УДК 662.63: 66.091

БІОВУГЛЕЦЬ ЯК ЕФЕКТИВНЕ ТВЕРДЕ ПАЛИВО З БІОМАСИ

Скляренко Є.В., канд. техн. наук, **Сергієнко Р.В.,** канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

https:doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.12

В статті представлено техніко-економічний аналіз, який показав, що одним з найбільш ефективних твердих палив з рослинної біомаси для теплоенергетики є біовуглець, вироблений за технологією і на установці, створеній в Інституті технічної теплофізики НАН України.

В статье представлен технико-экономический анализ, который показал, что одним из наиболее эффективных твердых топлив из растительной биомассы, для теплоэнергетики является биоуглерод, произведенный при помощи технологии и установки созданной в ИТТФ НАН Украины.

We present the results of technical – and – economical analysis showing that the most efficient fuel from biomass for thermal power engineering is bio carbon, which is produced with the help of industrial facility developed and manufactured at the Institute of Engineering Thermophysics of Ukrainian National Academy of Sciences.

Бібл. 6, табл. 4.

Ключові слова: рослинна біомаса, термохімічна конверсія, піролізний газ, біовуглець.

Актуальність роботи. Ефективне використання усіх видів енергоресурсів є однією з найважливіших загальнодержавних задач в Україні, що викликано дефіцитом викопних палив, постійним подорожчанням і низькою ефективністю їх використання, а також міжнародними зобов'язаннями щодо екологічної безпеки довкілля. Значні ж витрати на імпорт паливних ресурсів лягають важким тягарем на економіку країни, що породжує залежність від країн-експортерів і створює пряму загрозу для енергетичної та національної безпеки країни.

Один із дієвих шляхів вирішення цих проблем полягає в комплексному енерготехнологічному використанні палив і у впровадженні нових технологій використання відновлюваних джерел енергії. Серед них чільне місце займає біомаса рослинного походження, яка в більшості країн світу розглядається як альтернативне паливо для виробництва теплової і електричної енергії, шляхом прямого її спалювання. За деякими оцінками вона дає понад 2 млрд.т у.п. енергії на рік, а це близько 14% загального споживання первинних енергоносіїв у світі [1].

Найбільш економічно доцільним в Україні є використанням біомаси в створенні замкнутих вертикально-інтегрованих виробництв твердих, рідких та газоподібних палив з рослинної біомаси, в першу чергу для потреб внутрішнього ринку. Тоді при повному використанні наявного потенціалу всієї біомаси можливо забезпечити понад 10 % загальнодержавних потреб в паливно-енергетичних ресурсах.

Привабливість рослинної біомаси обумовлена значним наявним потенціалом, доступністю, відновлюваністю і універсальністю її використання, можливістю транспортування, накопичення та переробки. А високий вихід летких сполук, незначна зольність, відсутність хлору, сірки і важких металів сприяє екологічній чистоті при згорянні. Дана стаття присвячена аналізу шляхів ефективного використання енергетичного потенціалу рослинної біомаси. При цьому наводяться результати експериментальних та розрахункових досліджень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проведений аналіз літературних джерел показав, що існує ряд факторів, згідно яких рослинна біомаса по енергетичній ефективності не може конкурувати з традиційними вуглеводневими паливами і які перешкоджають її широкому використанню в теплоенергетиці. Зокрема, це її низькі теплотехнічні характеристики, затратність збирання, зберігання, транспортування і переробки, невідповідність концентрації запасів біомаси місцевим потребам в теплоенергетиці. Особливо нагальна необхідність є в створенні апаратів і технологій для використання дрібнофракційної рослинної біомаси, якій притаманна низька насипна і енергетична щільність та висока вологість.

Для покращення теплотехнічних характеристик такої біомаси і ефективного використання її піддають фізичній (сушка, подрібнення, пресування),

біохімічній (бродіння, біометаногенез, ферментація) чи термохімічній конверсії (спалювання, газифікація, піроліз, гідропіроліз, риформінг). Така попередня обробка вихідної біомаси дозволяє знизити її вологість, підвищити теплоту згоряння та покращити умови використання (табл. 1).

Зменшити ж собівартість кінцевих продуктів термохімічної конверсії біомаси і додатково отримати економічну та екологічну вигоду можна шляхом впровадження комплексних технологій, які дають можливість поряд з виробництвом енергетичної продукції отримувати супутні високоліквідні продукти [2].

