

УДК 66.092-977

ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ ГРАНУЛЬОВАНОГО БІОПАЛИВА ТОРРЕФІКОВАНОГО У АТМОСФЕРІ ВЛАСНОГО ГАЗОПОДІБНОГО СЕРЕДОВИЩА

Михайлик В.А., канд. техн. наук, Корінчевська Т.В., канд. техн. наук, Корінчук Д.М., канд. техн. наук, Дахненко В.Л., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.10>

Методами TGA та DTA досліджено торрефіковані за 250, 270 та 290 °С гранули з деревини сосни. Торрефікація здійснювалась при атмосферному тиску в умовах газоподібного середовища, що утворюється в обмеженому просторі при термічному розкладанні органічних речовин палива.

Методами TGA и DTA исследованы торрефицированные при 250, 270 и 290 °С гранулы из древесины сосны. Торрефикация осуществлялась при атмосферном давлении в условиях газовой среды, образующейся в ограниченном пространстве при термическом разложении органических веществ топлива.

The TGA and DTA methods were used to study the pine wood granules that has been torrefied at 250, 270, and 290 °C. Torrefaction was carried out at atmospheric pressure in a gaseous environment formed in a confined space during the thermal decomposition of organic fuel substances.

Бібл. 18, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: дериватографія, гранульоване біопаливо, торрефікація, температура та теплота термічного розкладання, рівноважна вологість, зольність.

Скорочення:

TGA – термогравіметричний аналіз;

DTA – диференціальний термічний аналіз;

ДТА – крива диференціального термічного аналізу;

ДТГ – крива диференціальної термогравіметрії;

СМ – суха маса;

ТГ – крива термогравіметрії;

Т – крива температури.

Вступ

Рослинна біомаса є важливим джерелом поновлюваної енергії. Однак, низька енергетична щільність, нестабільність гранулометричного складу і фізичних властивостей, а також біологічна ураженість і розосередження по території є головними проблемами при її енергетичному і технологічному використанні [1]. Для більш ефективного використання біомаси як джерела енергії її паливні властивості покращують. Одним із способів підвищення теплотехнічних та транспортних характеристик біопалива є гранулювання. Проте гранулювання не вирішує проблеми з високою гідрофільністю та біологічною ураженістю палива. Широке використання біопалива в енергетиці потребує більш значного підвищення теплотворної здатності та створення умов для малозатратного його диспергування до пилоподібного стану.

Серед відомих способів покращання енергетичних властивостей біомаси є попередня термічна обробка – торрефікація [2]. Торрефікація – термохімічний процес в інертному (м'який піроліз) або обмеженому кисневому середовищі, де біомаса повільно нагрівається до заданої температури і витримується протягом обумовленого часу [3].

Основними компонентами рослинної біомаси є геміцелюлоза, целюлоза та лігнін. Вміст даних компонентів в деревному біопаливі залежить від породи, умов росту і віку деревини. В середньому, в хвойних породах міститься 48...56 % целюлози, 26...30 % лігніну і 23...26 % геміцелюлози [4]. При термічній обробці біополімери перетерплюють різну ступінь розкладання, утворюючи леткі CO_2 , CO , H_2 , N_2 та C_nH_m (серед газоподібних вуглеводнів основним є CH_4), пару пірогенетичної води, кислоти та смоли, що при нормальних умовах формують рідку фракцію та твердий вугільний залишок. Склад кожної із фракцій і кількісне співвідношення між ними залежить від кінцевої температури та швидкості нагрівання. Вихід летких продуктів визначає масову втрату вихідної сировини. Геміцелюлоза є найбільш термічно нестабільним компонентом. У діапазоні температур від 100 до 260 °С геміцелюлоза максимально хімічно активна, основна деградація починається при температурі вище 200 °С, але кінетика і глибина розкладання залежить від структури і її хімічного складу [1]. Целюлоза розкладається при ще більш високій температурі (понад 275 °С), але її основна деградація відбувається у вузькому температурному діапазоні 270...350 °С. При торрефікації більша частина

геміцелюлози і аморфної целюлози розкладається, тоді як кристалічна целюлоза і лігнін піддаються меншому розкладанню [5]. Лігнін поступово розкладається в температурному інтервалі 250...500 °С, хоча він починає розм'якшуватися в інтервалі 80...90 °С [6, 7]. Для деревини сосни термічне розкладання біополімерів визначено в інтервалах 225...325, 305...375 та 250...500 °С, відповідно для геміцелюлози, целюлози та лігніну [8].

