

УДК 620.92

ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ З ТРІСКИ БІОМАСИ *MISCANTHUS X GIGANTEUS* В УКРАЇНІ

Трибой О.В. — консультант відділу загальних питань біоенергетики НТЦ «Біомаса», Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

Вступ. Зменшення споживання викопних палив та збільшення частки відновлюваних джерел у енергобалансі є однією із основних цілей України, яка закріплена у Національному плані дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року (НПДВЕ) і Енергетичній стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Зокрема, в Енергетичній стратегії зафіксована ціль 25% ВДЕ у загальному постачанні первинної енергії (ЗППЕ) до 2035 р, з яких майже 11,5% за рахунок «біомаси, біопалив та відходів». У 2016 році внесок «біомаси, біопалив та відходів» у ЗППЕ склав 3,1% [1]. Досягнення наміченої цілі у 11,5% можливе лише за рахунок залучення біомаси в сектор виробництва та постачання теплової енергії. Джерелом стабільного постачання

біомаси можуть стати енергетичні культури. У 2015 році енергетичні культури в Україні вирощувались лише на 4190 га земель, з яких плантації міскантусу займали площі у 500 га [2] (табл. 1). Проте, за даними Держкомстату України, існує близько 4 млн. га малопродуктивних сільськогосподарських земель, які потенційно можуть бути використані під плантації енергетичних культур [3].

Вирощування енергетичних культур активно розвивається і в Європі. Так, за даними Європейської асоціації Bioenergy Europe (раніше AEBIOM), сумарна площа плантацій енергетичних культур у країнах ЄС у 2017 році склала 50764 га [5]. Для різних кліматичних умовах визначені енергетичні культури, що показують найбільшу врожайність. У континентальній зоні — це верба, тополя, міскантус, дво-

кісточник тростинний, сорго; на півночі Середземномор'я — тополя, міскантус; на півдні Середземномор'я — арундо тростинний, евкаліпт [6].

В Україні вирощування енергетичних культур ще недостатньо широко розвивається. Однією з можливих причин є невирішеність питання енергетичної ефективності життєвого циклу вирощування енергетичних культур та їх використання для виробництва теплової енергії, а також екологічної сталості таких біоенергетичних ланцюгів. Комплексно дослідити весь біоенергетичний ланцюг від вирощування до використання можна застосувавши методологію оцінки життєвого циклу (ОЖЦ, англ. LCA — life cycle assessment). Узагальнююча оцінка досліджень біоенергетичних технологій за методологією ОЖЦ (близько 100), виконаних протягом 15 років, показала, що більшість робіт використовують розрахунок споживання первинної енергії палив та викидів парникових газів у якості показників, відповідно, енергетичної ефективності та екологічної сталості [7]. Найвні дослідження з ОЖЦ для енергетичних культур, досліджують переважно сировинний цикл від посадки до збору врожаю [8] або виробництва біопалив [9]. Виходячи з інформації щодо відсутності аналогічних комплексних досліджень вирощування та використання енергетичних культур для виробництва енергії для України, видається необхідним проведення оцінки життєвого циклу таких біоенергетичних ланцюгів, використовуючи в якості критеріїв показники енергетичної ефективності та балансу парникових газів.

Методологія оцінки життєвого циклу

Мета дослідження — визначити сукупні витрати енергії та сукупні витрати невідновлюваної енергії та викиди парникових газів у життєвому циклі вирощування та використання біомаси міскантусу (*Miscanthus x giganteus*) у вигляді тріски для виробництва теплової енергії в Україні, а також оцінити вплив найбільш критичних параметрів на коефіцієнт перетворення невідновлюваної енергії у життєвому циклі й порівняти з життєвим циклом виробництва теплової енер-

Таблиця 1. Площі під енергетичними культурами в областях України (вибрані дані) [4]

