

DOI: 10.32636/01308521.2026-(80)-1-13

Оригінальна наукова стаття

УДК 630: 620.952

**ЕКОНОМІЧНА ТА ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ
ВИРОЩУВАННЯ БІОМАСИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ВЕРБИ
В УМОВАХ ЗАХІДНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ****А. М. Шувар, В. С. Панькевич**

Західноукраїнський національний
університет
вул. Львівська, 11, м. Тернопіль,
46009

Про авторів:

Антін ШУВАР,
доктор сільськогосподарських наук
ORCID: 0000-0002-6016-0896

Віталій ПАНЬКЕВИЧ,
аспірант
ORCID: 0000-0002-6618-4549

Для листування:

Антін ШУВАР
e-mail: a.shuvar@wunu.edu.ua

Інформація про фінансування:

Західноукраїнський національний
університет

Отримано:
25 травня 2026 р.
Погоджено до друку:
16 вересня 2026 р.
Опубліковано:
30 вересня 2026 р.

За результатами досліджень встановлено економічну та енергетичну ефективність вирощування біомаси енергетичної верби прутковидної (*S. viminalis* L.) та тритичинкової (*S. triandra* L.) в умовах Західного Лісостепу України. Дослідження виконувалися впродовж 2022–2024 рр. на дослідних ділянках Західноукраїнського національного університету, розташованих у зоні нестійкого зволоження. Погодні умови в роки досліджень за ступенем відхилення від середніх багаторічних показників як за окремими місяцями, так і за період вегетації були в межах значень, характерних для даної зони. Виробництво теплової енергії з біомаси енергетичної верби в умовах Західного Лісостепу України характеризується дуже високою економічною ефективністю. Рентабельність становить 103,9 % після першого трирічного циклу та зростає до 224,2 % після двох циклів вирощування, що свідчить про значний потенціал цієї культури як відновлюваного джерела енергії та економічно обґрунтованої альтернативи традиційним видам палива. Енергетична оцінка доводить, що технологія вирощування енергетичної верби в умовах Західного Лісостепу України є енергетично ефективною та ресурсозберігаючою. Отриманий коефіцієнт енергетичної ефективності понад 5 у другому циклі вирощування свідчить, що на кожну одиницю витраченої енергії отримується понад п'ять одиниць енергії, акумульованої в біомасі, що підтверджує перспективність використання енергетичних плантацій верби як стабільного джерела відновлюваної енергії. Після завершення першого циклу вирощування економічна ефективність істотно зростає. Вихід теплової енергії збільшується зі 105,8 до 195,1 Гкал/га, тобто майже у 1,84 раза, що забезпечує пропорційне зростання виручки від 190,4 до 351,0 тис. грн/га.

Ключові слова: живці енергетичної верби, біомаса, біопаливо, елементи технології вирощування, *S. viminalis* L., продуктивність наземної маси.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons.

© Шувар А. М., Панькевич В. С., 2026

Economic and energy efficiency of cultivating energy willow biomass in the Western Forest-Steppe region of Ukraine

West Ukrainian National University
11 Lvivska Str., Ternopil,
46009

About authors:

Antin SHUVAR
ORCID: 0000-0002-6016-0896

Vitalii PANKEVYCH
ORCID: 0000-0002-6618-4549

Corresponding author:

Antin SHUVAR
e-mail: a.shuvar@wunu.edu.ua

Funding information:

West Ukrainian National University

Received:
May 25, 2026
Accepted:
September 16, 2026
Published:
September 30, 2026

Research findings have demonstrated the economic and energy efficiency of growing energy willow biomass - specifically, the wicker willow (*S. viminalis* L.) and the three-stalked willow (*Salix triandra* L.) – in the Western Forest-Steppe region of Ukraine. The research was conducted from 2022 to 2024 on experimental plots of the Western Ukrainian National University, which are located in an area of variable moisture conditions. Weather conditions during the study period, in terms of deviation from long-term averages both at individual locations and throughout the growing season were within the ranges typical for this zone. The production of thermal energy from energy willow biomass in the Western Forest-Steppe of Ukraine is characterized by very high economic efficiency. The rate of return is 103.9 % after the first three-year cycle and increases to 224.2 % after two growing cycles, indicating the significant potential of this crop as a renewable energy source and an economically viable alternative to traditional fuels. The energy assessment demonstrates that the technology for growing energy willow in the Western Forest-Steppe region of Ukraine is energy-efficient and resource-conserving. The energy efficiency ratio of over 5 obtained in the second growing cycle indicates that for every unit of energy expended, more than five units of energy are stored in the biomass, confirming the potential of energy willow plantations as a stable source of renewable energy. Upon completion of the first growing cycle, economic efficiency increases significantly. Thermal energy output rises from 105.8 to 195.1 Gcal/ha – an increase of nearly 1.84 times – resulting in a proportional increase in revenue from 190.4 to 351.0 thousand UAH/ha.

