

# ЕКОНОМІЧНА, ЕНЕРГЕТИЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БІОМАСИ ТОПОЛІ

Я. Д. ФУЧИЛО<sup>2</sup>,

доктор с.-г. наук, професор, завідувач кафедри лісівництва та захисту лісу.  
E-mail: fuchylo\_yar@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-2669-5176>

Я. О. КИРИЛКО,

аспірант. E-mail: yaroslavkirillko@i.ua;  
<http://orcid.org/0009-0008-6167-3788>;

О. М. КОПИШИНСЬКА<sup>1,2</sup>,

викладач. E-mail: oksana.2605.mv@gmail.com;  
<http://orcid.org/0009-0008-8602-2863>

Д. Я. ФУЧИЛО<sup>3</sup>,

магістр лісового господарства. E-mail: friendupdates@facebookmail.com.

<sup>1</sup>Малинський фаховий коледж, с. Гамарня, Житомирська область, Україна

<sup>2</sup>Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків, м. Київ, Україна

<sup>3</sup>Збройні сили України

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку людської цивілізації однією з ключових проблем виступає виснаження запасів викопних джерел енергії за крайш швидких темпів збільшення обсягів використання енергетичних ресурсів. При цьому все це супроводжується різного роду екологічними негараздами, які частково є причиною різких кліматичних змін, що зараз спостерігаються. Все це стимулює наукові дослідження, спрямовані на отримання нових, альтернативних легковідновлюваних джерел енергії.

Проведені дослідження вказують на те, що одним із ефективних способів вирішення цієї проблеми є використання в якості легковідновлюваного джерела енергії біомаси рослин, зокрема — деревини швидкозрослих дерев і кущів [1, 3, 6, 9, 10, 11].

Як вказує М. Dieter [6], щорічно використання деревної маси як джерела енергії на даний час інтенсивно зростає і, згідно проведених розрахунків, до 2030 року збільшиться на 500 млн. м<sup>3</sup> у рік.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Відомо, що серед деревних рослин помірної зони найвищими показниками продуктивності деревної маси відзначається низка видів, гібридів і сортів тополі, в зв'язку з чим, як відзначає R. Stoffel [16], її культивування в Європі відоме ще з початку сімнадцятого століття.

Кращі її насадження, за дотримання належних агротехнічних вимог, здатні продукувати за 1 рік в середньому 20–25 т/га абсолютно сухої біомаси [1, 9, 11, 12, 14], і зараз вона визнана однією з найважливіших рослин для отримання енергетичної сировини [4, 7, 12].

Важливою особливістю тополь є їх здатність до утворення міжвидових гібридів, внаслідок чого на даний час використовуються сотні їх культиварів, які вдається швидко розмножувати завдяки іншій важливій особливості тополь — здатності легко розмножуватися вегетативним шляхом. Серед інших тополь цими здатностями найбільш відзначаються види секцій бальзамічних і чорних тополь, останні з яких

на даний час мають найбільше поширення на тополевих плантаціях [9, 13, 16, 17].

В Італії, де культура тополі розвивається не одну сотню років, вирощування її енергетичної біомаси відбувається за різних схем, які переважно визначаються періодичністю збору врожаю (від щорічної заготівлі до заготівлі через кожні 5–6 років). При цьому простежується тенденція до переходу на більш пізні варіанти ротації [13]. Американські дослідники вважають доцільними ще більш тривалі терміни вирощування тополевої енергетичної біомаси — до 10 років [11, 17]. Підвищення періоду вирощування дозволяє підвищити концентрацію біомаси під час її збирання та зменшити собівартість заготівлі біомаси [15, 16].

Метою досліджень було вивчення особливостей росту, продуктивності біомаси, економічної, енергетичної та екологічної ефективності середньо-ротаційних плантацій тополі культивару "Robusta" в умовах Правобережного Лісогоспу України.

**Матеріали та методи досліджень.** Дослідження особливостей росту та продуктивності тополі (культивар "Robusta") були проведені протягом 2019–2022 років на Дослідному полі ІБКІЦБ НААН (с. Ксаверівка Друга Білоцерківського району Київської області).