Енергетичні культури	Площа, га	Область України	Компанія
Верба	1488	Волинська	ТОВ «Salix Energy»
Міскантус	30	Дніпропетровська	ТОВ «КСГ Агро»
Міскантус	67	Житомирська	ІБКіЦБ НААН України
Верба	5	Закарпатська	ГО «Молочай»
Верба, тополя	200	Івано-Франківська	ТОВ «Вербав», ПП «Степан Мельничук»
Верба, міскантус	304	Київська	ТОВ «УкрАгроЕнерго», ТОВ «ЕнергоАграр»
Верба, тополя, міскантус, свічграс	450	Львівська	ТОВ «Salix Energy», УкрНДІ-ПВТ ім. Л. Погорілого, ТОВ «Біопроєкт»
Верба, міскантус, свічграс	7,5	Полтавська	ІБКіЦБ НААН, PhytoFuels Investments
Верба	36	Рівненська	Інститут с/г Західного Полісся НААН, ГО "Рівненський центр маркетингових досліджень"
Міскантус	12	Харківська	ТОВ «Квадро», ФОП Кателівський
Міскантус	207	Хмельницька	ТОВ «ЕнергоАграр»
Міскантус	207	Хмельницька	ТОВ «ЕнергоАграр»

гії з природного газу.

Відповідно до методології оцінки життєвого циклу (ДСТУ ISO 14040:2013) була проведена оцінка енергетичної ефективності та екологічної сталості використання біомаси плантацій міскантусу для виробництва теплової енергії. Розглянуто життєвий цикл виробництва теплової енергії, в якому система продукту включає етап вирощування та збору міскантусу (сировинний цикл), а також виробництво теплової енергії в котлі 500 кВт (підсистема перетворення). Кінцевим продуктом є тепла енергія із функціональною одиницею — МДж тепла. Життєвий цикл включає матеріальні та енергетичні потоки всіх технологічних процесів сировинного циклу та підсистеми перетворення (рис. 1).

Методика оцінки енергетичної ефективності та екологічної сталості життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски *Miscanthus x giganteus*

Показником енергетичної ефективності у дослідженні обрано коефіцієнт перетворення невідновлюваної енергії EYCNR [10], який відображає у скільки разів енергії на виході (СЕР) (рівняння (1) і (2) із системи продукту отримано більше, ніж витрачено сукупно невідновлюваної енергії (CEDNR) у всіх одиничних процесах життєвого циклу, враховуючи витрати первинної енергії у сировинному циклі (Есир.) та у підсистемі перетворення біопалива в теплову енергію (Епер.) (рівняння (3), (4), (5)).

$$EYC_{NR} = \frac{СЕР}{CED_{NR}} \quad (1)$$

де, СЕР — виробництво теплової енергії котельною установкою, ГДж/рік; CED_{NR} — сукупні приведені витрати невідновлюваної енергії, ГДж/рік.

$$СЕР = \sum W_i \cdot \tau_i, \quad [ГДж/рік] \quad (2)$$

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

$$CED_{NR} = E_{сир} + E_{пер}, \quad [ГДж/рік] \quad (3)$$

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

$$\begin{cases} E_{сир} = \sum_{i=1}^n E_i; \\ E_{мо} = \frac{(\sum_{j=1}^n b_{моj} \cdot Q_p^H + \sum_{k=1}^n b_{трк} \cdot Q_p^H + \sum_{l=1}^n m_{тмл} \cdot \alpha_{тмл}) \cdot S}{k_n}; \\ E_{тр} = (E_{ткм1} + E_{ткм2}) \cdot V \cdot n; \\ E_{ван} = 2,5 \cdot V \cdot b_{ван} \cdot Q_p^H; \\ E_{збер} = \frac{72 \cdot V \cdot \rho_{збер.нав.}}{\tau} \end{cases} \quad (4)$$

де, E_{мо}, E_{тр}, E_{ван}, E_{збер} — споживання первинної енергії, відповідно, при: польових механізованих операціях з вирощу-

