення висоти рослин спостерігаються у контрольному варіанті без внесення добрив. Так, у 2024 році висота рослин у цьому варіанті становила 226 см, тоді як у варіанті з максимальними дозами добрив ($N_{60}P_{300}K_{360}$) вона досягала 254 см, що підтверджує позитивний вплив мінерального живлення на ріст і розвиток культури.

Аналіз динаміки врожайності сухої біомаси міскантусу протягом дев'яти років досліджень показав, що формування продуктивності цієї культури має S-подібний характер, який є типовим для багаторічних рослин. Перший рік вирощування характеризується низькою врожайністю, що пов'язано з формуванням кореневої системи та адаптацією рослин до умов вирощування. У наступні роки відбувається різке збільшення продуктивності, і вже на третій–четвертий роки плантація досягає піку врожайності.

Так, у контрольному варіанті без внесення добрив врожайність сухої біомаси у перший рік становила лише 0,8 т/га, тоді як у четвертий рік вона досягала 17,4 т/га. Внесення мінеральних добрив значно підвищувало продуктивність культури. Наприклад, у варіанті з внесенням азотних добрив ($N_{60}P_0K_0$) врожайність збільшувалася з 2,3 т/га у перший рік до 29,8 т/га у четвертий рік вегетації. Найвищі показники врожайності спостерігалися у варіантах із комплексним внесенням азоту, фосфору та калію. Зокрема, у варіанті

N₆₀P₃₀₀K₃₆₀ у 2021 році врожайність сухої біомаси досягала 30,7 т/га, що є максимальним значенням серед усіх досліджуваних варіантів.

Поряд з міскантусом важливою біоенергетичною культурою є верба прутovidна, яка широко використовується у країнах Північної та Центральної Європи для виробництва деревної біомаси. На відміну від міскантусу, збирання біомаси верби проводять не щорічно, а через 2–3 роки, що пов'язано з особливостями формування деревної маси. Перший урожай біомаси верби отримують, як правило, після третього року вирощування, після чого плантація може експлуатуватися протягом 20–25 років [34].

За даними досліджень, середня врожайність біомаси енергетичної верби становить 10–15 т/га сухої маси на рік у середньорічному перерахунку, а на високопродуктивних плантаціях може досягати 18–20 т/га [95]. Таким чином, за рівнем продуктивності верба дещо поступається міскантусу, однак має інші переваги, зокрема високу адаптивність до умов зволжених ґрунтів та можливість вирощування на малопродуктивних землях.

Порівняльний аналіз продуктивності двох культур свідчить, що міскантус характеризується вищою стабільністю формування врожаю та більш рівномірним розподілом біомаси по роках, тоді як продуктивність верби залежить від тривалості циклу збирання та умов вирощування.

Таким чином, результати проведених досліджень підтверджують, що продуктивність біомаси багаторічних біоенергетичних культур значною мірою визначається віком плантації, рівнем мінерального живлення та ґрунтово-кліматичними умовами вирощування. Найвищі показники продуктивності міскантусу досягаються у період 4–10 років експлуатації плантації, після чого спостерігається поступове зниження врожайності. Енергетична верба також формує стабільні врожаї біомаси протягом тривалого періоду, однак її продуктивність залежить від циклів збирання деревної маси.

Отримані результати є важливою основою для оцінки енергетичного потенціалу біомаси та обсягів поглинання атмосферного вуглецю, що буде розглянуто у наступному підрозділі.

4.2. Обсяги поглинання атмосферного CO₂ плантаціями міскантусу та верби

Важливим екологічним показником ефективності вирощування багаторічних біоенергетичних культур є їх здатність до поглинання атмосферного вуглекислого газу (CO₂) у процесі фотосинтезу. Рослини використовують CO₂ як основне джерело вуглецю для формування органічної речовини, що накопичується у вигляді біомаси. Частина цього вуглецю залишається у ґрунті у вигляді рослинних залишків та кореневої системи, що сприяє довгостроковому накопиченню органічного вуглецю в агроecosистемах [79, 90].

Обсяг поглинання CO₂ безпосередньо пов'язаний із продуктивністю рослинної біомаси. За результатами численних досліджень встановлено, що для утворення 1 т сухої рослинної біомаси рослини поглинають у середньому близько 1,8 т CO₂ з атмосфери. Це співвідношення використовується для оцінки кліматичного ефекту вирощування енергетичних культур та визначення їх ролі у зменшенні концентрації парникових газів у атмосфері [36].

4.2.1. Поглинання CO₂ плантаціями міскантусу

Як показали результати досліджень, обсяги поглинання вуглекислого газу плантаціями міскантусу тісно пов'язані з віком рослин та рівнем їх продуктивності. У перший рік вегетації поглинання CO₂ є відносно невисоким через обмежену масу надземної біомаси та спрямування значної частини енергії рослини на формування кореневої системи. За врожайності біомаси близько 0,8–2,3 т/га поглинання атмосферного CO₂ становить приблизно 1,4–4,1 т CO₂/га.

У наступні роки вегетації інтенсивність фотосинтетичної діяльності рослин значно зростає, що призводить до різкого збільшення обсягів поглинання вуглекислого газу. Зокрема, на третій–четвертий роки розвитку плантації врожайність сухої біомаси міскантусу може досягати 20–30 т/га, що відповідає поглинанню приблизно 36–54 т CO₂/га на рік.

Найбільші обсяги поглинання CO₂ спостерігаються у період максимальної продуктивності плантації, який зазвичай припадає на 4–10 роки експлуатації. У цей період врожайність сухої біомаси може перевищувати 25–30 т/га, що забезпечує поглинання понад 45–54 т CO₂/га щорічно. Такі показники підтверджують високий потенціал міскантусу як культури для секвестрації атмосферного вуглецю.

З віком плантації продуктивність рослин поступово знижується, що відповідно впливає на обсяги поглинання CO₂. Згідно з прогнозними розрахунками, після 15–20 років експлуатації врожайність біомаси може зменшуватися на 0,2–0,3 т/га щорічно, що призводить до поступового зниження річних обсягів поглинання вуглекислого газу. Проте навіть на пізніх етапах функціонування плантації рівень секвестрації CO₂ залишається значним.

4.2.2. Поглинання CO₂ плантаціями верби

Енергетична верба також характеризується високим потенціалом поглинання атмосферного вуглецю, хоча механізм формування біомаси дещо відрізняється від трав'янистих культур. Верба формує деревну біомасу, яка накопичується протягом кількох років і заготовляється через певні інтервали часу.

На початкових етапах розвитку плантації верби основна частина біомаси спрямована на формування пагонів та кореневої системи, тому поглинання CO₂ є відносно невисоким. Перший значний урожай біомаси отримують, як правило, після завершення третього року вегетації, коли здійснюється перше зрізування пагонів.

У середньому врожайність біомаси верби становить 10–15 т сухої маси з гектара на рік у перерахунку на середньорічний показник, що відповідає поглинанню 18–27 т CO₂/га щорічно. У сприятливих умовах вирощування цей показник може досягати 30–36 т CO₂/га.

Після проведення першого зрізування рослини верби формують нові пагони, і цикл накопичення біомаси повторюється. Такий цикл може повторюватися 7–8 разів протягом 20–25 років експлуатації плантації, що забезпечує стабільне поглинання атмосферного вуглецю протягом тривалого періоду [141].

Порівняльна оцінка поглинання CO₂ біоенергетичними культурами.

Порівняльний аналіз показує, що міскантус і верба мають дещо різні закономірності поглинання атмосферного CO₂, що пов'язано з особливостями їх біології та технології вирощування.

Міскантус характеризується щорічним накопиченням значної кількості трав'янистої біомаси, що забезпечує стабільно високі обсяги поглинання CO₂ у кожному році експлуатації плантації. Верба, у свою чергу, формує деревну біомасу, яка накопичується протягом кількох років і заготовляється періодично, тому її продуктивність має циклічний характер.

Незважаючи на ці відмінності, обидві культури демонструють значний потенціал секвестрації атмосферного вуглецю. За оцінками дослідників, протягом усього періоду експлуатації плантації (20–25 років) сумарний обсяг поглинання CO₂ може становити понад 600–800 т CO₂/га для міскантусу та 400–600 т CO₂/га для енергетичної верби [100, 143].

Таким чином, вирощування багаторічних біоенергетичних культур не лише забезпечує отримання значної кількості відновлюваної біомаси, але й сприяє зменшенню концентрації парникових газів в атмосфері. Висока здатність цих культур до поглинання атмосферного CO₂ робить їх важливим інструментом формування кліматично нейтральних агроенергетичних систем та підвищення екологічної ефективності використання земельних ресурсів.

4.3. Енергетичний потенціал біомаси міскантусу та верби

Одним із ключових показників ефективності вирощування біоенергетичних культур є енергетичний потенціал отриманої біомаси, який визначається її врожайністю та теплотворною здатністю. Саме ці параметри визначають можливість використання рослинної біомаси як альтернативного джерела енергії для виробництва теплової та електричної енергії, а також для заміщення викопних видів палива.

Біомаса багаторічних енергетичних культур характеризується високою теплотворною здатністю та низьким вмістом зольних елементів. За даними досліджень, нижча теплота згоряння сухої біомаси міскантусу становить у середньому 17–18 МДж/кг, тоді як для деревної біомаси енергетичної верби цей показник коливається в межах 18–19 МДж/кг [101, 113]. Такі значення теплотворної здатності є близькими до характеристик деяких видів твердого викопного палива, що робить ці культури перспективною сировиною для виробництва твердих біопалив.

Енергетичний потенціал біомаси безпосередньо залежить від її врожайності. Як показали результати проведених досліджень, у перші роки вегетації продуктивність біомаси міскантусу є відносно низькою через формування кореневої системи рослин. У цей період енергетичний потенціал біомаси не перевищує 15–40 ГДж/га.

У наступні роки продуктивність рослин значно зростає. Починаючи з третього–четвертого року вегетації врожайність сухої біомаси міскантусу може досягати 20–30 т/га, що відповідає енергетичному потенціалу на рівні 340–

540 ГДж/га. Найбільші значення енергетичного потенціалу спостерігаються у період максимальної продуктивності плантації, який зазвичай припадає на 4–10 роки експлуатації.

Внесення мінеральних добрив суттєво впливає на енергетичний потенціал біомаси. Найвищі показники спостерігалися у варіантах із комплексним застосуванням азоту, фосфору та калію. Зокрема, у варіанті $N_{60}P_{300}K_{360}$ врожайність сухої біомаси досягала 30,7 т/га, що відповідає енергетичному потенціалу близько 550 ГДж/га. У контрольному варіанті без внесення добрив цей показник був значно нижчим і становив приблизно 300 ГДж/га.