Дослідні насадження були створені у квітні 2019 року однорічними здерев'янілими живцями довжиною 25 см і діаметром у верхньому зрізі від 0,8 до 1,0 см. Безпосередньо перед проведенням садіння живців була проведена передсадивна культивування. Схема розміщення садивних місць становила: 2,0x0,8 м у густішому варіанті та 2,0x0,9 м — у рідкішому.

Через два тижні було виконане перше розпушування ґрунту культиватором із одночасним знищенням бур'янів. Проведення протягом пер-

шої половини періоду вегетації ще двох культивувань дозволило майже повністю знищити бур'яни у міжряддях.

Для контролю бур'янів у рядках виконувалося ручне прополювання, що у подальшому забезпечило інтенсивний ріст надземної частини саджанців.

Восени, після завершення кожного періоду вегетації, за традиційними методиками [8, 10] проводилися дослідження укорінення живців, збереженості рослин та їхніх морфометричних характеристик.

**Результати дослідження та їх обговорення.**

Після першого періоду вегетації на дослідних ділянках відбулася загибель значної кількості саджанців. Це сталося через проведення косіння бур'янів за допомогою мотокоши (тримера) і недотримання захисної зони біля саджанців, внаслідок чого була пошкоджена їх кора. На дослідній ділянці № 1 загинуло 27% живців, а на № 2–24% (табл. 1).

На кінець другого року вирощування у густому варіанті залишилося 4094 деревця (64,4% від їх початкової густоти), а на рідкому — 3004 шт. або 53,2%. Протягом третього року вирощування збереженість рослин тополі зменшилася несуттєво (у обох варіантах — на 0,6%), а протягом четвертого — загибелі дерев не спостерігалася. Слід відзначити, що внаслідок інтенсивного росту дерев тополі й повного затінення їх кронами поверхні ґрунту, протягом третього року в досліджуваних насадженнях майже повністю зникли бур'яни.

Після першого року вирощування висота рослин тополі на обох варіантах була однаковою й становила 1,6±0,05 м (табл. 2).

За другий рік їх приріст за висотою становив: у рідкішого варіанту на рівні 2,0±0,05 м,

Таблиця 1

Приживлюваність живців і збереженість рослин чотирирічних плантацій тополі сорту "Robusta" на вилугуваних чорноземах

№ дослідної ділянки	Кількість садивних місць, шт./га	Кількість рослин за роками, шт./га Приживлюваність (збереженість), %			
		1 (2019 р.)	2(2020 р.)	3 (2021 р.)	4 (2022 р.)
1	6342	4631 73,0	4094 64,6	4060 64,0	4060 64,0
2	5650	4305 76,2	3004 53,2	2915 51,6	2915 51,6

Таблиця 2

Динаміка середньої висоти рослин чотирирічних плантацій тополі сорту "Robusta" на вилугуваних чорноземах

№ дослідної ділянки	Кількість садивних місць, шт./га	Середня висота рослин за роками, м Річний приріст за висотою, м			
		2019 р.	2020 р.	2021 р.	2022 р.
1	6342	1,6±0,03 1,6	3,7±0,06 2,1	6,8±0,09 3,1	8,0±0,16 1,2
2	5650	1,6±0,05 1,6	3,6±0,07 2,0	6,6±0,12 3,0	7,7±0,22 1,1

а у більш густого — 2,1±0,05 м.

Протягом третього вегетаційного періоду висота збільшилася, відповідно, на 3,1 та 3,0 м, а їхня середня висота досягла, відповідно, 6,8 та 6,6 м.

За наступний рік швидкість росту рослин тополі за висотою суттєво сповільнилася (до 1,2 та 1,1 м відповідно) і висота чотирирічних насаджень склала 8,0±0,16 м на густому варіанті та 7,7±0,22 м — на більш рідкому.

Внаслідок більшої кількості рослин на 1 га, врожайність енергетичної біомаси виявилася вищою на більш густому варіанті (ділянка 1) (табл. 3).

Як видно з наведених даних, за перших 4 роки існування плантацій вищими показниками продуктивності відзначається варіант з більшою початковою густиною, його перевага становить від 16 до 32%. При цьому найменша різниця (16%) спостерігається на четвертий рік, що вказує на поступове вирівнювання врожайності біомаси досліджуваних насаджень, хоча на цей час (протягом четвертого року вирощування) врожайність біомаси інтенсивно зростає. Це вказує на недоцільність збирання енергетичної біомаси на досліджуваних плантаціях у віці 4 роки, оскільки вони ще не досягли максимуму продуктивності.

