

УДК 620.92

ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОЇ ЕНЕРГІЇ З ТРІСКИ БІОМАСИ SALIX VIMINALIS L. В УКРАЇНІ

Трибой О.В.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

Представлено результати оцінки життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски *Salix Viminalis L.* Оцінено енергетичну ефективність та скорочення викидів парникових газів. Проаналізовано вплив найбільш вагомих параметрів та визначено оптимальні співвідношення для забезпечення максимальної енергетичної ефективності та екологічної сталості.

Представлены результаты оценки жизненного цикла производства тепловой энергии из щепы *Salix Viminalis L.* Проведена оценка энергетической эффективности и сокращения выбросов парниковых газов. Проанализировано влияние наиболее значимых параметров и определены оптимальные соотношения для обеспечения максимальной энергетической эффективности и экологической устойчивости.

The results of the life cycle assessment of heat production from willow chips of *Salix Viminalis L.* are presented. Energy efficiency and greenhouse gas emissions reduction are estimated. The influence of the most significant parameters is analyzed and optimal relationships are determined to ensure maximum energy efficiency and environmental sustainability.

Ключові слова: оцінка життєвого циклу, енергетичні культури, виробництво теплової енергії, енергетична оцінка, екологічна оцінка, біомаса, біопаливо, тріска, верба, *Salix Viminalis L.*

Бібл. 15, табл. 5, рис. 1.

СЕД – сукупні витрати енергії;
 CE_{NR} – сукупні витрати невідновлюваної енергії;
 ЕУС – коефіцієнт перетворення енергії;
 E_{NR} – коефіцієнт перетворення невідновлюваної енергії;
 ЛСА – оцінка життєвого циклу;
 ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
 ВКЕС – валове кінцеве енергоспоживання;

ЗППЕ – загальне постачання первинної енергії;
 КАС – калій-амонійна селітра;
 НПДВЕ – Національний план дій з відновлюваної енергетики;
 ОЖЦ – оцінка життєвого циклу;
 ПГ – парникові гази;
 н.е. – нафтовий еквівалент.

Про актуальність роботи свідчить необхідність зменшення споживання викопних палив, зокрема, природного газу в Україні, а також виконання зобов'язань в рамках Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року (НПДВЕ) та Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Серед зобов'язань цих стратегічних документів, зокрема, забезпечення 11% відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у валовому кінцевому енергоспоживанні (ВКЕС) до 2020 р. та 25% ВДЕ у загальному постачанні первинної енергії (ЗППЕ) до 2035 р., з яких майже 11,5% за рахунок «біомаси, біопалив та відходів». Станом на 2016 рік, внесок «біомаси, біопалив та відходів» у ЗППЕ складав 3,1% [1]. Досягти наміченого показника у 11,5% можливо лише за активного залучення біомаси в енергетичний баланс України, а саме у сектор виробництва і постачання теплової енергії. Таким потенційним джерелом стабільного постачання біомаси можуть стати енергетичні культури. Станом на 2015 рік під енергетичними культурами в Україні були зайняті лише 4190 га земель [2], хоча за даними Держкомстату України існує близько 4 млн га малопродуктивних сільськогосподарських земель, які потенційно можуть бути використані під плантації енергетичних культур [3].

Про перспективність напрямку з вирощування енергетичних культур свідчать і дані Європейської біомасової асоціації АЕВІОМ, відповідно до яких сумарна площа енергетичних культур, що вирощувалися у країнах ЄС у 2017 році, склала 50764 га [4]. Вирощуються переважно ті енергетичні культури, які добре засвідчили свою врожайність за певних кліматичних умов. Для континентальної зони – це верба, тополя, міскантус, двокісточник тростинний, сорго; для півночі Середземномор'я – тополя, міскантус; для півдня Середземномор'я – арундо тростинний, евкаліпт [5].

Можливим стримуючим фактором для широкого вирощування енергетичних культур в Україні є невирішеність питання енергетичної ефективності життєвого циклу вирощування енергетичних культур та їх використання для виробництва теплової енергії, а також екологічної сталості таких біоенергетичних ланцюжків. Для комплексного дослідження біоенергетичних ланцюжків від вирощування до використання та визначення найбільш життєздатних біоенергетичних систем застосовують методологію оцінки життєвого циклу (ОЖЦ, англ. LCA – life cycle assessment). Узагальнююча оцінка робіт з ОЖЦ біоенергетичних технологій (близько 100 робіт), виконаних протягом 15 років показала, що більшість досліджень використовують розрахунок споживання первинної енергії та викидів парникових газів у

якості показників відповідно енергетичної ефективності та екологічної сталості [6]. Наявні дослідження, що використовують методологію ОЖЦ для енергетичних культур, досліджують переважно сировинний цикл від посадки до збору врожаю [7] або виробництва біопалив [8]. Виходячи з інформації щодо відсутності аналогічних досліджень щодо вирощування та використання енергетичних культур для виробництва енергії для України, видається необхідним проведення оцінки життєвого циклу таких біоенергетичних ланцюжків, використовуючи у якості критеріїв показники – енергетичної ефективності та балансу парникових газів.