Метою даної роботи є підвищення ефективності використання енергопотенціалу рослинної біомаси за допомогою піролізної технології.

Опис установки і результати досліджень. Така піролізна технологія і установка розроблені в Інституті технічної теплофізики НАН України [3]. Особливістю даної технології є те, що процес термохімічної конверсії вихідної біомаси здійснюється шляхом її нагрівання в затиснутому рухомому шарі високотемпературним газовим теплоносієм [4], що завершується на стадії відгонки летких сполук (піролізного газу, який використовується як паливо для виробництва теплової енергії), та виведення утвореного коксового залишку (біовуглецю) з апарату. Це дозволяє: по-перше, виключити сам повільний хімічний процес, яким є газифікація твердого вуглецю і тим самим підвищити швидкість переробки біомаси; по-друге, в процесі отримується продукт з високими споживчими характеристиками – біовуглець.

Проведені атестаційні випробування показали, що за технічним аналізом отриманий біовуглець має наступний склад: вуглець – 70…80 %, леткі речовини – до 15 %, зольність – 4…10 %, вологість – 5…9 %, нижча теплота згоряння складає 24,75 МДж/кг. Теплоту згоряння біовуглецю досліджено за допомогою кондуктивного бомбового калориметра моделі КТС-4 Інституту технічної теплофізики НАН України за стандартною методикою ГОСТ 147-95 (ИСО 1928-76) [5].

Узагальнені результати вимірювань та розрахунків властивостей досліджуваних зразків біовуглецю у аналітичному повітряно-сухому стані (in air dry), у сухому стані (dry basis) та у робочому стані наведені в табл. 2.

Проведені дослідження та аналіз літературних даних показав, що крім високої теплоти згоряння (до 30 МДж/кг), до основних переваг біовуглецю можна також віднести:

- низький вміст токсичних речовин (хлору, сірки і важких металів);
- високу ефективність згоряння за низької емісії NO_X і нейтральності щодо CO_2;
- високу температуру плавлення золи (1400 °С), що запобігає шлакуванню;
- високу гідрофобність, що забезпечує довготривале зберігання.

Як видно з табл. 1, біовуглець, особливо брикетований, має найвищу енергетичну щільність, що дає можливість за рахунок збільшеної внутрішньої реакційної поверхні здійснювати його горіння з високою швидкістю і жаропродуктивністю. Це дозволяє отримати майже в 2 рази більшу напруженість топкового об'єму, ніж при спалюванні, наприклад, дров. А відсутність важких вуглеводневих сполук у його складі дозволяє здійснювати "бездимне" спалювання з мінімальними шкідливими викидами.

Табл. 1. Теплотехнічні характеристики твердих палив з рослинної біомаси

Вид палива	**Вологість, % (мас)**	**Нижча теплота згоряння, МДж/кг**	**Насипна щільність, кг/м^3**	**Енергощільність, кВт/м^3**
Дрова	40	10,2	470	1333
Тріска	40	10,2	250	710
Тирса	40	10,2	195	552
Тирсобрикет	10	18	600	3000
Солома зернових (тюки)	20	12,5	100	347
Торф фрезерний	50	11,2	400	1244
Брикети	10	17	550	2600
Біовуглець (насипний)	8,1	24,75	220	1512
Біовуглець (брикет)	5	25,6	475	3378

Для підтвердження економічної ефективності використання біовуглецю як палива були проведені порівняльні розрахунки середніх витрат на паливо для опалення 1 м^2 житлового приміщення за опалювальний сезон (4500 годин). Дані цих розрахунків приведено в табл. 3.

Як видно, найменші витрати на паливо для опалення будуть при спалюванні біовуглецю. Вони порівняно з тирсобрикетами, є меншими у понад 2 рази. Тобто паливна складова в структурі собівартості 1 Гкал/ч може бути суттєво скорочена.

Ефективність розглянутої технології піролізного процесу з отриманням піролізного газу і біовуглецю підтверджується тим, що споживча вартість біовуглецю різного призначення (паливо, біочар (добриво), карбюризатор) в 5…10 разів перевищує вартість вихідної деревини, що дозволяє отримати додатковий зиск від їх реалізації, а при виробництві теплової енергії, порівняно з прямим спалюванням, експлуатаційні витрати будуть зменшенні на 20 %. При цьому, майже в 2 рази скорочуються викиди CO_2 (табл. 4).

