

УДК 620.92

АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОГІСТИКИ ПОСТАЧАННЯ БІОПАЛИВ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ОБ'ЄКТИ

Желєзна Т.А.¹, канд. техн. наук, Драгнєв С.В.², канд. техн. наук¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник, zhelyezna@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-9607-3022>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, dragnev@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-3754-4186><https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.9>

Розглянуто складові ланцюга постачання твердих біопалив. Проведено огляд кращих практик організації заготівельно-логістичних операцій постачання біомаси для енергетичних потреб. Проаналізовано особливості технологій заготівлі біомаси аграрного походження, деревної біомаси, біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень. Розроблено рекомендації щодо запровадження кращих практик логістики біомаси в Україні.

The components of supply chain for solid biomass fuels are considered. An overview of the best practices in biomass harvesting and logistics for supplying to bioenergy facilities has been conducted. The features of harvesting technologies for biomass of agricultural origin, wood biomass, biomass from the pruning and removal of perennial agricultural plantations are analyzed. Recommendations for the introduction of biomass logistics best practices in Ukraine have been developed.

Бібл. 15, табл. 2.

Ключові слова: біомаса, біопаливо, тверде біопаливо, післяжнивні рештки, порубкові залишки, деревні тріски.

ОВБСН – обрізка та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень;

ПТК – промислово-торгівельна компанія;

ТЕС – теплова електростанція;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

ТЛЦ – торговельно-логістичний центр;

ЦТ – централізоване теплопостачання;

р.м. – робоча маса;

с.м. – суха маса;

Q – нижча теплота згорання;

W – вологість.

Індекси:

t – тепловий;

e – електричний.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю заміщення викопних палив відновлюваними джерелами енергії, зокрема біомасою. Біомаса є вуглецево-нейтральним паливом, використання якого не робить внеску до глобального парникового ефекту. Логістика постачання біопалива є важливою складовою біоенергетичних проєктів, від якої у багатьох залежить їх фінансова ефективність. **Метою** роботи є аналіз кращих підходів до організації заготівельно-логістичних операцій постачання біомаси на енергетичні об'єкти, а також розробка рекомендацій для їх впровадження в Україні. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Складові ланцюга постачання твердих біопалив

Оптимальна логістика постачання біомаси на енергетичні об'єкти є однією з важливих передумов успішності реалізації біоенергетичних проєктів. Частка

логістичних витрат у ланцюгах постачання становить 30...50% вартості біопалива у кінцевого споживача, а у випадку далеких міжнародних перевезень (наприклад, деревних гранул морським транспортом) ця частка може сягати більше 75% [1, 2].

Склад і складність заготівельно-логістичних операцій, що впливає на вартість кінцевого продукту, залежить від джерела біомаси та її виду. Сільське господарство, лісове господарство, харчова і переробна промисловість та інші галузі щорічно продукують велику кількість різноманітних видів біомаси у вигляді відходів або побічних продуктів, які можуть бути залучені до енергетичного сектору. Порубкові залишки, післяжнивні рештки, біомаса від обрізки або видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень, енергетичні рослини, інші види твердої біомаси потребують індивідуальних підходів до заготівлі та постачання на об'єкти енергетики. Логістика постачання

залежить не тільки від виду біомаси, але й від її торгової форми (гранули, брикети, тріски, тюки). Чим більш ущільнена біомаса, тим ефективнішим є її транспортування з економічної і енергетичної точки зору у перерахунку на тону-кілометр. Так, наприклад, за однакових умов питома вартість і витрати енергії на перевезення вантажівкою великих тюків соломи (густина 160 кг/м^3 , насипна щільність $70 \dots 160 \text{ кг/м}^3$) майже у 1,6 разів вище, ніж для гранул з соломи (густина 900 кг/м^3 , насипна щільність $500 \dots 700 \text{ кг/м}^3$) [3].

Основні елементи логістичної схеми постачання біомаси включають її заготівлю, зберігання, транспортування і попередню обробку. Кожний з елементів має свої різновиди, наприклад, зберігання може відбуватися на краю поля (тюки соломи), на центральному, проміжному або оперативному складі. Перевезення може реалізовуватися трактором з причепом (тюки соломи на невелику відстань від поля), спеціалізованим транспортом (деревні тріски, гранули) або звичайними вантажівками. Організацією кожного етапу загального ланцюга постачання біомаси можуть займатися як власник енергетичного об'єкту, так і залучені сторонні компанії. В залежності від річного обсягу споживання паливної сировини можливі наступні схеми взаємодії з постачальниками: власник енергетичного об'єкту самостійно виконує заготівлю, зберігання та доставку біомаси; власник делегує всі стадії постачання стороннім організаціям; схема розмежування повноважень, коли, наприклад, заготівлею та доставкою біомаси займається стороння організація, а її зберігання відбувається на складах власника.