Методика оцінки енергетичної ефективності життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски *Salix Viminalis L.*

Мета даного дослідження – визначити сукупні витрати енергії і сукупні витрати невідновлюваної енергії, а також викиди парникових газів життєвого циклу використання біомаси верби *Salix Viminalis L.* у вигляді тріски для виробництва теплової енергії в Україні, оцінити вплив найбільш критичних параметрів на коефіцієнт перетворення невідновлюваної енергії у життєвому циклі, та порівняти з життєвим циклом виробництва теплової енергії з природного газу.

Для оцінки енергетичної ефективності та екологічної сталості використання біомаси плантацій верби *Salix Viminalis L.* для виробництва теплової енергії застосовано методологію оцінки життєвого циклу (ОЖЦ) (ДСТУ ISO 14040:2013). Відповідно до методології ОЖЦ розглянуто повний цикл або інакше систему продукту від вирощування *Salix Viminalis L.* до отримання кінцевого продукту у вигляді теплової енергії у котельній установці із врахуванням матеріальних та енергетичних потоків усіх технологічних процесів сировинного циклу та підсистеми перетворення (рис. 1).

У якості показника енергетичної ефективності використано коефіцієнт перетворення невідновлюваної енергії $E_{UC_{NR}}$ [9], який показує у скільки разів енергії

на виході (СЕР) (див. рівняння (1) та (2)) із системи продукту отримано більше, ніж витрачено сукупно невідновлюваної енергії ($CE_{D_{NR}}$) у всіх технологічних процесах життєвого циклу, включаючи витрати первинної енергії під час операцій сировинного циклу ($E_{сир.}$) та у підсистемі перетворення біопалива в теплову енергію ($E_{пер.}$) (див. рівняння (3), (4), (5)).

$$E_{UC_{NR}} = СЕР / CE_{D_{NR}}, \tag{1}$$

де, СЕР – виробництво теплової енергії котельною установкою, ГДж/рік; $CE_{D_{NR}}$ – сукупні приведені витрати невідновлюваної енергії, ГДж/рік.

$$СЕР = \sum W_i \cdot \tau_i, \text{ [ГДж/рік]} \tag{2}$$

де, W_i – потужність котельної установки в певний період її роботи (τ_i), МВт; τ_i – річне завантаження установки, год./рік.

$$CE_{D_{NR}} = E_{сир.} + E_{пер.}, \text{ [ГДж/рік]} \tag{3}$$

де, $E_{сир.}$ – витрати первинної енергії під час операцій сировинного циклу, ГДж/рік; $E_{пер.}$ – витрата первинної енергії у підсистемі перетворення біопалива в теплову енергію, ГДж/рік.

$$\begin{cases} E_{сир.} = \sum_{i=1}^n E_i; \\ E_{мо} = \frac{(\sum_{j=1}^n b_{моj} \cdot Q_p^H + \sum_{k=1}^n b_{трк} \cdot Q_p^H + \sum_{l=1}^n m_{тмл} \cdot \alpha_{тмл}) \cdot S}{k_{п}}; \\ E_{тр1} = E_{т-км1} \cdot B \cdot n_1; \\ E_{тр2} = (B + A) \cdot E_{т-км2} \cdot n_2; \\ E_{ван} = 2,5 \cdot B \cdot b_{ван} \cdot Q_p^H; \\ E_{збер} = \frac{72 \cdot B \cdot e_{збер.нав.}}{\tau}. \end{cases} \tag{4}$$