Keywords: energy willow cuttings, biomass, biofuel, cultivation techniques, *S. viminalis* L., above-ground biomass yield.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons.

Вступ. В Україні у зв'язку з військовою агресією пошкоджено більше половини енергетичних об'єктів та потужностей. Значна частина енергосистеми реструктуризується та децентралізується зі збільшенням частки використання альтернативних джерел енергії. Скорочення використання традиційних видів палива в тепловій енергетиці мотивує до пошуку нових, альтернативних способів отримання енергії [1, 7]. Тому надзвичайно актуальним сьогодні є створення нових енергетичних об'єктів та плантацій біоенергетичних культур з метою використання біопалива для виробництва енергії. З огляду на літературні джерела, теоретичний потенціал біомаси деревних біоенергетичних культур в Україні

становить 11,5 млрд м³, з економічним потенціалом 6,28 млн т умовного палива. Враховуючи те, що в Україні налічується 4 млн гектарів малопродуктивних земель поза сівоzmінами та близько 1 млн гектарів деградованих земель у сівоzmінах, існує належний потенціал та сприятливі кліматичні умови для вирощування біомаси [2, 3, 5, 6]. Для цього необхідна розробка нових енергоефективних технологій використання органічної сировини для виробництва біопалива, а також економічне та енергетичне обґрунтування раціонального витрачання паливних ресурсів, добрив, підвищення окупності енергії та ефективності використання ФАР [10–12]. Створення промислових біоенергетичних плантацій дозволить значно зменшити обсяги імпорту

природного газу. Наступною важливою перевагою вирощування енергетичної верби є екологічний фактор: за 3 роки вирощування на 1 га рослини поглинають з повітря понад 200 т CO_2 і повертають у ґрунт 6 тонн листя восени, що позитивно впливає на збагачення ґрунту органікою та розвиток мікрофлори, яка підвищує родючість [15–18, 21]. Багаторічні енергетичні рослини цінні високим рівнем урожайності, невибагливістю до родючості ґрунтів та високим рівнем механізації виробничих процесів; за відносно невеликий період часу вони можуть давати значні прирости біомаси. У перерахунку на еквівалент енергії витрати на вирощування деревних біоенергетичних культур значно менші порівняно з вартістю енергоносіїв, отриманих від традиційних джерел. Використання рослинної біомаси за умови її безперервного відновлення не призводить до збільшення концентрації CO_2 в атмосфері [4, 13, 14, 19, 20].

Методика та методи. Об'єктами досліджень слугували плантації верби прутоподібної та тритичинкової, створені восени 2022 р. на дослідних ділянках НДВГ «Наука» Західноукраїнського національного університету. Після закінчення кожного вегетаційного періоду визначали збереженість рослин, їхні розміри та масу. Висоту кущів та діаметр найвищого пагона у кущі визначали також наприкінці кожного місяця вегетації. Частину плантації перед початком третього вегетаційного періоду було зрізано для встановлення доцільності застосування дворічного циклу збирання врожаю.

При проведенні досліджень використовували традиційні методики. Отримані дані обробляли математично з використанням пакета Statistica. У розрахунках економічної ефективності вирощування біоенергетичних культур враховували енерговитрати, необхідні на здійснення технологічних процесів і акумульовані в матеріально-технічних засобах (машинах, пальному, добривах,

гербіцидах). Витрати сукупної енергії на вирощування культури та вміст енергії в урожаї виражали в МДж та ГДж. Технологія вирощування біомаси передбачала мінімальний рівень витрат енергії на виробництво паливної тріски. Один кілограм сухої речовини в середньому забезпечує 18 МДж. Витрати сукупної енергії на вирощування енергетичної біомаси визначали для кожного агротехнічного заходу згідно з технологічною картою (лущення стерні, оранка, енергоємність добрив та витрати на їх внесення, весняний обробіток, садіння, догляд та збирання біомаси) [6, 8].