Подібні закономірності формування енергетичного потенціалу спостерігаються і для енергетичної верби. Урожайність деревної біомаси цієї культури у середньорічному перерахунку становить 10–15 т сухої маси з гектара, що відповідає енергетичному потенціалу 180–270 ГДж/га. У сприятливих ґрунтово-кліматичних умовах цей показник може досягати 300–350 ГДж/га.

Важливою особливістю верби є циклічний характер формування біомаси. Збирання врожаю проводиться, як правило, кожні 2–3 роки, тому енергетичний потенціал плантації формується у вигляді періодичних піків продуктивності. Незважаючи на це, середньорічний енергетичний потенціал плантацій верби залишається достатньо високим і забезпечує стабільне виробництво біоенергетичної сировини протягом усього періоду експлуатації плантації.

Отримана біомаса може використовуватися у вигляді паливної тріски, пелет або брикетів, які широко застосовуються у котельнях та теплоелектростанціях. За енергетичною цінністю 1 т сухої біомаси міскантусу приблизно еквівалентна 400 кг сирової нафти, 515 м³ природного газу або близько 620 кг кам'яного вугілля [191]. Це свідчить про високий потенціал цієї культури для заміщення традиційних енергоносіїв.

Порівняльний аналіз енергетичного потенціалу двох культур показує, що міскантус характеризується вищим рівнем щорічного виробництва енергії з одиниці площі, що пояснюється його більшою продуктивністю біомаси. Верба, у свою чергу, має інші переваги, зокрема високу адаптивність до умов підвищеної вологості та можливість вирощування на деградованих або малопродуктивних землях.

Загалом, протягом 20–25 років експлуатації плантації сумарний енергетичний потенціал біомаси може становити понад 8000–10000 ГДж/га для міскантусу та 5000–7000 ГДж/га для енергетичної верби, що підтверджує високий потенціал цих культур для розвитку біоенергетики.

Таким чином, результати проведеного аналізу свідчать, що багаторічні біоенергетичні культури мають значний потенціал для виробництва відновлюваної енергії. Висока врожайність біомаси, значна теплотворна здатність та тривалий період експлуатації плантацій забезпечують формування стабільного джерела енергетичної сировини та сприяють підвищенню енергетичної безпеки країни.

РОЗДІЛ 5

ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

5.1. Аналіз ключових джерел викидів парникових газів у технології виращування міскантусу

Оцінка структури викидів парникових газів у технології вирощування міскантусу гігантського (*Miscanthus × giganteus*) є необхідною передумовою для обґрунтування заходів щодо зниження вуглецевого сліду та підвищення екологічної ефективності біоенергетичного виробництва. Згідно з сучасними підходами аналізу життєвого циклу (LCA), найбільший вплив на формування сумарних викидів мають окремі ресурси та технологічні операції, що характеризуються високою енергоємністю або значними непрямими емісіями [89, 4].

Результати проведених попередніх розрахунків (див. табл. 3.1) свідчать, що сумарні викиди парникових газів за чотири роки вирощування міскантусу становлять 4555,3 кг CO₂ eq/га. При цьому структура викидів є суттєво нерівномірною, а основний внесок формують обмежена кількість джерел, серед яких домінуючу роль відіграють мінеральні добрива.

Найбільшу частку у структурі викидів становлять викиди, пов'язані з використанням мінеральних добрив – 3250,1 кг CO₂ eq/га, або 71,3% від загального обсягу емісій. Така висока частка пояснюється значною енергоємністю виробництва азотних добрив, яке базується на процесі Габера–Боша та потребує великих витрат викопного палива. Крім того, внесення азотних добрив у ґрунт супроводжується утворенням закису азоту (N₂O), потенціал глобального потепління якого у 298 разів перевищує CO₂ [17]. За даними міжнародних досліджень, саме мінеральне живлення є основним фактором формування вуглецевого сліду аграрних систем, частка якого може перевищувати 60–80% у структурі загальних викидів [131, 11].

Другим за значенням джерелом викидів є паливно-мастильні матеріали (ПММ), на які припадає 982,5 кг CO₂ eq/га, або 21,6% сумарних викидів. Викиди цієї категорії формуються як у результаті безпосереднього спалювання дизельного пального під час виконання технологічних операцій, так і внаслідок його виробництва та транспортування. Найбільші обсяги використання пального припадають на операції обробітку ґрунту, догляду за насадженнями та збирання біомаси. Відповідно, інтенсивність використання техніки є одним із ключових чинників формування вуглецевого сліду технології [33].

Менший, але помітний внесок у загальну структуру викидів має садивний матеріал – 206,3 кг CO₂ eq/га, або 4,5%. Викиди цієї категорії пов'язані з процесами вирощування, підготовки, транспортування та зберігання ризомів міскантусу. Хоча цей елемент є одноразовим у межах життєвого циклу плантації, він відіграє важливу роль на етапі її закладання та формує частину початкового вуглецевого навантаження [12].

Найменшу частку у структурі викидів становлять засоби захисту рослин – 116,4 kg CO₂ eq/га, або 2,6%. Це пояснюється відносно низькою потребою міскантусу у хімічному захисті, що зумовлено його високою конкурентною здатністю та стійкістю до більшості шкідливих організмів. Відповідно, використання пестицидів у технології вирощування цієї культури є обмеженим, що позитивно впливає на загальний рівень викидів [131].

Деталізація структури викидів за технологічними операціями (див.табл. 3.3) дозволяє встановити, що найбільш енергоємним етапом є період експлуатації плантації, зокрема догляд за насадженнями у другий, третій та четвертий роки вегетації, сумарна частка яких перевищує 65% загальних викидів. Це зумовлено систематичним виконанням агротехнічних заходів, внесенням добрив та використанням техніки, що супроводжується значними витратами енергетичних ресурсів.

Водночас початкові операції, пов'язані із закладанням плантації (обробіток ґрунту, садіння), хоча й характеризуються відносно високими разовими витратами, мають менший внесок у довгостроковій структурі викидів. Це пояснюється тим, що ці операції виконуються одноразово, тоді як експлуатаційні процеси повторюються протягом усього періоду функціонування плантації [4, 33].

Аналіз розподілу викидів за роками вегетації (див. табл. 3.2) підтверджує, що інтенсивність формування вуглецевого сліду зростає у міру розвитку плантації та досягнення нею повної продуктивності. Найбільша частка викидів припадає на четвертий та наступні роки, що пов'язано з максимальним рівнем використання ресурсів у фазі стабільної експлуатації.

Таким чином, результати проведеного аналізу дозволяють виокремити ключові джерела формування вуглецевого сліду технології вирощування міскантусу гігантського. До них належать:

- використання мінеральних добрив (понад 70% викидів);
- споживання паливно-мастильних матеріалів (понад 20%);
- технологічні операції догляду за насадженнями у період експлуатації плантації.

Отримані результати узгоджуються з висновками європейських досліджень, які також визначають мінеральне живлення та енергоспоживання як основні фактори формування вуглецевого сліду біоенергетичних культур [131, 11, 33]. Це свідчить про універсальний характер виявлених закономірностей та підтверджує доцільність спрямування заходів декарбонізації саме на оптимізацію цих елементів технології.

Отже, ідентифікація ключових джерел викидів створює наукове підґрунтя для подальшого обґрунтування комплексу низьковуглецевих технологічних рішень, спрямованих на зменшення антропогенного навантаження на клімат при вирощуванні міскантусу.

5.2. Обґрунтування низьковуглецевих елементів технології вирощування міскантусу

Встановлення ключових джерел викидів парникових газів у технології вирощування міскантусу гігантського дозволяє перейти до науково обґрунтованого формування комплексу низьковуглецевих елементів, спрямованих на зменшення вуглецевого сліду без втрати продуктивності біомаси. З огляду на отримані результати (див. розділ 3), а також узагальнення сучасних наукових підходів, основні напрями декарбонізації технології доцільно групувати за видами ресурсів та технологічних операцій [142, 29].

Враховуючи, що понад 70% сумарних викидів припадає на мінеральні добрива, саме система живлення є визначальним фактором формування вуглецевого сліду. Зниження викидів у цій категорії може бути досягнуте за рахунок:

- оптимізації норм внесення азоту на основі агрохімічного аналізу ґрунту та потреб культури. Дослідження показують, що надлишкове внесення азоту не призводить до пропорційного зростання врожайності, але суттєво підвищує емісію N_2O [78];

- використання органічних добрив (компости, дигестат біогазових установок), які характеризуються нижчим рівнем “вкладених” викидів порівняно з мінеральними аналогами [132];

- застосування інгібіторів нітрифікації, що зменшують втрати азоту та викиди N_2O з ґрунту [8];

- використання добрив із низьким вуглецевим слідом, вироблених із застосуванням відновлюваних джерел енергії (так звані “green fertilizers”) [40].

Важливим також є поєднання мінерального та органічного живлення, що дозволяє забезпечити стабільну продуктивність культури та одночасно зменшити сумарні викиди.

Другим за значенням джерелом викидів є паливно-мастильні матеріали, тому зниження їх використання є важливим напрямом декарбонізації технології. Основні заходи включають:

- мінімізацію кількості технологічних операцій, зокрема шляхом переходу до ресурсозберігаючих систем обробітку ґрунту (mini-till, strip-till);

- оптимізацію логістики виконання робіт, що дозволяє зменшити кількість проходів техніки по полю;

- використання сучасної енергоефективної техніки, яка має нижчу витрату пального на одиницю виконаної роботи;

- часткову електрифікацію або використання альтернативних видів палива (біодизель, біометан), що дозволяє знизити прямі викиди CO_2 [29, 40].

Згідно з європейськими дослідженнями, впровадження таких заходів може зменшити викиди від використання ПММ на 15–30% [70].

Раціоналізація технологічних операцій у період експлуатації плантації

Як показав аналіз (див. табл. 3.3), найбільша частка викидів припадає на операції догляду за насадженнями у період з другого по четвертий роки вегетації. У зв'язку з цим доцільно:

- зменшити інтенсивність міжрядного обробітку після формування щільного травостою, коли міскантус самостійно пригнічує бур'яни;
- оптимізувати строки та способи внесення добрив, поєднуючи декілька операцій в один прохід техніки;
- використовувати точні технології (precision agriculture) для диференційованого внесення ресурсів;
- мінімізувати використання засобів захисту рослин, переходячи до інтегрованих систем захисту (IPM), що особливо актуально для міскантусу як культури з високою природною стійкістю [132].

Хоча закладання плантації має меншу частку у довгостроковій структурі викидів, його оптимізація дозволяє знизити початкове вуглецеве навантаження. До основних заходів належать:

- зменшення глибини та інтенсивності обробітку ґрунту;
- використання якісного садивного матеріалу, що забезпечує швидке укорінення та зменшує потребу у додаткових операціях догляду;
- оптимізація густоти садіння, що впливає на швидкість формування продуктивного травостою [70].