де, $E_{мо}$, $E_{тр}$, $E_{ван}$, $E_{збер}$ – споживання первинної енергії,

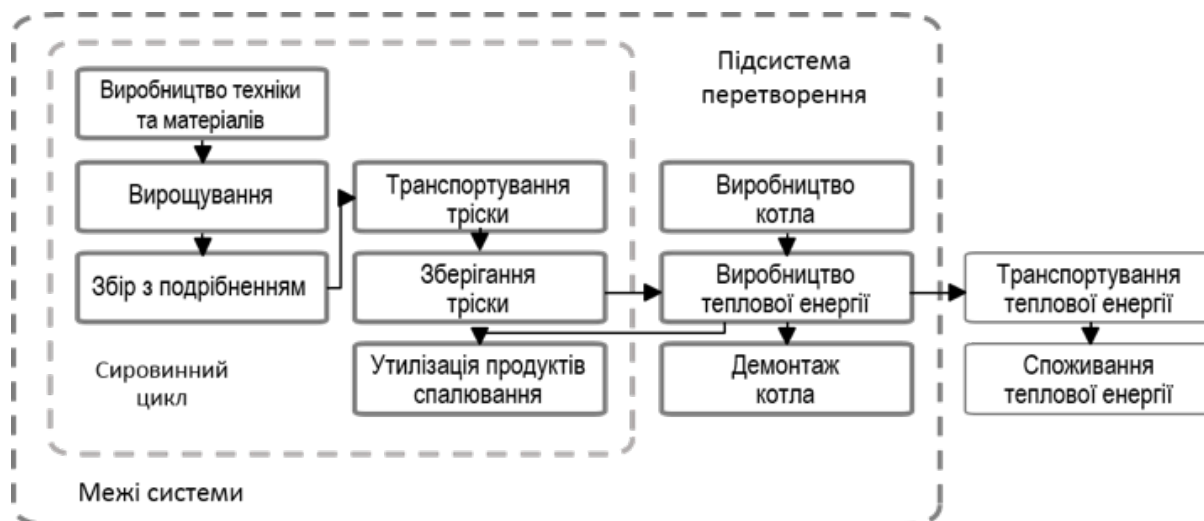


Рис.1. Життєвий цикл виробництва теплової енергії з біомаси *Salix Viminalis L.*

відповідно, при: польових механізованих операціях з вирощування та збору верби з подрібненням в тріску; транспортуванні твердого біопалива; операціях з вантаження/розвантаження; зберіганні біопалива, ГДж/рік; $b_{\text{мо}}, b_{\text{тр}}, b_{\text{ван}}$ – питомі витрати дизельного палива під час польових механізованих операцій, транспортування та навантаження сировини чи технологічних матеріалів, л/га (л/т); $m_{\text{тм}}$ – питома маса технологічних матеріалів, кг/га; $\alpha_{\text{тм}}$ – енергетичний еквівалент хімічної речовини (добрив, пестицидів), МДж/кг_{д.р.}; S – площа плантації, га; $k_{\text{п}}$ – період експлуатації плантації, років; B – річна витрата біопалива, т/рік; $Q_{\text{р}}^{\text{н}}$ – нижча теплота згорання дизельного пального, МДж/л (36,1 МДж/л); A – кількість золи, що утворюється, т/рік; $E_{\text{ткм}}$ – енергоємність транспортних робіт, МДж/т·км; n – відстань транспортування біомаси від місця її збору до центрального складу та від центрального складу до споживача, км (перша відстань приймається на рівні 5 км, друга – змінною величиною), км; τ – річне завантаження установки, год./рік; $e_{\text{збер.нар.}}$ – питомі витрати первинної енергії при будівництві навісу для зберігання біопалива, МДж/т.

$$E_{\text{пер.}} = E_{\text{к.}} / k_{\text{к.}} + E_{\text{екс.}} + E_{\text{ел.}}, \quad (5)$$

де, $E_{\text{пер.}}$ – витрата первинної енергії у підсистемі перетворення палива в теплову енергію, ГДж/рік; $E_{\text{к.}}$ – витрати первинної енергії на стадії спорудження та демонтажу установки, ГДж; $k_{\text{к.}}$ – розрахунковий період експлуатації установки, років; $E_{\text{екс.}}$ – витрати первинної енергії на ремонт та обслуговування котельного обладнання, ГДж/рік; $E_{\text{ел.}}$ – власне енергоспоживання установки, ГДж/рік.

У якості критерію енергетичної ефективності відповідно до рекомендацій Міжнародного енергетичного агентства, зокрема результатів виконання Завдання 32 у секції Біоенергетика, приймаємо коефіцієнт перетворення енергії $EY_{\text{NR}} > 2$, а рекомендоване значення $EY_{\text{NR}} > 5$ [9].

Методика оцінки екологічної сталості життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски *Salix viminalis L.*

Оцінка екологічної сталості проводилась за показником скорочення викидів парникових газів (ПГ) ($\Delta \epsilon$) життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски верби *Salix viminalis L.* у котлі 500 кВт у порівнянні з котлом тієї ж потужності на природному газі. Для розрахунку балансу парникових газів використовувалась методика, запропонована Єврокомісією у своєму звіті з біоенергетики для твердої біомаси та біогазу, що використовуються для виробництва теплової та електричної енергії та охолодження [10]. Методика враховує викиди від таких одиничних процесів, як посадка, збір урожаю, попередня підготовка та транспортування біомаси, а також фінальний етап перетворення в теплову та/чи електричну енергію.

При виробництві теплової енергії із біомаси викиди парникових газів мають порівнюватись з відповідними

