

ПРОДУКТИВНІСТЬ БІОМАСИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЛАНТАЦІЙ ТОПОЛІ І ВЕРБИ ЗАЛЕЖНО ВІД АГРОТЕХНІКИ ВИРОЩУВАННЯ

Наведено результати досліджень росту розвитку і продуктивності біомаси енергетичних плантацій верби і тополі на середньо суглинкових дернових опідзолених ґрунтах Прикарпатського регіону. Встановлено, що після закінчення восьмого вегетаційного періоду найбільшу висоту рослини верби прутovidної (9,6 м) мають у варіанті з висаджуванням 15 тис. шт. живців на 1 га. Діаметр основного пагона при цьому становив у середньому 70 мм, а кількість пагонів на одну рослину – 3,6 шт., або 54,0 тис. шт./га.

У тополі найбільша висота восьмирічних рослин (15,1 м) виявилася за початкової густоти 5,6 тис. рослин./га. Діаметр їх основного стовбура становив 215 мм, а кількість стовбурів на 1 рослину – 2,5 шт., або 30,0 тис. шт. на 1 га. Внесення комплексу мінеральних добрив (N₈₀P₃₀₀K₃₀₀) забезпечило збільшення висоти рослин тополі на 0,5-1,0 м, а товщини їх пагонів – на 11-22 мм.

Найвища продуктивність сухої біомаси верби (74,2 т/га) виявилася за середньої густоти садіння (15 тис. живців на 1 га) і внесення у ґрунт мінеральних добрив. При цьому за восьмий рік вирощування річний приріст урожайності верби виявився найменшим за всі роки досліджень – від 2,8 т/га за висаджування 18,0 тис. живців/га без внесення добрив до 4,1 т/га – за густоти 15,0 тис. живців/га і внесення мінеральних добрив.

За восьмирічний період вирощування тополі найвищою врожайністю сухої біомаси (133,1 т/га) відзначався варіант із початковою густрою 6,7 тис. живців/га. Це на 15,0 т/га перевищує врожайність варіанту з густрою 8,3 тис. живців/га та на 4,3 т/га більше варіанту з висаджуванням 5,6 тис. живців на 1 га. Застосування добрив забезпечило підвищення урожайності сухої біомаси досліджуваних варіантів від 13,4 до 22,4 т/га.

За останній, восьмий рік річний приріст сухої біомаси тополі становив від 14,7 т/га за густоти садіння 8,3 тис. шт./га без використання добрив до 19,4 т/га у варіанті з густрою 5,6 тис./га і внесенням добрив.

Економічна оцінка ефективності вирощування вербової енергетичної біомаси показала, що найбільшим економічний ефект (від 49,8 до 52,9 тис. грн./га) виявився у варіантах з висаджуванням 12 та 15 тис. живців/га і застосуванням мінеральних добрив. З енергетичної точки зору найбільш ефективним (коефіцієнт енергетичної ефективності – 8,2) виявився варіант із мінімальною густрою стояння рослин (12 тис. шт./га) і застосуванням добрив.

За вирощування енергетичної біомаси тополі найбільший прибуток (128,4-132,2 тис.

¹Лис Надія Миколаївна, канд. с.-г. наук, с.н.с., вчений секретар, E-mail: lysn67@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2850-1179>;

²Фучило Ярослав Дмитрович, доктор с.-г. наук, професор, завідувач кафедри лісівництва та захисту лісу. E-mail: fuchylo_yar@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-2669-5176>;

¹Ткачук Надія Любомирівна, м.н.с. E-mail: nadjuscha.lys@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-5464-3316>.

грн./га) можна отримати за варіантів густоти 5,6 і 6,7 тис. шт./га і внесення мінеральних добрив. Найвищим показник коефіцієнта енергетичної ефективності при вирощуванні тополі (13,1) виявився за густоти 5,6 тис. шт./га без внесення добрив.

Ключові слова: біоенергетичні культури; *Salix viminalis* L.; *Populus*×*Max-4*; живці; густина садіння; мінеральні добрива; середній діаметр; середня висота; урожайність біомаси; економічна і енергетична ефективність.

Вступ. Проблеми інтенсивного зростання світового попиту на енергію та енергоносії, тенденція до зменшення використання викопного палива і зростання цін на нього та глобальне потепління призвели до необхідності вибору альтернативних напрямків енергопостачання. Однією з ключових стратегій при цьому розглядається заміна викопного палива на біопаливо. При цьому біомаса може служити відновлюваною сировиною для виробництва різних видів біопалива – твердого, рідкого та газоподібного. Директива II Європейського Союзу «Про відновні джерела енергії» (REDII) передбачає до 2030 року збільшити відсоток відновлюваної енергії в енергобалансі до 32 %, а у транспортному секторі – до 14 % [1]. Серед держав-членів ЄС передові позиції у використанні відновних джерел енергії (ВДЕ) займає Швеція, яка уже в 2015 році використовувала для внутрішнього транспорту більше 20 % відновлюваного палива, з яких 85 % було імпортовано з інших країн [2]. Крім того, шведський уряд вирішив до 2030 року викиди CO₂ від внутрішнього транспорту скоротити на 70%, порівняно з показниками 2020 р. До 2045 року вони стануть вуглецево-нейтральними, з подальшим негативним балансом CO₂ [3; 4].