Типовий температурний діапазон для процесу торрефікації лежить в межах від 200 до 300 °С. Незважаючи на те, що були запропоновані інші діапазони, жоден з них не перевищує 300°С. Термічна обробка вище цієї температури може призвести до карбонізації біополімерів, що небажано для торрефікації [9]. Крім того, вище 300 °С значною є втрата лігніну. Ця втрата може утруднити формування гранул з торрефікованого палива. До того ж за температур 300...320 °С швидка термічна деструкція целюлози викликає утворення смоли [10]. Ці причини встановлюють верхню межу температури торрефікації як 300 °С.

Іншим важливим аспектом умов торрефікації є концентрація кисню в реакторі. Дослідження впливу кисню на торрефікацію показують, що не обов'язково мати безкисневе середовище. Присутність невеликої кількості кисню може бути допустимим і може навіть мати благотворний вплив на процес торрефікації [6, 11].

В процесі торрефікації біомаса втрачає свою волокнисту структуру, становиться крихкою, легко мелеться і не втрачає властивостей до формування гранул без допоміжних зв'язувальних речовин [12].

Щоб забезпечити максимальний вихід твердого продукту швидкість нагрівання біомаси повинна бути досить повільною (менше 50 К/хв.). Більш висока швидкість нагрівання збільшує вихід рідини за рахунок твердих продуктів, як це відбувається при піролізі [9].

Термічна деструкція супроводжується зміною складу біомаси, втратою ~ 40 % маси та 10...15 % енергії [2]. Зменшується вміст низькокалорійної геміцелюлози (ксилан, основний компонент геміцелюлоз, має теплотворну здатність 13,9 МДж/кг [13]) та зростає вміст целюлози та лігніну, теплотворна здатність яких відповідно 17,44 та 26,87 МДж/кг [14]. В результаті термічної обробки в біомасі зменшується процентний вміст кисню і водню, проте вміст вуглецю збільшується, що призводить до зростання теплоти згорання [11, 15].

Через руйнування ОН-груп біополімерів паливо втрачає свою гідрофільність і набуває гідрофобні властивості. В результаті зменшується здатність по-

глинати воду, що спрощує умови транспортування та зберігання біопалива і обумовлює захист його від біологічної деградації [2].

Торрефікація дозволяє максимально наблизити властивості біопалива до властивостей енергетичного вугілля та спалювати в пиловугільних котлах [2, 3, 9]. Термічній обробці можна піддавати різні види біомаси, в тому числі і сільськогосподарські відходи та «енергетичні культури» [16].

Хімічний склад рослин, співвідношення між основними компонентами біополімерів, навіть у одного виду, коливається і залежить від зони вирощування та кліматичних умов. Тому при дослідженні процесу торрефікації намагаються знайти оптимальний режим, який дозволяє домогтися найвищої теплотворної здатності при найменшій втраті вихідної енергії, для кожної конкретної рослинної сировини.

Створення інертного середовища ускладнює та здорожує технологію торрефікації, тому цікавим є проведення процесу в атмосфері, що виникає в обмеженому об'ємі в результаті виділення газоподібних речовин при термічному розкладанні біомаси.

Матеріали і методи

Торрефікації були піддані гранули з тирси деревини сосни діаметром 8 мм і довжиною 30...40 мм. Гранули виготовлені на заводі ТОВ "Інтерсорс" (м. Берегове, Закарпатська обл.) з місцевої сировини. Торрефікація здійснювалась при атмосферному тиску в сталевих тонкостінних циліндричних контейнерах в муфельній печі СНОЛ з регулятором температури ТРЦ 02 (рис. 1). Температуру в печі та гранул в ході

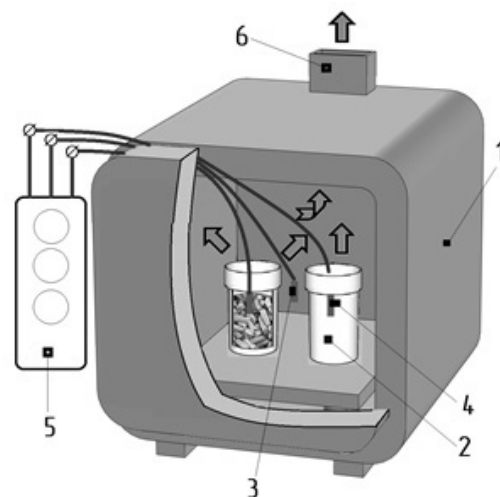


Рис. 1. Обладнання для торрефікації: 1 – муфельна піч; 2 – контейнер; 3, 4 – датчики температури; 5 – контролер; 6 – відвід газів.