викидами від систем на викопних паливах (EC_{Fh}), що становлять 80 гCO_{2-екв}/МДж_{тепл.ен.} (EC_{Fh}) згідно звіту Європейської Комісії щодо стану сталого розвитку виробництва теплової, електричної енергії та охолодження із твердої та газоподібної біомаси за 2014 рік [11]. Біоенергетичну технологію можна вважати екологічно сталою, коли її впровадження зменшує викиди парникових газів у порівнянні з використанням традиційного палива. Кількісну межу щодо зниження викидів ПГ встановила Директива Європарламенту 2009/28/ЕС для рідкого палива з біомаси, а також біогазу, призначеного для використання в галузі транспорту. Відповідно до Директиви, з 1 січня 2018 року повинно забезпечуватись скорочення не менше 50% для зазначених видів біопалив, вироблених на установках, введених в експлуатацію до 5 жовтня 2015 року включно, та не менше 60%, якщо зазначені види біопалива вироблено на установках, введених в експлуатацію після 5 жовтня 2015 року [12]. Наразі, на розгляді в Європарламенті знаходиться Пропозиція для оновленої Директиви, відповідно до якої подібна вимога розповсюджуватиметься і на тверді та газоподібні біопалива для виробництва тепла та електроенергії [13]. В Україні вимоги Директиви 2009/28/ЕС відображені в проекті Закону No 7348 від 29.11.2017 «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо розвитку сфери виробництва рідкого палива з біомаси та впровадження критеріїв сталості рідкого палива з біомаси та біогазу, призначеного для використання в галузі транспорту». У якості критерію екологічної сталості у даному дослідженні приймається значення показника скорочення викидів ПГ $\Delta \epsilon > 60\%$ порівняно з системою на природному газі.

Відповідно до системи співвідношень (6) був проведений розрахунок скорочення викидів парникових газів у повному циклі виробництва теплової енергії з тріски біомаси *Salix viminalis L.* у котлі потужністю 500 кВт (табл. 6).

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon = K_{\text{в.д.}} \cdot \Sigma E_{\text{диз.}} + K_{\text{в.мін.д.}} \cdot \Sigma E_{\text{мін.д.}} + \\ + K_{\text{в.герб.}} \cdot \Sigma E_{\text{герб.}} + K_{\text{в.ел.}} \cdot \Sigma E_{\text{ел.}}; \\ EC_{\text{h}} = \frac{\epsilon \cdot B}{Q_1}; \\ \Delta \epsilon = \frac{EC_{\text{Fh}} - EC_{\text{h}}}{EC_{\text{Fh}}}; \\ \Delta \epsilon > 60\%. \end{array} \right. \quad (6)$$

де, ϵ – викиди ПГ від виробництва твердої біомаси перед її перетворенням у теплову енергію, гCO_{2-екв}/т_{біом.}; $K_{\text{в.д.}}, K_{\text{в.мін.д.}}, K_{\text{в.герб.}}, K_{\text{в.ел.}}$ – питомі викиди парникових газів при відповідно використанні дизельного пального (становить 93,95 гCO_{2-екв}/МДж), мінеральних добрив (суперфосфат подвійний амонізований – 1,552 гCO_{2-екв}/кг_{д.р.}, калій-амонійна селітра – 2,693 гCO_{2-екв}/кг_{д.р.}, каліймаг – 0,413 гCO_{2-екв}/кг_{д.р.}), гербіцидів (13,8963 гCO_{2-екв}/кг_{д.р.}), електричної енергії споживачами, які віднесені до 2 класу напруги (становлять 1,227 кгCO_{2-екв}/кВт·год); $\Sigma E_{\text{диз.}}, \Sigma E_{\text{мін.д.}}, \Sigma E_{\text{герб.}}, \Sigma E_{\text{ел.}}$ – сумарне споживання відповідно

дизельного пального, мінеральних добрив, гербіцидів, електричної енергії; EC_h – загальні викиди парникових газів при виробництві теплової енергії як кінцевого продукту, $gCO_{2-екв}/MДж_{вир.}$; EC_{Fh} – загальні викиди ПГ при використанні викопних палив для виробництва теплової енергії; Q_1 – річне виробництво теплової енергії котельною установкою, $MДж/рік$; B – річна витрата палива, $MДж_{тепл.}/т$; $\Delta\epsilon$ – скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії із біомаси, %.

Опис життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски *Salix Viminalis L.*

Відповідно до ДСТУ ISO 14040:2013 перед проведенням оцінки життєвого циклу необхідно визначити границі системи продукту, в межах яких визначаються енергетичні і матеріальні потоки. Система виробництва теплової енергії з тріски *Salix Viminalis L.* (рис. 1.) включає сировинний цикл з отриманням тріски верби на виході і підсистему перетворення, в якій відбувається спалювання вербової тріски у котельній установці потужністю 500 кВт із виробництвом теплової енергії.

Дані щодо всіх вхідних елементарних потоків, ідентифікованих в межах сировинного циклу, були отримані в рамках виконання проекту FORBIO (www.forbio-project.eu). Дані щодо технологічних операцій та необхідної техніки були отримані у консультаціях з виробником енергетичної верби у Київській області.

Вхідні дані для підсистеми перетворення взяті для котла «Волинь-Кальвіс» 500 кВт (табл. 1).

Внесення добрив протягом життєвого циклу плантації включало внесення у підготовчий рік суперфосфату подвійного амонізованого N9P30 та Каліймагу K44, а також внесення калій-амонійної селітри (КАС) у кожен 3-й рік після збору врожаю. Гербіциди та інсектицид вносились лише у перший рік плантації. Інвентаризація елементарних потоків сировинного циклу представлена у табл. 2.