У нашій країні за рахунок ВДЕ забезпечується всього 4 % енергетичних потреб. При цьому, згідно «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року» передбачається збільшити частку ВДЕ до 2025 року до рівня 12 % від загального первинного постачання енергії (ЗППЕ) та не менше 25 % – до 2035 року (включаючи всі гідроенергуючі потужності та термальну енергію) [5]. Виконання вищенаведених показників може бути забезпечене наявністю великої кількості орних земель, які з різних причин не використовуються у аграрному виробництві, але цілком придатні для вирощування біоенергетичних рослин. Збільшення рівня енергоспоживання на фоні постійного зростання ціни на енергоресурси робить розвиток біоенергетики в Україні надзвичайно актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Початок інтенсивного розвитку вирощування насаджень енергетичних культур прийшовся на 1970-ті роки, внаслідок жорсткої енергетичної кризи, яка виникла через військові дії на Близькому Сході [6; 7; 8]. Це змусило уряди більшості країн Європи і Північної Америки прийняти спеціальні енергетичні програми, з метою скорочення використання мінеральної енергетичної сировини і заміни її іншими джерелами енергії, зокрема – біомасою швидкорослих деревних рослин [9].

На даний час різним аспектам добору енергетичних культур, агротехніці їх

виращування, урожайності біомаси, економічній, екологічній та енергетичній ефективності їх виращування надається значна увага у низці країн, зокрема в Данії, Великобританії, Німеччині, Польщі, Швеції, Фінляндії та ін. [4; 9; 10], а також – в Україні [9–12].

Серед низки перспективних енергетичних культур на плантаціях переважно використовують різні види і форми верби [6; 7; 9–11] та тополі [4; 12; 13]. Ці культури є високопродуктивними, маловимогливими до ґрунтових умов, легко розмножуються вегетативно, інтенсивно відновлюються після періодичного зрізання надземної частини на отримання енергетичної біомаси.

Важливим аспектом виращування енергетичних плантацій деревних рослин є їх позитивний вплив на довкілля. Вони, завдяки інтенсивному накопиченню біомаси, поглинають з атмосфери велику кількість вуглекислого газу та збагачують повітря киснем; внаслідок багаторічного виращування на одній площі поліпшують структуру ґрунтів, підвищують їх родючість, затримують вологу, виконують ґрунтозахисні функції тощо [7; 8; 9; 12].

Метою досліджень, результати яких наведені у даній статті, було вивчення ефективності виращування біомаси енергетичних плантацій тополі і верби на дернових опідзолених грубо пилюватих середньо суглинкових ґрунтах Прикарпаття.

Матеріали та методи досліджень. Об'єкти досліджень закладені на території Прикарпатської державної сільськогосподарської дослідної станції 14 квітня 2016 року.

Перший дослід передбачав вивчення особливостей росту і продуктивності енергетичних плантацій верби прутовидної, залежно від агротехніки їх виращування.

Схема досліду:

Фактор А – густина садіння: 18, 15, 12 тис. шт./га;

Фактор В – мінеральне живлення: контроль (без внесення добрив); внесення $N_{80}P_{300}K_{300}$.

Дослід закладений в чотириразовій повторності. Площа дослідної ділянки – 150 м², облікової – 125 м². Загальна площа варіантів досліду – 0,36 га.

Садіння живців верби відбувалося у спарені ряди з відстанню між ними 0,70 м і міжряддями 2 м (табл. 1).

Таблиця 1

Схема досліду № 1

Культура	Варіант досліду	Густина садіння <i>Фактор А</i>	Мінеральне живлення <i>Фактор В</i>
Верба прутовидна	1	18 тис. шт./га	Без добрив
	2	(відстань між рослинами в ряду 40 см)	$N_{40}P_{300}K_{300} + N_{40}$
	3	15 тис. шт./га	Без добрив

		(відстань між рослинами в ряду	
	4	50 см)	N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀
	5	12 тис. шт./га	Без добрив
	6	(відстань між рослинами в ряду 60 см)	N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀

Дослід 2 передбачав вивчення особливостей росту і продуктивності енергетичних плантацій гібридної тополі «Мах-4», залежно від агротехніки їх вирощування.

Схема дослідю:

Фактор А – густина садіння: 8,3; 6,7; 5,6 тис. шт./га

Фактор В – мінеральне живлення: мінеральне живлення: контроль (без внесення добрив); внесення N₈₀P₃₀₀K₃₀₀.

Дослід має 4 повторності. Площа дослідної ділянки – 150 м², облікової – 125 м². Загальна площа варіантів дослідю – 0,36 га.

Згідно схеми садіння живці тополі були висаджені одним рядом з міжряддями 2 м (табл. 2).

Таблиця 2

Схема дослідю № 2

Культура	Варіант дослідю	Густина садіння <i>Фактор А</i>	Мінеральне живлення <i>Фактор В</i>
Енергетична тополя 'Мах-4'	1	8,3 тис. шт./га	Без добрив
	2	(відстань між рослинами в ряду – 40 см)	N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀
	3	6,7 тис. шт./га	Без добрив
	4	(відстань між рослинами в ряду – 40 см)	N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀
	5	5,6 тис. шт./га	Без добрив
	6	(відстань між рослинами в ряду – 40 см)	N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀

Восени кожного року, після закінчення вегетації досліджуваних рослин, визначали їх збереженість, розміри і масу. Ці ж показники визначали також протягом періоду вегетації у кінці кожного місяця.