Кожний з варіантів має свої переваги і недоліки. Так, коли власник енергетичного об'єкту самостійно виконує заготівлю та доставку біомаси, він може оперативно вирішувати проблеми і гнучко приймати рішення, але при цьому несе повну відповідальність за весь процес постачання. Закупівля біопалива на біржі або у логістичних компаній-посередників зазвичай гарантує надійність і якість поставок. Завадити такому варіанту може лише відсутність біопаливної біржі та організацій, що спеціалізуються на постачанні біопалива. Позитивною стороною укладання прямих договорів з власником біомаси є відсутність посередників, що може призвести до зменшення ціни. Ризиком такого підходу є можливість непередбачуваного росту вартості біомаси при укладанні нового контракту з її власником після закінчення поточного. Цей ризик є особливо високим за відсутності практики довгострокових угод на постачання і недостатньому рівню розвитку біопаливного ринку.

Купівля біомаси на біржі є розповсюдженою практикою в країнах ЄС. Відомим успішним прикладом в

Європі є литовська біопаливна біржа Baltpool, яка ефективно функціонує з 2012 р. [4] За цей час біржа розширила географію своєї роботи на ряд інших країн ЄС – Латвію, Естонію, Польщу, Фінляндію, Швецію, Данію. Сьогодні на Baltpool відбувається електронна торгівля деревним паливом: трісками (п'ять видів), гранулами (чотири види), подрібненою використаною деревиною (два види), сумішшю лігніну та деревної біомаси. Іншим прикладом є американська біопаливна біржа Midwest, на якій запроваджено електронну торгівлю багатьма видами деревної біомаси та агробіомаси для продавців і покупців з США та Канади. Представлені на біржі види біопалив включають деревні гранули, брикети, тріски, тирсу, деревний лом, обрізки плодівих дерев, солом, стебла кукурудзи, стрижні кукурудзи, лушпайку рису, біомасу енергетичних рослин (верба, міскантус, тополя, свічграс) та деякі інші види.

Заготівля і постачання біопалива аграрного походження

Основними особливостями заготівлі післязбирних решток (наприклад, соломи) є сезонність і обмежений термін виконання заготівельних робіт, а також складність логістики. Збір соломи з поля має відбуватися відразу після збору урожаю зернових. Це мінімізує ризик росту вологості біомаси внаслідок опадів та дозволяє одразу приступити до необхідних операцій по обробці ґрунту. Згідно типових сівозмін господарств, збір соломи з полів може тривати не більше 14 днів після закінчення збору урожаю зернових. Повний набір заготівельних операцій соломи включає згрібання, тюкування, складування, перевезення тюків по полю та по автомобільних дорогах, навантаження і розвантаження з вантажівок або причепів, зберігання на полі та на проміжному складі. Зазвичай операціями, які обмежують швидкість виконання заготівлі, є вивіз тюків з поля і їх складування.

Рекомендується заготовляти солом у вигляді великих прямокутних тюків ($2,5 \times 1,2 \times 1,3 \text{ м}$, щільність від 140 кг/м^3) при обсягу її утворення не менше 3 т/г та за вологості не більше 15%. Для операцій вантаження/розвантаження ефективним вважається використання фронтальних або телескопічних навантажувачів 1,5 т з вильотом стріли $10 \dots 12 \text{ м}$. При перевезенні автомобільними дорогами перевагу слід віддавати вантажівкам з причепом довжиною 7,5-8 м кожна складова автопоїзду. Тимчасове зберігання на території об'єктів енергетики рекомендується у закритих складах з висотою складування до 8 м ($6 \times 1,3 \text{ м}$) [5].

В організації постачання соломи для енергетичних потреб найбільш досвідченою в Європі є Данія, де працює велика кількість котельень, ТЕЦ і ТЕС на

соломі. Датська організація постачальників соломи об'єднує фермерів, для яких забезпечення соломою біоенергетичних установок є пріоритетним видом діяльності. Існує локальна торгівля соломою (контракти з фермерами на 1...10 років), оптова і торгівля на основі тендерів або аукціонів (контракти з фермерами, кооперативами на 1...5 років) [6]. Так, наприклад, тюкована солома для котлів системи ЦТ м. Рінгстед ($2 \times 8,5 \text{ МВт}_t$) закуповується через тендери у місцевих фермерів із укладанням контрактів на постачання терміном на 1...3 роки (табл. 1).

В Данії продовжуються дослідження, спрямовані на вдосконалення логістики постачання соломи. Роботи ведуться в двох основних напрямках: збільшення щільності тюків і перехід з використання великих тюків ($2,4 \times 1,2 \times 1,3 \text{ м}$) на середньо-великі ($2,4 \times 1,2 \times 0,9 \text{ м}$), оскільки останні дозволяють ефективніше використовувати вантажопідйомність транспортних засобів. Вантажівки можуть перевозити три шари середньо-великих тюків замість двох шарів великих. Оскільки середньо-великі тюки виробляються практично з такою ж вагою, як і великі, то можна транспортувати майже на 50% більше соломи на вантажівці, тим самим значно зменшуючи питомі витрати [7].

В Україні також є практичні приклади ефективної логістики постачання соломи. Один з них – заготівля соломи для котельні птахокомплексу Дніпровський (м. Нікополь) (див. табл. 1). Великі тюки соломи постачаються з власних полів підприємства площею 3 тис. га, розташованих в радіусі 15 км. Вологість соломи при заготівлі становить 10...12%, на складі котельні – 15%, а котли ($2 \times 5 \text{ МВт}_t$) працюють при вологості біомаси до 17%. Щорічно для потреб котельні заготовлюється близько 10 тис. т соломи із використанням двох прес-підбирачів, кожний з яких може обробляти до 50 га/день. Є також третій прес-підбирач, але він не застосовується, оскільки техніка не встигає вивозити тюки з поля і складувати їх. Заготівля виконується протягом липня-серпня. Загальний успішний досвід підприємства по заготівлі соломи становить більше 10 років.