Врожайність верби відрізняється для різних сортів, кліматичних умов та умов ділянки, на якій вирощується плантація. Для розрахунків приймалось, що врожайність верби у період збору складає 60 т/га свіжої біомаси. Враховуючи, що врожайність першого та останнього збору буде складати 60% від основної врожайності (з 2-го по 5-й збір). Середня врожайність за 20 років була розрахована відповідно до рівняння (7):

$$\text{Врожайність верби}_{\text{Середня}} = \frac{1 \text{ врожай} \times 2 + 2 \text{ врожай} \times 5}{20}, \quad (7)$$

Площа плантації верби була розрахована відповідно до технічних характеристик котла на деревній трісці (табл. 1), а також середньої врожайності верби протягом життєвого циклу (9,3 т/га/рік сухої маси) та склала 39,7 га.

Табл. 1. Технічні характеристики котла на деревній трісці.

Показники	Значення
Встановлена потужність	500 кВт
Навантаження	4272 год./рік
Номінальне навантаження	70%
ККД котла	85%
Витрата палива (тріска верби)	696,6 т/рік
Виробництво теплової енергії	5383 ГДж/рік
Втрати теплової енергії	5%
Теплова енергія отримана споживачем	5114 ГДж/рік
Економія споживання природного газу	171 тис. м ³ /рік

Табл. 2. Інвентаризація елементарних потоків стадії вирощування *Salix Viminalis L.*

Елементарний потік на вході/виході до стадії ЖЦ	Значення, кг·рік ⁻¹ ·га ⁻¹
N	54
P ₂ O ₅	23
K ₂ O	20
Пестициди	0,48
Дизель	10
Врожай сухої маси	9300

Споживання дизелю (табл. 3) розраховувалось відповідно до рівняння (8). Для споживання дизелю, пестицидів та добрив також враховувались витрати первинної енергії для їх виробництва. Для всіх стадій життєвого циклу на яких використовувались сільськогосподарські машини і обладнання враховувались витрати первинної енергії для їх виробництва пропорційно до часу їх використання.

$$Q_{\text{год}} = \frac{N_c \times q_0 \times K_{\text{з.д.}}}{1000} \text{ кг/год.}; \quad (8)$$

де $Q_{\text{год}}$ – годинні витрати палива; N_c – потужність двигуна; q_0 – питомі витрати палива; $K_{\text{з.д.}}$ – коефіцієнт, що враховує вплив завантаження двигуна на питомі витрати палива [14].

Табл. 3. Інвентаризація елементарних потоків сировинного циклу тріски *Salix Viminalis L.* у якості палива.

Операція	Обладнання для виконання операції	Тип обладнання	Паливо, що витрачається	Витрата палива	Частота за ЖЦ
Дискування на глибину до 12 см	Трактор + Борона важка дискова причепна	ХТЗ-242К + БДВП-5,5	дизельне паливо	10 л/га	1 операція
Оранка	Трактор + плуг	John Deere 8360R + KUHN-6 корп.	дизельне паливо	21,7 л/га	1 операція
Культивація	Трактор + культиватор	ХТЗ-242К + КПС-8	дизельне паливо	3,8 л/га	1 операція
Посадка	Трактор + садильна машина	John Deere 8360R + Egedal 4 рядн.	дизельне паливо	18 л/га	1 операція
Міжрядний обробіток фрезою	Трактор + культиватор вертикально-фрезерний	ХТЗ-242К + Celli Ranger 400	дизельне паливо	7,4 л/га	1 операція
Міжрядне дискування	Трактор + Луцильник стерньовий дисковий	John Deere 6930 + ЛСД-3,7	дизельне паливо	4,4 л/га	2 операції
Транспортування води для гербіциду	Трактор + причеп цистерна	John Deere 6930 + РЗС-6	дизельне паливо	3,5 л/т; 2 л/т	1 операція 2 операції
Внесення гербіциду	Трактор + оприскувач	МТЗ-892 + Харді Ренджер	дизельне паливо	1 л/га	3 операції
Внесення мінеральних добрив	Трактор + розкидач, Трактор + вакуумний напівпричіп цистерна	ХТЗ-242К + РУМ-8, JohnDeere 8360R + ВНЦ-20	дизельне паливо	4,2 л/т, 5,6 л/т	1 операція, 7 операцій
Збір урожаю з подрібненням у тріску	Комбайн з насадкою для збору біомаси	Claas Jaguar + HSAB's SRC Chipping Head	дизельне паливо	21 л/га (24 л/га)	2 операції (6 операцій)
Транспортування а) саджанців, б) мінеральних добрив, в) біомаси (5 км)	Трактор + причеп	John Deere 6930 (ХТЗ-242К, МТЗ-892) + 2ПТС-6	дизельне паливо	0,15 л/т, 3,75 л/т, 0,74 л/т	а) 1 операція, б) 7 операцій, в) 8 операцій
Транспортування тріски до центрального складу/котельні	Вантажний транспорт	МАЗ-6501С9-8525-000 з причепом МАЗ-856103-010	дизельне паливо	19,2 г/т*км; 13,5 г/т*км	
Складування та зберігання деревної тріски	під металевим навісом	енергозатрати на матеріали та спорудження		70 МДж/м ³ складу	місячний запас палива
Завантажувальні/розвантажувальні роботи	фронтальний навантажувач	MAN BME-1560 (1,5 т)	дизельне паливо	0,5 кг/т	2 операції