Дослідження проводилися з використанням традиційних методик. Вимірювання висоти кущів верби та тополі проводили за допомогою мірної рейки з точністю до 1 см, а діаметра найбільшого пагона у кущі – штангенциркулем [13].

У дослідях виконували також такі спостереження, обліки та аналізи:

- густоту насаджень визначали шляхом підрахунку рослин на 1 погонному метрі рядка в п'яти місцях по діагоналі ділянки з наступним перерахунком на 1 га [13];

- уміст сухої речовини визначали шляхом висушування зразка біомаси до абсолютно сухого стану в сушильній шафі за температури 100-105 °С упродовж 4-6 год. [13];

- урожайність наземної маси насаджень енергетичних культур обліковували способом суцільного зрізування наземних частин рослин культури на облікових ділянках (площа – 25 м²) на всіх повтореннях. Отриману біомасу зважували, перераховували на стандартну вологість [13];

- вихід енергії розраховували з використанням даних попередніх дослідників [9; 11–13];

- статистичний аналіз результатів дослідження проводився на ПК за використання прикладної програми «Statistika-6»;

- економічну оцінку досліджуваних елементів технології проводили відповідно до загальноприйнятих методик [9; 10; 12];

- енергетичну ефективність елементів технології оцінювали за методичними вказівками О. К. Медведовського та П. І. Іваненка [14].

Результати досліджень та їх обговорення. Найбільшого приросту за висотою, згідно проведеним фенологічним дослідженням, енергетичні плантації верби досягали за період з червня по серпень. Висота рослин після припинення вегетації знаходилась у межах 9,0-9,6 м. Діаметр основного пагона коливався від 55 до 71 мм.

Найбільша висота рослин верби за восьмий рік вегетації (9,6 м). зафіксована за густоти садіння 15 тис. шт./га. Діаметр головного пагона при цьому становив 70 мм, кількість пагонів на 1 рослину – 3,6 шт., або 54,0 тис. шт. на 1 гектар. Протягом восьмого року вегетації внесення (N₈₀P₃₀₀K₃₀₀) не мало суттєвого впливу на ріст рослин.

У тополі найбільша висота пагонів за восьмий рік вегетації зафіксована за густоти садіння 5,6 тис. шт./га – 15,1 м. Діаметр головного пагона при цьому становив 258 мм, кількість пагонів на 1 рослину – 2,5 шт., або 30,0 тис. шт. на 1 га.

Внесення добрив (N₈₀P₃₀₀K₃₀₀) забезпечило рослини більшою кількістю доступних поживних речовин та сприяло збільшенню товщини пагонів на 11-22 мм, а висоти рослин – на 0,5-1,0 м, порівняно з варіантами без удобрення.

За третій рік вегетації приріст рослин тополі за висотою у середньому становив 1,8 м, за четвертий рік – 2,4 м, за п'ятий – 1,0 м, за шостий – від 1,4 до 1,7 м., за сьомий – 1,2-1,5 м і за восьмий рік – 1,2-1,5 м. Схожа динаміка спостерігалася також з середнім діаметром головних пагонів, де за третій рік вегетації він збільшився у середньому на 21 мм, за четвертий – на 30 мм, за п'ятий – на 35 мм, за шостий – на 39 мм, за сьомий – на 40 мм і за восьмий – на 43 мм.

За вирощування енергетичних рослин урожайність вегетативної маси є одним із вирішальних критеріїв, що забезпечують економічну доцільність такої

діяльності, оскільки, чим більша врожайність, тим вищий вихід продукції і відповідно більший прибуток з одиниці площі.

Встановлено, що найвищою врожайністю біомаси верби прутovidної (132,0 т/га зеленої маси та 74,2 т/га сухої) відзначається варіант з густотою садіння живців 15 тис. шт./га і внесенням мінеральних добрив, що на 18,3 % більше, порівняно висаджуванням 18 тис. шт./га живців і внесенням добрив (табл. 3).

Слід відзначити, що мінеральні добрива забезпечили рослини верби достатньою кількістю поживних речовин а це в свою чергу посприяло підвищенню врожайності енергетичної біомаси на всіх варіантах, де вони застосовувалися.

Таблиця 3

**Урожайність біомаси верби прутovidної протягом 2016-2023 років
залежно від густоти насадження і фону живлення**

№ з/п	Густота садіння живців, тис. шт./га <i>Фактор А</i>	Мінеральне живлення <i>Фактор В</i>	Урожайність зеленої маси, т/га	Вміст абсолютно сухої речовини в біомасі, %	Урожайність сухої маси, т/га
1	12,0	Без добрив	83,1	56,0	46,8
2		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	107,8	56,1	60,6
3	15,0	Без добрив	94,3	56,0	52,8
4		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	132,0	56,2	74,2
5	18,0	Без добрив	82,7	56,0	46,3
6		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	125,5	56,1	70,3

Застосування добрив забезпечило в середньому по варіантах прибавку урожайності на рівні 38 т/га зеленої маси, або 21 т/га сухої.