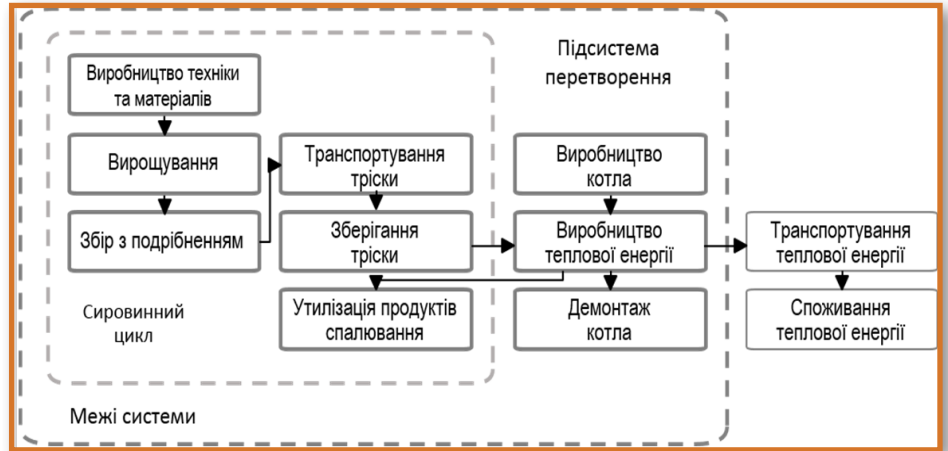


Рис. 1. Життєвий цикл виробництва теплової енергії з біомаси *Miscanthus x giganteus*

вання та збору міскантусу з подрібненням у тріску; транспортуванні твердого біопалива; операціях з вантаження/розвантаження; зберіганні біопалива, ГДж/рік; b_{мо}, b_{тр}, b_{ван} — питомі витрати дизельного палива під час польових механізованих операцій, транспортування та навантаження сировини чи технологічних матеріалів, л/га (л/т); m_{тмл} — питома маса технологічних матеріалів (гербіцидів, добрив, посадкового матеріалу), кг/га; a_{тмл} — енергетичний еквівалент хімічної речовини (добрив, пестицидів), МДж/кгд.р.; S — площа плантації, га; k_n — період експлуатації плантації, років; V — річна витрата біопалива, т/рік; Q_p^H — нижча теплота згорання дизельного пального, МДж/л (47,78 МДж/л [11]); A — кількість золи, що утворюється, т/рік; E_{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; τ — річне завантаження установки, год/рік; e_{збер.нав.} — питомі витрати первинної енергії при будівництві навісу для зберігання біопалива, МДж/т.

$$E_{пер} = E_k/k_k + E_{екс.} + E_{ел.}, \quad [ГДж/рік] \quad (5)$$

де, E_{пер} — витрата первинної енергії у підсистемі перетворення палива в теплову енергію, ГДж/рік; E_k — витрати первинної енергії на стадії спорудження та демонтажу установки, ГДж; k_k — розрахунковий період експлуатації установки, років; E_{екс.} — витрати первинної енергії

на ремонт та обслуговування котельного обладнання, ГДж/рік; E_{ел.} — власне енергоспоживання установки, ГДж/рік.

Критерієм енергетичної ефективності за рекомендаціями Міжнародного енергетичного агентства відповідно до результатів виконання Завдання 32 секції Біоенергетика, приймаємо коефіцієнт перетворення енергії EYCNR > 2, а рекомендоване значення EYCNR > 5 [10].

