

Антоніна В. Калініченко, Юлія В. Вакуленко, Олександр А. Галич
**ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ДОЦІЛЬНОСТІ
ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКЦІЇ РОСЛИННИЦТВА
В АЛЬТЕРНАТИВНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ**

У статті розглянуто можливості, а також способи використання біомаси як джерела енергії для теплозабезпечення малих сільськогосподарських підприємств. Акцент зроблено на еколого-економічних перевагах такого типу енергопостачання.

Ключові слова: біомаса; пелети; брикети; альтернативна енергетика.

Літ. 10.

Антонина В. Калиниченко, Юлия В. Вакуленко, Александр А. Галыч
**ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДУКЦИИ
РАСТЕНИЕВОДСТВА В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

В статье рассмотрены возможности, способы и пути использования биомассы как источника энергии для теплоснабжения малых сельскохозяйственных предприятий. Акцент сделан на эколого-экономических преимуществах такого типа энергоснабжения.

Ключевые слова: биомасса; пеллеты; брикеты; альтернативная энергетика.

Antonina V. Kalinichenko¹, Yuliya V. Vakulenko², Oleksandr A. Galych³
**ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF FEASIBILITY
OF USING CROP PRODUCTS IN ALTERNATIVE ENERGY**

The article reviews the possibilities and the methods of using biomass as an energy source for heating supply of small agricultural enterprises. The emphasis is put on ecological and economic benefits of this type of energy supply.

Keywords: biomass; pellets; briquettes; alternative energy.

Постановка проблеми. Зростання світових енергетичних потреб, спричинене швидким розвитком промислового виробництва, обмежена кількість корисних копалин та надмірне забруднення навколишнього середовища спрямовують все більше уваги на відновлювальні джерела енергії. Останні 5 років у країнах ЄС спостерігається динамічне зростання виробництва пристроїв та агрегатів для пелетування та брикетування біомаси, з одного боку, та збільшення кількості твердопаливних котлів та камінів для спалювання такого виду палива – з іншого. Одним з найважливіших факторів такої зацікавленості, безперечно, є нижча ніж у традиційних видів палив ціна, але свою роль відіграють і доступність, екологічність та необхідність утилізації біомаси.

Аналіз останніх публікацій. На сьогоднішній час близько 95,5% загальної енергії, отриманої з біомаси, перетворюється безпосередньо у теплову та механічну енергію (біопаливо) і лише близько 4,5% – в електроенергію [1–3; 8–10]. Що стосується використання соломи і стебел культурних рослин для виробництва біогазу або спалювання в якості твердого палива, то при визначенні допустимих обсягів їх як біоенергетичної сировини необхідно враховувати і традиційні напрями їх використання у агроєкосистемах – для утриман-

¹ Poltava State Agrarian Academy, Ukraine; Opole University, Poland.

² Poltava State Agrarian Academy, Ukraine.

³ Poltava State Agrarian Academy, Ukraine.

ня й годівлі тварин, а також відтворення родючості ґрунту. Науково обґрунтований баланс рослинних залишків у збалансованих агроєкосистемах є наступним: на корм і підстилку для тваринництва – 30%, заробка в ґрунт – 40%, на енергетичні цілі – 30% [1; 4; 6; 9; 10].

Мета дослідження – аналіз шляхів, способів, можливостей та доцільності використання біомаси для енергозабезпечення малих сільськогосподарських підприємств.

Основні результати дослідження. Найпростішим способом виробництва теплової енергії з біомаси є її пряме спалювання. Наприклад, тепла енергія 1 кг соломи з вологістю 15% становить близько 14,3 МДж, що відповідає запасам теплової енергії 0,81 кг деревини для опалення, 0,75 кг бурого вугілля або 0,41 м³ природного газу [3; 6]. Очевидно, що використання для енергетичних цілей 10 т соломи, наприклад, дозволяє зменшити використання вугілля приблизно на 4–5 тонн, а також зменшити викиди CO₂ до атмосфери приблизно на 8–10 млн тонн. Спалювання соломи супроводжує залишкова емісія SO₂, а обсяги ж емісії NO_x подібні до вугільних котелень. Зольні залишки становлять 3–5% від маси спалюваної соломи. Головною складовою попелу є калій, що може використовуватись в якості добрива.

Солома, що спалюється у котлах, характеризується великою неоднорідністю та різним вмістом мінеральних частин і, що дуже важливо, різною вологістю. Летючі складові соломи сягають 70%. Тому солома вважається досить складним паливом для ефективного спалювання [8].