торрефікації вимірювали за допомогою термопар та контролера DT821A. Дроти термопар були пропущені через невеликий отвір в кришках контейнерів. Цей отвір слугував і каналом для виходу надлишку газів, що утворювались в процесі термічного розкладання. Контейнери заповнювали гранулами, зважували і розміщували в піч, яка заздалегідь була нагріта до заданої температури. Термічну обробку проводили за температур в печі 250, 270 та 290 °С. Відлік часу торрефікації розпочинали після досягнення гранулами температури печі (рис. 2). За температур 250 та 290 °С торрефікація здійснювалась на протязі 60 хв., за 270 °С – 30 хв. Атмосферою слугувало газове середовище, що утворювалось в ході термічного розкладання біопалива.

Через екзотермічність процесів термічного розкладання органічних речовин температура гранул під час торрефікації підвищувалась і на час закінчення термообробки перевищувала температуру в муфельній печі за 250 та 270 °С на 15 К, за 290 °С – на 10 К. Після закінчення торрефікації контейнери охолоджували до кімнатної температури за межами муфельної печі, зважували та розвантажували. Отримане паливо зберігали в умовах навколишнього середовища.

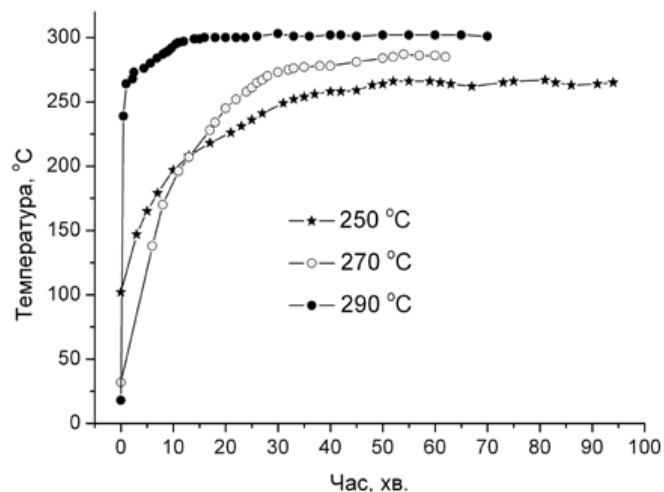


Рис. 2. Зміна температури гранул палива в процесі торрефікації за температур в печі 250, 270 та 290 °С.

Таблиця 1.

Температура в печі, °С	Час торрефікації, хв.	Ступінь розкладання, %	Вихід торрефікованого палива, % сухої маси
250	60	17,06	82,94
270	30	22,98	77,02
290	60	44,64	55,36

Термічний аналіз палив проводили в модернізованому в ІТТФ НАН України дериватографі «Q-1000», системи Paulik-Paulik-Erdey (фірма «МОМ», Угорщина), в діапазоні 20...1000 °С при швидкості нагрівання 7,4 К/хв. В дериватографі реалізована можливість одночасного проведення досліджень двома методами аналізу: термогравіметричним (TGA) та диференціальним термічним (DTA), що робить його зручним в вивченні термічного розкладання твердих палив. Корекцію шкали температур здійснювали по температурі переходу кварцу з α - в β - форму (573 °С). Відхилення температури не перевищувало $\pm 0,5$ К. Збір та обробку інформації з каналів вимірювання дериватографа виконували за допомогою створеної в ІТТФ прикладної комп'ютерної програми «Derivatograph». Подрібнені в фарфоровій ступці зразки палива завантажували в конічний алундовий тигель. В тиглі порівняння знаходилась інертна речовина (оксид алюмінію).

Результати вимірювань та їх аналіз

По даним зміни маси гранул в процесі термічної обробки були розраховані ступінь розкладання (частка сухої маси, що термічно розклалася, віднесена до загальної сухої маси палива) та вихід торрефікованого палива (табл. 1). Результати, що отримані за 290 °С в печі співпадають з даними, які були одержані в [1] при торрефікації деревини сосни в реторті за 300 °С без застосування інертних газів.

Для порівняння результатів торрефікації термічному аналізу було піддано вихідне біопаливо, дериватограма якого представлена на рис. 3. З кривих ДТГ та ДТА видно, що зв'язана вода [17] видаляється в інтервалі 20...172 °С. Термічне розкладання органічних речовин супроводжується різкою зміною маси зразка та активним газоутворенням, що реєструється на кривих ТГ та ДТГ. Максимальної швидкості цей процес набуває за 324 °С. Активна фаза газовиділення завершується за 387 °С.

