

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗАГОРАННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Малик Іван Костянтинівич,

аспірант IV курсу, greenpower.ukr@gmail.com

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Україна

Миросниченко Денис Вікторович,

доктор технічних наук, професор, dvmir79@gmail.com

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Україна

Мещанін Валерій Іванович,

аспірант IV курсу, valerameshchanin@gmail.com

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Україна

У цій роботі виконано аналіз взаємозв'язку показників технічного (вміст вологи, зольність, вихід летких речовин, вміст нелетючого вуглецю) та елементного (вміст вуглецю, водню, азоту, сірки та кисню) аналізів різних видів рослинної сировини (362 проби) для виробництва біогазу, деревної біомаси з величиною його найвищої теплоти згорання.

Встановлено, що найбільш тісно в органічній масі рослинної сировини пов'язані показники вмісту вуглецю та кисню ($R^2=0.898$).

Розроблено математичні залежності, що дозволяють з високою точністю ($R^2>0.849$) прогнозувати величину вищої теплоти згорання рослинної сировини за вмістом у ньому вуглецю, кисню та їхнього атомного відношення.

Ключові слова: рослинна сировина, технічний аналіз, елементний склад, теплота згорання, математичні залежності.

Теплота згорання палива визначається як кількість теплової енергії, що виділяється при згоранні певної кількості. Теплота згорання є важливою властивістю рослин, яка може відображати здатність фіксувати сонячну радіацію під час фотосинтезу. Теплота згорання також є важливим показником для оцінки матеріального циклу та перетворення енергії у лісових екосистемах.

У роботі показано, що теплота згорання хвойних порід деревини вище, ніж листяних, причому різні компоненти деревини, такі як пень, стовбур, вершина, кора, листя і гілки також мають різну теплоту згорання.

Теплота згорання рослинної сировини пов'язана з її елементним складом, зокрема вмістом вуглецю, водню та кисню. Різні види сировини характеризуються різним елементним складом і, отже, мають різну величину теплоти згорання.

У роботі наведено рівняння (1) і (2), що дозволяють прогнозувати найвищу теплоту згорання рослинної сировини за даними її елементного складу:

$$Q_s^d = 0.3491 \cdot C^d + 0.1783 \cdot H^d + 0.1005 \cdot S^d - 0.1034 \cdot O^d - 0.0151 \cdot N^d - 0.0211 \cdot A^d, \quad (1)$$

$$Q_s^d = 0.2949 \cdot C^d + 0.8250 \cdot H^d, \quad (2)$$

де Q_s^d – найвища теплота згорання на сухий стан, МДж/кг; C^d , H^d , S^d , O^d , N^d – вміст вуглецю, водню, сірки, кисню та азоту на сухий стан, %; A^d – зольність, %.

Коефіцієнти в рівняннях (1) та (2) показують, що вміст вуглецю, водню та сірки має позитивний вплив на величину вищої теплоти згорання, а вміст азоту та кисню – негативний.

У роботі в результаті аналізу понад 150 різних рівнянь, що дозволяють прогнозувати величину вищої теплоти згорання рослинної сировини, показано, що лише 3 рівняння (3)-(5) характеризуються найменшою похибкою розрахунку, що не перевищує 5-6%:

$$Q_s^d = 0.4373 \cdot C^d + 1.6701, \quad (3)$$

$$Q_s^d = 0.00355 \cdot (C^d)^2 - 0.232 \cdot C^d - 2.230 \cdot H^d + 0.05 \cdot C^d \cdot H^d + 0.131 \cdot N^d + 20.6, \quad (4)$$

$$Q_s^d = 0.328 \cdot C^d + 1.4306 \cdot H^d - 0.0237 \cdot N^d + 0.0929 \cdot S^d \cdot \left(1 - \frac{A^d}{100} - \frac{40.11 \cdot H^d}{C^d}\right), \quad (5)$$

Теплота згорання рослинної сировини також залежить від її хімічного складу, зокрема,

вмісту в ньому целюлози, лігніну, геміцелюлози та смолистих речовин.

Найвища теплота згоряння целюлози та геміцелюлози становить 18–19 МДж/кг, лігніну – 24–27 МДж/кг, а смолистих речовин – 32–38 МДж/кг.

В роботі розроблено таке рівняння (6):

$$Q_s^d = 32.3Ext + 24.5L + 18.6Cell, \quad (6)$$

де Q_s^d – вища теплота згоряння на сухий беззольний стан, МДж/кг; Ext, L і Cell – вміст смолистих речовин, лігніну та суми целюлози та геміцелюлози у рослинній сировині.

У роботі при аналізі взаємозв'язку вищої теплоти згоряння 17 проб деревного палива та вмісту в ньому лігніну та смолистих речовин було отримано рівняння (7):

$$Q_s^d = 14.3366 + 0.1228L + 0.3553Ext; R^2 = 0.915, \quad (7)$$

де Q_s^d – вища теплота згоряння на сухий беззольний стан, МДж/кг; L і Ext – вміст лігніну та смолистих речовин у рослинній сировині.

В рамках цього дослідження аналізували взаємозв'язок показників технічного (W_t^r , A^d , V^{daf}) та елементного (C^{daf} , H^{daf} , N^{daf} , S^{daf} , O^{daf}) аналізів, а також атомних відносин C/H, C/N, C/S та C/O різних видів рослинної сировини з величиною її вищої теплоти згоряння (Q_s^{daf}).

Для аналізу скористалися унікальною базою даних, яка містить інформацію про склад та властивості рослинної сировини, яку можна використовувати для виробництва біогазу, деревного вугілля та торефікованої біомаси. Усього було вивчено 362 проби, серед яких були такі зразки: -необроблена деревина, оброблена деревина, солома та залишки зернових культур, трава та рослини, лушпиння, шкаралупа, кісточки – тверді частини різних горіхів та морські водорості.