Показником екологічної сталості життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски *Miscanthus x giganteus* у котлі 500 кВт обрано скорочення викидів парникових газів (ПГ) (Δε) у порівнянні з котлом тієї ж потужності на природному газі. Розрахунок балансу парникових газів виконувався відповідно до методики, запропонованої Єврокомісією у своєму звіті з біоенергетики для твердої біомаси та біогазу, що використовуються для виробництва теплової та електричної енергії та охолодження [12]. Методика враховує викиди від одиничних процесів життєвого циклу, таких як операції з обробітку ґрунту, посадки, догляду за плантацією, включаючи внесення добрив та обробіток гербіцидами, збір урожаю, транспортування біомаси, перетворення в теплову та/чи електричну енергію.

Викиди ПГ при виробництві теплової енергії з біомаси мають порівнюватись з відповідними викидами від систем на викопних паливах (природний газ), що становлять 80 гCO₂-екв/МДжтепл.

Таблиця 2. Питомі викиди ПГ у ЖЦ вирощування та використання біомаси міскантусу для виробництва теплової енергії [16]

Питомі викиди парникових газів	Значення
Природний газ	71,75 гCO ₂ -екв/МДж
Дизельне паливо	93,95 гCO ₂ -екв/МДж
Карбамід	1935 гCO ₂ -екв/кгд.р
Нітроамофос (NPK 16-16-16)	5013 гCO ₂ -екв/кгд.р
Гербіциди	138963 гCO ₂ -екв/кгд.р
Електрична енергія*	1,227 кгCO ₂ -екв/кВт·год

* споживачі, які віднесені до 2 класу напруги

Таблиця 3. Технічні характеристики котла на трісці міскантусу

Показники	Значення
Встановлена потужність	500 кВт
Навантаження	4272 год/рік
Номінальне навантаження	70%
ККД котла	85%
Витрата палива (тріска міскантусу)	464,4 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

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 [13]. Біоенергетична технологія вважається екологічно сталою, коли її впровадження зменшує викиди ПГ порівняно з використанням традиційного палива (у даному дослідженні — природного газу). 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 повинні 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 [14]. Наразі, на розгляді в Європарламенті знаходиться Пропозиція для оновленої Директиви, відповідно до якої подібна вимога розповсюджуватиметься і на твердої та газоподібні біопалива для виробництва тепла та електроенергії [15]. В Україні вимоги Директиви 2009/28/ЕС відображені в проекті Закону № 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 зна-

чення показника скорочення викидів ПГ $\Delta\epsilon > 60\%$ порівняно з системою на природному газі.

Відповідно до системи співвідношень (6), із застосуванням коефіцієнтів питомих викидів [16] (табл. 2) був проведений розрахунок скорочення викидів парникових газів у повному циклі виробництва теплової енергії з тріски біомаси *Miscanthus x giganteus* у котлі потужністю 500 кВт (табл. 5).

$$\left\{ \begin{aligned} \epsilon &= K_{зд.} \cdot \Sigma E_{диз.} + K_{з.з.д.д.} \cdot \Sigma E_{з.д.д.} + K_{в.д.д.} \cdot \Sigma E_{герб.} + K_{в.герб.} \cdot \Sigma E_{герб.} + K_{в.ел.} \cdot \Sigma E_{ел.}; \\ F_{C_{h}} &= \frac{\epsilon \cdot B}{Q_1}; \\ \Delta\epsilon &= \frac{EC_{Fh} - EC_{Fh}}{EC_{Fh}}; \\ \Delta\epsilon &> 60\%. \end{aligned} \right.$$

(6)

де, ϵ — викиди ПГ від виробництва твердої біомаси перед її перетворенням у теплову енергію, гCO₂-екв./тбіом.; $K_{в.д.д.}$, $K_{в.мін.д.}$, $K_{в.герб.}$, $K_{в.ел.}$ — питомі викиди парникових газів при, відповідно, використанні дизельного пального, мінеральних добрив, гербіцидів, електричної енергії; $\Sigma E_{диз.}$, $\Sigma E_{мін.д.}$, $\Sigma E_{герб.}$, $\Sigma E_{ел.}$ — сумарне споживання, відповідно, дизельного пального, мінеральних добрив, гербіцидів, електричної енергії; EC_{Fh} — загальні викиди парникових газів при виробництві теплової енергії як кінцевого продукту, гCO₂-екв./МДжвир.; EC_{Fh} — загальні викиди ПГ при використанні викопних палив для виробництва теплової енергії; Q_1 — річне виробництво теплової енергії котельною установкою, МДж/рік; B — річна витрата палива, тбіом./рік; $\Delta\epsilon$ — скорочення викидів парникових газів при виробництві