Сучасні котлоагрегати для спалювання соломи дозволяють отримати показники ККД на рівні 80–90% з наднизькими показниками викидів [9].

У процесі спалювання соломи горючі гази і недоокислені частки палива вимагають допалення при температурі понад 800°C, перед тим як вони охолонуть у зоні теплообмінника котла. Для такого способу спалення використовують різні конструкції котлів, складність яких залежить насамперед від потужності котла.

Можна виділити 3 головні типи котлів для спалювання соломи [2]:

- котли з «сигарним» спалюванням всього тюку соломи. Переважно це великі котли, якими забезпечені теплові мережі і теплоелектроцентралі, оснащені автоматичною системою завантаження тюками соломи масою до 500 кг;

- котли для спалювання подрібненої соломи малої та середньої теплової потужності. Подача соломи відбувається від солеморізки пресованої соломи (кожна з яких пристосована для окремого виду тюків соломи) через систему транспортерів або за допомогою повітряного потоку. Паливо подається безперервно. Система автоматичної подачі соломи істотно впливає на вартість всього агрегату;

- котли з двофазним спалюванням тюків малої та середньої потужності. Двофазне спалювання є комбінацією процесів газифікації біопалива та спалювання газу і часток палива в потоці припливного повітря.

У більшості господарств соломоспалювальні котли включені до мережі центрального обігріву паралельно з основним опаленням, що дозволяє зберегти енергетичну безпеку на випадок браку пелетів або брикетів з соломи.

Єдиним обмеженням для такого проекту є потреба у додатковому просторі у котельнях під обладнання. Котли середньої потужності пристосовані для спалювання тюків вагою до 12 кг. Обслуговування котлів дуже просте. До котлів потужністю до 100 кВт завантажується декілька невеликих брикетів вагою до 12 кг (від 2 до 6 штук) не частіше трьох разів на добу. Влітку одного завантаження соломи на добу достатньо для підігріву води для системи гарячого водопостачання. Застосування у системах гарячого водопостачання та обігріву теплозбірника дозволяє значно полегшити їх обслуговування. Ємність сховища розраховується виходячи з потужності котла. Коефіцієнт корисної дії твердопаливних котлів, розрахованих на спалення брикетів, не перевищує 80%. Великим недоліком використання цього типу котлів є їх вимогливість до вологості соломи ($\leq 20\%$). Підвищений вміст вологи призводить до значного зменшення теплотворної здатності (навіть до 8 МДж/кг, тобто майже до 50%) та неповного згорання паливних брикетів [2].

У сільських будинках для опалення останнім часом все частіше використовують каміни з водяним контуром, в яких спалюються дрова, брикети або пелети з біомаси. При цьому, вартість опалення знижується приблизно удвічі, у порівнянні до опалювання газовим котлом.

Для кращого зберігання соломи та підвищення ефективності процесу спалювання широко застосовується операція пелетування та брикетування.

Пелети – це паливо, вироблене методом пресування під великим тиском у спеціальну форму. Солома добре пресується при вологості 17–18% з додаванням зв'язуючої речовини (рисового або кукурудзяного борошна у кількості декількох відсотків на тонну, яке отримують з молоткового млина). У процесі пелетування соломи використовують електроенергію вдвічі більше, ніж при її брикетуванні. Суха солома, зібрана у полі, як сировина для пелетування, не потребує додаткового сушіння ($< 15\%$ вологості) [4]. Основне обладнання для пелетування: подрібнювач, млин молотковий, гранулятор з пелетуєчими насадками.

Брикети – екологічне паливо, що виробляється методом холодного або гарячого пресування нарізної соломи без додавання будь-яких хімічних наповнювачів та клеїв. Брикети можуть застосовуватися для спалювання разом з вугіллям або окремо в традиційних твердопаливних котлах, камінах, печах, теплостанціях та автоматизованих котельнях. Теплотворна здатність брикетів становить від 15,5 до 17,5 МДж/кг (1 т вугілля за енергією дорівнює 1,25 т брикетів).