У 2023 році найвищі показники урожайності біомаси тополі виявилися за початкової густоти 6,7 тис. шт./га, а саме – 236,8 т/га зеленої маси або 133,1 т/га – сухої, що відповідно на 26,6 т/га та 15,0 т/га переважає варіант з густотою 8,3 тис. шт./га і, відповідно, – на 7,6 т/га та 4,3 т/га більше у порівнянні з варіантом густотою 5,6 тис. шт./га.

Внесення добрив забезпечило по всіх варіантах прибавку урожаю біомаси на рівні від 23,5 до 39,6 т/га зеленої маси та від 13,4 до 22,4 т/га – сухої.

Аналіз зміни продуктивності енергетичних плантацій верби за роками вегетації вказує на те, що за останні три роки річний приріст біомаси значно зменшився, порівняно з попередніми роками (табл. 4).

Як видно з представлених даних, в середньому за 8 років у варіантах без внесення мінеральних добрив щорічно приростало від 5,7 до 6,6 т/га/рік абсолютно сухої біомаси верби, а за внесення добрив – від 7,6 до 9,3 т/га/рік. За останні три роки (2021–2023) приріст біомаси значно зменшився і становив на

варіантах без добрив від 1,9 до 2,6 т/га/рік, а за використання добрив – від 2,4 до 3,3 т/га/рік.

Таблиця 4

Аналіз продуктивності верби прутувидної за роками вегетації

№ з/п	Густота садіння, тис. шт./га Фактор А	Мінеральне живлення Фактор В	Збір зеленої маси, т/га Збір сухої маси, т/га					
			2021 р.	2022 р.	2023 р.	Приріст за 2023 р.	Середній річний приріст за 2021-2023 рр.	Середній річний приріст за 2016-2023 рр.
1	12,0	Без добрив	<u>77,1</u> 43,3	<u>80,3</u> 45,0	<u>83,1</u> 46,8	<u>2,8</u> 1,8	<u>3,6</u> 2,0	<u>10,4</u> 5,9
2		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	<u>101,0</u> 56,9	<u>104,5</u> 58,5	<u>107,8</u> 60,6	<u>3,3</u> 2,1	<u>4,6</u> 2,4	<u>13,5</u> 7,6
3	15,0	Без добрив	<u>87,2</u> 49,2	<u>91,0</u> 51,0	<u>94,3</u> 52,8	<u>3,3</u> 1,8	<u>5,1</u> 2,6	<u>11,8</u> 6,6
4		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	<u>123,6</u> 69,7	<u>127,9</u> 71,6	<u>132,0</u> 74,2	<u>4,1</u> 2,6	<u>6,1</u> 3,3	<u>16,5</u> 9,3
5	18,0	Без добрив	<u>76,3</u> 43,0	<u>79,6</u> 44,6	<u>82,7</u> 46,3	<u>3,1</u> 1,7	<u>3,7</u> 1,9	<u>10,3</u> 5,7
6		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	<u>117,5</u> 66,3	<u>121,4</u> 68,0	<u>125,5</u> 70,3	<u>4,1</u> 2,6	<u>6,1</u> 3,3	<u>15,7</u> 8,9

Протягом останнього, восьмого року показники приросту біомаси становили 1,7–1,8 т/га/рік у варіантах без внесення добрив і 2,1–2,6 – за їх застосування.

Наведені дані вказують на те, що в регіоні досліджень на енергетичних плантаціях верби для забезпечення високої економічної ефективності, енергетичну біомасу доцільно заготовляти раніше п'ятирічного віку. Орієнтовно оптимальним віком заготівлі урожаю можна вважати вік 3-4 роки.

Продуктивність енергетичної біомаси тополі за восьмирічний період виявилася значно більшою, порівняно з вербою прутувидною. Зокрема, урожайність варіантів без внесення мінеральних добрив становила від 105,6 т/га за густоти садіння 8,3 тис. шт./га до 109,9 т/га за густоти 6,7 тис. шт./га (табл. 5).

За внесення мінеральних добрив відбулося помітне зростання показників продуктивності плантацій тополі на всіх варіантах досліджу, де вони були внесені.

Урожайність біомаси тополі за 2016-2023 років вегетації залежно від густоти насадження і фону живлення

№ з/п	Густота садіння, тис. шт./га <i>Фактор А</i>	Мінеральне живлення <i>Фактор В</i>	Збір зеленої маси, т/га	Вміст абсолютно сухої речовини в біомасі, %	Збір сухої маси, т/га
1	8,3	Без добрив	187,9	56,2	105,6
2		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	210,2	56,3	118,1
3	6,7	Без добрив	195,3	56,1	109,9
4		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	236,8	56,2	133,1
5	5,6	Без добрив	191,2	56,1	107,6
6		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	229,2	56,3	128,8

Найвища урожайність сухої біомаси сформувалась у варіанті з середньою густиною садіння (6,7 тис. шт./га), де вона становила 133,1 т/га.

Також, на відміну від верби, приріст сухої біомаси тополі на час останніх досліджень не знижується, а продовжує зростати (табл. 6).