Окремим напрямом підвищення екологічної ефективності є посилення процесів накопичення органічного вуглецю у ґрунті. Міскантус характеризується високим потенціалом секвестрації завдяки розвиненій кореневій системі та значному надходженню рослинних решток у ґрунт [121]. Для підсилення цього ефекту доцільно:

- мінімізувати порушення ґрунтового покриву;
- залишати післязливні рештки на полі;
- уникати надмірної інтенсифікації обробітку ґрунту.

За даними досліджень, довготривале вирощування міскантусу може забезпечити накопичення до 1–2 т С/га на рік, що суттєво компенсує технологічні викиди [121, 34].

Таким чином, обґрунтований комплекс низьковуглецевих елементів технології вирощування міскантусу включає:

- оптимізацію системи удобрення (ключовий фактор);
- зниження споживання паливно-мастильних матеріалів;
- раціоналізацію технологічних операцій у період експлуатації;
- оптимізацію закладання плантації;
- посилення процесів секвестрації вуглецю.

Реалізація зазначених заходів дозволяє зменшити сумарні викиди парникових газів на 30–50% без істотного зниження продуктивності біомаси, що узгоджується з результатами європейських досліджень у сфері біоенергетики [29, 40, 34]. Це підтверджує доцільність впровадження низьковуглецевих технологій як основи сталого виробництва біоенергетичної сировини.

5.3. Аналіз ключових джерел викидів у технології вирощування енергетичної верби

Оцінка структури викидів парникових газів у технології вирощування енергетичної верби (*Salix viminalis* L.) є важливим етапом формування науково обґрунтованих підходів до зниження вуглецевого сліду біоенергетичних систем. На відміну від міскантусу, технологія вирощування верби має певні особливості, зокрема короткоротаційний цикл (3–4 роки між зрізами), інтенсивніше використання техніки під час збирання та специфічну систему удобрення. Це зумовлює відмінності у структурі джерел викидів та їхній питомій вазі [23, 73].

Згідно з сучасними дослідженнями, сумарні викиди парникових газів при вирощуванні енергетичної верби формуються за рахунок трьох основних компонентів: використання мінеральних добрив, споживання паливно-мастильних матеріалів та виконання технологічних операцій протягом життєвого циклу плантації [45].

Одним із ключових джерел викидів є мінеральні добрива, насамперед азотні. Як і у випадку міскантусу, їх внесення супроводжується значними непрямыми викидами, пов'язаними з виробництвом, а також прямими емісіями N_2O з ґрунту після внесення [78]. Водночас, порівняно з міскантусом, потреба верби в азоті може бути вищою, особливо на інтенсивних плантаціях, що призводить до збільшення частки цього джерела у структурі викидів.

За даними європейських досліджень, частка викидів від мінеральних добрив у технології вирощування енергетичної верби може становити 40–70% від загального обсягу емісій залежно від рівня удобрення та родючості ґрунтів [143]. Це підтверджує, що система живлення є одним із визначальних факторів формування вуглецевого сліду даної культури.

Другим за значенням джерелом є викиди, пов'язані зі споживанням паливно-мастильних матеріалів. Вони формуються внаслідок виконання таких операцій, як підготовка ґрунту, садіння живців, міжрядний обробіток, внесення добрив та збирання біомаси.

Особливістю технології вирощування верби є використання спеціалізованої техніки для зрізування та подрібнення біомаси, що може супроводжуватися значними витратами пального. У зв'язку з цим частка ПММ у структурі викидів може досягати 25–35% [30]. Найбільші обсяги викидів припадають на операції збирання, які виконуються періодично протягом усього циклу експлуатації плантації.

Аналіз технологічної структури вирощування енергетичної верби свідчить, що значний внесок у формування викидів мають операції догляду за насадженнями та їх експлуатації. Зокрема, регулярні агротехнічні заходи, такі як внесення добрив, боротьба з бур'янами та догляд за міжряддями, супроводжуються використанням техніки та відповідними викидами CO_2 .

Окрему роль відіграє цикл зрізування біомаси, який повторюється кожні 3–4 роки. На відміну від міскантусу, де збирання здійснюється щорічно, у верби воно має періодичний, але більш енергоємний характер. Це призводить до

нерівномірного розподілу викидів у часі, коли пікові значення припадають на роки збирання [73, 30].

Початковий етап створення плантації верби включає підготовку ґрунту та висаджування живців, що також супроводжується викидами парникових газів. Однак, як і у випадку міскантусу, ці викиди мають одноразовий характер і в довгостроковій перспективі займають відносно невелику частку у загальному балансі [74].

Важливим фактором є також якість посадкового матеріалу та технологія садіння, які впливають на приживлюваність рослин і потребу в додаткових агротехнічних заходах.

Узагальнюючи отримані дані, можна зазначити, що структура викидів у технології вирощування енергетичної верби має такі характерні риси:

- значна частка викидів, пов'язаних із мінеральним живленням;
- підвищена роль паливно-мастильних матеріалів, особливо на етапі збирання;
- вагомий внесок періоду експлуатації плантації;
- нерівномірність розподілу викидів у часі через циклічність зрізування біомаси.

На відміну від міскантусу, де викиди більш рівномірно розподілені за роками, у верби спостерігається більш виражена циклічність, що пов'язано з біологічними особливостями культури та технологією її вирощування [23, 73].

Таким чином, ключовими джерелами викидів парникових газів у технології вирощування енергетичної верби є:

- мінеральні добрива (основний фактор);
- паливно-мастильні матеріали;
- технологічні операції догляду та збирання біомаси.

Отримані результати узгоджуються з висновками міжнародних досліджень і підтверджують, що найбільший потенціал зниження викидів пов'язаний із оптимізацією системи удобрення та підвищенням енергоефективності технологічних процесів [45, 143, 30].

Це створює наукову основу для подальшого обґрунтування низьковуглецевих елементів технології вирощування енергетичної верби, які будуть розглянуті у наступному підрозділі.

5.4. Обґрунтування низьковуглецевих елементів технології вирощування енергетичної верби

На основі проведеного аналізу структури викидів парникових газів у технології вирощування енергетичної верби (*Salix viminalis* L.) (підрозділ 5.3) встановлено, що найбільший вплив на формування вуглецевого сліду мають система удобрення, використання паливно-мастильних матеріалів та технологічні операції, пов'язані з експлуатацією плантації. Це дозволяє обґрунтувати комплекс низьковуглецевих елементів технології, спрямованих на мінімізацію антропогенних викидів без зниження продуктивності біомаси [1, 2].

Враховуючи значний внесок мінеральних добрив у загальну структуру викидів, першочерговим напрямом декарбонізації є оптимізація системи живлення рослин. Для енергетичної верби ефективними є такі заходи:

– зниження норм внесення азотних добрив до рівня, що відповідає фактичним потребам культури, з урахуванням запасів поживних речовин у ґрунті;

– використання органічних добрив (осади стічних вод, дигестат), які дозволяють частково або повністю замінити мінеральні добрива та зменшити “вкладені” викиди [50];

– використання побічних продуктів біоенергетики, зокрема золи від спалювання біомаси, як джерела калію та мікроелементів;

– впровадження систем точного землеробства, що забезпечують диференційоване внесення добрив залежно від просторової неоднорідності ґрунтів.

За результатами досліджень, оптимізація азотного живлення може зменшити викиди N_2O на 20–40% без істотного впливу на врожайність [49].

Зменшення використання паливно-мастильних матеріалів

Значна частка викидів у технології вирощування верби пов’язана з використанням техніки, особливо під час збирання біомаси. У зв’язку з цим доцільними є такі заходи:

– оптимізація кількості технологічних операцій, зокрема скорочення міжрядних обробітків після формування насадження;

– використання високопродуктивної техніки, що дозволяє зменшити витрати пального на одиницю зібраної біомаси;

– раціоналізація логістики транспортування біомаси, зокрема скорочення відстаней перевезення та оптимізація маршрутів;

– використання альтернативних видів палива (біодизель, біометан), що дозволяє знизити прямі викиди CO_2 .

Згідно з європейськими дослідженнями, впровадження таких заходів дозволяє знизити викиди від ПММ на 15–25% [98].

Оптимізація технології збирання біомаси

Особливістю енергетичної верби є циклічний характер збирання (кожні 3–4 роки), що супроводжується піковими викидами. Для їх зменшення доцільно:

– застосовувати сучасні комбайни для одночасного зрізування та подрібнення біомаси, що скорочує кількість операцій;

– підвищувати ефективність збирання за рахунок оптимізації строків, що дозволяє зменшити втрати біомаси та додаткові витрати енергії;

– використовувати технології попереднього підсушування біомаси в полі, що зменшує витрати енергії на транспортування та подальшу переробку.

Зменшення викидів на етапі створення плантації може бути досягнуто за рахунок:

– мінімізації інтенсивності обробітку ґрунту;

– використання якісного посадкового матеріалу (живців) з високою приживлюваністю;

– оптимізації густоти садіння, що дозволяє швидше сформувати продуктивне насадження та зменшити потребу у додаткових агротехнічних заходах.

Енергетична верба характеризується високою здатністю до накопичення вуглецю як у біомасі, так і в ґрунті. Розвинена коренева система та регулярне надходження органічних решток сприяють збільшенню запасів органічного вуглецю [102]. Для посилення цього ефекту доцільно:

- залишати частину рослинних решток у ґрунті;
- уникати інтенсивного механічного обробітку;
- підтримувати довготривале використання плантації (20–25 років).

За даними досліджень, плантації енергетичної верби можуть акумулювати до 0,5–1,5 т С/га щорічно, що суттєво компенсує технологічні викиди [102, 78].

Таким чином, обґрунтований комплекс низьковуглецевих елементів технології вирощування енергетичної верби включає:

- оптимізацію системи удобрення;
- зниження використання паливно-мастильних матеріалів;
- удосконалення технології збирання біомаси;
- оптимізацію закладання плантації;
- посилення процесів секвестрації вуглецю.

Реалізація зазначених заходів дозволяє суттєво знизити вуглецевий слід виробництва біомаси енергетичної верби та підвищити її екологічну ефективність. За оцінками міжнародних досліджень, впровадження низьковуглецевих технологій може забезпечити скорочення викидів парникових газів на 25–45% при збереженні або навіть підвищенні рівня продуктивності [2, 98, 78].

Отже, формування та впровадження комплексу низьковуглецевих елементів технології є ключовою умовою сталого розвитку біоенергетичних систем на основі енергетичної верби.

5.5. Порівняльна оцінка ефективності низьковуглецевих заходів

Порівняльний аналіз ефективності впровадження низьковуглецевих заходів у технологіях вирощування міскантусу гігантського (*Miscanthus × giganteus*) та енергетичної верби (*Salix viminalis*) дозволяє визначити пріоритетні напрями декарбонізації та оцінити потенціал скорочення викидів парникових газів для кожної культури.