У відповідності до зміни стратегій використання сільськогосподарських угідь землеробство країн ЄС останнім часом все більше орієнтується на вирощування енергетичних культур як сировини для промисловості і локальної енергетики. Найбільш поширеними енергетичними культурами у Польщі є тополя, верба, міскантус, вільха, акація та ін. Беручи до уваги майже удвічі більший щорічний приріст біомаси у порівнянні з деревиною і у півтора рази більшу теплотворну спроможність, їх можна вважати одним із найважливіших видів поновлювального твердого енергоносія. Собівартість отримання сухої речовини таких культур сьогодні знаходиться у межах 13,6–18,2 євро/т, а питома теплота згорання – понад 3000 ккал/кг, що робить цей вид палива

значно конкурентоздатнішим у порівнянні з іншими видами твердого палива [2]. Неабияку енергетичну цінність мають луб'яні культури. Біомаса швидко зростаючих енергетичних культур використовується як сировина у хімічній промисловості для виготовлення целюлози і метанолу, а також як відновлюване екологічне паливо.

На основі аналізу результатів наших досліджень ситуації з виробництва енергетичних культур у регіоні досліджень було виділено наступні переваги вирощування енергетичних рослин:

- низькі витрати праці, що забезпечують швидку окупність інвестиції;
- низькі енергетичні витрати на обробіток при вирощуванні (мала потреба в гною та пестицидах);
- висока продуктивність;
- можливість вирощування на значних площах;
- можливість застосування стандартних машин як для передпосівного обробітку ґрунту, так і для посадки, а з незначними пристосуваннями – й для збору біомаси;
- практично необмежений ринок збуту й можливість загосподарювання деградованих земель;
- безпечність для довкілля (поєднання суспільних цілей: екологічних й сільськогосподарських).

Плантації енергетичних рослин сьогодні найчастіше всього розміщуються у агроєкосистемах, що характеризуються значною вологістю ґрунту, підвищеним рівнем забруднення або іншими негативними ознаками [2].

Видами, найбільш пристосованими до обробітку, є різні форми виду *Salix viminalis* – дика верба. Вербу розмножують вегетативним способом за допомогою саджанців, які після посадки до ґрунту укорінюються, утворюючи нові рослини.

Посадковим матеріалом є відростки з параметрами:

- довжина 20–25 см; товщина – 5–15 мм;
- саджанці виготовляються з однорічних або дворічних відростків.

На 1 га висаджується 20–60 тис. саджанців. Висота трирічних відростків на чотирирічних кореневищах коливається у межах від 5,5 до 6,0 м, а середня товщина відростка становить 30 мм. Урожай сухої маси деревини верби складає у середньому 17,5 тонн/га/рік. У 2007 р., наприклад, у Польщі з енергетичних плантацій отримано близько 270 тис. тонн біомаси, при цьому доплати від ЄС в тому ж році становили 416 злотих на 1 га плантації [7; 8]. У 2008–2009 рр. селянам, які заклали багатолітні плантації енергетичних рослин, було виплачено компенсації на загальну суму 7,5 млн злотих. Допомога охопила понад 1600 га оброблених площ: енергетичної верби (*Salix viminalis*) (40%), пенсільванської мальви (*Sida hermaphrodia Rusby*) (45%), міскантуса (4%), тополі (1%). Доплати становили від 30–50% витрачених на обробіток коштів [5].

Деревину починають заготовляти після двох років обробітку. Це може відбуватися у однорічних, дворічних або трирічних циклах. Цілковитий період користування кореневищем становить близько 30 років. Після цього періоду ґрунт необхідно рекультивувати. Останнім часом *Salix viminalis* рекомендується для охорони середовища на промислових територіях, забруднених важкими

металами, при рекультиватії ґрунтів, вздовж транспортних магістралей з інтенсивним рухом, біля житлових будинків і промислових будівель. Платтації вербняків виконують також функцію біологічної очистки стоків, що при надходженні на поля вербняку біологічно розкладаються й очищуються. Але основну увагу привертає енергетичний аспект вирощування верби як цілий напрямок аграрного виробництва, що є досить прибутковим. Енергетична сировина з верболозу, у принципі, є невичерпним і швидко відтворюваним джерелом енергії. Спалювана деревина значно менш шкідлива для навколишнього середовища, ніж продукти спалювання вугілля. 1 кг брикету із зрубів чагарникової верби за калорійністю відповідає 0,7 кг кам'яного вугілля, а коштує вдвічі дешевше [2].

Дослідження умов і доцільності брикетування наявної біомаси проводилося у модельному дрібнотоварному фермерському господарстві Малопольського регіону (Польща) з переважаючою галуззю рослинництва.