Таблиця 6

Аналіз продуктивності енергетичних плантацій тополі за роками вегетації

№ з/п	Густота садіння, тис. шт./га <i>Фактор А</i>	Мінеральне живлення <i>Фактор В</i>	Збір зеленої маси, т/га Збір сухої маси, т/га					
			2021 р.	2022 р.	2023 р.	Приріст за 2023 р.	Середній річний приріст за 2021-2023 рр.	Середній річний приріст за 2016-2023 рр.
1	8,3	Без добрив	<u>135,9</u> 76,8	<u>161,8</u> 90,9	<u>187,9</u> 105,6	<u>25,9</u> 14,7	<u>25,2</u> 14,0	<u>23,5</u> 13,2
2		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	<u>158,4</u> 89,6	<u>185,3</u> 104,3	<u>210,2</u> 118,1	<u>26,9</u> 13,8	<u>26,4</u> 13,6	<u>26,3</u> 13,5
3	6,7	Без добрив	<u>141,2</u> 80,3	<u>168,2</u> 94,4	<u>195,3</u> 109,9	<u>27,1</u> 15,5	<u>25,7</u> 14,3	<u>24,4</u> 13,7
4		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	<u>178,3</u> 100,9	<u>207,8</u> 116,8	<u>236,8</u> 133,1	<u>29,0</u> 16,3	<u>28,0</u> 15,7	<u>27,6</u> 15,6
5	5,6	Без добрив	<u>139,2</u> 79,2	<u>165,4</u> 92,8	<u>191,2</u> 107,6	<u>26,2</u> 14,8	<u>25,5</u> 14,1	<u>23,9</u> 13,5
6		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	<u>160,3</u> 90,4	<u>194,2</u> 109,4	<u>229,2</u> 128,8	<u>35,0</u> 19,4	<u>29,9</u> 16,7	<u>28,7</u> 16,1

Як видно з наведених даних, середній річний приріст за 2016-2023 рр. у варіантах без внесення мінеральних добрив становить від 13,2 до 13,7 т/га/рік, а з внесенням добрив – від 13,5 до 16,1 т/га/рік. За останні три роки річний приріст

сухої біомаси становив на контрольних варіантах від 13,5 до 14,3 т/га/рік, а на варіантах з внесенням добрив — від 13,6 до 16,7 т/га/рік.

Приріст сухої біомаси за останній рік досліджень (2023 р.) на варіантах без внесення мінеральних добрив виявився дещо більшим, ніж в середньому за три та вісім років і становив від 14,7 до 15,5 т/га/рік. За внесення добрив за восьмий рік досліджень приріст біомаси склав від 13,8 до 19,4 т/га/рік.

Отже, після восьми років вирощування енергетичних плантацій тополі, їх річний приріст за біомасою у останні три роки дещо перевищує показники середнього річного приросту за 8 років. Це вказує на те, що для такого типу насаджень ще не настав максимум річного приросту біомаси, після якого доцільно виконувати заготівлю біомаси для отримання максимальної її кількості.

Згідно тенденцій, що проглядаються з аналізу даних таблиці 6, енергетичну біомасу на плантаціях тополі густотою від 5,6 до 8,3 тис. шт./га в досліджуваному регіоні доцільно заготовлювати у віці 9-10 років.

Проведені дослідження виходу твердого біопалива і енергії з 1 га площі енергетичних плантацій верби і тополі показали, що найвищий вихід вербового біопалива виявився у варіанті з густотою 15 тис. шт./га та внесенням добрив – 81,6 т/га, при цьому вихід енергії становив 1305,9 ГДж/га (табл. 7). Високий вихід енергії (1237,3 ГДж/га) зафіксований також у варіанті з густотою садіння 12 тис. шт./га та внесенням мінеральних добрив. За густоти 18 тис. шт./га та внесення добрив вихід енергії становив 1066,6 ГДж/га.

Вихід твердого вербового біопалива на контрольних варіантах (без внесення добрив) змінювався у межах від 50,9 до 58,1 т/га, а вихід енергії при цьому був на рівні 814,9–929,3 ГДж/га.

Таблиця 7

Вихід енергії та твердого біопалива з отриманої біомаси верби

№ з/п	Густота садіння, шт./га	Мінеральне живлення	Збір сухої маси, т/га	Вихід твердого біопалива, т/га	Вихід енергії, ГДж/га
1	12,0	Без добрив	46,8	51,5	823,7
2		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	60,6	66,7	1066,6
3	15,0	Без добрив	52,8	58,1	929,3
4		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	74,2	81,6	1305,9
5	18,0	Без добрив	46,3	50,9	814,9
6		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	70,3	77,3	1237,3

Таким чином, застосування мінеральних добрив збільшує вихід твердого біопалива верби на всіх варіантах дослідів від 15,2 до 26,4 т/га і вихід енергії. – від 142,9 до 422,4 ГДж/га.

Найбільше біопалива тополі було отримано на варіанті з густотою 6,7 тис. шт./га і з застосуванням мінеральних добрив – 146,4 т/га (табл. 8).