Встановлено, що температурний режим за роки проведення досліджень (2022–2024 рр.) був майже стабільним, без значних коливань, проте з перевищенням середніх багаторічних показників. У 2022 році за період вегетації температура повітря була вищою за середні багаторічні значення на 1,1 °С. Загалом найпосушливішим серед років проведення досліджень виявився 2022 рік; опади впродовж вегетаційного періоду хоч і випадали регулярно, але в значно меншій кількості. При цьому температура повітря впродовж цього періоду на 1,5–2,0 °С перевищувала середні багаторічні показники, що спричинило значне зниження запасів продуктивної вологи в ґрунті та, як наслідок, зменшення врожайності біомаси енергетичної верби. У цілому можна зробити висновок, що погодні умови в роки досліджень за ступенем відхилення від середніх багаторічних (як за окремими місяцями, так і за період вегетації) були в межах показників, характерних для зони нестійкого зволоження Лісостепу України. На основі даних температури повітря і кількості опадів за роки проведення досліджень було визначено показники гідротермічного коефіцієнта (ГТК) впродовж теплого періоду року з температурою повітря вище 10 °С (табл. 1).

1. Показники гідротермічного коефіцієнта (ГТК) у зоні проведення досліджень за вегетаційний період (2022–2024 рр.)

Роки	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Середнє
2022	1,5	0,2	0,4	1,1	0,9	1,8	0,6	0,9
2023	2,6	0,5	1,2	0,9	0,8	0,2	1,3	1,1
2024	1,8	0,6	1,3	0,2	1,1	1,3	0,8	1,0

Наведені дані показують, що найбільш сприятливим для росту і розвитку рослин у досліджуваних умовах був 2023 рік, коли показник ГТК становив 1,1, а найбільш несприятливим, як згадувалося вище, був 2022 рік, коли гідротермічний коефіцієнт становив 0,9 і був нижчим за середні багаторічні показники.

Результати та обговорення. На основі даних досліджень проведено економічний та енергетичний аналіз технології вирощування енергетичної верби прутovidної (*S. viminalis* L.) та

тритичинкової (*S. triandra* L.) в умовах Західного Лісостепу України, результати якого наведено в табл. 2. Аналіз даних свідчить, що витрати енергії на вирощування біомаси верби є меншими за обсяг енергії, акумульованої в урожаї та отриманої під час виробництва теплової енергії. Енергетичний еквівалент сирової біомаси при вологості 50 % складає 12 МДж. Максимальні показники коефіцієнта енергетичної ефективності отримано в другому циклі вирощування (табл. 2).

2. Енергетична оцінка вирощування верби прутovidної (*Salix viminalis* L.) та верби тритичинкової (*Salix triandra* L.) у 2022–2024 рр.

Цикли збирання біомаси	Вид рослин	Урожайність, т/га	Енергетичний еквівалент біомаси, ГДж/га	Енергетичні витрати, ГДж/га	Коефіцієнт енергетичної ефективності
Перший цикл	Прутовидна	58,8	705,6	226,0	3,1
	Тритичинкова	47,5	570,0	226,0	2,2
Другий цикл	Прутовидна	109,0	1308,0	232,0	5,6
	Тритичинкова	97,0	1164,0	232,0	5,0

Аналіз результатів енергетичної оцінки технології вирощування енергетичної верби свідчить про високу ефективність використання біомаси для виробництва біопалива в умовах Західного Лісостепу України. Встановлено, що в усіх варіантах досліджень енергетичний вихід із отриманої біомаси суттєво перевищував енергетичні витрати на її вирощування, що підтверджує позитивний енергетичний баланс технології. У першому циклі вирощування найвищі показники були отримані у верби прутovidної (*Salix viminalis* L.). За урожайності 58,8 т/га енергетичний еквівалент біомаси становив 705,6 ГДж/га, тоді як сумарні енергетичні витрати дорівнювали 226,0 ГДж/га. Це забезпечило коефіцієнт енергетичної ефективності на рівні 3,1. У верби

тритичинкової (*Salix triandra* L.) урожайність була нижчою (47,5 т/га), відповідно енергетичний вихід становив 570,0 ГДж/га, а коефіцієнт енергетичної ефективності – 2,2. Таким чином, уже в першому циклі вирощування прутovidна верба характеризувалася вищою продуктивністю та кращим використанням вкладеної енергії. У другому циклі вирощування спостерігалось істотне підвищення всіх показників енергетичної продуктивності. Урожайність верби прутovidної зросла до 109,0 т/га, що на 85,4 % більше порівняно з першим циклом. Енергетичний вихід досяг 1308,0 ГДж/га, тоді як енергетичні витрати збільшилися лише незначно – до 232,0 ГДж/га (на 2,7 %). У результаті коефіцієнт енергетичної ефективності зріс до 5,6, що свідчить про