Викликає інтерес концепція створення торгівельно-логістичних центрів для біомаси сільськогосподарського походження, реалізована в деяких країнах ЄС. Принцип функціонування таких центрів полягає в інтегруванні виробництва і постачання біопалива у звичайну діяльність аграрних компаній. Наприклад, ТЛЦ Tchiggerl Agram (Австрія) постачає стрижні кукурудзи (цілі або подрібнені) і гранули зі стрижнів кукурудзи місцевим побутовим та промисловим споживачам. При цьому основний вид діяльності компанії – вирощування зернових культур і виробництво кормових гранул для худоби.

Заготівля і постачання деревного палива

Деревні відходи, доступні для енергетичних потреб, утворюються головним чином в процесі лісозаготівлі (порубкові залишки, або лісосічні відходи), а також при виробництві меблів, паперу, деревинностружкових плит, деревинноволокнистих плит та іншої подібної продукції (тирса, стружки, обрізки). Обсяг порубкових залишків складає близько 14% від заготівлі круглого лісу. При розпилюванні колод утворюється 35% відходів від обсягу переробки деревини, при виробництві дверних і віконних блоків – 31%, паркету – 30%, меблів – 54% [8].

В процесі рубок головного користування виробляється паливна деревина (дрова, тріски), яка являє собою готове для споживання біопаливо. Для отримання дров використовується низькоякісна деревина. Операції виробництва дров включають навантаження сировини, її доставку, розвантаження, штабелювання, зберігання та сушку, подачу на переробку, розкряжування, розколювання, облагородження, штабелювання готових дров, їх пакування, маркування, відвантаження та розвантаження у споживача. При доставці дров часто використовують поперечне розміщення. Для збільшення місткості кузовів при перевезенні короткомірних лісоматеріалів (довжиною до 2 м) можливе збільшення корисного об'єму кузова за рахунок вертикальної установки лісоматеріалів та формування шапки. Таке укладання також зменшує випадання дров при транспортуванні. Малі партії дров (до $6...8 \text{ м}^3$) перевозяться насипом у кузовах вантажівок або причепах (коефіцієнт повнодеревності 0,4). Штабелювання дров дозволяє більш ефективно використовувати вантажопідйомність транспортного засобу (коефіцієнт повнодеревності 0,67). При зазначених способах перевезення вантажні операції потребують значних витрат часу, тому при великих обсягах виробництва дров застосовують їх доставку на палетах, сітках об'ємом 1...3 м^3 . В такому випадку вантажні операції можуть проводитися механізовано, зокрема, маніпуляторами.

Для отримання паливних трісок може використовуватися більша номенклатура сировини порівняно з дровами, зокрема, тонкомірна деревина і великомірна деревина неправильної форми (пні, обламки стовбурів, стовбури з кроною). Комплексна заготівля ділової деревини та деревної біомаси для виробництва паливних трісок дозволяє знизити витрати на планування, управління та інші основні витрати з розрахунку на кубічний метр лісової продукції. Крім того, застосування лісозаготівельних машин для виконання різних робіт мінімізує питомі витрати. Такі підходи реалізовано, наприклад, у Фінляндії, де постачання деревних трісок на котельні ЦТ та ТЕЦ зазвичай інтегровано у загальну си-

Табл. 1. Кращі приклади організації постачання біопалива на енергетичні установки в ЄС, США і Україні

Вид енергетичної установки (розташування)	Потужність	Вид біопалива	Підхід до логістики постачання біопалива
Котельня системи ЦТ (с. Ульб'єрг, Данія)	1 МВт _т	Основне: солома (до W20%). Додаткове: деревні тріски (до W30%), тирса	Солома у вигляді великих тюків постачається місцевими фермерами. Склад соломи на котельні: 700 великих тюків по 550 кг кожний
Котельня на птахокомплексі Дніпровський (м. Нікополь, Україна)	2×5 МВт _т	Солома (до W17%)	Тюкована солома постачається з власних полів підприємства з радіусу 15 км. Заготівля, доставка власною технікою. Зберігання: 3 склади, 2 скирти.
ТЕЦ системи ЦТ (Лісб'єрг, Данія)	38 МВт _е + 110 МВт _т	Основне: солома. Додаткове: деревні тріски (до 50% загального обсягу біопалива)	Тюковану солому доставляють з місцевих фермерських господарств.
Завод з виробництва біоетанолу компанії DuPont (м. Невада, США, 2015-2018 рр., зараз завод не існує)	113 млн л/рік	Стебла кукурудзи	Тюковані стебла кукурудзи постачалися місцевими фермерами на контрактній основі (500 постачальників в радіусі 48 км, 76 тис. га)
ТЕЦ Järvenpää (Фінляндія)	23 МВт _е + 60 МВт _т	Основне: тріски лісової деревини. Додаткове: деревні/картонні відходи, торф, кінський гній	Тріски виробляються з стовбурів, невеликих дерев і порубкових залишків. Всі види біомаси постачаються з радіусу 100 км вантажівками
ТЕЦ Värtan (Стокгольм, Швеція)	130 МВт _е + 280 МВт _т	Деревні тріски	Деревні тріски постачаються у спеціальних контейнерах морським (3-4 доставки на тиждень) і залізничним (6 днів на тиждень) транспортом
Котельня з паровим котлом на ПТК «Шабо» (Одеська область, Україна)	1,6 т пари/год	Виноградна лоза	Біомаса постачається з виноградників компанії. Радіус заготівлі лози – до 10 км.
Котел системи ЦТ м. Вілафранка-дель-Пенедес (Іспанія)	400 кВт _т	Виноградна лоза	Лоза збирається у 45 фермерів в радіусі до 15 км від місця зберігання. Обрізки залишаються на землі протягом 30 днів для зменшення вологості до 30%.
ТЕЦ і котельня аграрної компанії Nufri (Іспанія)	2 МВт _е + 10 МВт _т ; 10 МВт _т	Деревина видалених фруктових садів	Компанія надає послуги з видалення садів, а отриману біомасу використовує як паливо на ТЕЦ і котельні. Радіус заготівлі – до 40 км.