Таблиця 4. Приведені дані елементарних потоків на вході/виході стадій Сировинного циклу

Елементарний потік на вході/виході до стадії ЖЦ	Значення, кг рік-1 га-1
N	5,31
P	3
K	3
Пестициди	0,18
Дизель	16,13
Врожай сухої маси	11200

теплової енергії із біомаси, %.

Інвентаризація життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски *Miscanthus x giganteus*.

Відповідно до ДСТУ ISO 14040:2013, перед проведенням оцінки життєвого циклу необхідно визначити межі життєвого циклу, в рамках яких визначаються енергетичні та матеріальні потоки. Система виробництва теплової енергії з тріски *Miscanthus x giganteus* (рис. 1.) включає сировинний цикл з отриманням тріски міскантусу на виході й підсистему перетворення, в якій відбувається спалювання тріски міскантусу в котельній установці потужністю 500 кВт із виробництвом теплової енергії.

Дані щодо технологічних операцій та необхідної техніки в межах Сировинного циклу були отримані у консультаціях з виробником міскантусу в Харківській області. Вхідні дані для підсистеми перетворення зяті для котла «Волинь-Кальвіс» 500 кВт (табл. 3).

Внесення добрив протягом життєвого циклу плантації включало внесення у підготовчий рік нітроаммофосу N16P16K16 та Карбаміду N46,2 перед посадкою. Внесення добрив після збору врожаю не враховувалось. Гербіциди вносились лише у підготовчий, перший та другий рік плантації. Інвентаризація елементарних потоків сировинного циклу представлена у табл. 4.

Врожайність міскантусу відрізняється для різних сортів, кліматичних умов та умов ділянки, на якій вирощується плантація. Для розрахунків приймалось, що врожайність міскантусу у період збору складає 15 т/га свіжої біомаси (вологість 20%). Враховуючи, що врожайність першого та другого збору буде складати 25% та 60% від основної врожайності (з 3-го по 20-й збір, середня врожайність за 20 років була розрахована відповідно до рівняння (7):

$$\text{Врожайність міскантусу}_{\text{Середня}} = (1 \text{ врожай} + 2 \text{ врожай} + 3 \text{ врожай} \times 18) / 20, \quad (7)$$

Площа плантації міскантусу була розрахована відповідно до технічних характеристик котла «Волинь-Кальвіс» 500 кВт (табл. 3), а також середньої врожайності міскантусу протягом життєвого циклу (11,2 т/га/рік сухої маси) та складала 33 га.

Споживання дизелю (табл. 5) 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.

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

де $Q_{\text{год.}}$ — годинні витрати палива; N_c — потужність двигуна; q_o — питомі витрати палива; $K_{з.д.}$ — коефіцієнт, що враховує вплив завантаження двигуна на пи-

томі витрати палива [17].

Результати оцінки енергетичної ефективності та екологічної сталості життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски *Miscanthus x giganteus*

На основі рівнянь (1), (2), (3), (4) та (5) було проведено дослідження енергетичної ефективності виробництва теплової енергії у котлі потужністю 500 кВт з тріски *Miscanthus x giganteus*. В таблиці 6 наведені значення всіх складових витрат первинної енергії протягом життєвого циклу використання тріски міскантусу. Значення всіх показників, отримані в даному розрахунку (табл. 6), відповідають рекомендованим діапазоном (EUCNR>5) [10]. Результати розрахунків показують, що впровадження котла на трісці міскантусу є енергетично ефективним за відстані транспортування до 400 км.