надзвичайно високий рівень окупності вкладеної енергії. Аналогічна тенденція спостерігалася і у верби тритичинкової, де урожайність збільшилася до 97,0 т/га, енергетичний вихід – до 1164,0 ГДж/га, а коефіцієнт енергетичної ефективності досяг 5,0. Порівняльний аналіз досліджуваних видів показав, що верба прутувидна переважала вербу тритичинкову за всіма основними показниками енергетичної оцінки. У першому циклі різниця коефіцієнта енергетичної ефективності становила близько 41 %, тоді як у другому циклі вона зменшилася до 12 %, що свідчить про більш повну реалізацію продуктивного потенціалу обох видів після формування насаджень. Отримані результати підтверджують, що основним фактором зростання коефіцієнта енергетичної ефективності є значне підвищення

урожайності біомаси за практично незмінного рівня енергетичних витрат. Це свідчить про стабільність технології вирощування та її високу енергетичну доцільність для виробництва біопалива. Найвищу енергетичну ефективність забезпечує вирощування верби прутувидної, яка формує найбільший вихід енергії з одиниці площі та характеризується максимальним коефіцієнтом енергетичної ефективності 5,6. Основні енергетичні витрати під час вирощування верби як сировини для біопалива (близько 50 %) припадають на посадковий матеріал та паливно-енергетичні ресурси при закладанні плантації (табл. 3). Тому слід впроваджувати ефективні елементи технології вирощування біоенергетичних культур, які сприятимуть зменшенню сукупних енергетичних витрат.

3. Затрати та матеріально-технічні засоби для вирощування біомаси енергетичної верби прутоподібної (*S. viminalis* L.) та тритичинкової (*Salix triandra* L.) в умовах Західного Лісостепу України на 1 га (2022–2024 рр.)

№ з/п	Матеріально технічні засоби	тис. грн	%
1.	Посадковий матеріал	45,0	48,2
2.	Техніка	6,3	6,7
3.	Пальне	9,7	10,4
4.	Мінеральні добрива	16,5	17,7
5.	Пестициди	3,9	4,2
6.	Зарплата	12,0	12,8
	Всього	93,4	100

За рахунок застосування науково обґрунтованих технологічних рішень, раціонального і найбільш повного використання потенціалу добрив, засобів захисту від бур'янів, шкідників і хвороб можливо досягти зменшення витрат на одержання екологічно чистої і якісної біомаси.

Разом з тим швидко вирішити питання застосування технології вирощування енергетичної верби не вдається, так як це нова розробка, яка потребує значних фінансових вкладень для придбання технічних засобів. Окремі сільськогосподарські машини (для садіння

живців, розпушування ґрунту в міжряддях та збирання) в Україні не випускаються, і їх необхідно купувати за кордоном.

Тому слід впроваджувати такі технології вирощування біоенергетичних культур, які б сприяли зменшенню сукупних енергетичних витрат. У системі технологій усе більше значення починає відігравати диференційоване використання природних ресурсів, техногенних факторів і адаптивного потенціалу культивованих видів і сортів рослин, розробка сортової агротехніки, застосування певних методів боротьби з бур'янами, шкідниками й хворобами. Зокрема у табл. 4 наведено

показники використання тріски енергетичної верби шляхом реалізації на ринку за ціною 1500 гривень за тонну та її

спалювання в котлах місцевого значення і реалізації тепла в Гкал.

4. Економічна ефективність вирощування та використання біомаси верби тритичинкової (*Salix triandra* L.) в умовах Західного Лісостепу України

Показник	I цикл (3 роки)	I–II цикли (6 років)
Середня урожайність біомаси енергетичної верби, т/га	47,5	97,0
Затрати на вирощування біомаси верби, тис. грн/га	93,4	108,4
Собівартість 1 т біомаси, грн	1966	1118
Вихід теплової енергії, Гкал/га	68,0	152,0
Собівартість 1 Гкал, грн	1374	713
Виручка від реалізації тріски (1500 грн/т), тис. грн/га	71,25	145,50
Прибуток від реалізації тріски, тис. грн/га	–22,15	37,10
Рентабельність реалізації тріски, %	–23,7	34,2
Виручка від використання тріски для виробництва теплової енергії (1800 грн/Гкал), тис. грн/га	122,40	273,60

Дані таблиці свідчать про істотне зростання рентабельності виробництва біомаси у другому циклі експлуатації плантації. Економічна ефективність вирощування енергетичної верби суттєво залежить від тривалості експлуатації плантації. Собівартість виробництва біомаси знижується на 43,1 %, (з 1966 до 1118 грн/т), що свідчить про розподіл основних витрат на довший період використання плантації та підвищення економічної віддачі вкладених інвестицій. У другому циклі вирощування біомаси валовий збір паливної тріски збільшується з 47,5 до 97,0 т/га, що забезпечує істотне зниження затрат при вирощуванні. Реалізація деревної тріски після першого циклу є економічно збитковою. За ціни реалізації 1500 грн/т рівень рентабельності становить –23,7 %, що свідчить про недостатню окупність початкових інвестицій. Після завершення двох циклів вирощування виробництво стає прибутковим, а рентабельність досягає 34,2 %. Найвищу економічну ефективність забезпечує використання біомаси для виробництва теплової енергії. При використанні тріски як палива прибуток зростає з 29,0 до 165,2 тис. грн/га, тобто майже у шість разів, що підтверджує значно вищу додану вартість порівняно з