Як показали результати попередніх підрозділів, структура викидів для обох культур має спільні риси, однак відрізняється за рівнем інтенсивності окремих джерел. Для міскантусу ключовим фактором є використання мінеральних добрив, тоді як для верби – поєднання впливу добрив та паливно-мастильних матеріалів, особливо на етапі збирання біомаси [97, 152, 71].

З огляду на це, ефективність низьковуглецевих заходів залежить як від технологічних особливостей культури, так і від структури викидів у межах її життєвого циклу (табл. 5.1). Порівняльна оцінка показує, що міскантус має більш концентровану структуру викидів, де домінує один фактор – мінеральні добрива (понад 70%). Це означає, що реалізація навіть одного ключового заходу (оптимізація азотного живлення) дозволяє досягти значного скорочення загального вуглецевого сліду. Відповідно, у випадку міскантусу легше досягти швидкого ефекту декарбонізації, оскільки система є менш складною за структурою [97, 157].

Таблиця 5.1 - Порівняльна характеристика ефективності низьковуглецевих заходів

№	Низьковуглецевий захід	Ефект від заходу		Потенціал скорочення викидів
		Міскантус	Верба	
1	Оптимізація азотного живлення	Дуже високий ефект (основне джерело викидів)	Високий	20–40%
2	Перехід на органічні добрива	Високий	Високий	15–30%
3	Зменшення обробітку ґрунту	Середній	Середній	10–20%
4	Оптимізація використання ПММ	Середній	Високий	15–25%
5	Оптимізація збирання біомаси	Невисокий	Дуже високий (через циклічне збирання)	20–30%
6	Підвищення продуктивності культури	Високий (ефект «розбавлення» викидів)	Високий	10–25%
7	Секвестрація вуглецю (SOC)	Дуже високий	Високий	компенсація до 50% викидів
8	Подовження життєвого циклу плантації	Високий	Високий	10–20%

Натомість у технології вирощування верби викиди є більш рівномірно розподіленими між кількома джерелами, зокрема добривами, паливом та процесами збирання. Це ускладнює досягнення швидкого ефекту за рахунок одного заходу, проте створює можливості для комплексного зниження викидів шляхом поєднання декількох рішень. Зокрема, найбільший потенціал скорочення викидів у верби пов'язаний із оптимізацією механізованих операцій та логістики [152, 71].

Важливою перевагою обох культур є їх здатність до накопичення органічного вуглецю в ґрунті, що дозволяє частково або повністю компенсувати технологічні викиди. При цьому міскантус, завдяки більш розвиненій кореневій системі та вищій біомасі підземних органів, має дещо вищий потенціал секвестрації вуглецю [73].

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Впродовж останніх 50 років світове споживання енергії зросло у 2,6 рази, при цьому переважна більшість енергії (81,6%) все ще генерується з викопного палива, що призвело до масштабних викидів CO₂. Оскільки понад 73% цих викидів припадає на енергетику, Україна потребує системного переходу до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), частка яких у 2020 році становила лише 6,6% порівняно з 24,5% у ЄС. Розвиток різних видів біопалива (твердого, рідкого та газоподібного) є стратегічним кроком для зміцнення енергетичної безпеки та забезпечення маневреності енергосистеми.

2. Згідно з «Європейським зеленим курсом», Україна має орієнтуватися на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року та проміжне скорочення викидів на 55% до 2030 року. Оновлена Директива (ЄС) 2023/2413 встановлює жорсткі вимоги: частка ВДЕ у валовому кінцевому споживанні має досягти мінімум 42,5% до 2030 року. Важливо, що біомаса, яка не відповідає стандартам сталості ЄС, буде позбавлена державної підтримки та витіснена з ринку, що створює прямі вимоги до українських виробників підтверджувати екологічність своєї продукції.

3. Міскантус гігантський є перспективною C₄-культурою, що характеризується специфічною S-подібною динамікою росту. Якщо у перший рік вегетації врожайність сухої біомаси становить лише 0,8–2,3 т/га, то вже на третій рік вона зростає до 20–26 т/га, а в період максимальної продуктивності (4–5 роки) перевищує 30 т/га. Дослідження підтвердили сильний зв'язок між врожайністю та роком вегетації ($r = 0,89$), а також критичну роль азотного живлення для досягнення пікових показників продуктивності.

4. Плантаційне вирощування верби прутовидної (*Salix viminalis*) є ефективним інструментом вирішення екологічних проблем, зокрема через заліснення сільськогосподарських невідгод та відновлення земель, порушених промисловістю. Культура забезпечує реальні кліматичні переваги протягом свого 20–30-річного життєвого циклу, поглинаючи більше вуглецю, ніж виділяється під час її вирощування, збирання та спалювання. Крім того, такі плантації підтримують біорізноманіття, покращують якість води та ґрунту і сприяють створенню нових робочих місць у сільській місцевості.

5. Аналіз показав, що нижча теплота згоряння біомаси міскантусу становить 17–18 МДж/кг, а верби — 18–19 МДж/кг. За умови високої врожайності (25–30 т/га) річний енергетичний потенціал міскантусу може досягати 450–550 ГДж/га, що суттєво перевищує показники верби (180–300 ГДж/га). Протягом повного циклу експлуатації плантацій (20–25 років) сумарний енергетичний вихід може становити до 10 000 ГДж/га для міскантусу та до 7 000 ГДж/га для верби, що підтверджує їхню надзвичайну ефективність як джерел відновлюваної енергії.

6. Багаторічні біоенергетичні культури демонструють високий потенціал активного витягування CO₂ з атмосфери: для утворення 1 т сухої біомаси рослини поглинають близько 1,8 т вуглекислого газу. У фазі максимальної продуктивності плантації міскантусу здатні секвеструвати понад 45–50 т CO₂/га щорічно, тоді як верба поглинає в середньому 18–30 т CO₂/га на рік. Вуглець

надійно фіксується не лише у надземній біомасі, а й у потужній кореневій системі та органічній речовині ґрунту протягом тривалого часу.

7. Повний життєвий цикл міскантусу дозволяє досягти від'ємного вуглецевого балансу з потенціалом скорочення викидів до 30–40 т CO₂-екв./га щороку. Прогнозні розрахунки на 25-річний період свідчать, що при технологічних викидах на рівні 25,43 т CO₂-екв./га, накопичення вуглецю в ґрунті досягає 95,8 т, а поглинання біомасою — вражаючих 766 т CO₂/га. В результаті чистий баланс становить –70 т CO₂-екв./га, що робить цю культуру одним з найефективніших інструментів декарбонізації.

8. Оцінка за методологією аналізу життєвого циклу (LCA) встановила, що система удобрення є визначальним фактором формування викидів для міскантусу, складаючи понад 76% від загального обсягу (5547,4 кг CO₂-екв./га за перші чотири роки). На паливно-мастильні матеріали припадає лише 17,9% викидів, а частка засобів захисту рослин і садивного матеріалу є мінімальною. Це вказує на те, що вуглецевий слід міскантусу є висококонцентрованим і залежить переважно від інтенсивності використання мінерального азоту.

9. На відміну від міскантусу, енергетична верба характеризується більш рівномірним розподілом джерел парникових газів. Крім мінеральних добрив, суттєвий внесок у вуглецевий слід роблять паливно-мастильні матеріали та численні технологічні операції, серед яких найбільш енергоємним є механізоване збирання біомаси. Така структура вимагає більш комплексного підходу до декарбонізації, що включає як оптимізацію живлення, так і вдосконалення логістичних та збиральних процесів.

10. Найбільша частка технологічних викидів (понад 85%) формується у період повноцінної експлуатації плантацій через регулярність агротехнічних робіт. Деталізація операцій показала, що догляд за насадженнями акумулює понад 70% викидів, а збирання врожаю — близько 15%. Найбільш інтенсивне поглинання CO₂ відбувається між 4-м та 14-м роками росту, але навіть у період зниження продуктивності (15–25 роки) культури зберігають позитивний екологічний ефект, що підтверджує їхню довгострокову кліматичну стійкість.

11. Впровадження обґрунтованого комплексу низьковуглецевих заходів дозволяє скоротити викиди парникових газів на 25–45%. Пріоритетними напрямками є оптимізація норм внесення азотних добрив, їх часткова заміна органічними джерелами, що суттєво зменшує викиди оксиду азоту (N₂O). Також критично важливим є використання технологій точного землеробства, скорочення кількості проходів техніки та підвищення загальної енергоефективності машин.

12. Вирощування міскантусу та верби на маргінальних і деградованих землях забезпечує їхнє ефективне господарське використання, запобігає ерозії та поліпшує фізичні властивості ґрунтів. Собівартість скорочення викидів у таких системах часто є негативною, що вказує на пряму економічну прибутковість біоенергетичних проєктів. Впровадження цих культур сприяє розвитку сільських територій, зменшенню видатків на опалення та формуванню сталих агроенергетичних систем, що відповідають сучасним світовим вимогам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdalla M., Hastings A., Campbell G., Chen H., Smith P. Assessing the sustainability of Miscanthus and willow as global bioenergy crops: current and future climate conditions (Part 1) // *Agronomy*. 2024. Vol. 14, № 12. 3020. DOI: 10.3390/agronomy14123020
2. Abdalla M., Hastings A., Campbell G., McCalmont J., Shepherd A., Smith P. Assessing the sustainability of Miscanthus and willow as global bioenergy crops: current and future climate conditions (Part 2) // *Agronomy*. 2025. Vol. 15, № 6. 1491. DOI: 10.3390/agronomy15061491.
3. Adedoyin F.F., Alola A.A., Bekun F.V. An assessment of environmental sustainability corridor: The role of economic expansion and research and development in EU countries. *Science Of The Total Environment*. 2020. Vol. 713. N136726. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.136726
4. Adler P. R. Life cycle inventory of Miscanthus production on a commercial farm in the US // *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. 1029141. DOI: 10.3389/fpls.2023.1029141.
5. Adoption of the paris agreement. Approved 12.12.2015. Режим доступу: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
6. Ahmad T., Zhang D.D. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 1973-1991. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.07.020
7. Ahmad M., Ahmed Z., Majeed A., Huang. B. An environmental impact assessment of economic complexity and energy consumption: Does institutional quality make a difference? *Environmental Impact Assessment Review*. 2021. Vol. 89. N106603. doi:10.1016/j.eiar.2021.106603
8. Akiyama H., Yan X., Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: Meta-analysis // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16, № 6. P. 1837–1846. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02031.x.
9. Amougou N., Bertrand I., Mchet J.M., Recous S. (2011). *Quality and decomposition of miscanthus litter: Implications for carbon sequestration*. *Soil Biology & Biochemistry*, 43(2), 431–440.
10. Anderson-Teixeira K.J., Masters M.D., Black C.K., et al. (2013). *Altered belowground carbon cycling following land-use change to perennial bioenergy crops*. *Ecosystems*, 16, 508–520.
11. Arnoult S., Brancourt-Hulmel M. A review on Miscanthus biomass production and composition for bioenergy use // *BioEnergy Research*. 2015. Vol. 8. P. 502–526. DOI: 10.1007/s12155-014-9524-7.
12. Aslan-Sungur R., Boersma N., Moore C. E. et al. Advances in Miscanthus × giganteus planting techniques may increase carbon uptake in the establishment year // *Global Change Biology Bioenergy*. 2025. Vol. 17, № 1. e70012.
13. At DeCarbon Copenaghen BECCS took centre stage URL: <https://bioenergyeurope.org/at-decarbon-copenaghen-beccs-took-centre-stage/>