Результати оцінки енергетичної ефективності та екологічної сталості життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски *Salix Viminalis L.*

На основі рівнянь (1), (2), (3), (4) та (5) було проведено дослідження енергетичної ефективності виробництва теплової енергії у котлі потужністю 500 кВт з тріски верби. В таблиці 4 наведені значення всіх складових витрат первинної енергії протягом життєвого циклу використання тріски верби. Значення всіх показників, отримані в даному розрахунку (табл. 4), відповідають рекомендованим діапазоном ($EUC_{NR} > 5$) [9]. Результати розрахунків показують, що впровадження котла

на трісці верби є енергетично ефективним за відстані транспортування до 180 км.

З даних, представлених в таблиці 4 видно, що найбільші витрати первинної енергії викопного палива відбуваються на стадії вирощування та збору врожаю із подрібненням у тріску. Також, вагомими складовими витрат є транспортування вже готового палива у вигляді тріски та виробництво теплової енергії в котельній установці. Витрати енергії на виготовлення, демонтаж, обслуговування та ремонт котельної установки становлять менше 3% від усіх витрат первинної енергії викопного палива.

Табл. 4. Витрати первинної енергії протягом життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски верби в котлі 500 кВт, ГДж/рік.

№ етапу		Витрати первинної енергії, ГДж/рік			
		0 км	50 км	100 км	180 км
1.	Обробіток ґрунту	6,32			
2.	Посадка	5,06			
3.	Внесення добрив (включаючи мінеральні добрива)	71,06 (65,63)			
4.	Внесення гербіциду (включаючи гербіциди)	2,78 (2,18)			
5.	Транспортування води (для гербіциду та міңдобрив), посадкового матеріалу, міңдобрив, біомаси	13,38			
6.	Збір з подрібненням у тріску за цикл 20 років	31,75			
1-6	Всього за етап вирощування та збору	130,35			
8.	Вантаження-розвантаження тріски	46,96			
9.	Складування та зберігання тріски	2,5			
10.	Витрата палива (тріска) в котлі	6333			
11.	Спорудження котельної установки (виготовлення обладнання, будівельно-монтажні роботи)	17,7			
12.	Споживання електроенергії котлом	116,3			
13.	Витрати енергії на обслуговування котла персоналом	8,9			
14.	Витрати енергії на ремонтування котла	0,6			
15.	Демонтаж, утилізація обладнання котельної установки	2,2			
16.	Транспортування тріски до споживача та золи до місця утилізації	0 км	50 км	100 км	180 км
		0	189,7	379,4	682,9
СЕД, ГДж/рік		6658	6848	7038	7341
ЕУС		0,77	0,75	0,73	0,7
СЕД_{NR}, ГДж/рік		325	515	705	1008
ЕУС_{NR}		15,71	9,93	7,25	5,07

Відповідно до системи співвідношень (6) був проведений розрахунок скорочення викидів парникових газів у повному циклі виробництва теплової енергії з тріски верби *Salix Viminalis L.* в котлі потужністю 500 кВт (табл. 5). Аналіз отриманих результатів по-

казує, що скорочення викидів парникових газів при використанні тріски енергетичних культур є досить високим – 60,3...91,3% в залежності від відстані транспортування біомаси (в розглянутому прикладі – 0-390 км).

Табл. 5. Баланс викидів парникових газів протягом життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски верби в котлі потужністю 500 кВт.

Стадія життєвого циклу	Викиди ПГ, т CO _{2-екв} /рік			
	0 км	100 км	200 км	390 км
Обробіток ґрунту	0,36			
Посадка	0,13			
Внесення добрив (враховуючи мінеральні добрива)	4,95 (4,65)			
Внесення гербіциду (враховуючи гербіциди)	0,28 (0,26)			
Транспортування води (для гербіциду та міндобрив), посадкового матеріалу, міндобрив, біомаси	2,27			
Збір з подрібненням у тріску за цикл 20 років	1,3			
Завантажувальні роботи	3,5			
Споживання е/є котлом	13,19			
Транспортування тріски до споживача та золи до місця утилізації	0 км	100 км	200 км	390 км
	0	35,6	71,3	139,0
Викиди парникових газів протягом життєвого циклу	31,1	66,7	102,4	170,1
Скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з тріски енергетичних культур, %	92,76	84,45	76,15	60,36

Результати даного дослідження показують, що сировинний цикл біоенергетичної системи виробництва теплової енергії з тріски верби прутковидної *Salix Viminalis L.* подібний до сировинного циклу заготівлі деревної тріски у лісах України за споживанням первинної енергії, досягаючи показника $EUC_{NR} > 5$ для відстані транспортування до 180 км, порівняно із 150 км для деревної тріски у дослідженні [15]. Скорочення викидів парникових газів у даному дослідженні менше за тих же відстаней транспортування ніж в [15], що пояснюється використанням пестицидів та добрив, які мають високі питомі показники викидів, проте все одно становить більше 60% для відстані транспортування до 390 км.