продажем необробленої біомаси. Зменшення собівартості теплової енергії майже вдвічі (з 1374 до 713 грн/Гкал) свідчить про високу конкурентоспроможність енергетичної верби як місцевого відновлюваного джерела енергії та перспективність її використання для заміщення викопних видів палива. Отримані результати підтверджують, що економічна доцільність створення плантацій енергетичної верби формується не за рахунок першого врожаю, а завдяки тривалому використанню насаджень протягом наступних циклів, коли капітальні витрати вже амортизовані, а врожайність залишається високою. Проведений економічний аналіз свідчить, що в умовах Західного Лісостепу України вирощування енергетичної верби є інвестиційно доцільним за умови довготривалої експлуатації плантації. Перший цикл вирощування характеризується низькою економічною ефективністю через значні початкові витрати, тоді як упродовж другого циклу собівартість продукції істотно зменшується, а рівень рентабельності реалізації тріски досягає 34,2 %. Максимальний економічний ефект забезпечує використання біомаси для виробництва теплової енергії, що дозволяє

суттєво підвищити прибутковість виробництва та створює передумови для широкого впровадження енергетичної верби як ефективної біоенергетичної культури в Україні. Використання деревної тріски енергетичної верби для виробництва теплової енергії є значно економічно ефективнішим, ніж її реалізація як товарної біомаси. За перший цикл вирощування реалізація тріски є збитковою (–23,7 %), тоді як виробництво теплової енергії забезпечує рентабельність 31,0 %. Після завершення двох циклів вирощування економічна ефективність суттєво підвищується. Рентабельність виробництва

теплової енергії досягає 152,4 %, що майже у 5 разів перевищує рівень першого циклу. Основним чинником підвищення прибутковості є зростання врожайності біомаси з 47,5 до 97,0 т/га, при цьому загальні витрати збільшуються лише на 16 % (з 93,4 до 108,4 тис. грн/га), що забезпечує істотне зниження собівартості як біомаси, так і теплової енергії. Собівартість виробництва теплової енергії зменшується з 1374 до 713 грн/Гкал (майже на 48 %), що свідчить про зростання технологічної та економічної ефективності експлуатації багаторічних енергетичних плантацій (табл. 5).

5. Економічна ефективність вирощування та використання біомаси верби прутоподібної (*S. viminalis* L.) в умовах Західного Лісостепу України

Показник	I цикл (3 роки)	I–II цикли (6 років)
Середня урожайність біомаси енергетичної верби, т/га	58,8	109,0
Затрати на вирощування, тис. грн/га	93,4	108,4
Собівартість 1 т біомаси, грн	1610,0	910,9
Вихід теплової енергії, Гкал/га	105,8	195,1
Собівартість 1 Гкал, грн	889,5	555,6
Виручка від реалізації тріски (1500 грн/т), тис. грн/га	88,2	178,5
Прибуток від реалізації тріски, тис. грн/га	–5,2	70,1
Рентабельність реалізації тріски, %	–5,6	64,7
Виручка від виробництва теплової енергії (1800 грн/Гкал), тис. грн/га	190,4	351,0
Прибуток від використання тріски для опалення, тис. грн/га	97,0	243,0
Рентабельність використання тріски для опалення, %	103,9	224,2

Використання біомаси енергетичної верби для виробництва теплової енергії є значно економічно ефективнішим, ніж реалізація тріски як товарної продукції. Уже після першого циклу вирощування рівень рентабельності виробництва теплової енергії перевищує 100 %, що свідчить про повне відшкодування виробничих витрат та отримання чистого прибутку. Після завершення двох циклів вирощування економічна ефективність істотно зростає. Рентабельність досягає 224,2 %, що більш ніж удвічі перевищує показник першого циклу. Це пояснюється зниженням собівартості біомаси (з 1610,0 до 910,9 грн/т) та теплової енергії (з 889,5 до 555,6 грн/Гкал) при одночасному підвищенні врожайності. Вихід теплової