стему торгівлі круглим лісоматеріалом. Постачальники деревних трісок купують їх у компаній, які займаються торгівлею лісоматеріалами. Доставка до енергетичного об'єкта здійснюється самим постачальником або найманою транспортною компанією. Оплата залежить від енергетичного вмісту біопалива, що передбачає ретельний контроль якості. Сучасні підприємства-виробники гранул зазвичай мають власні ТЕЦ на біомасі для забезпечення своїх потреб у технологічному теплі. Надлишок теплової енергії подається у місцеву систему ЦТ. Поставка гранул на ТЕЦ та котельні часто відбувається за прямими контрактами між виробником і споживачем.

В європейській практиці ведення лісового господарства розрізняють три основні варіанти отримання деревних трісок з порубкових залишків: виробництво безпосередньо на місці утворення відходів лісозаготівлі, на площадці біля лісової дороги або на території біоенергетичної установки. На сьогодні найбільш розповсюдженим варіантом (особливо у Фінляндії і Швеції) є виробництво деревних трісок з лісосічних відходів на площадці біля лісової дороги. В цьому випадку порубкові залишки збираються і доставляються форвардером до дороги, де викладаються у формі валів для сушки протягом певного періоду часу. Тріски виробляються пересувною рубальною машиною, агрегованою з сільськогосподарським трактором, після чого вивозяться з лісу вантажівками та спеціальними трісковозами з або без причепів/напівпричепів. Інша опція цього варіанту полягає у виробництві і перевезенні деревних трісок комбінованою машиною – автотрісковозом, оснащеним рубальним модулем [9-11].

У разі подрібнення порубкових залишків на місці їх утворення в лісі потрібна високомобільна рубальна машина, оснащена контейнером для трісок об'ємом 15...20 м³. Рубальна машина перевозить тріски на площадку біля дороги. Тріски з контейнера (який нахилиється для розвантаження) переміщуються у вантажівку для доставки споживачу. Такий варіант не підходить для заготівлі великих обсягів деревної біомаси. При виробництві деревних трісок з лісосічних відходів на території енергетичного об'єкта або на проміжному складі має місце незалежна робота рубальної машини і вантажівки. Замість мобільних рубальних машин можуть використовуватися стаціонарні дробарки. Для підвищення ефективності логістики, у цьому варіанті рекомендується перевезення порубкових решток з лісу до місця подрібнення у вигляді тюків або в'язанок.

Належне зберігання деревного біопалива є важливою складовою загального ланцюга постачання. При зберіганні трісок у купах під час опадів зволожується не дуже глибокий поверхневий шар, а характеристики

основної маси біопалива залишаються незмінними. При такому способі зберігання у періоди ясної погоди тріски підсушуються. Для запобігання злежуванню, започаткуванню процесів гниття, утворенню плісняви та іншим негативним явищам необхідно виконувати воружіння забуртованих трісок. Приблизно раз на два тижні купу з трісками треба перемішувати на інше місце. В середньому за 2...3 місяці втрата вологи складає 7...10%. Існуючий досвід зберігання трісок в складських приміщеннях, що не обладнані системами якісної вентиляції, свідчить про негативні наслідки через утворення великої кількості пари в середині приміщень.

Прикладом комплексного підходу до реалізації ланцюга постачання є робота торгівельно-логістичних центрів для деревної біомаси в Австрії. Такі центри були створені з метою підвищення надійності, ефективності та обсягів постачання деревного біопалива споживачу шляхом залучення власників лісу як безпосередніх гравців ринку біомаси. Сьогодні ТЛЦ Австрії координують весь процес – від заготівлі і доставки біопалива до центру до його постачання кінцевим споживачем. Існують мінімальні вимоги до інфраструктури і обладнання центру, а також обсягу деревини, що зберігається. Передові ТЛЦ обладнані автоматизованою системою, яка дозволяє приймати та вести облік поставленої деревини у період відсутності працівників. Торгівельно-логістичні центри для деревної біомаси існують і в інших країнах ЄС, але їх діяльність відрізняється від класичного прикладу Австрії. Так, в Німеччині і Словенії ТЛЦ окрім своїх основних функцій можуть займатися також вирощуванням енергетичних рослин, експлуатацією котельнь та мереж ЦТ, реалізацією нових біоенергетичних проєктів, а також продажом, встановленням і обслуговуванням котлів на деревній біомасі [12].