Висновки

Досягнення цілей, поставлених НПДВЕ до 2020 року та Енергетичною стратегією України на період до 2035 року можливе лише за активного залучення біомаси енергетичних культур у сектор виробництва і постачання теплової енергії. Станом на 2015 рік під енергетичними культурами в Україні були зайняті лише 4190 га земель, хоча за даними Держкомстату України існує близько 4 млн га малопродуктивних сільськогосподарських земель, які потенційно можуть

бути використані під плантації енергетичних культур. Можливим стримуючим фактором до широкого вирощування енергетичних культур є невирішеність питання енергетичної ефективності життєвого циклу вирощування енергетичних культур та їх використання для виробництва теплової енергії, а також можливий негативний вплив на екологію.

Результати проведеної оцінки використання біомаси плантацій *Salix Viminalis L.* для виробництва теплової енергії упродовж життєвого циклу показали, що найбільш вагомим параметром, що впливає на енергетичну ефективність та екологічну сталість є відстань транспортування. Вирощування верби *Salix Viminalis L.* в Україні із подальшим використанням тріски для виробництва теплової енергії у котельних на біопаливі є екологічно сталим за відстані транспортування до 390 км та енергетично ефективним за відстані транспортування до 180 км.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Енергетичний баланс України* за 2016 р. http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2017/energ/en_bal/Bal_2016_u.zip
2. *Report on Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources and Consumption in Ukraine in 2014-*

2015 [Electronic resource] – P.20. Mode of access: https://www.energy-community.org/dam/jcr:38625929-3c80-4a80-878e-0b3791e143e2/UA_RE_progress_2016.pdf

3. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы выращивания и использования энергетических культур в Украине. Часть 2 // Журнал «Промышленная теплотехника». – 2015. – т. 37. – №5. – С. 58-67.

4. *AEBIOM Statistical Report*. European Bioenergy Outlook / [Calderon C., Gauthier G., Jossart J.-M. and others], – Brussels: European Biomass Association (AEBIOM), 2017. – 264 p. – Mode of access: <http://www.aebiom.org/statistical-report-2017/statistical-report-2017-17-10-17>

5. Alexopoulou E. Role of 4F cropping in determining future biomass potentials, including sustainability and policy related issues [Electronic resource] / Alexopoulou E., Christou M., Eleftheriadis I. // [Biomass Department of CRES, 2010-2012]. – P. 8. http://www.biomassfutures.eu/public_docs/final_deliverables/WP3/D3.2%20Role%20of%204F%20crops.pdf

6. Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. *Bioresource technology*, 102(2), 437-451.

7. Heller, M., Keoleian, G., Volk, T. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. (2003). *Biomass Bioenergy*, 25, 147–65.

8. Fantozzi, F., Buratti, C. (2010). Life cycle assessment of biomass chains: Wood pellet from short rotation coppice data measured on a real plant. *Biomass and Bioenergy*, 34, 1796-1804.

9. Nussbaumer T. Evaluation of Biomass Combustion based Energy Systems by Cumulative Energy Demand and Energy Yield Coefficient / T. Nussbaumer, M. Oser. – Zurich: Verenum press, 2004. [Electronic resource] – 47 p. – (Report to International Energy Agency IEA Bioenergy Task 32 and

Swiss Federal Office of Energy). Mode of access: http://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/03/Nussbaumer_IEA_CED_V11.pdf .

10. *Report from the Commission to the Council and the European Parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling*. [Electronic resource] – Brussels, 25.2.2010. COM (2010) final. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1410874845626&uri=CELEX:52010DC0011>

11. *Commission staff working document “State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU”*. [Electronic resource]. – Brussels, 28.7.2014. SWD (2014) 259 final.

12. *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23.04.2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*.

13. *Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council on the promotion of the use of energy from renewables (recast)*. – Brussels, 23.2.2017, COM(2016) 767 final/2. Mode of access: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52016PC0767R\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52016PC0767R(01))

14. *Проектування технологій та розрахунок витрат на вирощування сільськогосподарських культур [Навч. посібник] / За ред. Г.Є.Мазнева. – Харків: «Майдан». – 2009. – 257 с.*

15. Железная Т.А., Дроздова О.И. Комплексный анализ производства энергии из твердой биомассы в Украине // *Теплоэнергетика*, 2014, №4, с.16-20.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF HEAT PRODUCTION FROM WILLOW CHIPS OF SALIX VIMINALIS L. IN UKRAINE