енергії збільшується зі 105,8 до 195,1 Гкал/га, тобто майже в 1,84 раза, що забезпечує пропорційне зростання виручки від 190,4 до 351,0 тис. грн/га та прибутку від 97,0 до 243,0 тис. грн/га. Економічні результати підтверджують, що найбільша ефективність досягається при довготривалій експлуатації плантацій, коли початкові капіталовкладення розподіляються на більший обсяг виробленої біомаси та енергії. Отримані показники свідчать про високу конкурентоспроможність виробництва теплової енергії з енергетичної верби порівняно з реалізацією біомаси у вигляді тріски, що підтверджує доцільність використання таких плантацій для локального теплопостачання, заміщення

викопного палива та підвищення енергетичної незалежності громад. Результативні показники, наведені в таблицях 4–5, свідчать, що при спалюванні тріски в місцевих котлах і реалізації тепла за ціною 1800 грн/Гкал виробництво стає рентабельним уже на другий рік вегетації, а в подальшому прибутковість різко зростає. Наведені розрахунки відображають основні тенденції використання верби як твердого палива станом на червень 2025 р. Однак конкретні показники можуть змінюватися залежно від коливань цін на енергоносії та матеріально-технічні ресурси, комерційних цілей підприємців, кон'юнктури ринку та інших факторів. Враховуючи результати розрахунків, можна стверджувати, що в сучасних реаліях української економіки інвестування власного капіталу в біоенергетичні плантації є економічно обґрунтованим.

Висновки. Продукування теплової енергії з біомаси енергетичної верби в Західному Лісостепу України демонструє істотно високу економічну ефективність. Рентабельність становить 103,9 % після першого трирічного циклу та збільшується до 224,2 % після двох циклів вирощування. Це підкреслює значний потенціал цієї культури як відновлюваного джерела енергії та економічно виправданого альтернативи традиційним паливам.

Список використаної літератури

1. Бондар В. С., Фурса А. В., Гументик М. Я. Стратегія та пріоритети розвитку біоенергетики в Україні. *Економіка агропромислового виробництва*. 2018. Том 25. № 8. С. 17–25. <https://eapk.com.ua/uk/journals/tom-25-8-2018/strategiya-ta-prioriteti-rozvitku-bioenergetiki-v-ukrayini>
2. Гордієнко М. І., Маурер В. М., Ковалевський С. Б. Методичні вказівки до вивчення та дослідження лісових культур. К : Видавничий центр НАУ, 2000. 101 с.
3. Гументик М. Я. Технологічні основи створення промислових плантацій високопродуктивних біоенергетичних культур. *Біоенергетика*. 2020. № 1 (15). С. 14–17. <https://be.bio.gov.ua/article/view/224938/225230>.
4. Еколого-геробологічний моніторинг і прогноз в агроценозах : навчальний посібник / І. А. Шувар та

Найбільший економічний ефект досягається за умови використання біомаси безпосередньо для виробництва теплової енергії, а не її продажу як сировини. Це дозволяє максимізувати додану вартість біомаси та підвищити ефективність функціонування біоенергетичних систем. Практичне значення дослідження полягає у підтвердженні доцільності створення локальних систем теплопостачання на основі енергетичної верби. Рентабельність понад 150 % після двох циклів вирощування свідчить про високу інвестиційну привабливість таких проєктів і їхню перспективність для забезпечення енергетичної незалежності громад та аграрних підприємств.

Енергетична оцінка демонструє, що технологія вирощування енергетичної верби в умовах ґрунтово-кліматичної зони Західного Лісостепу є ефективною щодо енергозбереження та раціонального використання ресурсів. У другому циклі вирощування коефіцієнт енергетичної ефективності перевищує 5, що означає, що на кожну одиницю спожитої енергії отримується понад п'ять одиниць енергії, нагромадженої в біомасі. Це підтверджує перспективність використання енергетичних плантацій верби як надійного джерела відновлюваної енергії.

References

1. Bondar V. S., Fursa A. V. Strategy and Priorities for Bioenergy Development in Ukraine. *Ekonomika ahropromyslovoho vyrobnytstva*. 2018. Vol. 8. P. 17–25. <https://eapk.com.ua/uk/journals/tom-25-8-2018/strategiya-ta-prioriteti-rozvitku-bioenergetiki-v-ukrayini>
2. Hordiienko M. I., Maurer V. M., Kovalevskiy S. B. Methodological guidelines for the study and research of forest plantations. K : Vydavnychyi tsentr NAU, 2000. 101 p.
3. Humentyk M. Ya. Technological foundations for establishing industrial plantations of high-yielding bioenergy crops. *Bioenerhetyka*. 2020. No. 1 (15). P. 14–17. <https://be.bio.gov.ua/article/view/224938/225230>.
4. Ecological and Herbological Monitoring and Forecasting in Agrocenoses : A Study Guide

ін. ; за ред. І. А. Шувара. Львів : НВФ “Українські технології”, 2011. 208 с.