Біомаса від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень

До деревного біопалива можна віднести біомасу від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень (садів, виноградників), хоча в ЄС фахівці класифікують її як вид агробіомаси. Даний напрямок біоенергетики є відносно новим, особливо у порівнянні із досвідом використання лісової деревини і соломи. Тим не менш, вже зараз в Європі є чимало прикладів успішної роботи комерційних енергетичних установок на біомасі ОВБСН. Серед таких прикладів виробництво технологічної пари з виноградної лози у котельні ПТК «Шабо» (Одеська область); отримання теплової енергії з виноградної лози для системи ЦТ м. Вілафранка-дель-Пенедес (Іспанія);

робота ТЕЦ 2 МВт_е + 10 МВт_т і котельні 10 МВт_т на деревині видалених фруктових садів аграрної компанії Nufri (Іспанія) (див. табл. 1) [13].

При обрізці плантацій дерев біомаса утворюється в обсязі 1...5 т/га. Можна виділити три підходи до заготівлі такої біомаси. У першому випадку вітки переміщуються або стягуються на край плантації, де відбувається їхнє подрібнення або тюкування. Другий варіант полягає у поєднанні операцій збору з подрібненням або тюкуванням обрізків. В обох випадках біомаса контактує з ґрунтом і може бути забрудненою ґрунтом і камінням. Третій варіант – поєднання операції обрізки з подрібнення, в результаті чого біомаса не контактує з ґрунтом, а отримане біопаливо є чистим. Даний варіант наразі ще знаходиться в стадії розвитку, але є перспективним через свої переваги.

При заготівлі біомаси від видалення багаторічних насаджень (обсяг до 50 т/га) можна викорчувувати цілі дерева з наступним подрібненням на краю плантації або у міжрядді; виконувати рубку наземної частини дерева з подрібненням на місці, на краю плантації або на спеціальному терміналі. При викорчуванні цілих дерев отримана біомаса містить каміння і ґрунт, тому її якість значно нижча порівняно з лісовою деревиною. При застосуванні опції подрібнення дерев у міжрядді (без стягування на край плантації), забруднення біомаси значно менше. Якщо заготовлюється тільки наземна частина дерева, біопаливо є незабрудненим, але в землі залишаються пні і потрібні додаткові витрати на їх вида-

лення. Теоретично можливий варіант заготівлі, в якому операція рубки поєднана з подрібненням, але для нього ще не розроблено технічних рішень і обладнання.

Кожний з описаних вище підходів до заготівлі біомаси ОВБСН характеризується своїм набором обладнання, яке може відрізнитися навіть в рамках одного варіанту і впливати на вартість отриманого біопалива. Так, наприклад, при роздільному збиранні та подрібненні обрізків вартість біопалива, доставленого споживачу, може коливатися в межах 870...1110 грн/т. Нижня межа передбачає використання дискового подрібнювача навісного на трактор і перевезення біомаси трактором з причепом на відстань 10 км. Верхня межа відповідає випадку застосування мобільного барабанного подрібнювача на шасі вантажного автомобіля і транспортування біомаси вантажівкою на 20 км. У варіанті поєднаних операцій збору (трактор з вилами/граблями) і подрібнення (подрібнювач причіпний на трактор з контейнером) вартість біопалива становить близько 765 грн/т при перевезенні трактором з причепом на відстань 10 км. Всі наведені випадки відповідають обсягу виходу обрізків 2 т/га.

За теплотворною здатністю біомаса/біопалива ОВБСН є близькими до лісової деревини (табл. 2). Порівняння характеристик брикетів з виноградної лози з вимогами стандарту ISO 17225-3 для брикетів класу В (сировина – деревні насадження та інша природна деревина) показує, що вони відповідають стандарту по масовій частці вологи ($M \leq 15\%$ р.м.), нижчій теплоті зго-

Табл. 2. Склад та паливні характеристики гранул і брикетів з біомаси ОВБСН [14]

Показники	Брикет		Гранули		
	з виноградної лози	з деревної тирси*	з видалених фруктових дерев	з виноградної лози	з деревної тирси*
Вологість, %	11	4...8	13	10	≤ 10
Зольність, %	3,4	0,5...1,1	4,8	4,5	$\leq 0,7$
Q, МДж/кг с.м.	18,0	19,0	18,1	17,7	19,0
Густина, т/м ³	0,61...0,72	1,15...1,25	~1,0	~1,0	1,2
Насипна щільність, кг/м ³	760	800...1000	530	710	600...750
Вміст окремих елементів, %:					
- вуглець С	49,0	50,0	49...51	49,0	50,0
- водень Н	5,9	6,0	6,2...6,5	5,8	6,0
- азот N	0,85	< 0,3	0,5...1,0	0,81	< 0,3
- сірка S	0,05	< 0,04	0,01	0,07	< 0,04
- хлор Cl	0,05	< 0,03	< 0,03	0,02	< 0,03
Температура плавлення золи, °С	1300	> 1100	> 1000	1380	> 1100

* Для порівняння.