Одним із основних аспектів, який забезпечує екологічну ефективність плантаційного вирощування енергетичної біомаси тополі, є прискорене накопичення плантаційними насадженнями деревної маси, що супроводжується, відповідно, більшим поглинанням ними в процесі фотосинтезу вуглекислого газу та виділенням більшої кількості кисню, порівняно з менш швидкозростаючими деревами й чагарниками. Відомо, що на утворення однієї тонни абсолютно сухої маси деревини, незалежно від деревного виду, поглинається у середньому 1,83 тонни CO<sub>2</sub> і виділяється 1,32 тонни кисню [10].

Проведені нами на основі даних таблиці 3.8 розрахунки показали, що всього за 4 роки досліджувані нами тополеві енергетичні плантації сорту "Robusta" на формування надземної деревної маси поглинають з атмосфери 47–55 т/га вуглекислого газу та виділяють 34–40 т/га кисню (табл. 4).

Особливо інтенсивно процеси накопичення деревної енергетичної біомаси і, відповідно, поглинання вуглекислоти й виділення кисню спостерігалися на третій і, особливо, на четвертий роки вирощування, коли ці показники зростали щорічно більш ніж удвічі.

Крім надземної деревної біомаси важливо враховувати також біомасу кореневих систем та масу листя, яке щорічно опадає на поверхню ґрунту, перегниває й збагачує орний шар органікою та поживними елементами.

Як показали наші дослідження, після четвертого вегетаційного періоду на ґрунт під насадженнями енергетичної тополі опало від 3,6 до 4,2 т/га сухої листяної біомаси (табл. 5).

Як видно з наведених даних, ця значна кількість органіки, що за 1–2 роки перетворюється у гумус, містить також достатньо велику кількість макроелементів живлення, які також значно підвищують родючість ґрунту.

Дещо більша кількість листяного опаду виявилася у варіанті з вищою щільністю стояння рослин, що значною мірою корелює з вищою продуктивністю енергетичної біомаси. За приблизно однакового хімічного складу опалого листя, більша кількість макроелементів також потрапила на ґрунтову поверхню густішого варіанту. При цьому ґрунт збагатився на значну кількість азоту (96,4 кг/га), калію (62,9 кг/га) та кальцію (76,3 кг/га). Вміст фосфору в опаді виявився незначним — 10,1 кг/га.

Таким чином, при плантаційному вирощу-

ванні енергетичної біомаси тополі можна отримати високий екологічний ефект, пов'язаний з невиснажливим використанням ґрунтових умов та рядом інших корисних впливів, що позитивно позначаються на довкіллі: захист території від вітрової та водної ерозії, затримання вологи в ґрунті, біологічна консервація земель тощо.

Вирощування енергетичної біомаси тополі можливе також на більш зручних для вирощу-

вання її високопродуктивних насаджень умовах, зокрема — у полежахисних лісосмугах. Як вважають науковці ІБКЦБ НААН, для цього класичні полежахисні насадження слід трансформувати, увівши до їх складу швидкозростаючі деревні види, зокрема — тополі, яка здатна забезпечити достатньо високу ефективність лісосмуг практично з перших років їх існування, а надалі — її дерева з певною періодичністю че-

**Таблиця 3**
**Продуктивність плантації тополі сорту "Robusta" на вилугуваних чорноземах протягом перших чотирьох років вирощування**

№ дослідної ділянки	Кількість садивних місць, шт./га	Кількість дерев, шт./га	Сира маса одного дерева, кг	Вихід сирової біомаси, т/га	Вихід сухої біомаси, т/га
У віці 1 рік					
1.	6342	4631	0,15	0,69	0,35
2.	5650	4305	0,13	0,56	0,28
У віці 2 роки					
1.	6342	4094	1,45	5,94	2,97
2.	5650	3004	1,50	4,51	2,25
У віці 3 роки					
1.	6342	4060	7,18	29,15	14,58
2.	5650	2915	8,00	23,32	11,66
У віці 4 роки					
1.	6342	4060	14,75	59,89	29,94
2.	5650	2915	17,69	51,57	25,78

**Таблиця 4**
**Поглинання вуглекислого газу та виділення кисню плантаціями тополі культувару "Robusta" на вилугуваних чорноземах протягом перших чотирьох років вирощування**