Вміст кисню (O^{daf}) розраховувалося за формулою (8):

$$O^{daf} = 100 - C^{daf} - H^{daf} - N^{daf} - S^{daf}$$

Необхідно відзначити, що хоча вміст кисню і є розрахунковою величиною, проте його роль у формуванні величини теплоти згоряння рослинної сировини можна порівняти лише з вмістом вуглецю, оскільки його вміст може сягати 50% і більше.

Аналізуючи дані показників якості рослинної сировини можна констатувати, що вони характеризуються досить широким діапазоном значень. Зокрема, вміст робочої вологи варіюється від 0 до 75.3%; зольність - від 0.1 до 9.9%; вихід летких речовин – від 61,6 до 94,9%.

Таблиця 1. Математичні рівняння та їх статистична оцінка

№	Уравнение	Статистическая оценка	
		r	R^2
(10)	$C^{daf} = -0.8711O^{daf} + 87.557$	0.948	0.898
(11)	$\frac{C}{H} = -0.0003(C^{daf})^2 + 0.0397C^{daf} - 0.6564$	0.587	0.345
(12)	$\frac{C}{H} = -0.0088(H^{daf})^2 - 0.2205H^{daf} + 1.7138$	0.750	0.562
(13)	$\frac{C}{O} = 0.0058(C^{daf})^2 - 0.5051C^{daf} + 12.365$	0.973	0.946
(14)	$\frac{C}{O} = 0.0048(O^{daf})^2 - 0.4785O^{daf} + 13.175$	0.982	0.965
(15)	$Q_s^{daf} = 0.0066(C^{daf})^2 - 0.3549C^{daf} + 21.124$	0.921	0.849
(16)	$Q_s^{daf} = 0.0055(O^{daf})^2 - 0.5690O^{daf} + 42.294$	0.932	0.869
(17)	$Q_s^{daf} = -0.3215\left(\frac{C}{O}\right)^2 + 5.2847\left(\frac{C}{O}\right) + 12.53$	0.939	0.882

Показники елементного складу також схильні до сильних змін: вміст вуглецю коливається від 40.22 до 79.30 %; водню – від 4.12 до 15.16%; азоту - від 0.02 до 3.04%; сірки – від 0.01 до 2.21%; кисню - від 10.54 до 53.45%.

Зазначені зміни показників технічного та елементного аналізів відбилися на величині вищої теплоти згоряння (Q_{dafs}) вивчених проб – вона варіювалася від 16.25 до 33.82 МДж/кг.

Встановлено, що найбільш тісно в органічній масі рослинної сировини пов'язані показники вмісту вуглецю та кисню. Показано, що залежність вмісту вуглецю від вмісту кисню носить лінійний характер ($R^2=0.898$), а залежність атомного відношення вуглецю до кисню (C/O) від вмісту вуглецю та кисню – квадратичний ($R^2=0.946$ та $R^2=0.965$).

Розроблено математичні та графічні залежності, що дозволяють з високою точністю ($R^2>0.849$) прогнозувати величину вищої теплоти згоряння рослинної сировини за даними її елементного аналізу, а саме: за вмістом вуглецю, кисню та атомним відношенням вуглецю до кисню.

1. Балаєва Я.С., Мирошниченко Д.В., Кафтан Ю.С. // ХТТ. 2018. №5. С. 3. DOI: 10.1134/S0023117718040138 [Solid Fuel Chemistry, 2018, vol. 52, no. 5, p. 279. DOI: 10.3103/S0361521918030023].
2. Балаєва Я.С., Мирошниченко Д.В., Кафтан Ю.С. // ХТТ. 2017. №3. С. 10. DOI: 10.7868/S0023117717030021 [Solid Fuel Chemistry, 2017, vol. 51, no. 3, p. 141. DOI: 10.3103/S0361521917030028].
3. Bao Y.J., Li Z.H., Han X.G., Song G.B., Yang X.H., Lu H.Y. // Chinese Journal of Ecology. 2006. V. 25. № 9. P. 1095.
4. Singh T., Kostecy M.M. // Canadian Journal of Forest Research. 1986. V. 16. P. 1378.
5. Demirbas A. // Energy, Explorations and Exploitation. 2002. V. 20. №1. P.105.
6. Gaur S., Reed T.B. An atlas of thermal data for biomass and other fuels. NREL/TB-433-7965. National renewable Energy Laboratory. Golden. Colorado. USA. 1995.
7. Channival S.A., Parikh P.P. // Fuel. 2001. V. 81. P. 1051.
8. Yin C. // Fuel. 2011. V. 90. № 3. P. 1128.
9. Demirbas A., Demirbas A.H. // Energy, Exploration and Exploitation. 2004. V. 22. № 2. P. 135.
10. Jover J., Antal K., Zsembeli J., Blasko L., Tamas J. // Research in Agricultural Engineering. 2018. V. 64. № 3. P. 121.
11. Bychkov A.L., Denkin A.I., Tikhova V.D., Lomovsky O.I. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2017. V. 130. № 3. P. 1399.
12. Рустамов Н.А., Зайцев С.И., Чернова Н.И. // Энергия. 2005. № 6. С. 20.
13. White R.H. // Wood and Fiber Science. 1987. V. 19. № 4. P. 446.
14. Rhen C. // Scandinavian Journal of Forest Research. 2004. V. 19. № 1. P. 72.
15. Akpınar A., Komurcu M.I., Kaukal M., Ozoker I.H., Kaygusuz K. // Renewable Sustainable Energy Reviews. 2008. V. 12. P. 2013.
16. Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar // <https://phyllis.nl/>