рання ($Q \geq 14,9$ МДж/кг р.м.), вмісту азоту ($N \leq 1,0\%$ с.м.) та сірки по верхній межі ($S \leq 0,05\%$ с.м.). Не відповідають стандарту зольність брикетів з виноградної лози (вимога $A \leq 3,0\%$) і вміст хлору (вимога $Cl \leq 0,03\%$). Щодо вимог до якості гранул за EN plus, гранули з біомаси ОББСН можуть задовольняти вимогам по нижчій теплотворній здатності, насипній щільності, температурі плавлення золи, вмісту азоту і хлору (для ENplus B).

Подрібнені обрізки та видалена деревина часто характеризуються значною негомogeneousністю маси. Наявність занадто крупних часток може призводити до забивання шнеків і утворення перемичок у паливних бункерах енергетичних установок. Для запобігання цьому подрібнену біомасу з високим ступенем неоднорідності треба додатково просіювати перед кінцевим споживанням. Крім того, існують практичні рекомендації для мінімізації попаданню ґрунту і каміння при заготівлі біомаси ОББСН.

Висновки та рекомендації для України

Ефективна логістика постачання біомаси мінімізує її вартість як палива «на вході» енергетичного об'єкту. Це є важливим, оскільки паливна складова є найбільшою (до 70% і вище) і часто вирішальною у формуванні ціни виробленої енергії. Вартість вихідної сировини також значно впливає на рентабельність виробництва всіх видів біопалива. Крім цього важливими факторами є належна якість біомаси та вчасність її доставки на біоенергетичний об'єкт.

Україні необхідно вивчати і впроваджувати кращий європейський досвід реалізації заготівельно-логістичних операцій постачання біомаси для енергетичної конверсії, зокрема, післяжнивних решток, лісової та іншої деревини, біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень. Фахівці Інституту технічної теплофізики НАН України брали участь у розробці проєктів базових документів, у тому числі законодавчих, для створення в Україні системи електронної торгівлі біомасою, а також для практичної реалізації концепції виробництва деревних трісок з порубкових залишків на площадці біля лісової дороги [4, 15].

Пропозиції по створенню системи електронної торгівлі в Україні враховують кращу світову практику роботи біопаливних бірж, у тому числі біржи Baltpool. Відповідний проєкт закону було зареєстровано у Верховній раді України у 2022 році (№ 8052 від 19.09.2022). Рекомендації по запровадженню виробництва деревних трісок з лісосічних відходів передбачають низку заходів, які потребують законодавчого врегулювання. Ці заходи включають покладання на постійних лісокористувачів обов'язку вивезення поруб-

кових решток до найближчих доріг, заборону суцільного та часткового спалювання порубкових решток, уведення обліку порубкових решток шляхом врахування їх повної маси у лісорубних квитках. Для кожної з пропозицій розроблено проєкти нормативно-правових актів. Дотепер ці напрацювання, на жаль, ще не були розглянуті і затверджені на офіційному рівні. Однак, вони залишаються актуальними, оскільки країні необхідно розвивати ринок біомаси як палива для прискорення заміщення викопних палив відновлюваними джерелами енергії.

Іншими актуальними напрямками для вітчизняної біоенергетики є освоєння технологій заготівлі стебел кукурудзи і соняшника, розвиток вирощування енергетичних рослин, створення торгівельно-логістичних центрів для деревної/аграрної біомаси або реалізація інших подібних концепцій, запровадження практики довгострокових контрактів на постачання біомаси і оплати за поставлену енергію (а не за вагу чи об'єм), розвиток спеціалізованих компаній, що займаються питаннями логістики біомаси та біопалив.

Пріоритетне використання побічних продуктів виробництва кукурудзи на зерно (а не соломи зернових колосових) має дві переваги. По-перше, кукурудзиння має кращі паливні характеристики, ніж солома; по-друге, його часткове відчуження з полів для використання як біопалива несе меншу загрозу для погіршення родючості ґрунтів. В Україні запровадити заготівлю і постачання стебел кукурудзи (а в майбутньому і стебел соняшнику) можна, наприклад, за концепцією роботи торгівельно-логістичних центрів для аграрної біомаси. В такому випадку виробництво біопалива буде складовою загальної роботи сільськогосподарської компанії і додатковим джерелом її доходу. Для реалізації цієї концепції необхідно освоїти технологію заготівлі стебел кукурудзи/соняшнику, знайти надійних споживачів виробленої продукції і укласти з ними довгострокові контракти на постачання. Будівництво нових котелень, ТЕЦ і ТЕС на біомасі сприятиме створенню компаній, які будуть займатися логістикою постачання біопалив на енергетичні об'єкти як пріоритетним видом діяльності.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Martin Junginger, Peter-Paul Schouwenberg. Sustainable biomass markets and international bioenergy trade to support the biobased economy. IEA Bioenergy, Task 40, 2019. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/11/IEA-Bioenergy_Task-40-Triennium-2016-2018-1.pdf*