№ дослідної ділянки	Кількість садивних місць, шт./га	Кількість дерев, шт./га	Вихід сухої біомаси, т/га	Кількість CO <sub>2</sub> , поглинутого на утворення біомаси, т/га	Кількість кисню, що виділився в процесі фотосинтезу, т/га
Перший рік					
1.	6342	4631	0,35	0,64	0,46
2.	5650	4305	0,28	0,51	0,37
Другий рік					
1.	6342	4094	2,97	5,44	3,92
2.	5650	3004	2,25	4,12	2,97
Третій рік					
1.	6342	4060	14,58	26,68	19,25
2.	5650	2915	11,66	21,34	15,39
Четвертий рік					
1.	6342	4060	29,94	54,79	39,52
2.	5650	2915	25,78	47,18	34,03

**Таблиця 5**
**Вміст елементів живлення у листяному опаді 4-річних плантацій тополі сорту "Robusta" на вилугуваних чорноземах**

№ дослідної ділянки	Кількість рослин, шт./га	Маса сухого листяного опаду, т/га	Вміст елементів живлення, кг/га			
			N	P	K	Ca
1.	4060	4,19	96,4	10,1	62,9	76,3
2.	2915	3,61	83,0	8,7	54,2	65,7

рез певну кількість рядів можна зрізати задля отримання енергетичної біомаси.

Також схожого типу насадження тополі більшої чи меншої ширини можна використовувати в умовах гідрографічної мережі для захисту річок та інших водойм від замулювання та припинення ерозії ґрунтів. При цьому, зважаючи на значну вологолюбність тополі, можна налагодити високоефективне отримання великої кількості енергетичної біомаси із забезпеченням повного виконання ними пользахисних функцій.

Економічна ефективність вирощування плантацій тополі залежить від собівартості (витрат на їх створення й догляд за ними, вартості заготівлі енергетичної біомаси та урожайності насаджень) і ціни на енергетичну біомасу на час її заготівлі.

Станом на 2022–2023 роки вартість 1 тонни сухої біомаси становить в середньому 1600 грн, а вартість теплової енергії — 1654,41 грн

за 1 Гкал.

Результати розрахунку вартості біомаси та енергії, яка в ній міститься, за роками вирощування, наведені у таблиці 6.

Як видно з наведених даних, синхронно із збільшенням урожайності енергетичної біомаси з кожним роком досліджень, стрімко зростає її вартість. При цьому, вартість енергії, що в ній міститься значно (у 4,4 рази) переважає вартість самої енергетичної біомаси. Це вказує на те, що підприємства-виробники енергетичної біомаси для підвищення економічної ефективності своєї діяльності повинні максимально налаштувати перероблення біомаси для реалізації не самої біомаси, а теплової чи іншої енергії, отриманої з неї.

Різке збільшення вартості біомаси протягом чотирьох років вирощування вказує на доцільність більш тривалого періоду вирощування таких насаджень для отримання максимальної

економічної вигоди.

За чотири роки вартість урожаю більш густого варіанту мінімум ще в наступні два роки буде більшою на плантації з початковою густотою 6,3 тис. шт./га, порівняно з густотою 5,7 тис. шт./га.

Певному зниженню собівартості створення енергетичних плантацій тополі, з використанням у якості садивного матеріалу однорічних живцевих саджанців, може служити висаджування саджанців без надземної частини (без стовбурів). Крім вищої приживлюваності такого матеріалу та більш інтенсивного росту, за його застосування вивільняються однорічні стовбури, з яких можна заготовити однорічні стандартні живці. Для розрахунків ми використали дані середньої висоти однорічних живцевих саджанців за роками досліджень, наведених у таблицях 3.2–3.4; початкову густоту енергетичної плантації 6,3 тис. шт./га. Та вартість 1 стандартного живця (довжиною 25 см) — 2,12 грн. Результати розрахунку додаткового прибутку від заготівлі живців зі зрізаних стовбурів однорічних живцевих саджанців наведені у таблиці 7.

Таким чином зрізання надземної частини живцевих саджанців та її використання для заготівлі живців може мати значний прибуток, який оцінюється на рівні від 64 до 80 тис. грн. на 1 га.