Перевагою розглянутої технології конверсії рослинної біомаси є і те, що отримані енергетичні продукти (піролізний газ і біовуглець) можна з високою ефективністю використовувати не тільки в побуті, але й в існуючих енергетичних установках, практично без їх реконструкції. Це дозволяє адаптувати існуючі енергетичні установки до використання різних видів рослинної біомаси, розширити паливну базу підприємств і підвищити їх енергетичну безпеку. Так,

Табл. 2. Результати вимірювань та розрахунків властивостей зразків біовуглецю

Вологість аналітичної проби,%	8,5	
Вологість у робочому стані (поставка), %	8,1	
Зольність аналітичної проби, %	15,39	
Зольність у сухому стані, %	16,82	
Зольність у робочому стані (поставка), %	15,45	
Зольність очищеної аналітичної проби, %	5,00	
Зольність очищеної проби у сухому стані, %	5,47	
Зольність очищеної проби у робочому стані (поставка), %	5,02	
	МДж/кг	ккал/кг
Вища теплота згоряння аналітичної проби	25,45	6079
Вища теплота згоряння у сухому стані	27,81	6644
Вища теплота згоряння у робочому стані (поставка)	25,55	6103
Нижча теплота згоряння аналітичної проби	24,64	5887
Нижча теплота згоряння у сухому стані	27,16	6488
Нижча теплота згоряння у робочому стані (поставка)	24,75	5912

Табл. 3. Середні витрати для опалення 1м^2 площі житлового приміщення за опалювальний сезон

Вид палива	**Ціна палива, грн/м^3**	**Енергощільність МДж/м^3**	**Витрати палива, м^3/м^2**	**Витрати на паливо, грн./м^2**
Природний газ	7,0	33,9	61,1	427,7
Тирсобрикет	1500	8800	0,235	353,0
Солома зернових (тюки)	170	1260	1,64	282,0
Тріска	250	2550	0,812	203,0
Дрова	450	4700	0,44	198,0
Біовуглець (насипний)	400	5445	0,38	152,0
Біовуглець (брикети)	1100	12160	0,17	187,0

Табл. 4. Порівняння викидів в атмосферу CO_2 на 1 ГКал виробленої теплової енергії

	Викиди CO_2, 1кг/1ГКал
Спалювання природного газу	255,0
Спалювання дров	595,0
Гниття деревини	595,0
Реалізація піролізного процесу	297,0

біовуглець з високою ефективністю може бути використано як висококалорійна добавка до низькосортного кам'яного вугілля при його спалюванні в пиловугільних котлах ТЕЦ замість підсвітки природним газом [6].

Крім того, продукти піролізу можна використовувати як хімічну сировину. Так, під час вторинної переробки продуктів піролізу біомаси (особливо смол), можна отримати низку цінних хімічних речовин (поліфеноли, гідроксидоцтовий альдегід, левоглюкозан та ін.). Висока цінність цих продуктів, порівняно з вихідним паливом, навіть при їх відносно невеликій концентрації, робить їх отримання надзвичайно вигідним. Сам біовуглець також може використовуватися для технологічних потреб промисловості: хімічної (для виробництва сірковуглецю, ціаніду натрію, карбідів і ін.), металургії (для плавки і агломерування залізорудних концентратів, зміцнення поверхні сталі), в сільському господарстві як мінеральне добриво (біочар) чи кормова добавка для лікування деяких хвороб у птиць і тварин, у фармакології як стійкий фарбник.

Висновки і перспективи. Техніко-економічний аналіз показав, що для виробництва теплової і електричної енергії біовуглець, отриманий при термохімічній конверсії рослинної біомаси, має найкращі теплотехнічні характеристики серед твердих палив з біомаси. Спожив-ча вартість біовуглецю у 5… 10 разів перевищує вартість вихідної деревини, а при виробництві теплової енергії експлуатаційні витрати менші на 20 %. Створена в ІТТФ НАН України технологія і установка термохімічної конверсії рослинної біомаси дозволяє задіяти в палив-ний баланс широкий спектр рослинних відходів лісового і сільськогосподарського виробництва. Розроблена технологія дозволяє, практично без реконструкції, адап-тувати існуючі енергетичні установки до використання рослинної біомаси як альтернативного палива.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Калетнік Г.М.* Біопаливо. Продовольча, енергетична та економічна безпека України: монографія / Г.М.Калетнік. – К.: Хай-Тек Прес, 2010. – 516 с.

2. *Носач В.Г., Шрайбер А.А., Скляренко Е.В.* Об эффективности производства тепловой и электрической энергии из древесины // Промышленная теплотехника. - 2004. т. 26, № 3.- С. 54-57.