14. Bauer N., Rose S.K., Fujimori S., van Vuuren D.P., Weyant J. et al. Global energy sector emission reductions and bioenergy use: overview of the bioenergy demand phase of the EMF-33 model comparison. *Climatic Change*. 2020. Vol. 163. Iss. 3. P. 1553-1568. DOI: 10.1007/s10584-018-2226-y
15. Baum, S., M. Weih, G. Busch, F. Kroiher, and A. Bolte. 2009. "The Impact of Short Rotation Coppice Plantations on Phytodiversity." *Landbauforschung Volkenrode* 59, no. 3: 163–170.
16. Baumber, A. 2017. "Enhancing Ecosystem Services Through Targeted Bioenergy Support Policies." *Ecosystem Services* 26: 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.012>.
17. Behnke G. D., David M. B., Voigt T. B. Greenhouse gas emissions, nitrate leaching, and biomass yields from production of *Miscanthus × giganteus* in Illinois, USA // *BioEnergy Research*. 2012. Vol. 5, № 4. P. 801–813.
18. Bentsen N.S., Felby C., Thorsen B.J. (2014). *Sustainability of bioenergy in a climate change perspective*. *Biomass and Bioenergy*, 70, 230–245.
19. Berg, Å. 2002. "Breeding Birds in Short-Rotation Coppices on Farmland in Central Sweden—The Importance of Salix Height and Adjacent Habitats." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 90, no. 3: 265–276. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00212-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00212-2).
20. Bertoldi P., Kona A., Rivas S., Dallemand J.F. Towards a global comprehensive and transparent framework for cities and local governments enabling an effective contribution to the Paris climate agreement. *Current Opinion In Environmental Sustainability*. 2018. Vol. 30. P. 67-74. DOI: 10.1016/j.cosust.2018.03.009
21. Boehmel C., Lewandowski I., Claupein W. (2008). *Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities*. *Agricultural Systems*, 96(1–3), 224–236.
22. Bojčuk O., Bondar V., Tymchuk V., et al. (2021). *Miscanthus × giganteus cultivation as a tool for degraded land restoration and climate mitigation in Ukraine*. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(2), 123–131.
23. Börjesson P. Environmental effects of energy crop cultivation in Sweden: I. Identification and quantification. *Biomass and Bioenergy*. 1999. Vol. 16, No. 2. P. 137–154.
24. Brandão M., Milà i Canals L., Clift R. (2011). *Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for greenhouse gas balances*. *GCB Bioenergy*, 3(4), 323–341.
25. Bremond U., Bertrandias A., Steyer J.P., Bernet N., Carrere H. A vision of European biogas sector development towards 2030: Trends and challenges. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 287. N125065. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125065
26. Brodny J., Tutak M. The analysis of similarities between the European Union countries in terms of the level and structure of the emissions of selected gases and air pollutants into the atmosphere. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 279. N123641. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123641

27. Carbon Balance of Miscanthus Biomass from Rhizomes and Seedlings / D. Bilandžija, R. Stuparić, M. Galić et al. *Agronomy*. 2022. Vol. 12, Iss. 6. Art. 1426. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061426>.
28. Carbon storage by miscanthus: one tonne of CO₂ /ha/year. *Novabiom*. 2023. URL: <https://www.novabiom.com/en/stockage-de-carbone-par-le-miscanthus-une-tonne-de-co2-ha-an/>
29. Cherubini F., Bird N. D., Cowie A. et al. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations // *Resources, Conservation and Recycling*. 2009. Vol. 53, № 8. P. 434–447. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.03.013.
30. Cherubini F., Strømman A. H. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102, No. 2. P. 437–451.
31. Chiamonti D., Talluri G., Scarlat N., Prussi M. The challenge of forecasting the role of biofuel in EU transport decarbonisation at 2050: A meta-analysis review of published scenarios. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 139. N110715. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110715
32. Chiatante, G., Z. Porro, A. Musacchio, A. Bazzocchi, and A. Meriggi. 2019. “Multi-Scale Habitat Requirements of Forest Bird Species in a Highly Fragmented Landscape.” *Journal of Ornithology* 160, no. 3: 773–788. <https://doi.org/10.1007/s10336-019-01664-9>.
33. Clifton-Brown J., Hastings A., Mos M. et al. Effects of a 20-year Miscanthus stand on soil carbon and greenhouse gas emissions // *Biomass and Bioenergy*. 2015. Vol. 80. P. 82–93.
34. Clifton-Brown J., Hastings A., Mos M. et al. Progress in upscaling Miscanthus biomass production for the European bioeconomy // *Global Change Biology Bioenergy*. 2017. Vol. 9. P. 6–17. DOI: 10.1111/gcbb.12358.
35. Clifton-Brown J., Hastings A., Mos M., et al. (2015). *Thermal energy and greenhouse gas balance of bioenergy crops: Miscanthus case study*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 245–259.
36. Clifton-Brown J., Lewandowski I. Overwintering problems of newly established Miscanthus plantations can be overcome by identifying genotypes with improved rhizome cold tolerance. *New Phytologist*. 2000. Vol. 148. P. 287–294.
37. Clifton-Brown J., Robson P., Sanderson R., et al. (2019). *Improving yield and sustainability of Miscanthus bioenergy crops: Genetic and agronomic advances*. *Industrial Crops and Products*, 137, 508–517.
38. CO₂ emissions. *Our World in Data*. 2021. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
39. Dale, V. H., K. L. Kline, L. L. Wright, R. D. Perlack, M. Downing, and R. L. Graham. 2011. “Interactions Among Bioenergy Feedstock Choices, Landscape Dynamics, and Land Use.” *Ecological Applications* 21, no. 4: 1039–1054. <https://doi.org/10.1890/09-0501.1>.
40. Davis S. C., Parton W. J., Dohleman F. G. et al. Comparative biogeochemical cycles of bioenergy crops reveal nitrogen-fixation and low greenhouse

gas emissions in a *Miscanthus × giganteus* agro-ecosystem // *Ecosystems*. 2010. Vol. 13. P. 144–156. DOI: 10.1007/s10021-009-9306-9.

41. Ding Q., Khattak S.I., Ahmad M. Towards sustainable production and consumption: Assessing the impact of energy productivity and eco-innovation on consumption-based carbon dioxide emissions (CCO₂) in G-7 nations. *Sustainable Production And Consumption*. 2021. Vol. 27. P. 254-268. DOI:10.1016/j.spc.2020.11.004

42. Directive (EU) 2018/2001 (RED II) of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG

43. Directive (EU) 2023/2413 (RED III) amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202302413

44. Directive 2009/28/EC (RED I) of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>

45. Djomo S. N., Ac A., Zenone T., De Groote T., Bergante S., Facciotto G., Sixto H., Ciria P., Weger J., Ceulemans R. Energy performances of intensive and extensive short rotation cropping systems for woody biomass production in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 41. P. 845–854.

46. Djomo, S. N., O. E. Kasmioui, and R. Ceulemans. 2011. “Energy and Greenhouse Gas Balance of Bioenergy Production From Poplar and Willow: A Review.” *GCB Bioenergy* 3, no. 3: 181–197. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01073.x>.

47. Don A., Osborne B., Hastings A., et al. (2012). *Land-use change to bioenergy production in Europe: Implications for soil carbon*. *GCB Bioenergy*, 4(4), 372–391.

48. Dondini M., Van Groenigen K.J., Del Galdo I., Jones M.B. (2009). *Carbon sequestration under Miscanthus: A study of 13C distribution in soil organic matter*. *GCB Bioenergy*, 1(5), 413–421.

49. Drewer J., Finch J. W., Lloyd C. R., Baggs E. M., Skiba U. How do soil emissions of N₂O, CH₄ and CO₂ from perennial bioenergy crops differ from arable crops? // *Global Change Biology Bioenergy*. 2012. Vol. 4, № 4. P. 408–419.

50. Eisenbies M. H., Volk T. A., Posselius J. et al. Willow biomass crops are a carbon negative or low-carbon feedstock depending on prior land use and transportation distances // *Energies*. 2020. Vol. 13, № 16. 4251. DOI: 10.3390/en13164251.

51. Emmerling C., Pude R. (2017). *Impact of miscanthus cultivation on soil quality and ecosystem services*. *Applied Soil Ecology*, 119, 317–325.

52. Energy mix: what sources do we get our energy from? *Statistical Review of World Energy*. 2025. <https://ourworldindata.org/energy-mix?country=#energy-mix-what-sources-do-we-get-our-energy-from>
53. Englund, O., P. Börjesson, B. Mola-Yudego, et al. 2021. “Strategic Deployment of Riparian Buffers and Windbreaks in Europe Can Co-Deliver Biomass and Environmental Benefits.” *Communications Earth & Environment* 2, no. 1: 176. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00247-y>.
54. Englund, O., P. Börjesson, G. Berndes, et al. 2020. “Beneficial Land Use Change: Strategic Expansion of New Biomass Plantations Can Reduce Environmental Impacts From EU Agriculture.” *Global Environmental Change* 60: 101990. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101990>.
55. Englund, O., P. Börjesson, G. Berndes, et al. 2020. “Beneficial Land Use Change: Strategic Expansion of New Biomass Plantations Can Reduce Environmental Impacts From EU Agriculture.” *Global Environmental Change* 60: 101990. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101990>.
56. EU Green Deal (carbon border adjustment mechanism). *Proposal for a Directive*. <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12228-Carbon-Border-Adjustment-Mechanism>
57. European Environment Agency. 2019. “CORINE Land Cover 2018 (Raster 100 m), Europe, 6-Yearly–Version 2020_20u1, May 2020 (Version 20.01) [GeoTIFF].” <https://doi.org/10.2909/960998c1-1870-4e82-8051-6485205ebbac>.
58. Fazio S., Monti A. (2011). *Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops*. *Biomass and Bioenergy*, 35(11), 4868–4878.
59. Felten D., Emmerling C. (2011). *Accumulation of organic carbon in soils under Miscanthus in Rhineland-Palatinate, Germany*. *Biomass and Bioenergy*, 35(6), 2523–2530.
60. Firbank, L. G. 2008. “Assessing the Ecological Impacts of Bioenergy Projects.” *Bioenergy Research* 1, no. 1: 12–19. <https://doi.org/10.1007/s12155-007-9000-8>.
61. Frank, S., C. Fürst, A. Witt, L. Koschke, and F. Makeschin. 2014. “Making Use of the Ecosystem Services Concept in Regional Planning–Trade-Offs From Reducing Water Erosion.” *Landscape Ecology* 29, no. 8: 1377–1391. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-9992-3>.
62. Gelfand I., Sahajpal R., Zhang X., Izaurralde R.C., Gross K.L., Robertson G.P. (2013). *Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest*. *Nature*, 493, 514–517.
63. Goglio P., Williams A.G., Balta-Ozkan N., Harris N.R.P., et al. Advances and challenges of life cycle assessment (LCA) of greenhouse gas removal technologies to fight climate changes. *Journal Of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244. N118896. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118896
64. Gossling S., Scott D. The decarbonisation impasse: global tourism leaders' views on climate change mitigation. *Jornal Of Sustainable Tourism*. 2018. Vol. 26. Iss. 12. P. 2071-2086. DOI: 10.1080/09669582.2018.1529770