Вихід енергії з одного гектара та її вартість (табл. 6) вказує на значну економічну ефективність вирощування енергетичних плантацій. Для більш об'єктивнішої оцінки ефективності вирощування різних культур використовують показник енергетичної ефективності технологій їх вирощування — енергетичний коефіцієнт, який являє собою співвідношення енергії, акумульованої у врожаї з енергією, витраченою на його вирощування та заготівлю (табл. 8).

Результати проведених досліджень свідчать, що кількість енергії, яка міститься у вирощеній біомасі тополі, у 6,1–7,4 разів перевищує витрати енергії на її вирощування. Найефективнішим виявився варіант із густотою садіння 6,3 тис. шт./га, за якого коефіцієнт енергетичної ефективності становив 7,4.

**Висновки.** Дослідження чотирирічних енергетичних плантацій культивуvarу "Robusta", що були створені однорічними живцями з розміщенням садивних місць 2,0x0,8 та 2,0x0,9 м на малогумусних чорноземах Правобережного Лісостепу України, дозволили з'ясувати, що після чотирьох років вирощування з одного гектара таких плантацій можна отримати 25,78–29,94 тонн сухої біомаси, що еквівалентно 458,8–532,8 ГДж енергії.

Встановлено, що за цей час енергетичні плантації на формування надземної деревної маси поглинули з атмосфери 47–55 т/га вуглекислого газу та виділили 34–40 т/га кисню. Крім того, після четвертого вегетаційного періоду на ґрунт під насадженнями енергетичної тополі опало від 3,6 до 4,2 т/га сухої листяної біомаси і він збагатився на значну кількість азоту (83,0–96,4 кг/га), калію (54,2–62,9 кг/га) та кальцію (65,7–76,3 кг/га). Вміст фосфору в опаді виявився незначним — від 8,7 до 10,1 кг/га.

Із збільшенням урожайності енергетичної біомаси з кожним роком, стрімко зростає її вартість. При цьому, вартість енергії, що в ній міститься, значно (у 4,4 рази) переважає вартість самої енергетичної біомаси. Різке зростання у четвертому році вартості біомаси вказує на доцільність тривалішого (5–6-річного) циклу вирощування енергетичних плантацій тополі для отримання максимального економічного ефекту.

Енергетично найефективнішим, серед використаних у дослідженнях, є варіант із густотою садіння 6,3 тис. шт./га, за якого коефіцієнт енергетичної ефективності досягає 7,4.

Таблиця 6

**Вартість біомаси та енергії з неї на середньо-ротаційних плантаціях тополі сорту "Robusta" на вилугуваних чорноземах за роками**

№ дослідної ділянки	Кількість садивних місць, шт./га	Урожайність сирової біомаси, т/га	Урожайність сухої біомаси, т/га	Вартість сухої біомаси, грн./га	Вихід енергії, ГДж/га	Вартість енергії, грн./га
Перший рік						
1.	6342	0,69	0,35	560	6,23	2454
2.	5650	0,56	0,28	448	4,98	1962
Другий рік						
1.	6342	5,94	2,97	4752	52,85	20818
2.	5650	4,51	2,25	3600	40,04	15772
Третій рік						
1.	6342	29,15	14,58	23328	259,5	102218
2.	5650	23,32	11,66	18656	207,5	81736
Четвертий рік						
1.	6342	59,89	29,94	47904	532,8	209874
2.	5650	51,57	25,78	41248	458,8	180725

Таблиця 7

**Розрахунок додаткового прибутку від заготівлі живців зі зрізаних стовбурів однорічних живцевих саджанців при створенні плантацій тополі**

Культивари	Густота садіння, тис. шт./га	Середня висота живцевих саджанців, см	Кількість отриманих живців, тис. шт./га	Вартість одного живця, грн	Прогнозований прибуток від реалізації живців, грн/га
'Dorskamp'	6,3	158,7	37,8	2,12	80136
'Robusta'	6,3	149,4	31,5	2,12	66780
'I-45/51'	6,3	137,6	30,1	2,12	63812

Таблиця 8

**Енергетична ефективність чотирирічних середньо-ротаційних плантацій тополі культивуvarу "Robusta" на вилугуваних чорноземах**

№ дослідної ділянки	Кількість садивних місць, шт./га	Урожайність сухої біомаси, т/га	Затрати сукупної енергії ГДж /га	Вихід енергії, ГДж/га	Коефіцієнт енергет. ефективності
1.	6342	29,94	72,3	532,8	7,4
2.	5650	25,78	68,6	458,8	6,1