З даних, представлених в таблиці 6, 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 9% від усіх витрат первинної енергії викопного палива.

Відповідно до системи співвідношень (6) був проведений розрахунок скорочення викидів парникових газів у повному циклі виробництва теплової енергії з тріски *Miscanthus x giganteus* в котлі потужністю 500 кВт (табл. 7). Аналіз отриманих результатів показує, що скорочення викидів парникових газів при використанні тріски міскантусу є досить високим — 63...89% в залежності від відстані транспортування біомаси (в розглянутому прикладі — 0–750 км).

Результати даного дослідження показують, що сировинний цикл біоенергетичної системи виробництва теплової енергії з тріски *Miscanthus x giganteus* подібний до сировинного циклу заготівлі тюків соломи за споживанням первинної енергії, досягаючи показника EUCNR>5 для відстані транспортування біопалива до котельної установки до 400 км, порівняно із 200 км для тюків соломи у дослідженні [18]. Скорочення викидів парникових газів у даному дослідженні менше за тих же відстаней транспортування, ніж в [18], що пояснюється використанням пестицидів та добрив, які мають високі питомі показники викидів, проте все одно становить більше 60% для відстані транспортування до 750 км.

Висновки

Виконання цілей Енергетичної стратегії України на період до 2035 року можливе лише за активного залучення біомаси енергетичних культур у сектор

Таблиця 5. Інвентаризація витрат первинної енергії у Сировинному циклі

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	ХТ3-242К + 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	ХТ3-242К + КПС-8	дизельне паливо	3,8 л/га	1 операція
Посадка	Трактор + садильна машина	МТ3-892 + КСН-Л-202	дизельне паливо	9,2 л/га	1 операція
Досходове боронування	Трактор + борона	МТ3-892 + БПН-12	дизельне паливо	1,6 л/га	2 операції
Міжрядне дискування	Трактор + Луцильник стерньовий дисковий	John Deere 6930 + ЛСД-3,7	дизельне паливо	4,4 л/га	1 операція
Транспортування води для гербіциду	Трактор + причеп цистерна	John Deere 6930 + РЗС-6	дизельне паливо	3,5 л/т; 2 л/т	1 операція, 3 операції
Внесення гербіциду	Трактор + оприскувач	МТ3-892 + Харді Ренджер	дизельне паливо	1 л/га	4 операції
Внесення мінеральних добрив	Трактор + розкидач	ХТ3-242К + РУМ-8	дизельне паливо	4,2 л/т	2 операції
Збір урожаю з подрібненням у тріску	Комбайн	Claas Jaguar	дизельне паливо	7,5 л/га, 10,7 л/га, 15 л/га	1 рік, 2 рік, 3-20 роки
Транспортування а) ризом, мінеральних добрив, б) біомаси (5 км)	Трактор + причеп	John Deere 6930 (ХТ3-242К, МТ3-892) + 2ПТС-6	дизельне паливо	3,8 л/т, 1,4 л/т	а) 3 операції, б) 20 операцій
Транспортування тріски до центрального складу; котельні	Вантажний транспорт	МАЗ-6501С9-8525-000 з причепом МАЗ-856103-010	дизельне паливо	14,2 г/т*км; 2 г/т*км	86 операцій, 86 операцій
Складування та зберігання тріски міскантусу	під металевим навісом	енергозатрати на матеріали та спорудження		70 МДж/м3 складу	місячний запас палива
Завантажувальні/розвантажувальні роботи	фронтальний навантажувач	MAN BME-1560 (1,5 т)	дизельне паливо	0,5 кг/т	2 операції

Таблиця 6. Витрати первинної енергії протягом життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски міскантусу в котлі 500 кВт, ГДж/рік