65. Greenhouse Gas Balance of Willow Crops (<https://www.esf.edu/cafriny/documents/willow-factsheet.pdf>), (The potential of willow and poplar plantations as carbon sinks in Sweden URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953411005216>)
66. Gurr S.J., Piotrowska M., Richter G.M. (2020). *Perennial biomass crops for a low-carbon future*. *Annual Review of Plant Biology*, 71, 743–772.
67. Haas T., Sander H. Decarbonizing Transport in the European Union: Emission Performance Standards and the Perspectives for a European Green Deal. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Iss. 20. N8381. DOI: 10.3390/su12208381
68. Han X., Wei C. Household energy consumption: state of the art, research gaps, and future prospects. *Environment Development And Sustainability*. 2021. Vol. 23. Iss. 8. P. 12479-12504. DOI: 10.1007/s10668-020-01179-x
69. Hanowski, J. M., G. J. Niemi, and D. C. Christian. 1997. “Influence of Within-Plantation Heterogeneity and Surrounding Landscape Composition on Avian Communities in Hybrid Poplar Plantations.” *Conservation Biology* 11, no. 4: 936–944.
70. Hastings A., Clifton-Brown J., Wattenbach M., et al. (2009). *Potential of Miscanthus grasses to meet European renewable energy targets by 2050*. *GCB Bioenergy*, 1(4), 180–196. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2009.01012.x.
71. Hastings A., Clifton-Brown J., Wattenbach M., Stampfl P., Mitchell C. P., Smith P. Potential of Miscanthus grasses to provide energy and mitigate greenhouse gas emissions in the UK // *Global Change Biology*. 2009. Vol. 15, № 4. P. 1080–1095. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01786.x.
72. Heaton E. A., Dohleman F. G., Long S. P. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of Miscanthus. *Global Change Biology*. 2008. Vol. 14. P. 2000–2014
73. Heller M. C., Keoleian G. A., Volk T. A. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy*. 2003. Vol. 25, No. 2. P. 147–165.
74. Holm-Nielsen J. B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100, No. 22. P. 5478–5484.
75. <https://e-forest.gov.ua/fsc-sertyfikatsiia-zahalna/>
76. Hughes J.K., Lloyd A.J., Escobar-Gutiérrez A.J., et al. (2010). *The potential of Miscanthus to reduce global atmospheric CO₂ concentrations*. *GCB Bioenergy*, 2(5), 299–312.
77. IEA Bioenergy. Lifecycle greenhouse gas emissions of bioenergy systems. Paris : International Energy Agency, 2020.
78. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama: IGES, 2006. 678 p.
79. IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva : IPCC, 2019.
80. Iqbal Y., Lewandowski I. (2014). *Inter-annual variation in biomass yield and quality of miscanthus in Europe*. *Industrial Crops and Products*, 58, 49–58.

81. ISCC System. ISCC EU 205 Greenhouse Gas Emissions. Cologne : ISCC Association, 2023.
82. Kardung M., Cingiz K., Costenoble O., Delahaye R. et al. Development of the Circular Bioeconomy: Drivers and Indicators. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 1. N413. DOI: 10.3390/su13010413
83. Kaye J.P., Quemada M., Wunder S., et al. (2018). *Soil greenhouse gas fluxes following conversion to Miscanthus × giganteus: A field study in Pennsylvania*. *Biomass and Bioenergy*, 111, 83–93.
84. Khan Z., Ali S., Umar M., Kirikkaleli D., Jiao Z.L. Consumption-based carbon emissions and International trade in G7 countries: The role of Environmental innovation and Renewable energy. *Science Of The Total Environment*. 2020. Vol. 730. N138945. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138945
85. Khanna M., Dhungana B., Clifton-Brown J. (2008). *Costs of producing Miscanthus and switchgrass for bioenergy in Illinois*. *Biomass and Bioenergy*, 32(6), 482–493.
86. Kiesel A., Clifton-Brown J., Lewandowski I. (2017). *Miscanthus crop establishment and management: Economic and environmental assessment*. *Biomass and Bioenergy*, 96, 18–27.
87. Kober T., Schiffer H.W., Densing M., Panos E. Global energy perspectives to 2060-WEC's World Energy Scenarios 2019. *Energy Strategy Reviews*. 2020. Vol. 31. N100523. DOI: 10.1016/j.esr.2020.100523
88. Králík, T., J. Knápek, K. Vávrová, et al. 2023. “Ecosystem Services and Economic Competitiveness of Perennial Energy Crops in the Modelling of Biomass Potential—A Case Study of The Czech Republic.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 173: 113120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113120>.
89. Krzyżaniak M., Stolarski M. J., Warmiński K. Life cycle assessment of giant miscanthus production on marginal soil with various fertilisation treatments // *Energies*. 2020. Vol. 13, № 8. 1931. DOI: 10.3390/en13081931.
90. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 2004. Vol. 304. P. 1623–1627
91. Leaders Summit Showcases Clean Energy Commitments to Tackle Global Climate Crisis. *SDG knowledge hub. International Institute for Sustainable development*. Retrieved 2 May 2021. <https://sdg.iisd.org/news/leaders-summit-showcases-clean-energy-commitments-to-tackle-global-climate-crisis/>
92. Lewandowski I., Clifton-Brown J., Kiesel A., Hastings A., et al. (2018). *Progress in upscaling Miscanthus biomass production and utilization: Results from the EU project OPTIMISC*. *Biomass and Bioenergy*, 111, 94–109.
93. Lewandowski I., Clifton-Brown J., Scurlock J., Huisman W. Miscanthus: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*. 2000. Vol. 19. P. 209–227.
94. Lewandowski I., Clifton-Brown J., Trindade L.M., et al. (2016). *Progress on optimizing miscanthus biomass production for the European bioeconomy: Results of the EU FP7 project OPTIMISC*. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1620.

95. Lewandowski I., Scurlock J. M. O., Lindvall E., Christou M. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*. 2003. Vol. 25. P. 335–361
96. Material Economics. 2021. “EU Biomass Use In A Net-Zero Economy– A Course Correction for EU Biomass.”
97. McCalmont J. P., Hastings A., McNamara N. P., Richter G. M., Robson P., Donnison I. S., Clifton-Brown J. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions and energy balances of UK-grown *Miscanthus* and short rotation coppice willow // *Global Change Biology Bioenergy*. 2017. Vol. 9, № 2. P. 401–413. DOI: 10.1111/gcbb.12376.
98. McCalmont J. P., Rowe R., Elias D. et al. Soil nitrous oxide flux following land-use reversion from *Miscanthus* and SRC willow to perennial ryegrass // *Global Change Biology Bioenergy*. 2018. Vol. 10, № 12. P. 914–929. DOI: 10.1111/gcbb.12541.
99. McCalmont J.P., Hastings A., Clifton-Brown J. (2017). *The role of Miscanthus in reducing greenhouse gas emissions in agriculture and energy sectors*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1–14.
100. McCalmont J.P., Hastings A., McNamara N.P., Richter G.M., Robson P., Donnison I.S., Clifton-Brown J. (2017). *Environmental costs and benefits of growing Miscanthus for bioenergy in the UK*. *GCB Bioenergy*, 9(3), 489–507.
101. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 83, No. 1. P. 37–46.
102. Mi J., Liu W., Zhao X. et al. N₂O and CH₄ emissions from *Miscanthus* energy crop fields // *Biotechnology for Biofuels*. 2018. Vol. 11. 321. DOI: 10.1186/s13068-018-1320-8.
103. Miguez F.E., Liebman M., Brandau P.S., et al. (2009). *Carbon sequestration and greenhouse gas mitigation potential of Miscanthus × giganteus in the U.S. Corn Belt*. *GCB Bioenergy*, 1(6), 411–421.
104. Monti A., Zegada-Lizarazu W., Casler M., et al. (2019). *Biomass crops for energy transition in Europe: Potentials and challenges*. *GCB Bioenergy*, 11(1), 4–17.
105. Moore J.E., Stuart E.A., Healy R., Griffin T.S. (2021). *Carbon sequestration and greenhouse gas mitigation potential of perennial bioenergy crops in the northeastern United States*. *GCB Bioenergy*, 13(6), 1029–1045.
106. Müller-Kroehling, S., G. Hohmann, C. Helbig, et al. 2020. “Biodiversity Functions of Short Rotation Coppice Stands—Results of a Meta Study on Ground Beetles (Coleoptera: Carabidae).” *Biomass and Bioenergy* 132: 105416. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105416>.
107. Mundaca L., Urge-Vorsatz D., Wilson C. Demand-side approaches for limiting global warming to 1.5 degrees C. *Energy Efficiency*. Vol. 2019. Vol. 12. Iss. 2. P. 343–362. DOI: 10.1007/s12053-018-9722-9
108. Nakajima, T., Yamada, T., Anzoua, K. G., Kokubo, R., & Noborio, K. (2018). Carbon sequestration and yield performances of *Miscanthus × giganteus* and

Miscanthus sinensis. Carbon Management, 9(4), 415–423. <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1518106>

109. Nationally determined contributions under the Paris Agreement. *Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement*. Third session Glasgow, 31 October to 12 November 2021. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_08_adv_1.pdf

110. Neves A., Godina R., Azevedo S.G., Matias J.C.O. A comprehensive review of industrial symbiosis. *Journal Of Cleaner Production*. 2019. Vol. 247. N119113. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.119113

111. New momentum reduces emissions gap, but huge gap remains – analysis. *Press release*. 2021. <https://climateactiontracker.org/press/new-momentum-reduces-emissions-gap-but-huge-gap-remains-analysis/>

112. Newburger E. Here's what countries pledged on climate change at Biden's global summit. *CNBC*. Retrieved 29 April 2021. <https://www.cnbc.com/2021/04/22/biden-climate-summit-2021-what-brazil-japan-canada-others-pledged.html>

113. Obernberger I., Thek G. *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets*. London : Earthscan, 2010. 549 p.