**REFERENCES**

- Aylott, M. J., Casella, E., Tubby, I. et al. (2008). Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-cutting cycle coppice in the UK. *New Phytol.* 178 (2), 358–370. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02396.x>
- Bratovich, R., Marlats, R. M., Mikelaite, H. (1996). Relación juvenil-adulto de crecimientos en alturas, diámetros y volúmenes de clones provenientes de cruzamientos contrados intr e interespecificos de *Populus* sp. *Rev. Fite, agron. Univ. nac. La Plata.* 1996. 101, № 1. 7–13.
- Broeckx, L. S., Verlinden, M. S., & Ceulemans, R. (2012). Establishment and two-year growth of a bio-energy plantation with fast-growing *Populus* trees in Flanders (Belgium): effects of genotype and former land use. *Biomass Bioenerg.* 42. 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.005>
- Debryniuk, Iu. M., & Fuchylo, Ya. D. (2020). Plantation forests in Ukraine: conceptual foundations, resource potential and energy use. Lviv: Galicia Publishing Union. (in Ukrainian).
- Desrochers, A. & Thomas, B. R. (2003). A comparison of pre-planting treatments on hardwood cuttings of four hybrid poplar clones. *New forests.* Vol. 26. Iss. 1. P. 17–32. [doi:10.1023/A:1024492103150](https://doi.org/10.1023/A:1024492103150)
- Dieter, M. (2016). *Poplars and Other Fast-Growing Trees — Renewable Resources for Future Green Economies.* 25th Session of the International Poplar Commission: Working Paper IPC/15 (Berlin, 13–16 Sept. 2016). Rome: FAO. 19 p. URL: <https://www.fao.org/forestry/45092-0fcd1e7430938785c3e2c0a0a03329a88.pdf>
- El Bassam N. (2010). *Handbook of Bioenergy Crops A Complete Reference to Species, Development and Applications.* MPG Books, an ISO 14001 accredited company, UK. 545 p.
- Fuchylo, Y. D., Sinchenko, V. M., Hanzhenko, O. M., Humentyko, M. Y., Pyrkin, V. I., Prysiazhniuk, O. I. ... & Tkachenko, A. M. (2018). The methodology of the study of willow and poplar energy plantations. Kyiv: Komprint. (in Ukrainian).
- Fuchylo Ya. D., Sbytna M. V., Fuchylo O. Ya., & Litvin V. M. (2009). Experience and aspects of growing poplar (*Populus* sp. L.) in the Southern Steppe of Ukraine. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine,* 7. 66–69. (in Ukrainian)
- Fuchylo Ya. D., Litvin V. M., & Sbytna M. V. (2012). Biological, ecological and technological aspects of poplar plantations cultivation in the conditions of Kyiv Polissya. Kyiv: Logos. (in Ukrainian).
- Keoleian, G. A. & Volk, T. A. (2005). *Renewable Energy from Willow Biomass Crops: Life Cycle Energy, Environmental and Economic Performance.* *Critical Reviews in Plant Sciences* 24. 385–406.
- Mann, J. (2012.). *Comparison of Yield, Calorific Value and Ash Content in Woody and Herbaceous Biomass used for Bioenergy Production in Southern Ontario, Canada.* A Thesis Presented to The University of Guelph. Guelph, Ontario, Canada, 106 p. URL: <https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/3959/Mann%20Thesis%20Defense%20Revised%20B.202.pdf?sequence=1>
- Spinelli, R. (2007). Short rotation coppice production in Italy. *Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 61.* Potsdam-Bornim, Germany. 158–167.
- Spinelli, R., Natti, C., & Magagnotti, N. (2008). Harvesting short-rotation poplar plantations for biomass production. *Croatian Journal of Forest Engineering.* 29.2. 129–139.
- Spinelli, R., Natti, C., & Magagnotti, N. (2009). Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. *Biomass and Bioenergy.* 33.5: 817–821.
- Stoffel, R. (2008). Short rotation woody crops — Hybrid poplar. [https://www.forestry.umn.edu/sites/forestry.umn.edu/files/cfans\\_asset\\_356341.pdf](https://www.forestry.umn.edu/sites/forestry.umn.edu/files/cfans_asset_356341.pdf)
- Volk, T. A., Berguson, B., Daly, C. et al. (2018). Poplar and shrub willow energy crops in the United States: field trial results from the multiyear regional feedstock partnership and yield potential maps based on the PRISM-ELM model. *Global Change Biology Bioenergy.* 10 (10). 735–751. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12498>
- Zalesny, R. S., Bauer, E. O., Hall, R. B., Zalesny, J. A., Kunzman, J., Rog, C. J. & Riemenschneider, D. E. (2005). Clonal variation in survival and growth of hybrid poplar and willow in an in situ trial on soils heavily contaminated with petroleum hydrocarbons. *International Journal of Phytoremediation.* 7, 177–197. <https://doi.org/10.1080/16226510500214632>
- Zalesny, R., Hall, R., Bauer, E. & Riemenschneider D. (2006). Shoot Position Affects Root Initiation and Growth of Dormant Unrooted Cuttings of *Populus*. *Silvae Genetica.* 52 (5). 273–279.
- Zalesny, S. & Wiese, A. (2006). Date of Shoot Collection, Genotype, and Original Shoot Position Affect Early Rooting of Dormant Hardwood Cuttings of *Populus*. *Silvae Genetica.* 55(4–5). 169–182.