Дериватограма вихідного біопалива підтверджує багатостадійний характер деструкції, обумовлений різною термічною стійкістю біополімерів. Повний термічний розклад палива завершується за 606 °С. Через інерційність, пов'язану з теплопровідністю та теплоємністю тигля з залишком палива (золи), реєстрація виділення теплоти припиняється за 620 °С (крива ДТА).

Аналіз дериватограм показав, що температура початку термічного розкладання в торрефікованому паливі (рис. 4 та 5) в порівнянні з вихідним (рис. 3) зміщується в сторону більш високих температур і чим вища температура торрефікації тим більший зсув. Так в торрефікованому за 290 °С паливі температура початку термічного розкладання становить 218 °С, в вихідному – 172 °С (криві ДТГ на рис. 3 та 5). Зростання термічної стійкості торрефікованого біопалива є наслідком руйнації термолабільних компонентів і в першу чергу геміцелюлози.

Торрефіковане біопаливо має більш широкий температурний діапазон термічного розкладання. В торрефікованому за 250 °С (рис. 4, крива ДТГ), термічне розкладання спостерігається в інтервалі 203...674 °С. У вихідному паливі (рис. 3, крива ДТГ) деструкція починається з 172 і закінчується при 606 °С. Підвищення температури торрефікації зрушує температуру закінчення термічного розкладання в область більш високих температур (до 785 °С, в паливі торрефікованому за 290 °С) (рис. 5, крива ДТГ). Розширення діапазону та підвищення температур термічного розкладання свідчить про зростання вмісту вуглецю в паливі.

Розрахована по даним TGA ступінь розкладання вихідного палива в печі дериватографа в момент досягнення 300 °С (кінцева температура гранул палива при торрефікації в печі з температурою 290 °С), складає 16,86 % (табл. 2). Підвищення температури до 325 °С викликає зростання ступеня розкладання на ~ 20 %.

В торрефікованому біопаливі ступінь розкладання, яка визначена методом TGA, з підвищенням температури термообробки зменшується (табл. 2), що свідчить про незначний залишок геміцелюлози.

Порівнюючи ступінь розкладання (табл. 1), одержану за температури в печі 290 °С (гранул 300 °С), та вихідного палива, визначену методом TGA в момент досягнення зразком 300 °С (табл. 2) бачимо, що після торрефікації вона більше ніж у два рази вища. Це свідчить про роль атмосфери та часу термічної обробки в технології торрефікації.

Термообробка викликала зростання гідрофобності палива, що проявилось в зменшенні рівноважної вологості (табл. 3), як наслідок зменшення кількості гідрофільних активних центрів в результаті деструкції біополімерів. Збільшення температури торрефікації викликає більш глибокі зміни в складі та структурі біопалива, що призводить до зростання його гідрофобності. Рівноважна вологість торрефікованих за 290 °С гранул у 2,8 рази нижча за таку для вихідного палива.

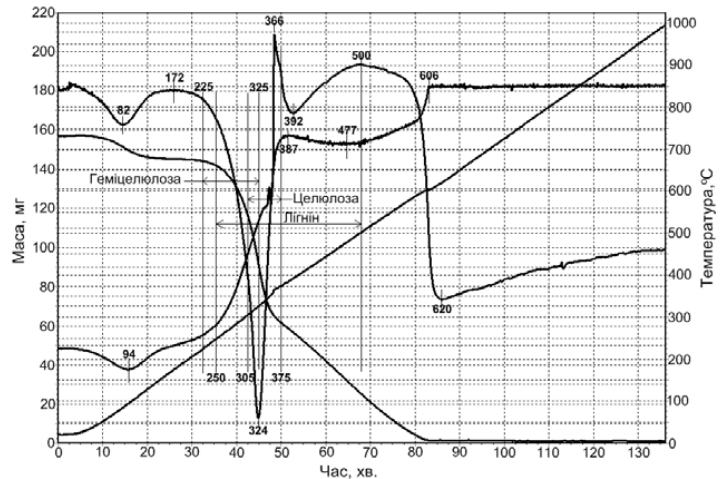


Рис. 3. Дериватограма деревини сосни.