N етапу	Назва етапу	Витрати первинної енергії, ГДж/рік			
		0 км	100 км	200 км	400 км
1.	Обробіток ґрунту				
2.	Посадка				
3.	Внесення добрив (у тому числі виробництво міндобрив)				
4.	Внесення гербіциду (у тому числі виробництво гербіциду)				
5.	Транспортування води (для гербіциду та міндобрив), посадкового матеріалу, міндобрив, біомаси				
6.	Збір з подрібненням у тріску за цикл 20 років				
1-6	Всього за етап вирощування та збору				
8.	Вантаження-розвантаження тріски				
9.	Складування та зберігання тріски				
10.	Витрата палива (тріска) в котлі				
11.	Спорудження котельної установки (виготовлення обладнання, будівельно-монтажні роботи)				
12.	Споживання електроенергії котлом				
13.	Витрати енергії на обслуговування котла персоналом				
14.	Витрати енергії на ремонтування котла				
15.	Демонтаж, утилізація обладнання котельної установки				
16.	Транспортування тріски до споживача та золи до місця утилізації	0 км	100 км	200 км	400 км
		0	160,5	321	642
CED, ГДж/рік		6673	6833	6994	7315
EYC		0,77	0,75	0,73	0,7
CEDNR, ГДж/рік		340	501	661	982
EYCNR		15,02	10,21	7,73	5,21

Таблиця 7. Баланс викидів парникових газів протягом життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски міскантусу в котлі потужністю 500 кВт

Стадія життєвого циклу	Викиди ПГ, т CO ₂ -екв/рік			
	0 км	100 км	300 км	750 км
Обробіток ґрунту				
Посадка				
Внесення добрив (у тому числі виробництво міндобрив)				
Внесення гербіциду (у тому числі виробництво гербіциду)				
Транспортування води (для гербіциду та міндобрив), посадкового матеріалу, міндобрив, біомаси				
Збір з подрібненням у тріску за цикл 20 років				
Завантажувальні роботи				
Споживання е/е котлом				
Транспортування тріски до споживача та золи до місця утилізації	0 км	100 км	300 км	750 км
	0	15,1	45,2	113,1
Викиди парникових газів протягом життєвого циклу використання, E _{C_n} , гCO _{2-екв} /МДж	45,4	60,5	90,7	158,5
Скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з тріски міскантусу, %	89,41	85,9	78,87	63,06

виробництва і постачання теплової енергії. Станом на 2015 рік енергетичні культури в Україні вирощувались лише на 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 міскантусу є не вирішеність питання енергетичної ефективності життєвого циклу його вирощування та використання для виробництва теплової енергії, а також можливий негативний вплив на екологію.

Результати проведеної оцінки використання біомаси плантацій *Miscanthus x giganteus* для виробництва теплової енергії упродовж життєвого циклу показали, що найбільш вагомим параметром, що впливає на енергетичну ефективність та екологічну сталість, є відстань транспортування біопалива до енергетичної установки. Вирощування *Miscanthus x giganteus* в Україні із подальшим використанням тріски для виробництва теплової енергії у котельних на біопаливі є екологічно сталим за відстані транспортування до 750 км та енергетично ефективним за відстані транспортування до 400 км.

ЛІТЕРАТУРА:

Енергетичний баланс України за 2016 р. http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2017/energ/en_bal/Bal_2016_u.zip

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

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.

Трибой О.В., Драгнев С.В. Як використати малопродуктивні землі для вирощування сталої біосировини для енергетики? // Журнал «Екологія підприємства». — 2018. — № 7(72). — С.55–63.

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>

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

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.

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

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.

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.

Pimentel, D. (1980). Handbook of energy utilization in agriculture. [Collection of available data]. United States: N. p.

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>

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.

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.