**АНОТАЦІЯ**

УДК 630\*2:630\*18

**Економічна, енергетична та екологічна ефективність вирощування енергетичної біомаси тополі**

 Я. Д. Фучило<sup>1, 2</sup>, Я. О. Кирилко<sup>2</sup>, О. М. Копишинська<sup>1, 2</sup>, Д. Я. Фучило<sup>3</sup>
<sup>1</sup>Малинський фаховий коледж, с. Гамарня, Житомирська область, Україна

<sup>2</sup>Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків, м. Київ, Україна

<sup>3</sup>Збройні сили України

Наведено результати чотирирічних досліджень росту енергетичних плантацій тополі сорту “Robusta” на вилугуваних чорноземах Правобережного Лісостепу, створених одоричними живцями завдовжки 25 см і діаметром 0,8–1,0 см. Схема садіння — 2,0x0,8 м та 2,0x0,9 м. В кінці першого року вирощування рослини на обох ділянках в середньому мали висоту 1,6 м. За другий рік приріст за висотою в рідкішого варіанту стано-

вив 2,0±0,05 м, а за вищої густоти рослин — 2,1±0,05 м. Упродовж третього року вирощування приріст досяг максимальних показників і становив, відповідно, 3,1 та 3,0 м, при цьому середня висота рослин досягла показників 6,8 та 6,6 м відповідно. За четвертий рік вегетації ріст рослин тополі за висотою суттєво сповільнився і становив, відповідно, 1,2 та 1,1 м. При цьому показники середньої висоти чотирирічних насаджень склали 8,0±0,16 м на густому варіанті та 7,7±0,22 м — на більш рідкому. Встановлено, що з трирічної плантації культивуру “Robusta”, створеної живцями, з 1 га можна отримати від 11,66 до 14,58 тонн сухої біомаси, або відповідно — від 207,5 до 259,5 ГДж енергії, а після четвертого року — від 25,78 до 29,94 т/га, що відповідає від 458,8 до 532,8 ГДж/га. Значне збільшення інтенсивності росту й урожайності біомаси енергетичних плантацій культивуру “Robusta” протягом четвертого періоду вегетації вказує, що для отримання максимальної врожайності біомаси доцільно застосовувати 5–6-річний термін вирощування таких плантацій.

Встановлено, що за 4 роки досліджувані тополеві плантації клону “Robusta” поглинають з атмосфери на формування деревної маси 47–55 т/га вуглекислого газу та вивільняють 34–40 т/га кисню. Після четвертого вегетаційного періоду на поверхню ґрунту під цими насадженнями опало від 3,6 до 4,2 т/га сухої листяної біомаси. Вона містить значну кількість азоту (96,4 кг/га), калію (62,9 кг/га) та кальцію (76,3 кг/га). Вміст фосфору в листяному опаді був незначним — 10,1 кг/га.

Вирощування енергетичної тополі передбачається на сільськогосподарських невіддідах, але воно можливе й на більш багатих землях, зокрема — в ползахисних лісосмугах, де можна налагодити високоефективне вирощування енергетичної біомаси одночасно з виконанням ними в повному обсязі екологічних функцій.