2. *Biomass supply chains*. WBA fact sheet, 2018.
<https://www.worldbioenergy.org/uploads/Factsheet%20-%20Biomass%20Supply%20Chains.pdf>
3. Гелету́ха Г., Драгне́в С., Кучеру́к П., Матве́єв Ю. Практичний посібник з використання біомаси в якості палива у муніципальному секторі України. Проект ПРООН/ГЕФ, 2017. – 37 с.
<https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/01/biofin.pdf>
4. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Баи́товий А.І. Створення конкурентного ринку біопалив в Україні. Частина 2 // Промислова теплотехніка. – 2017, т. 39, № 4, с. 76-80.
<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2017.11>
5. Олі́йник С., Анто́ненко В., Ча́плигін С., Зу́бенко В. Підготовка та впровадження проєктів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. Практичний посібник / За ред. Г. Гелету́хи. – К.: «Поліграф плюс», 2016. – 104 с.
<https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/posibnyk-onovlenyi-2016.pdf>
6. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Баи́товий А.І., Гелету́ха Г.І. Огляд кращих практик організації роботи ринку біопалив у країнах ЄС // Промислова теплотехніка. – 2017, т. 39, № 5, с. 108-112. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.18>
7. *Torben Skøtt, Jørgen Hinge, Louise Krogh Johnson. Straw to Energy. Technologies, policy and innovation in Denmark. Second edition.* – Aarhus: Food & Bio Cluster Denmark, 2021. – 56 p.
<https://agrobioheat.eu/agrobiomass-guides/>
8. Дзя́дике́вич Ю., Розу́м Р., Бу́ряк М. Основні напрями управління процесами використання відходів деревини // Наука молода. – 2011, № 15-16, с. 274-278.
<http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/27395/1/%D0%94%D0%B7%D1%8F%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf>
9. *Bengt Nilsson. Extraction of logging residues for bioenergy.* Linnaeus University Dissertations N 270/2016.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1049815/FULLTEXT01.pdf>
10. *Pentti Hakkila. Developing technology for large-scale production of forest chips. Interim Report, National Technology Agency, 2003.* <https://www.iufro.org/download/file/1466/1605/02-hakkila-woodenergy-99-03.pdf>
11. *Eija Alakangas. Properties of wood fuels used in Finland. BIOSOUTH project. 2005.* https://p29596.typo3server.info/fileadmin/Files/Documents/06_Publications/BIOSOUTH_Wood_fuel_properties_Oct2005.pdf
12. *Report about Potentials and Limitations for the Transfer of Good Practise Examples. BioRES – Sustainable Regional Supply Chains for Woody Bioenergy, 2015.*
http://bioresproject.eu/wp-content/uploads/2016/02/Potentials-and-Limitations-for-the-Transfer-of-Good-Practice-Examples_Dec.2015.pdf
13. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Баи́товий А.І. Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні // Промислова теплотехніка. – 2018, т. 40, № 1, с. 68-74. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.10>
14. Драгне́в С.В., Желе́зна Т.А., Баи́товий А.І. Техніко-економічне обґрунтування проєктів виробництва твердого біопалива з біомаси від обрізки багаторічних сільськогосподарських насаджень в Україні // Теплофізика та теплоенергетика. – 2021, т. 43, № 2, с. 68-76. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2021.8>
15. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Баи́товий А.І. Аналіз можливостей заготівлі деревного палива в лісах України // Промислова теплотехніка. – 2018, т. 40, № 1, с. 61-67.
<https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.09>

ANALYSIS OF DIRECTIONS TO OPTIMIZE LOGISTICS OF BIOMASS FUEL SUPPLY TO ENERGY FACILITIES

Zheliezna T.A.¹, Drahnev S.V.²

¹PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-9607-3022, e-mail: zhelyezna@secbiomass.com

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0003-3754-4186, e-mail: dragnev@secbiomass.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.9>

The objective of the work is analysis of the best options for harvesting and logistics of biomass supply to energy facilities. Another purpose is to develop recommendations for implementing best practices of biomass logistics in Ukraine. Effective logistics of biomass fuel supply is one of the important prerequisites for a successful implementation of bioenergy projects. The share of logistics cost in the whole supply chain is 30...50% for biomass delivered to the consumer. In case of long-distance international transportation this share may reach more than 75%. The composition and complexity of harvesting and logistics operations, which affects the final product cost, depends on biomass source, type and commercial form (pellets, briquettes, chips, bales). The more compressed biomass is, the more efficient its transportation is from an economic and energy point of view in terms of ton-kilometer. Effective biomass supply logistics minimizes its cost as a fuel for an energy facility. This is important because fuel cost is the largest component (up to 70% and more) and often plays the crucial role in forming the price of energy produced. It is important for Ukraine to study and implement the best European experience in harvesting and logistics operations for biomass supply for energy conversion. In particular, this includes the creation of a system for biomass electronic trading as well as practical implementation of the concept for wood chips production from felling residues on a forest roadside. Drafts of required basic documents, including legislative ones, have already been developed for these areas. Other priority tasks for the domestic bioenergy sector are the mastering of technologies for corn and sunflower stalks harvesting, development of energy crops growing, creation of trade and logistics centers for wood/agrarian

biomass or the implementation of other similar concepts, introduction of long-term contracts for biomass supply and payment for biomass delivered per its energy unit (not per ton), development of companies that specialize in biomass and biofuel logistics.

References 15, table 2.