Tryboi O.V.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

The purpose of the paper is to define the energy efficiency and environmental sustainability of bioenergy value chain for heat production from willow chips of *Salix Viminalis L.* in Ukraine. The methodology of Life Cycle Assessment (LCA) was used, according to which, the scope of the product system includes the feedstock cycle of willow *Salix Viminalis L.* cultivation and harvest, and the subsystem of willow chips conversion to heat in a 500 kW biomass boiler. Cumulative energy demand and energy yield coefficient were chosen as energy efficiency indicators. The product system was compared with the similar one using natural gas. Non-renewable energy yield coefficient was used to define how many times the energy output was bigger than input of non-renewable energy. An acceptable value for renewable energy installations and systems is to receive twice as much energy output as was spent of non-renewable energy, however the recommended value assumed in the work is to receive a 5 times more energy output compared to non-renewable energy input. As an environmental sustainability indicator, a reduction of GHG emissions was used. The acceptable level of GHG emissions reduction was chosen at a level of 60% for the whole life cycle from cultivation-to-heat, compared to traditional heat production in gas boilers. Results of the assessment identified that the most significant parameter affecting energy efficiency and environmental sustainability is transportation distance. The growing of willow *Salix Viminalis L.* in Ukraine for the subsequent production of biofuel in the form of chips and its combustion in biofuel boilers is environmentally sustainable with a maximum transportation distance of 390 km and energy efficient with a maximum transportation distance of 180 km.

References 15, table 5, figure 1.

Keywords: energy crops, willow, *Salix Viminalis L.*, LCA, energy efficiency, GHG, Cumulative Energy Demand, Energy Yield Coefficient, bioenergy heat.

1. *Enerhetychnyi balans Ukrainy za 2016 rik.* [Energy balance of Ukraine for 2016.] (Ukr.) http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2017/energ/en_bal/Bal_2016_u.zip

2. *Report on Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources and Consumption in Ukraine in 2014-2015* [Electronic resource] – P.20. Mode of access: https://www.energy-community.org/dam/jcr:38625929-3c80-4a80-878e-0b3791e143e2/UA_RE_progress_2016.pdf (viewed on March 16, 2018)

3. *Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Tryboi A.V.* Perspektivy vyrashhivaniya i ispol'zovaniya jenergeticheskikh kul'tur v Ukraine. Chast' 2 [Prospects for growing and use of energy crops in Ukraine. Part 2] // *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat engineering], 2015, V.37, No5, P.58-67. (Rus.)

4. *AEBIOM Statistical Report.* European Bioenergy Outlook / [Calderon C., Gauthier G., Jossart J.-M. and others].

– Brussels: European Biomass Association (AEBIOM), 2017. – 264 p. – Mode of access: <http://www.aebiom.org/statistical-report-2017/statistical-report-2017-17-10-17>

5. *Alexopoulou E.* Role of 4F cropping in determining future biomass potentials, including sustainability and policy related issues [Electronic resource] / Alexopoulou E., Christou M., Eleftheriadis I. // [Biomass Department of CRES, 2010-2012]. – P. 8. http://www.biomassfutures.eu/public_docs/final_deliverables/WP3/D3.2%20Role%20of%204F%20crops.pdf

6. *Cherubini, F., & Strømman, A. H.* (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. *Bioresour technol*, 102(2), 437-451.

7. *Heller, M., Keoleian, G., Volk, T.* Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. (2003). *Biomass Bioenergy*, 25, 147-65.

8. *Fantozzi, F., Buratti, C.* (2010). Life cycle assessment of biomass chains: Wood pellet from short rotation coppice data measured on a real plant. *Biomass and Bioenergy*, 34, 1796-1804

9. *Nussbaumer T.* Evaluation of Biomass Combustion based Energy Systems by Cumulative Energy Demand and Energy Yield Coefficient / T. Nussbaumer, M. Oser. – Zurich: Verenum press, 2004. [Electronic resource] – 47 p. – (Report to International Energy Agency IEA Bioenergy Task 32 and Swiss Federal Office of Energy). Mode of access: http://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/03/Nussbaumer_IEA_CED_V11.pdf

10. *Report from the Commission to the Council and the European Parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling.* [Electronic resource] – Brussels, 25.2.2010. COM (2010) final. Mode of access: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1410874845626&uri=CELEX:52010DC0011>

11. *Commission staff working document* “State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU”. [Electronic resource]. – Brussels, 28.7.2014. SWD (2014) 259 final.

12. *Directive 2009/28/EC* of the European Parliament and of the Council of 23.04.2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.

13. *Proposal for a Directive* of the European Parliament and the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). – Brussels, 23.2.2017, COM(2016) 767 final/2. Mode of access: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52016PC0767R\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52016PC0767R(01))

14. *Designing technologies* and calculating the costs of growing crops [Tutorial, in Ukrainian] / edited by G.Ye. Mazniev. - Kharkiv: "Maidan". - 2009. - 257 p.

15. *Zheliezna, T.A., Drozdova, O.I.* Kompleksnyj analiz texnologij proizvodstva e'nergii iz tverdoj biomassy v Ukraine [Comprehensive analysis of energy production technologies from solid biomass in Ukraine] // *ТЕПЛОЕ'НЕРГЕТИКА* [Thermal Engineering], 2014, No4, P. 16-20 (Rus.).

Отримано 22.05.2018

Received 22.05.2018