З огляду на наявний у господарстві запас соломи в обсязі близько 18 т щороку для фермерського господарства було закуплено і змонтовано на вільному місці у господарських приміщеннях брикетувальну машину фірми "Witamo" продуктивністю $P_{БР}^{НОМ} = 100$ кг/год, вартість якої становила близько 7000 зл. (≈ 1804 євро). З розрахунку 8-годинної робочої зміни за день ($t_{БР}^{ДЕН} = 8$ год) машина здатна виробити до 800 кг брикетів:

$$m_{БР}^{Д, НОРМ} = t_{БР}^{Д} \times P_{БР}^{НОМ} = 0,8 \text{ т/день.}$$

З 1 га зернових у господарстві в середньому збирають близько 3 т соломи. Враховуючи, що у фермерському господарстві зерновими засіяно 6 га, з цієї площі можна зібрати до 18 т соломи. З огляду на те, що 3 т соломи щорічно використовуються фермером для підстилки для свиней та підживлення, для брикетування залишається ($m_{БР, сол}^P$) 15 т соломи, для брикетування яких необхідно:

$$n_{сол}^Д = \frac{m_{БР, сол}^P}{m_{БР}^{Д, НОРМ}} = 18,75, \text{ тобто } \approx 19 \text{ робочих днів.}$$

Для використання землі, непридатної для сільськогосподарського виробництва, у господарстві закладено плантацію енергетичної верби площею близько 1 га. Згідно з технологією, після 3 років вирощування з плантації кожен рік отримується близько 15 т деревини ($m_{БР, верба}^P$). У той же час з лісу, що також належить господарству, щороку отримується близько 5 т дров'яних відходів ($m_{БР, дрова}^P$). Тобто сумарно щороку, після введеного в дію в ході експерименту брикетувального апарату, було отримано брикетів з дров'яних відходів, відходів соломи та друзок енергетичної верби тощо у кількості:

$$m_{БР}^P = \sum_i m_{БР, i}^P = 15 + 15 + 5 = 35 \text{ тонн.}$$

У рамках модернізації всієї системи теплозабезпечення у 2009 р. було виконано заміну застарілого вугільного котла на новий, пристосований також й для спалювання біомаси (стальний твердопаливний котел "Екорал D" номінальною потужністю 24 кВт, призначений для спалювання біомаси у вигляді друзок, брикетів, тирси тощо). Котел має регульовану подачу повітря, що

забезпечує чітке підтримання необхідної температури, повне згоряння палива у топці та зменшення шкідливих викидів. Він має досить малі теплові втрати та високий, як для твердопаливних котлів, ККД (80%).

Новий котел використовується як додаткове джерело тепла у холодні та хмарні дні, коли енергії теплового насосу та геліосистеми недостатньо. Згідно проведених нами досліджень щодо режимів роботи комплексу обладнання, за температури нижче +2°C енергії, виробленої тепловим насосом, не вистачає для опалення та підігріву ГВП, і тому використовується твердопаливний котел. Такий період з середини листопада по початок березня і становить 105 діб (за середньорічними статистичними даними погодних умов).

Новий котел пристосований для спалювання брикетів з соломи, дров'яних відходів та деревини з плантації енергетичної верби. Розрахунок кількості брикетованого палива, необхідного для повного тепло забезпечення, виконано за наступною схемою.

Теплотворна здатність брикетованого палива (q_b) становить:

$$q_b = 18 \text{ МДж/кг (5 кВт год/кг).}$$

Впродовж години для досягнення номінальної потужності твердопаливного котла (P) у 20 кВт необхідно завантажити до котла брикети загальною вагою $m_b^{год}$:

$$m_b^{год} = \frac{P}{q_b} = \frac{20}{5} = 4 \text{ кг.}$$

При найсильніших морозах у зимовий період енергії від теплового насосу не вистачає й котел працює із максимальною потужністю. Для досягнення котлом номінальної потужності у 20 кВт у процесі спалювання брикетів необхідно, щоб протягом часу спалювалось в середньому орієнтовно 4 кг брикетів. При цьому одночасне завантаження котла номінальною потужністю 24 кВт становить 60 кг брикетованого палива, що забезпечує безперебійну роботу котла на максимальній потужності протягом 15 годин. Тобто завантаження котла відбувається не частіше 2 разів на добу.

Для досягнення максимальної потужності необхідно впродовж доби спалювати близько 96 кг брикетів. Але котел працює на максимальній потужності тільки під час значних морозів. Зазвичай потужність котла регулюється інтенсивністю спалювання брикетів, яка в свою чергу залежить від інтенсивності нагнітання повітря у топку. Клімат регіону проведення досліджень є досить м'яким, з невеликою кількістю дуже морозних днів. Середня потужність котла за опалювальний період складала $P_{TK}^{сеп} = 3,39$ кВт.