Key words: biomass, biomass fuel, solid biomass fuel, crop residues, felling residues, wood chips.

1. Martin Junginger, Peter-Paul Schouwenberg. Sustainable biomass markets and international bioenergy trade to support the biobased economy. IEA Bioenergy, Task 40, 2019. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/11/IEA-Bioenergy_Task-40-Triennium-2016-2018-1.pdf

2. Biomass supply chains. WBA fact sheet, 2018. <https://www.worldbioenergy.org/uploads/Factsheet%20-%20Biomass%20Supply%20Chains.pdf>

3. Geletukha G., Drahnev S., Kucheruk P., Matveev Y. Praktychnyi posibnyk z vykorystannia biomasy v yakosti palyva u munitsypalnomu sektori Ukrainy. [Practical manual on the use of biomass as fuel in the municipal sector of Ukraine.]. UNDP/GEF project, 2017. – 37 p. (Ukr.). <https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/01/biofin.pdf>

4. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I. Stvorennia konkurentnoho rynku biopalyv v Ukraini. Chastyna 2. [Creation of the competitive biofuel market in Ukraine. Part 2.]. Industrial Heat Engineering. – Vol. 39, No. 4 (2017) – P. 76-80. (Ukr.). <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2017.11>

5. Oliynyk E., Antonenko V., Chaplyhin S., Zubenko V. Pidhotovka ta vprovadzhennia proektiv zamishchennia pryrodnoho hazu biomasoiu pry vyrobnytstvi teplovoi enerhii v Ukraini. [Preparation and implementation of projects to replace natural gas with biomass in the production of heat energy in Ukraine.]. Practical guide/Edited by G. Geletukha – K.: “Poligraph Plus”, 2016. – 104 p. Практичний посібник / За ред. Г. Гелетухи. – К.: «Поліграф плюс», 2016. – 104 с. (Ukr.). <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/posibnyk-onovlenyi-2016.pdf>

6. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I., Geletukha G.I. Ohliad krashchykh praktyk orhanizatsii roboty rynku biopalyv u krainakh YeS. [Review of best practices of biofuel market operation in the EU countries.]. Industrial Heat Engineering. – Vol. 39, No. 5 (2017) – P. 108-112. (Ukr.). <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.18>

7. Torben Skøtt, Jørgen Hinge, Louise Krogh Johnson. Straw to Energy. Technologies, policy and innovation in Denmark. Second edition. – Aarhus: Food & Bio Cluster Denmark, 2021. – 56 p. <https://agrobioheat.eu/agrobiomass-guides/>

8. *Dziadykevych Yu., Rozum R., Buriak M.* Osnovni napriamy upravlinnia protsesamy vykorystannia vidkhodiv derevyny. [Main areas of management of wood waste utilization processes.]. Young science. – No. 15-16 (2011) – P. 274-278. (Ukr.).
<http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/27395/1/%D0%94%D0%B7%D1%8F%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf>
9. *Bengt Nilsson.* Extraction of logging residues for bioenergy. Linnaeus University Dissertations N 270/2016.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1049815/FULLTEXT01.pdf>
10. *Pentti Hakkila.* Developing technology for large-scale production of forest chips. Interim Report, National Technology Agency, 2003. https://www.iufro.org/download/file/1466/1605/02-hakkila-woodenergy-99-03_pdf
11. *Eija Alakangas.* Properties of wood fuels used in Finland. BIOSOUTH project. 2005.
https://p29596.typo3server.info/fileadmin/Files/Documents/06_Publications/BIOSOUTH_Wood_fuel_properties_Oct2005.pdf
12. *Report about Potentials and Limitations for the Transfer of Good Practise Examples.* BioRES – Sustainable Regional Supply Chains for Woody Bioenergy, 2015.
http://bioresproject.eu/wp-content/uploads/2016/02/Potentials-and-Limitations-for-the-Transfer-of-Good-Practice-Examples_Dec.2015.pdf
13. *Geletukha G., Zheliezna T., Drahniev S., Bashtovyi A.* Perspektyvy vykorystannia biomasy vid obrizky ta vydalennia bahatorichnykh silskohospodarskykh nasadzhen dlia vyrobnytstva enerhii v Ukraini. [Prospects for using biomass from agrarian pruning and plantation removal in Ukraine.]. Industrial Heat Engineering. – Vol. 40, No. 1 (2018) – P. 68-74. (Ukr.). <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.10>
14. *Drahniev S., Zheliezna T., Bashtovyi A.* Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia proektiv vyrobnytstva tverdogo biopalyva z biomasy vid obrizky bahatorichnykh silskohospodarskykh nasadzhen v Ukraini. [Feasibility study of projects for the production of solid biofuels from biomass of agrarian plantations pruning and removal in Ukraine.]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – Vol. 43, No. 2 (2021). – P. 68-76. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2021.8>
15. *Geletukha G., Zheliezna T., Drahniev S., Bashtovyi A.* Analiz mozhlyvostei zahotivli derevnoho palyva v lisakh Ukrainy. [Analysis of opportunities for harvesting wood fuel in the forests of Ukraine.]. Industrial Heat Engineering. – Vol. 40, No. 1 (2018) – P. 61-67. (Ukr.). <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.09>

Отримано 15.12.2023

Received 15.12.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024