Вихід енергії та твердого біопалива з отриманої біомаси тополі

№ з/п	Густота садіння, шт./га	Мінеральне живлення	Збір сухої маси, т/га	Вихід твердого біопалива, т/га	Вихід енергії ГДж /га
1.	8,3	Без добрив	105,6	116,2	1858,6
2.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	118,1	129,9	2078,6
3.	6,7	Без добрив	109,9	120,9	1934,3
4.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	133,1	146,4	2342,6
5.	5,6	Без добрив	107,6	118,4	1893,8
6.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	128,8	141,7	2266,9

При цьому, вихід енергії становив 2342,6 ГДж/га. У варіанті із густотою садіння 8,3 тис. шт./га та внесенням мінеральних добрив вихід енергії становив 2078,6 ГДж/га, а у варіанті із густотою садіння 5,6 тис. шт./га – 2266,9 ГДж/га.

Внесення мінеральних добрив під вирощування плантацій тополі забезпечує збільшення виходу енергії у межах від 220,0 до 408,3 ГДж/га.

Економічну ефективність вирощування енергетичних культур розраховували виходячи із затрат на вирощування та реалізаційної ціни біомаси (згідно реалізаційної ціни ТзОВ «Вербава» м. Рогатин Івано-Франківської обл.).

Проведена економічна оцінка вирощування енергетичних плантацій верби (табл. 9) показала, що найбільший економічний ефект можна отримати за густоти садіння 12 і 15 тис. живців/га та внесення мінеральних добрив. Прибуток у цьому варіанті становив від 49,8 до 52,9 тис. грн/га.

Економічна ефективність вирощування енергетичних плантацій верби залежно від густоти насадження і фону живлення

№ з/п	Густота садіння, шт./га	Мінеральне живлення	Вихід сухої біомаси, т/га	Затрати на вирощування тис. грн/га	Надходження від реалізації тис. грн/га	Умовно чистий прибуток, тис. грн/га
1.	12,0	Без добрив	46,8	60,1	74,9	14,8
2.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	60,6	68,5	96,9	28,5
3.	15,0	Без добрив	52,8	57,3	84,5	27,2
4.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	74,2	65,8	118,7	52,9
5.	18,0	Без добрив	46,3	53,6	74,1	20,5
6.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	70,3	62,7	112,5	49,8

Оскільки економічна ефективність тісно пов'язана з цінами на сировину, матеріали, засоби механізації тощо, які здатні різко змінюватися залежно від стану економіки, попиту та інших чинників, для більш об'єктивної оцінки ефективності вирощування різних культур використовують показник енергетичної ефективності їх вирощування – енергетичний коефіцієнт –

співвідношення енергії акумульованої у врожаї з енергією, яка витрачена на його вирощування.

Результати розрахунку коефіцієнт енергетичної ефективності вирощування плантацій верби залежно від густоти насадження і фону живлення наведені у таблиці 10.

Таблиця 10

Енергетична оцінка вирощування плантацій верби залежно від густоти насадження і фону живлення

№ з/п	Густота садіння, шт./га	Мінеральне живлення	Вихід сухої біомаси, т/га	Затрати сукупної енергії ГДж /га	Вихід енергії ГДж /га	Коефіцієнт енергетичної ефективності
1.	12,0	Без добрив	46,8	142,0	823,7	5,8
2.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	60,6	180,8	1066,6	5,9
3.	15,0	Без добрив	52,8	134,7	929,3	6,9
4.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	74,2	169,6	1305,9	7,7
5.	18,0	Без добрив	46,3	118,1	814,9	6,9
6.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	70,3	150,9	1237,3	8,2

Дані таблиці 10 вказують на те, що вирощування енергетичної біомаси верби є достатньо високоефективним, оскільки витрати енергії на її вирощування у 5,8-8,2 разів менші, ніж кількість акумульованої в ній енергії.

Енергетично найбільш ефективним виявився варіант із густотою садіння живців 12 тис. шт./га та внесенням добрив, за якого коефіцієнт енергетичної ефективності становить 8,2.

Проведена економічна оцінка вирощування енергетичних плантацій тополі залежно від початкової густоти насадження і внесення мінеральних добрив показала, що найбільшим економічний ефект був у варіантах з початковою густотою 5,6 і 6,7 тис. шт./га та внесенням добрив, де було досягнуто прибутку 105,5-132,2 тис. грн./га (табл. 11).

Таблиця 11

Економічна ефективність вирощування енергетичних плантацій тополі залежно від густоти насадження і фону живлення

№ з/п	Густота садіння, шт./га	Мінеральне живлення	Вихід сухої біомаси, т/га	Затрати на вирощування тис. грн/га	Надходження від реалізації тис. грн/га	Умовно чистий прибуток, тис. грн/га
1.	8,3	Без добрив	105,6	75,1	169,0	93,9
2.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	118,1	83,5	188,9	105,5
3.	6,7	Без добрив	109,9	72,3	175,8	103,5
4.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	133,1	80,8	212,9	132,2
5.	5,6	Без добрив	107,6	68,6	172,2	103,6
6.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ + N ₄₀	128,8	77,7	206,1	128,4

В результаті проведених досліджень було встановлено, що вирощування енергетичної біомаси тополі в досліджуваних умовах енергетично вигідніше, ніж вирощування верби, оскільки витрати енергії на вирощування біомаси з тополі у 9,9-13,1 разів менші, ніж кількість акумульованої в ній енергії (табл. 12).