3. *Патент України* №43070 від 15.11.2001. Бюл. №10, 2001, "Спосіб піролізу деревини".

4. *Носач В.Г., Скляренко Е.В., Родионов В.И.* Исследование термохимической переработки древесины в зажатом подвижном и фильтруемом слое // Промышленная теплотехника, - 2005, т.27, №5. – С. 66-69.

5. *Воробйов Л.Й., Сергієнко Р.В., Бурова З.А., Назаренко О.О.* Моделювання теплових процесів у квазідиференціальному калориметрі. Промислова теплотехніка (Vorobiov L.Y., Sergienko R.V., Burova Z.A. & Nazarenko O.O. (2017). Modeling of heat processes in a quasi-differential calorimeter. Industrial Heat Engineering, 4, 77—83. [in Ukrainian]), — 2017, — № 4, — С/Р. 77—83.

6. *Носач В.Г., Рудник А.А. Скляренко Е.В* Использование продуктов термохимической переработки древесины в пылеугольных котлах электростанций для подсветки, вместо природного газа, при сжигании низкосортных углей // Промышленная теплотехника. - 2008. т.30, №3. – С. 27-29.

BIOCARBON AS AN EFFECTIVE SOLID FUEL FROM BIOMASS

Sklyarenko E.V., Serhiienko R.V.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Marii Kapnist Str., 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

https:doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.12

The study is devoted to the analysis of ways of efficient use of energy potential of plant biomass. The purpose of this work is to increase the efficiency of using biomass energy through pyrolysis technology. A feature of this technology is that the process of thermochemical conversion of the original biomass is carried out by heating it in a clamped moving layer with a high-temperature gas coolant, which is completed at the stage of distillation of volatile compounds and removing the formed coke residue (biocarbon) from the apparatus.

Technical and economic analysis has shown that one of the most effective solid fuels from vegetable biomass for thermal power is biocarbon produced by technology and at the plant created at the Institute of Technical Thermophysics of NAS of Ukraine. Conducted certification tests showed that the technical analysis of the obtained biocarbon has the composition: carbon - 70-80 %, volatiles - up to 15 %, ash content - 4-10 %, humidity - 5-9 %, and its lower combustion heat is 24,75 MJ/kg.

Biocarbon has the highest energy density, which allows it to burn at high speed and heat and to produce nearly 2 times the intensity of the combustion volume than when burning firewood. The efficiency of the considered technology of the pyrolysis process with the production of pyrolysis gas and biocarbon is confirmed by the fact that the consumption value of biocarbon of various purposes is 5 ... 10 times higher than the cost of the original wood, and in the production of thermal energy, compared with direct combustion, 20 % reduction in operating costs. At the same time, CO_2 emissions are reduced by almost 2 times. The proposed technology allows to adapt existing energy installations to the use of vegetable biomass as an alternative fuel.

References 6, tables 4.

Keywords: plant biomass, thermochemical conversion, pyrolysis gas, biocarbon.

1. *Kaletnik G.M.* Biofuels. [Food, energy and economic security of Ukraine], monograph, Kyiv, Chai-Tek Pres, 2010. 516 p. (in Ukr.).

2. *Nosach V.G., Schraiber A.A., Sklyarenko E.V.* [On the efficiency of production of heat and electric energy from wood], Industrial Heat Engineering. 2004. v. 26, № 3. P. 54-57. (In Rus.).

3. *Patent of Ukraine* № 43070 , 15.11.2001. Bul. №10, 2001, [Method of pyrolysis of wood]. (in Ukr.).

4. *Nosach V.G., Sklyarenko E.V., Rodionov V.I.* [The study of thermochemical processing of wood in a clamped movable and filtered layer], Industrial Heat Engineering, 2005, v.27, № 5. P. 66-69. (in Rus.).

5. *Vorobiov L.Y., Sergienko R.V., Burova Z.A. & Nazarenko O.O.* [Modeling of heat processes in a quasi-differential calorimeter]. Industrial Heat Engineering, № 4, 2017, P. 77—83. (in Ukr.).

6. *Nosach V.G., Rudnyk A.A., Sklyarenko E.V.* [The use of products of thermochemical processing of wood in pulverized coal boilers of power plants for lighting, instead of natural gas, when burning low-grade coal], Industrial Heat Engineering. 2008. v. 30, №3. P. 27-29. (in Rus.).

Отримано 14.08.2019
Received 14.08.2019