114. OECD. 2019. *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. OECD. URL: <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.

115. Olesen J.E. (2019). *Environmental effects of cultivating perennial grasses for bioenergy in agricultural landscapes*. *Biomass and Bioenergy*, 122, 55–65.

116. Ossewaarde M, Ossewaarde-Lowtoot R. The EU's Green Deal: A Third Alternative to Green Growth and Degrowth? *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Iss. 23. N9825. DOI: 10.3390/su12239825

117. Parra-López, C., M. Holley, K. Lindegaard, et al. 2017. “Strengthening the Development of the Short-Rotation Plantations Bioenergy Sector: Policy Insights From Six European Countries.” *Renewable Energy* 114: 781–793. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.098>.

118. Pineda-Zapata, S., & Mola-Yudego, B. (2025). Європейські системи виробництва біомаси: характеристика та потенційний внесок у різноманітність землекористування. *GCB Bioenergy*, 17, e70057. <https://lnkd.in/db3hCiw8>

119. Pittau F., Lumia G., Heeren N., Iannaccone G., Habert G. Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock. *Journal Of Cleaner Production*. 2019. Vol. 214. P. 365-376. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.304

120. Poeplau C., Don A. (2014). *Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 195, 52–58.

121. Poeplau C., Don A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of energy crops // *Global Change Biology Bioenergy*. 2014. Vol. 6. P. 75–84. DOI: 10.1111/gcbb.12035.

122. Poirier-Pocovi M., Beni C., Fagnano M., et al. (2020). *Soil organic carbon dynamics under perennial bioenergy crops: A meta-analysis*. *GCB Bioenergy*, 12, 116–130.
123. Popp, J., S. Kovács, J. Oláh, Z. Divéki, and E. Balázs. 2021. “Bioeconomy: Biomass and Biomass-Based Energy Supply and Demand.” *New Biotechnology* 60: 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.004>.
124. Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law). COM(2020) 80, Brussels, 4.3.2020. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/commission-proposal-regulation-european-climate-law-march-2020_en.pdf
125. Renewable energy statistics. Eurostat. Data extracted in December 2024. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics
126. Ritchie H., Roser M. Emissions by sector. *Our World in Data*. 2021. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
127. Robertson A.D., Whitaker J., Morrison R., et al. (2017). *Carbon intensity of bioenergy for different bioenergy crop systems in the UK*. *GCB Bioenergy*, 9(2), 356–368.
128. Ronzon T., Piotrowski S., Tamosiunas S., Dammer L., et al. Developments of Economic Growth and Employment in Bioeconomy Sectors across the EU. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Iss. 11. N4507. DOI: 10.3390/su12114507
129. Rosa, D. J., J. C. Clausen, and Y. Kuzovkina. 2017. “Water Quality Changes in a Short-Rotation Woody Crop Riparian Buffer.” *Biomass and Bioenergy* 107: 370–375. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.020>.
130. Sage, R., M. Cunningham, and N. Boatman. 2006. “Birds in Willow Short-Rotation Coppice Compared to Other Arable Crops in Central England and a Review of Bird Census Data From Energy Crops in the UK.” *Ibis* 148, no. s1: 184–197. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00522.x>.
131. Scordia D., D’Agosta G. M., Mantineo M. et al. Life cycle assessment of biomass production from lignocellulosic perennial grasses under changing soil nitrogen and water content // *Agronomy*. 2021. Vol. 11, № 5. 988. DOI: 10.3390/agronomy11050988.
132. Scordia D., Testa G., Cosentino S. L. Perennial grasses as lignocellulosic feedstock for bioenergy production in Mediterranean environment // *Italian Journal of Agronomy*. 2014. Vol. 9, № 4. P. 84–92. DOI: 10.4081/ija.2014.557.
133. Scown M.W., Brady M.V., Nicholas K.A. Billions in Misspent EU Agricultural Subsidies Could Support the Sustainable Development Goals. *One Earth*. 2020. Vol. 3. Iss. 2. P. 237-250. DOI: 10.1016/j.oneear.2020.07.011
134. Searchinger, T., R. Heimlich, R. A. Houghton, et al. 2008. “Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions From Land-Use Change.” *Science* 319, no. 5867: 1238–1240. <https://doi.org/10.1126/science.1151861>.

135. Semenov V., Kalinichenko V., Zaitsev O. (2019). *Energy efficiency and carbon balance of bioenergy crops in Eastern Europe*. *Renewable Energy*, 143, 1931–1942.
136. Share of energy from renewable sources. *Eurostat*. Last update: 20-07-2021. http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_ind_ren&lang=en
137. Smith P., Davis S.J., Creutzig F., et al. (2016). *Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions*. *Nature Climate Change*, 6, 42–50.
138. Smol M., Marcinek P., Duda J., Szoldrowska D. Importance of Sustainable Mineral Resource Management in Implementing the Circular Economy (CE) Model and the European Green Deal Strategy. *Resources-Basel*. 2020. Vol. 9. Iss. 5. N55. DOI: 10.3390/resources9050055
139. Snyder C. S., Bruulsema T. W., Jensen T. L., Fixen P. E. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2009. Vol. 133. P. 247–266.
140. Solarin. S.A. An environmental impact assessment of fossil fuel subsidies in emerging and developing economies. *Environmental Impact Assessment Review*. 2020. Vol. 85. N106443. doi:10.1016/j.eiar.2020.106443
141. Stolarski M. J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M. Productivity of willow biomass and energy yield in different harvest cycles. *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35. P. 118–126.
142. Styles D., Jones M. B. Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and Miscanthus production with conventional farming systems // *Biomass and Bioenergy*. 2007. Vol. 31, № 6. P. 407–421. DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.01.012.
143. Styles D., Jones M. Energy crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions. *Biomass and Bioenergy*. 2007. Vol. 31. P. 759–772
144. Sulaiman, C., A. S. Abdul-Rahim, and C. A. Ofozor. 2020. “Does Wood Biomass Energy Use Reduce CO₂ Emissions in European Union Member Countries? Evidence From 27 Members.” *Journal of Cleaner Production* 253: 119996. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119996>.
145. Teske S., Pregger T. Achieving the Paris Climate Agreement Goals Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5 degrees C and +2 degrees C Introduction. *Achieving The Paris Climate Agreement Goals: Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-Energy Ghg Pathways for +1.5(Degree)C and +2(Degree)C*. P. 1-4. DOI: 10.1007/978-3-030-05843-2_1
146. The European Green Deal. European Commission: веб-сайт. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
147. Toma Y., Nishiura K., Yamamoto S. (2019). *Field carbon budget and greenhouse gas balance in Miscanthus × giganteus cultivation in Japan*. *Biomass and Bioenergy*, 127, 105260.

148. Tsakalidis A, Gkoumas K., Pekar F. Digital Transformation Supporting Transport Decarbonisation: Technological Developments in EU-Funded Research and Innovation. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Iss. 9. N3762. DOI: 10.3390/su12093762
149. Tsakalidis A., van Balen M., Gkoumas K., Pekar F. Catalyzing Sustainable Transport Innovation through Policy Support and Monitoring: The Case of TRIMIS and the European Green Deal. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Iss. 8. N3171. DOI: 10.3390/su12083171
150. Valentine J., Clifton-Brown J., Hastings A., et al. (2012). *Food vs. fuel: The use of land for lignocellulosic 'next generation' energy crops that minimize competition with primary food production*. *GCB Bioenergy*, 4(1), 1–19.
151. Whitaker J., Field J.L., Bernacchi C.J., et al. (2018). *Consensus, uncertainties and challenges for perennial bioenergy crops and land use*. *GCB Bioenergy*, 10(3), 150–164.
152. Whitaker J., Ludley K. E., Rowe R., Taylor G., Howard D. C. Sources of variability in greenhouse gas and energy balances for bioenergy crops: a systematic review // *Global Change Biology Bioenergy*. 2010. Vol. 2, № 3. P. 99–112. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2010.01062.x.
153. Whitaker J., McCalmont J.P., Clifton-Brown J., et al. (2017). *Life cycle assessment of energy crop systems for low carbon energy generation*. *GCB Bioenergy*, 9(3), 532–545.
154. Willow trees and their physical and chemical products can help to solve global climate and environmental problems URL: <https://sciencenews.dk/en/willow-trees-and-their-physical-and-chemical-products-can-help-to-solve-global-climate-and-environmental-problems>
155. Willows for energy and phytoremediation in Sweden URL: <https://www.fao.org/4/a0026e/a0026e11.htm>
156. Yi H.T., Feiock R.C., Berry F.S. Overcoming collective action barriers to energy sustainability: A longitudinal study of climate protection accord adoption by local governments. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 79. P. 339-346. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.071
157. Zatta A., Clifton-Brown J., Robson P., Hastings A., Monti A. (2014). *Land-use change from C3 grassland to C4 Miscanthus: Effects on soil carbon content and estimated mitigation benefit after six years*. *GCB Bioenergy*, 6(4), 360–370. DOI: 10.1111/gcbb.12097
158. Zhuang Q., Qin Z., Chen M. (2013). *Biofuel, land and water: The bioenergy and environment nexus*. *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 179–204.
159. Акціонерне товариство «Фонд декарбонізації України» URL: <https://fdu.com.ua/about-us>
160. АНАЛІТИЧНА ЗАПИСКА. Стратегічна дорожня карта для зелених біопалив в Україні: розвиток ринку та гармонізація з ЄС з акцентом на морський сектор URL: <https://www.webuildukrainefund.org/wp-content/uploads/2025/11/Zvit-ukr.pdf>