Таким чином, тепла енергія, вироблена твердопаливним котлом, становила:

$$Q_{TK}^{зима} = P_{TK}^{сеп} \times t^{зима} = 3,39 \times 2520 = 8552,7 \text{ кВт} \cdot \text{год,}$$

де $t^{зима} = 105 \text{ днів} \times 24 \text{ год.} = 2520 \text{ год.}$

Для отримання такої кількості теплової енергії вага спалюваних брикетів становила:

$$m_b^p = \frac{Q_{TK}^{зима}}{q_b \times \eta_{кб}} = \frac{8552,7}{5 \times 0,8} = 2138,18 \text{ кг} \approx 2,1 \text{ тонни,}$$

де $\eta_{к\sigma}$ – ККД котла для спалювання брикетів.

Отже доведено, що наявної у досліджуваному фермерському господарстві соломи не тільки достатньо для спалювання у твердопаливному котлі протягом 105 морозних днів на рік, але значну частину виготовлених у господарстві брикетів можна продавати. Щоб повністю забезпечити власні потреби з теплозабезпечення на увесь опалювальний сезон, достатньо соломи, зібраної з поверхні 2,1 га, або друзок деревини з енергетичної верби з поверхні близько 0,2 га.

Заміна вугільних котлів застарілої конструкції, ККД яких становить у середньому 60%, на нові з автоматичним регулюванням потужності котла за рахунок подачі повітря у камеру згоряння та можливістю спалювання брикетів або пелет підвищує ККД системи опалювання будинків, дозволяє утилізувати та використовувати у енергетичних цілях рештки вирощування сільськогосподарських культур та зменшує викиди CO₂ у атмосферу.

Висновки:

1. Для енергозабезпечення малих сільськогосподарських підприємств одним з найбільш привабливих джерел енергії є біомаса з відходів сільськогосподарського виробництва.

2. Найбільш живимими технологіями використання біомаси сільськогосподарського походження є пряме спалювання у твердопаливних котлах та камінах, а також утилізація у біогазових установках.

3. Одним з найбільш простих, з одного боку, а з іншого – ефективних способів використання біомаси для теплозабезпечення невеликих господарств є технологія прямого спалювання рослинних решток або вироблених з них брикетів чи пелет у твердопаливних котлах або камінах.

4. У залежності від спеціалізації господарства від 30 до 50% соломи можна використати на енергетичні потреби. Встановлення брикетувального агрегату дозволяє не тільки забезпечити паливом власне господарство, але й утилізувати «надлишкову» солому, з отриманням додаткового доходу від продажу брикетів.

1. Новітні технології біоконверсії / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетуша, І.П. Григорюк, В.О. Дубровін та ін. – К.: Аграр Медіа Груп, 2010. – 326 с.

2. *Dubas, J.W., Kotowski, W., Tomczyk, A.* (2004). Wierzba energetyczna – uprawa i technologia przetwarzania. Bytom: Wydawca Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji w Bytomiu.

3. *Eisenbeifi, G.* Program w dziedzinie energetyki. Niemiecki Instytut Badawczy do spraw Lotnictwa i Lotow Kosmicznych (DLR).

4. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH we współpracy z Bundesforschung-sanstalt für Landwirtschaft Institut für Technologie und Biosystemtechnik (Instytut Technologii i Bio-techniki) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. Warszawa, 2009 (tłumaczenie: EC BREC IEO).

5. *Jedrysek, M.-O.* (2007). Wybrane zagadnienia z zakresu OZE. Ministerstwo Środowiska, 7: 28–35.

6. *Kotowski, W., Konopka, E.* (2008). Gigawat Energia. Zbiurka Prac Energetycznych, 07.07.2008: 23–28.

7. *Ladener, H.* (2004). Solare Stromversorgung. Okobuch.

8. *Solinski, J.* (1993). Sytuacja energetyczna świata w swietle obrad 15 Kongresu Światowej Rady Energetycznej w Madrycie. Energetyka, 2: 12–15.

9. *Szlachta, J.* (2006). Oplacalności produkcji biopaliwa z rzepaku na przykładzie agrorafinerii "Jawrol". Inżynieria Rolnicza, 11(86): 463–469.

10. *Tytko, R.* (2011). Odnawialne źródła energii. Warszawa: OWG. 576 s.

Стаття надійшла до редакції 31.07.2014.