Таблиця 12

Енергетична оцінка вирощування енергетичних плантацій тополі залежно від густоти насадження і фону живлення

№ з/п	Густота садіння, шт./га	Мінеральне живлення	Вихід сухої біомаси, т/га	Затрати сукупної енергії ГДж /га	Вихід енергії ГДж /га	Коефіцієнт енергетичної ефективності
1.	8,3	Без добрив	105,6	172,0	1858,6	10,8
2.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ +	118,1	209,9	2078,6	9,9
3.	6,7	Без добрив	109,9	162,5	1934,2	11,9
4.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ +	133,1	198,8	2342,6	11,7
5.	5,6	Без добрив	107,6	144,6	1893,7	13,1
6.		N ₄₀ P ₃₀₀ K ₃₀₀ +	128,8	182,8	2266,9	12,4

Енергетично найбільш ефективним, виявився варіант із початковою густрою 5,6 тис. шт./га без внесення мінеральних добрив, який забезпечив показник коефіцієнта енергетичної ефективності на рівні 13,1.

Висновки. Дослідження особливостей росту і продуктивності плантацій верби і тополі на середньо суглинкових дернових опідзолених ґрунтах Прикарпаття показали, що найбільша середня висота рослин восьмирічних енергетичних плантацій верби прутувидної спостерігалася за густоти садіння 15 тис. шт./га, де вона становила 9,6 м. Середній діаметр основного пагона при цьому становив 70 мм, кількість пагонів на одній рослині – 3,6 шт., або 54,0 тис. шт./га. Річний приріст за діаметром основного пагона склав 6,9-8,9 мм.

У досліджуваного клону тополі найбільша висота рослин за восьмий рік вегетації зафіксована за густоти садіння 5,6 тис. шт./га – 15,1 м. Діаметр центрального пагона за цього варіанту був на рівні 215 мм, кількість пагонів – 2,5 шт. на 1 рослині, або 30,0 тис. шт. на 1 га.

Внесення комплексу мінеральних добрив (N₈₀P₃₀₀K₃₀₀) посприяло збільшенню висоти рослин на 0,5-1,0 м, а товщини їх пагонів – на 11-22 мм.

Найвища урожайність енергетичної біомаси верби (132,0 т/га сирової маси та 74,2 т/га сухої) виявилася за густоти садіння 15 тис. шт./га та внесення у ґрунт мінеральних добрив. При цьому за восьмий вегетаційний період річний приріст урожайності верби виявився найменшим за всі роки досліджень – від 2,8 т/га за густоти садіння 18,0 тис. шт./га та без внесення добрив до 4,1 т/га за густоти 15,0 тис. шт./га із внесенням добрив.

За восьмирічний період вирощування тополі найвищою врожайністю сухої біомаси (133,1 т/га) відзначався варіант із початковою густрою 6,7 тис. шт./га, що на 15,0 т/га більше порівняно з густрою 8,3 тис. шт./га та на 4,3 т/га більше варіанту з висаджуванням 5,6 тис. шт. живців на 1 га. Внесення добрив забезпечило підвищення урожайності на всіх варіантах досліду від 13,4 до 22,4 т/га сухої біомаси.

За останній, восьмий рік вирощування енергетичної біомаси тополі річний приріст сухої біомаси становив від 14,7 т/га за садіння 8,3 тис. живців на 1 га без внесення добрив до 19,4 т/га за густоти 5,6 тис./га із внесенням мінеральних добрив.

Економічна оцінка ефективності вирощування енергетичної біомаси верби показала, що найбільшим економічний ефект був за густоти садіння 12 та 15 тис. шт./га і внесення мінеральних добрив, де прибуток становив від 49,8 до 52,9 тис. грн./га. Енергетично найбільш ефективним (коефіцієнт енергетичної ефективності – 8,2) виявився варіант із мінімальною густрою садіння живців (12 тис. шт./га) і застосуванням мінеральних добрив.

За вирощування енергетичних плантацій тополі найбільший економічний ефект можна отримати за густоти 5,6 і 6,7 тис. шт./га та внесення мінеральних добрив, де прибуток становив 128,4-132,2 тис. грн./га. За вирощування енергетичної біомаси тополі найвищий показник коефіцієнта енергетичної ефективності – 13,1 отримано за густоти садіння 5,6 тис. шт./га без внесення мінеральних добрив.

На енергетичних плантаціях в регіоні досліджень енергетичну біомасу верби доцільно заготовляти у віці 3-4 роки, а тополі – у віці 9-10 років

References

1. European Parliament, *Renewable Energy Directive (RED II)*, 2022.
2. ER 2019, *Energimyndigheten Drivmedel*, 2018, p. 14.
3. *Energimyndigheten, Komplettering till Kontrollstation 2019 For Reduktionsplikten*, 2019.
4. Bohlenius, H., Ohman, M., Granberg, F., Persson, P.-O. Biomass production and fuel characteristics from long rotation poplar plantations. *Biomass and Bioenergy*. Volume 178, November. 2023. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953423002398?via%3Dihub>
5. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>
6. Nordborg, M., Berndes, G., Dimitriou, I., Henriksson, A., Mola-Yudego, B., Rosenqvist, H. Energy analysis of willow production for bioenergy in Sweden. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 93, 473-482
7. Miyake, S., Smith, C., Peterson, A., McAlpine, C., Renouf, M., & Waters, D. (2015). Environmental implications of using 'underutilised agricultural land' for future bioenergy crop production. *Agricultural Systems*, 139, 180-195. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2015.06.010>.
8. Ruf, T.; Makselon, J., Udelhoven, T., Emmerling, C., Ruf, T., Udelhoven, T. Soil quality indicator response to land-use change from annual to perennial bioenergy cropping systems in Germany. *GCB Bioenergy*. 2018, 10, 444-459.
9. Fuchylo, Y.D., Sbytina, M.V. *Willows of Ukraine: biology, ecology, use: monograph. The second edition, corrected and supplemented*. K.: CPU "Comprint", 2017. 259 p.