161. Аналітичний огляд оновленого національно визначеного внеску України до паризької угоди. 2021. 57 с. <https://cutt.ly/qQiyIIA>
162. Будрюнас А.Р., Блузманас П. Интенсивность накопления соединений серы в листьях ивы-лозы и в хвое сосны обыкновенной в зависимости от концентрации сернистого газа в воздухе // Влияние промышленных загрязнений на лесные экосистемы и мероприятия по повышению их устойчивости: Тез. докл. к Всесоюзн. науч.-практ. совещ. 26–27 июня 1984. Каунас, 1984. С. 26–27.
163. Вакулюк П., Фучило Я., Онищенко В. До проблеми ведення лісового господарства на староорних землях // Лісове і мисливське господарство. 2004. № 3. С. 16–17.
164. Використання виду роду «Верба» (*Salix L.*) для заліснення верхового та низового укосів дамби Кременчуцького водосховища URL: https://www.researchgate.net/publication/398962365_Vikoristanna_vidiv_rodu_Verba_Salix_L_dla_zalishnenna_verhovogo_ta_nizovogo_ukosiv_dambi_Kremencuskogo_vodoshovisa).
165. Ганженко О.М. Розвиток енергоефективності та відновлювальної енергетики в 2016 році // Біоенергетика. – №1 (9). – 2017. – С.4.
166. Ганженко О.М., Фучило Я.Д., Квак В.М. Економічні аспекти вирощування багаторічних енергетичних культур. Біоенергетика/Віоenergy. 2019. №1 (13). С. 4-7.
167. Головнъов С. Сировинна економіка. Що купувала і продавала Україна в 2021 році. БізнесЦензор: <https://biz.censor.net/r3310713>
168. Гордієнко М.І., Фучило Я.Д., Гойчук А.Ф. Чагарникові верби рівнинної частини України (біологія, екологія, використання): монографія. К.: ВЦ ІАЕ УААН, 2002. 174 с.
169. Державна служба статистики України. Енергетичний баланс України за 2020. Експрес-випуск від 30.11.2021 р.
170. Державна служба статистики України. Зовнішня торгівля окремими видами товарів за країнами світу за 2019 рік http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2019/zd/e_iovt/arh_iovt2019.htm
171. Державний реєстр сортів рослин придатних для поширення в Україні (енергетичні культури) URL: <https://uabio.org/derzhavnyj-reyestr-sortiv-roslyn-prydatnyh-dlya-poshyrennya-v-ukrayini-energetychni-kultury/>
172. Енергетична верба в Україні URL: <https://ecoclubua.com/technology/enerhetychna-verba-v-ukrajini/>
173. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>
174. Енергетична стратегія України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р.
175. Енергетичні рослини URL: <https://uabio.org/energy-crops/>
176. Загальна екологія. Вуглекислий газ, двоокис карбону (CO₂) URL: <https://ecologyknu.wixsite.com/ecologymanual/12-4>

177. Закон України N 1989-III від 21 вересня 2000 року «Про Загальнодержавну програму формування національної екологічної мережі України на 2000-2015 роки» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1989-14#Text>
178. Закон України № 2019-VIII від 13 квітня 2017 року «Про ринок електричної енергії» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>
179. Закон України № 2633-IV від 02.06.2005 року «Про теплопостачання» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text>
180. Закон України № 555-IV від 20 лютого 2003 року «Про альтернативні джерела енергії» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>
181. Закон України № 810-IX від 21 липня 2020 року «Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення умов підтримки виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/810-20#Text>
182. Законопроект України «Про основні засади державної аграрної політики та державної політики сільського розвитку» №9162 від 04.10.2018.
183. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2020 році. *Постанова КМУ №975 від 16.06.2021 р.* <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0975874-21#Text>
184. Кавітаційне оброблення лігноцелюлозної біосировини в отриманні біопалив другого покоління: Монографія/ [Братішко В.В., Тігунова О.О., Шульга С.М., Поліщук В.М., Хмельовський В.С., Ганженко О.М., Клименко В.В., Ткаченко Т.В.] Київ: ФОП Білецький Р.Г. 2024 . 252 с. ISBN 978-617-8530-14-3
185. Квак В.М., Потапенко Л.В., Скачок Л.М., Горбаченко Н.І. Вирощування гігантського міскантусу на Поліссі на радіоактивно забруднених ґрунтах. Біоенергетика, 2021. №1. С. 12–15. <https://doi.org/10.47414/be.1.2021.244159>
186. Комплексний аналіз Українського ринку пелет з біомаси // Гелетуха Г., Крамар В., Епик О., Антощук Т., Тітков В / Програма розвитку Організації Об'єднаних Націй, К: 2016. – 334 с.
187. Кучерявий В.П. Екологія. Львів: Світ, 2000. 500 с.
188. Кучерявий В.П. Урбоекологія. Львів: Світ, 1999. 360 с.
189. Левон Ф.М. Біолого-екологічні основи створення зелених насаджень в умовах урбогенного і техногенного середовища: Автореф. дис... докт. с.-г. наук. Львів, 2004. 40 с.
190. Лосицкий К.Б., Чуенков В.С. Эталонные леса. Москва: Лесная промышленность, 1973. 160 с.
191. Міскантус в Україні: монографія / [М.В. Роїк, В.М. Сінченко, [В.І. Пиркін], В.М. Квак та ін.]. - К. : ФОП Ямчинський О.В., 2019 – 256 с. ISSN 978-617-7804-11-5
192. Можливості для виробництва енергії з енергетичних культур в громадах URL: <https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2021/04/melezhyk-res-seminar-dnipropetrovska-01-04-2021.pdf>

193. На місці Каховського водосховища за 20 років виросте унікальний ліс URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/akademik-nan-mistsi-kahovskogo-vodoshovishcha-1743849839.html>
194. Національної економічної стратегії до 2030 року. *Постанова КМУ №179 від 03 березня 2021 р.* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#Text>
195. Нормативно-справочные материалы для таксации лесов Украины и Молдавии. К.: Урожай, 1987. 560 с.
196. Переваги вирощування культур верби для бізнесу та навколишнього середовища є далекосяжними URL: <https://ecocrops.co.uk/willow-perennial-crops/>
197. Постанова Кабінету Міністрів України № 293 від 09.07.2014 року «Про стимулювання заміщення природного газу у сфері теплопостачання» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/293-2014-%D0%BF#Text>
198. Постанова Кабінету Міністрів України № 453 від 10.09.2014 року «Про стимулювання заміщення природного газу під час виробництва теплової енергії для установ та організацій, що фінансуються з державного і місцевих бюджетів» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/453-2014-%D0%BF#Text>
199. Правове регулювання енергозбереження в Європейському Союзі та в Україні (порівняльно-правове дослідження) URL: <https://just-dnipro.gov.ua/files/upload/files/9.pdf>
200. Практичний посібник з використання біомаси як палива в муніципальному секторі України (для представників державних установ та громадських організацій, що працюють у сфері екології) URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/01/ecofin.pdf>
201. Природа як союзник у післявоєнному відновленні: як природоорієнтовані рішення допоможуть Україні відродити довкілля URL: <https://ndu.kr.ua/775-priroda-yak-soyuznik-u-pislyavoennomu-vidnovlenni-yak-prirodoorientovani-rishennya-dopomozhut-ukrajini-vidroditi-dovkillya>
202. Про першочергові заходи щодо створення захисних лісових насаджень на неугіддях та басейнах річок: Постанова Кабінету Міністрів України від 28.02.2001 року, № 189.
203. Проект Закону «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо сприяння розвитку сфери вирощування енергетичних рослин» (№5227 від 12.03.2021). http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=71384
204. Ризики використання біоенергетичних рослин для відновлення земель, забруднених від воєнних дій URL: <https://ecoaction.org.ua/ryzyku-bioenerhet-roslyn-vidnovl-zemel.html>
205. Роїк М.В. Теоретичні та прикладні аспекти використання агролісомеліоративних насаджень України в енергетичних цілях / М.В. Роїк, Я.Д. Фучило, О.М. Ганженко // Біоенергетика/Bioenergy. – №1 (17). – 2021. – С. 5-8.
206. Роїк М.В., Сінченко В.М., Нурмухаммедов А.К., Ганженко О.М., Гументик М.Я. Застосування біоенергетичних культур для виробництва

біопластика. Біоенергетика/Bioenergy. 2021. №2 (18). С. 13-15.
<https://doi.org/10.47414/be.2.2021.244101>

207. Роїк М.В., Ганженко О.М. Агроекологічні аспекти сталого розвитку біоенергетики. Біоенергетика/Bioenergy. 2020. №1 (15). С. 4-7.

208. Роїк М.В., Ганженко О.М., Гончарук Г.С. Вплив багаторічних біоенергетичних культур на відновлення родючості ґрунту. Біоенергетика/Bioenergy. 2020. №2 (16). С. 4-6.

209. Роїк М.В., Ганженко О.М., Іваніна В.В., Гончарук Г.С. Стале вирощування біомаси на малопродуктивних землях Ялтушківської дослідно-селекційної станції. Біоенергетика/Bioenergy. 2024. №1 (23). С. 8-10. DOI: 10.47414/be.2024.No1.pp8-10

210. Роїк М.В., Ганженко О.М., Тимошук В.Л. Концепція виробництва і використання твердих видів біопалива в Україні. Біоенергетика. 2015. №1. С. 5-8.

211. Роїк М.В., Ганженко О.М., Фучило Я.Д. Стан та перспективи виробництва полімерних матеріалів на основі відновлювальної сировини біологічного походження. Вісник Малинського фахового коледжу: наукове видання. м. Малин. 2023. Випуск 2. С. 132-145. DOI: doi.org/10.62466/2786-9350-2023-1-4

212. Роїк М.В., Ганженко О.М., Фучило Я.Д. Розвиток біоенергетики в Україні та її вплив на декарбонізацію вітчизняної економіки. Вісник Малинського фахового коледжу. 2022. Випуск 1. С. 175-186. DOI: doi.org/10.62466/2786-9350-2022-1-8

213. Стратегія ІМО щодо скорочення викидів парникових газів з суден на 2023 рік URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx>

214. Українське "паливне золото" – енергетична верба URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/ukrainske-palyvne-zoloto-enerhetychna-verba>

215. Фучило Я.Д., Онищенко В.М., Сбитна М.В. До проблеми підвищення ефективності ведення лісового господарства на староорних землях // Науковий вісник НАУ. 2004. Вип. 72. С. 261–267.

216. Що таке вуглецева компенсація та чому вона важлива? URL: <https://bolt.eu/uk-ua/blog/so-take-vugleceva-kompensacija-ta-comu-vona-vazliva/>

217. Як перетворити убивцю клімату на його захисника? URL: <https://www.dw.com/uk/silске-hospodarstvo-iak-peretvoryty-ubyvtsiu-klimatu-na-ioho-zakhysnyka/a-55261868>

Науково-аналітичне видання

ГАНЖЕНКО Олександр Миколайович,
КВАК Володимир Михайлович,
КРАВЧУК Володимир Іванович,
ГУМЕНТИК Михайло Ярославович,
ФУЧИЛО Ярослав Дмитрович,
ХІВРИЧ Олександр Борисович,
ПРАВДИВА Людмила Анатоліївна

АГРОЕКОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ БАГАТОРІЧНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

Науково-методичні рекомендації

Електронне видання

Погоджено до опублікування 20.04.2026.
Формат: PDF. Гарнітура Times New Roman.

Видавець

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН
03110, м. Київ, вул. Клінічна, 25
Тел.: (044) 275-50-00; e-mail: sugarbeet@ukr.net
<https://bio.gov.ua>

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 5713 від 19.10.2017