5. Економічна ефективність інвестицій у вирощування біоенергетичних культур в зоні Лісостепу України / М. Я. Гументик та ін. *Економічний аналіз*. 2018. Т. 28. № 2. С. 21–30. <https://doi.org/10.35774/econa2018.02.021>

6. Енергетична верба: технологія вирощування та використання / М. В. Роїк та ін. ; під загальною редакцією доктора сільськогосподарських наук В. М. Сінченка. Вінниця : ТОВ «Нілан ЛТД», 2015. 340 с. <https://press.bio.gov.ua/catalog/view/728/1451/10135>.

7. Концепція розвитку біоенергетики в Україні на період до 2035 року / М. В. Роїк та ін. *Біоенергетика*. 2019. № 2 (14). С. 4–9. <https://be.bio.gov.ua/article/view/229304/228252>.

8. Методологія дослідження енергетичних плантацій верб і тополь : монографія / Я. Д. Фучило та ін. ; за ред. члена-кореспондента НААН В. М. Сінченка. К. : ТОВ «ЦП «Компринт», 2018. 137 с.

9. Роїк М. В., Гументик М. Я., Мамайсур В. В. Перспективи вирощування енергетичної верби для виробництва твердого біопалива. *Біоенергетика*. 2013. № 2. С. 18–19.

10. Формування продуктивності енергетичних плантацій верби за різних рівнів родючості ґрунту в умовах Західного Полісся / Р. В. Шевчук та ін. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. К. : ФОП Корзун Д. Ю., 2019. Вип. 27. С. 123–130. <https://doi.org/10.47414/np.27.2019.211177>.

11. Шкоропад Л., Думич В. Вирощування енергетичної верби в умовах західного регіону України. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*: зб. наук. пр. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 2017. Вип. 21 (35). С. 353–361.

12. Bressler, A. S., Vidon, P. G. & Volk, T. A. Impact of shrub willow (*Salix sp.*) as a potential bioenergy feedstock on water quality and greenhouse gas emissions. *Water, Air and Soil Pollution*, 2017. Vol. 228. P. 170–188. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-017-3350-4>.

13. Change in Yield Between First and Second Rotations in Willow (*Salix spp.*) Biomass Crops is Strongly Related to the Level of First Rotation Yield / N. J. Sleight et al. *BioEnergy Research*. 2016, Vol. 9. Issue 1, p. 270–287 <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-015-9684-0>.

14. Ecological Bio Energy Materials in Ukraine Current State and Prospects of Production Development / V. M. Sinchenko et al. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2020. No. 10 (1). P. 85–89. https://doi.org/10.15421/2020_13.

/ I. A. Shuvar et al. ; za red. I. A. Shuvara. Lviv : NVF “Ukrainski tekhnolohii”, 2011. 208 p.

5. Economic efficiency of investments in the cultivation of bioenergy crops in the Forest-Steppe zone of Ukraine / M. Ya. Humentyk et al. *Ekonomichniy analiz*. 2018. Vol. 28. No. 2. P. 21–30. <https://doi.org/10.35774/econa2018.02.021>

6. Energy Willow: Cultivation and Utilization Technology / M. V. Roik et al. Vinnytsia : TOV «Nilan LTD», 2015. 340 p. <https://press.bio.gov.ua/catalog/view/728/1451/10135>.

7. Concept for the Development of Bioenergy in Ukraine for the Period up to 2035 / M. V. Roik et al. *Bioenerhetyka*. 2019. No. 2 (14). P. 4–9. <https://be.bio.gov.ua/article/view/229304/228252>.

8. Methodology for Researching Willow and Poplar Energy Plantations : a monograph / Ya. D. Fuchylo et al. ; za red. chlena-korespondenta NAAN V. M. Sinchenka. K. : TOV «TsP «Komprynt», 2018. 137 p.

9. Roik M. V., Humentyk M. Ya., Mamaisur V. V. Perspektyvy vyroshchuvannya enerhetychnoi verby dlia vyrobnytstva tverdoho biopalyva. *Bioenerhetyka*. 2013. No. 2. P. 18–19.

10. Formation of willow energy plantation productivity under varying soil fertility levels in the Western Polissia region / R. V. Shevchuk et al. *Naukovi pratsi Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovyykh buriakiv*. K. : FOP Korzun D. Yu., 2019. Issue 27. P. 123–130. <https://doi.org/10.47414/np.27.2019.211177>.