10. Sinchenko, V.M., Fuchylo, Y.D., Hanzhenko, O.M., Humentyk, M.Ya., Gnap, I.V., Ivanyuk, I.D. *Introduction of high-yielding varieties of energy willow and technological aspects of its cultivation*. K.: Comprint, 2022. 206 p.

11. Boyko, I.I. *Prospects of growing energy willow for the production of solid biofuel*. *Bioenergetics*. 2017. No. 1 (9). P. 24-26.

12. Fuchylo, Y. D., Litvin, V. M., Sbytna, V. M. *Plantation cultivation of poplar in the conditions of Kyiv Polissia*. Kyiv, 2012. 214 p.

13. Fuchylo Y.D. *etc. Research methodology of willow and poplar energy plantations*. Kyiv: CPU "Comprint", 2018. 137 p.

14. Medvedovsky O. K., Ivanenko P. I. *Energy analysis of intensive technologies in agricultural production*. Kyiv: Urozhai, 1988. 205 p.

N. M. Lys, Y. D. Fuchylo, N. L. Tkachuk

¹*Carpathian State Agricultural Research Station of Institute of Agriculture of the Carpathian Region of the NAAS of Ukraine, Ivano-Frankivsk, Ukraine*

²*Malyny Vocational College, v. Hamarnya, Zhytomyr region, Ukraine*

BIOMASS PRODUCTIVITY OF POPLAR AND WILLOW ENERGY PLANTATIONS DEPENDING ON AGRICULTURAL GROWING TECHNOLOGY

The results of studies of growth, development and productivity of biomass of energy plantations of willow and poplar on medium loamy sod podzolized soils of the Carpathian region are given. It was established that after the end of the eighth growing season, the highest height of the basket willow (9.6 m) is achieved in the version with planting of 15,000 cuttings per 1 ha. The diameter of the main shoot was 70 mm on average, and the number of shoots per plant was 3.6, or 54,000/ha.

In poplar, the greatest height of eight-year-old plants (15.1 m) was found at the initial density of 5.6 thousand plants/ha. The diameter of their main trunk was 215 mm, and the number of trunks per 1 plant was 2.5, or 30,000 per hectare. The introduction of a complex of mineral fertilizers (N₈₀P₃₀₀K₃₀₀) ensured an increase in the height of poplar plants by 0.5-1.0 m, and the thickness of their shoots by 11-22 mm.

The highest productivity of dry willow biomass (74.2 t/ha) was found at an average planting density (15,000 cuttings per 1 ha) and application of mineral fertilizers to the soil. At the same time, in the eighth year of cultivation, the annual increase in willow productivity was the lowest for all years of research - from 2.8 t/ha for planting 18,000 cuttings/ha without fertilizing to 4.1 t/ha - for a density of 15.0 thousand cuttings/ha and application of mineral fertilizers.

Over the eight-year period of poplar growing, the variant with an initial density of 6.7 thousand cuttings/ha had the highest dry biomass yield (133.1 t/ha). This is 15.0 t/ha higher than the yield of the option with a density of 8.3 thousand cuttings/ha and 4.3 t/ha more than the option with planting 5.6 thousand cuttings per 1 ha. The use of fertilizers increased the yield of dry biomass of the tested variants from 13.4 to 22.4 t/ha.

In the last, eighth year, the annual increase in poplar dry biomass was from 14.7 t/ha at a planting density of 8.3 thousand units/ha without the use of fertilizers to 19.4 t/ha in the version with a density of 5.6 thousand /ha and application of fertilizers.

The economic assessment of the efficiency of growing willow energy biomass showed that the greatest economic effect (from 49.8 to 52.9 thousand cuttings/ha) appeared in the options with planting 12 and 15 thousand cuttings/ha and the use of mineral fertilizers. From the energy point of

view, the most effective (energy efficiency coefficient – 8.2) was the option with the minimum plant density (12,000 plants/ha) and the use of mineral fertilizers.

For the cultivation of poplar energy biomass, the highest profit (128.4-132.2 thousand cuttings/ha) can be obtained for the density options of 5.6 and 6.7 thousand cuttings/ha and fertilizer application. The highest indicator of the energy efficiency coefficient when growing poplar was 13.1 at a density of 5.6 thousand pcs./ha without fertilizer application.

Key words: *bioenergy crops; Salix viminalis L.; Populus×Max-4; cuttings; planting density; mineral fertilizers; average diameter; average height; biomass productivity; economic and energy efficiency.*