Із збільшенням урожайності енергетичної біомаси з кожним роком досліджень, стрімко зростає її вартість. При цьому вартість енергії, що в ній міститься, значно (в 4,4 рази) переважає вартість самої енергетичної біомаси. Зрізання надземної частини саджанців тополі та заготівля з неї живців може дати значний прибуток — на рівні від 64 до 80 тис. грн на 1 га. Енергетично найбільш ефективним виявився варіант із щільністю садіння 6,3 тис. шт./га, за якого коефіцієнт енергетичної ефективності становить 7,4.

**Ключові слова:** біоенергетика; *Populus* L.; культивар “Robusta”; живці; живцеві саджанці; приживлюваність; середня висота; середній діаметр; продуктивність біомаси; економічна, енергетична, екологічна ефективність

**ABSTRACT**
**Economic, energy and environmental efficiency of growing of energy poplar for biomass**

 Ya. Fuchylo<sup>1, 2</sup>, Y. Kyrylko<sup>2</sup>, O. Kopyshynska<sup>1, 2</sup>, D. Fuchylo<sup>3</sup>
<sup>1</sup>Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Malyn Vocational College, Hamarnya, Zhytomyr region, Ukraine

<sup>3</sup>Armed Forces of Ukraine

The results of four-year research on the growth of energy plantations of the ‘Robusta’ variety on the Right Bank Forest Steppe, created by one-year lignified cuttings 25 cm long and 0.8–1.0 cm in diameter, are given. The planting scheme is 2.0 x 0.8 m and 2.0 x 0.9 m.

In the second year, their annual increase in height in the less density variant was 2.0 ± 0.05 m, and in the case of a higher plant stand density 2.1 ± 0.05 m. During the third growing season, the increase reached indicators of 3.1 and 3.0 m, respectively, and the average height of plants increased to 6.8 and 6.6 m, respectively. During the fourth year of vegetation, the growth of poplar plants in height slowed down significantly and amounted to 1.2 and 1.1 m, respectively. At the same time, the average height of four-year plantations was 8.0 ± 0.16 m in the thick version and 7.7 ± 0.22 m in a more dense one.

It was established that after three years of growing a poplar plantation of the cultivar ‘Robusta’ established by cuttings, from 1 hectare from 11.66 to 14.58 tons of dry biomass can be obtained or, accordingly, from 207.5 to 259.5 GJ of energy, and after in the fourth year — from 25.78 to 29.94 t/ha, which corresponds to 458.8 to 532.8 GJ/ha of energy. A significant increase in growth indicators and biomass productivity of energy plantations of poplar variety ‘Robusta’ during the fourth year of cultivation indicates the expediency of using a 5–6-year period of cultivation of such plantations to obtain the maximum amount of biomass.

It was established that for 4 years the studied poplar plantations of the ‘Robusta’ clone absorbed 47–55 t/ha of carbon dioxide from the atmosphere and released 34–40 t/ha of oxygen for the formation of wood mass. After the fourth growing season, from 3.6 to 4.2 t/ha of dry leafy biomass fell to the soil surface under these plantations. It contains a significant amount of nitrogen (96.4 kg/ha), potassium (62.9 kg/ha) and calcium (76.3 kg/ha). The content of phosphorus in leaf litter was insignificant: 10.1 kg/ha.

The cultivation of energy poplar is envisaged on agricultural wastelands, but it is also possible on richer lands, in particular in field protection forest strips, where it is possible to establish a highly efficient cultivation of energy biomass simultaneously their full ecological functions.

As the yield of energy biomass increases with each year of research, its value is increasing rapidly. At the same time, the cost of the energy contained in biomass significantly (by 4.4 times) outweighs the cost of the energy biomass itself. Cutting the aboveground part of poplar seedlings and harvesting cuttings from it can give a significant profit at the level of 64 to 80 thousand UAH per 1 ha. The option with a plant density of 6.3 thousand units/ha, for which the energy efficiency was 7.4, turned out to be the most energy efficient.

**Keywords:** bioenergy; *Populus* L.; cultivar ‘Robusta’; cuttings, cutting seedlings; survival rate, average height; average diameter; biomass productivity; economic, energy, environmental efficiency.