11. Shkoropad L., Dumych V. Cultivation of energy willow in the western region of Ukraine. *Technical and technological aspects of the development and testing of new machinery and technologies for Ukrainian agriculture*: zb. nauk. pr. UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. 2017. Issue 21 (35). P. 353–361.

12. Bressler, A. S., Vidon, P. G. & Volk, T. A. Impact of shrub willow (*Salix sp.*) as a potential bioenergy feedstock on water quality and greenhouse gas emissions. *Water, Air and Soil Pollution*, 2017. Vol. 228. P. 170–188. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-017-3350-4>.

13. Change in Yield Between First and Second Rotations in Willow (*Salix spp.*) Biomass Crops is Strongly Related to the Level of First Rotation Yield / N. J. Sleight et al. *BioEnergy Research*. 2016, Vol. 9. Issue 1, p. 270–287 <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-015-9684-0>.

14. Ecological Bio Energy Materials in Ukraine Current State and Prospects of Production Development / V. M. Sinchenko et al. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2020. No. 10 (1). P. 85–89. https://doi.org/10.15421/2020_13.

15. El Bassam N. Handbook of Bioenergy Crops. A Complete Reference to Species, Development and Applications. London; Washington, DC: Earthscan. 2010. 544 p.

15. El Bassam N. Handbook of Bioenergy Crops. A Complete Reference to Species, Development and Applications. London; Washington, DC: Earthscan. 2010. 544 p. https://books.google.com.ua/books?id=ZdU_q5lj0fgC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false.
16. Fabio, E. S., Smart, L. B. Effects of nitrogen fertilization in shrub willow short rotation coppice production – a quantitative review. *Global Change Biology Bioenergy*. 2018. Vol. 10. Issue 8. P. 548–564. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12507>.
17. Grzesik, M., Romanowska-Duda, Z., Kalaji, H. M. Effectiveness of cyanobacteria and green algae in enhancing the photosynthetic performance and growth of willow (*Salix viminalis* L.) plants under limited synthetic fertilizers application. *Photosynthetica*. 2017. Vol. 55. Issue 3. P. 510–521. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11099-017-0716-1>.
18. Major J. E., Mosseler A., Malcolm J. W. Salix species variation in leaf gas exchange, sodium, and nutrient parameters at three levels of salinity. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017. Vol. 47 (8). P. 1045–1055. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20173324658>.
19. Short rotation coppices, grasses and other herbaceous crops: Productivity and yield energy value versus 26 genotypes / M. J. Stolarski et al. *Biomass & Bioenergy*. 2018. Vol. 119. P. 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.014>.
20. Stajić, B. Short rotation energy crops of fast-growing tree species in Serbia: biomass production, legislation, market, and environmental impacts – potentials and constraints: *Raport UNDP Serbia*. 2016. 80 p.
21. Torun H., Hansson Per-A., Sundberg C. Climate impact assessment of willow energy from a landscape perspective: a Swedish case study. *Global Change Biology Bioenergy*. 2017. Vol. 9. Issue 5. P. 973–985. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12399>.
- https://books.google.com.ua/books?id=ZdU_q5lj0fgC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false.
16. Fabio, E. S., Smart, L. B. Effects of nitrogen fertilization in shrub willow short rotation coppice production – a quantitative review. *Global Change Biology Bioenergy*. 2018. Vol. 10. Issue 8. P. 548–564. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12507>.
17. Grzesik, M., Romanowska-Duda, Z., Kalaji, H. M. Effectiveness of cyanobacteria and green algae in enhancing the photosynthetic performance and growth of willow (*Salix viminalis* L.) plants under limited synthetic fertilizers application. *Photosynthetica*. 2017. Vol. 55. Issue 3. P. 510–521. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11099-017-0716-1>.
18. Major J. E., Mosseler A., Malcolm J. W. Salix species variation in leaf gas exchange, sodium, and nutrient parameters at three levels of salinity. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017. Vol. 47 (8). P. 1045–1055. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20173324658>.
19. Short rotation coppices, grasses and other herbaceous crops: Productivity and yield energy value versus 26 genotypes / M. J. Stolarski et al. *Biomass & Bioenergy*. 2018. Vol. 119. P. 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.014>.
20. Stajić, B. Short rotation energy crops of fast-growing tree species in Serbia: biomass production, legislation, market, and environmental impacts – potentials and constraints: *Raport UNDP Serbia*. 2016. 80 p.
21. Torun H., Hansson Per-A., Sundberg C. Climate impact assessment of willow energy from a landscape perspective: a Swedish case study. *Global Change Biology Bioenergy*. 2017. Vol. 9. Issue 5. P. 973–985. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12399>.