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))

John Neeft et al. (2015). Publishable report of project BioGrace-II, grant agreement IEE/11/733/SI2.616371. Retrieved from <http://www.biograce.net/biograce2/>

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

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

АНОТАЦІЯ

УДК 620.92

Оцінка життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски біомаси *Miscanthus x giganteus* в Україні

Трибой О.В. — консультант відділу Загальних питань біоенергетики НТЦ «Біомаса»

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

Мета. Визначення енергетичної ефективності й екологічної сталості біоенергетичного ланцюжка виробництва теплової енергії з тріски міскантусу *Miscanthus x giganteus* в Україні. Методи. Для дослідження використовувалась методологія оцінки життєвого циклу (LCA), відповідно до якої в межі системи продукту (теплової енергії) входить

сировинної цикл вирощування і збору *Miscanthus x giganteus*, а також підсистема перетворення тріски міскантусу в теплову енергію в біопаливному котлі потужністю 500 кВт. У якості показника енергетичної ефективності був обраний показник сукупних витрат енергії та коефіцієнт перетворення енергії. Система продукту порівнювалася з аналогічною з використанням природного газу. Коефіцієнт перетворення невідновлюваної енергії використовувався для визначення того, у скільки разів вихід енергії більше, ніж внесок невідновлюваної енергії. Допустимим значенням для установок і систем на відновлюваних джерелах енергії вважається отримати в два рази більше енергії на виході, ніж було витрачено невідновлюваної енергії в системі, однак рекомендована величина, прийнята в цій роботі, це отримання енергії на виході з системи в 5 разів більше в порівнянні з витраченою невідновлюваною енергією. У якості показника екологічної сталості було використано скорочення викидів ПГ. Допустимий рівень скорочення викидів парникових газів був обраний на рівні 60% за весь життєвий цикл від вирощування до виробництва теплової енергії, в порівнянні з традиційним виробництвом у газових котлах. **Результати.** Оцінки показали, що найбільш важливим параметром, що впливає на енергетичну ефективність і екологічну сталість, є відстань транспортування. **Висновки.** Вирощування міскантусу *Miscanthus x giganteus* в Україні для подальшого виробництва біопалива у вигляді тріски і його спалювання в біопаливних котлах є екологічно сталим за максимальної відстані транспортування до 750 км і енергетично ефективним за відстані транспортування до 400 км.

Ключові слова: оцінка життєвого циклу, енергетичні культури, виробництво теплової енергії, енергетична оцінка, екологічна оцінка, біомаса, біопаливо, тріска, міскантус, *Miscanthus x giganteus*. Бібл. 18, табл. 7, рис. 1.

СЕС — сукупні витрати енергії;

СЕСДН — сукупні витрати невідновлюваної енергії;

ЕУС — коефіцієнт перетворення енергії;

ЕУСДН — коефіцієнт перетворення невідновлюваної енергії;

ЛСА — оцінка життєвого циклу;

ВДЕ — відновлювані джерела енергії;

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.

ABSTRACT

UDC620.92

Life cycle assessment of heat production from chips of *Miscanthus x giganteus* in Ukraine

Tryboi O. V. — consultant of the General Bioenergy Issues Division of the Scientific-Engineering Centre «Biomass», Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

Purpose. To define the energy efficiency and environmental sustainability of bioenergy value chain for heat production from chips of *Miscanthus x giganteus* in Ukraine. **Methods.** The methodology of Life Cycle Assessment (LCA) was used, according to which, the scope of the product system includes the feedstock cycle of *Miscanthus x giganteus* cultivation and harvest, and the subsystem of *Miscanthus* 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.** Identified that the most significant parameter affecting energy efficiency and environmental sustainability is transportation distance. **Conclusions.** The growing of *Miscanthus x giganteus* 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 750 km and energy efficient with a maximum transportation distance of 400 km.

References 18, tables 7, figure 1.

Key words: energy crops, *Miscanthus x giganteus*, LCA, energy efficiency, GHG, Cumulative Energy Demand, Energy Yield Coefficient, bioenergy heat.