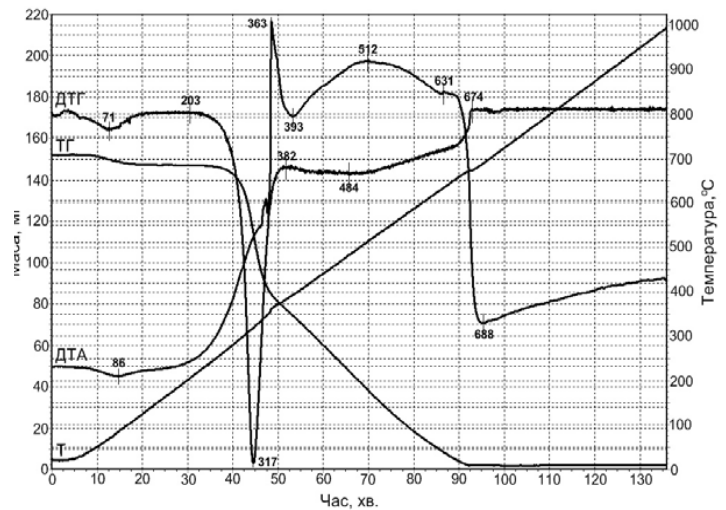


Рис. 4. Дериватограма деревини сосни після торрефікації за 250 °С.

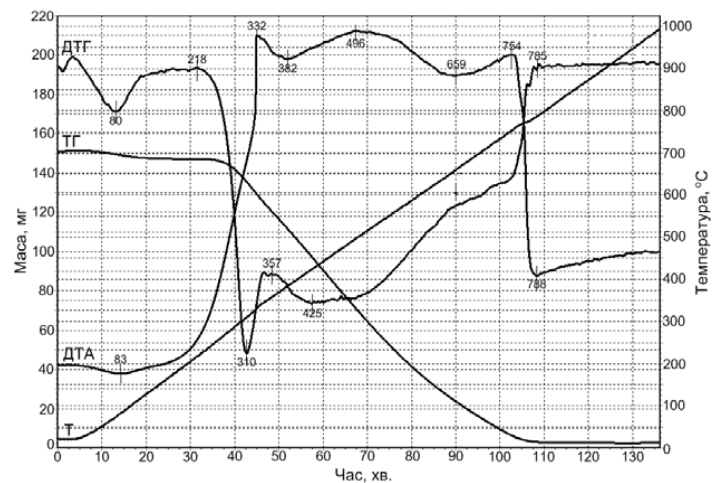


Рис. 5. Дериватограма деревини сосни після торрефікації за 290 °С.

Вміст золи в торрефікованому біопаливі через незмінність мінерального складу та зменшення сухої маси вищий в порівнянні з вихідним (табл. 3). Так в паливі, торрефікованому за 290 °С, зольність в 2,4 рази вища ніж в вихідному.

Оцінка теплоти термічного розкладання за методикою, наведеної в [18] показала, що підвищення температури торрефікації призводить до збільшення теплоти термічного розкладання (табл. 3). В порівнянні з вихідним біопаливом питома теплота термічного розкладання торрефікованого палива зростає з 19,6 до 65,4 % при збільшенні температури термообробки від 250 до 290 °С. Зважаючи на те, що термічне розкладання біопалив в дериватографі відбувається в повітряній атмосфері між питомою теплотою термічного розкладання та теплотворною здатністю палива існує пряма залежність.

З даних наведених в табл. 2 та 3 видно, що час термічної обробки впливає на результати торрефікації. Так обробка за 270 °С на протязі 30 хв. є недостатньо тривалою. Отримані величини ступеня розкладання, рівноважної вологості, зольності та теплоти розкладання є або гіршими, або такими ж як для палива торрефікованого за 250 °С протягом 60 хв.

Таблиця 2.

Біопаливо	Температура визначення, °С	Ступінь розкладання, %
Вихідне	300	16,86
	325	36,82
Торрефіковане за 250 °С	300	7,81
	325	27,17
Торрефіковане за 270 °С	300	6,27
	325	24,90
Торрефіковане за 290 °С	300	4,89
	325	11,42

Таблиця 3.

Біопаливо	Вологість, %	Органічні речовини, % СМ	Зола, % СМ	Тепловий ефект, мВ•с/мг СМ	Приріст теплового ефекту, %
Вихідне	7,33	98,97	0,76	325,3	–
Торрефіковане за 250 °С	3,16	98,57	1,43	389,1	19,6
Торрефіковане за 270 °С	3,20	98,38	1,35	413,1	27,0
Торрефіковане за 290 °С	2,65	98,16	1,84	535,0	64,5

Отримане торрефіковане паливо має властивості твердого крихкого тіла, воно легко подрібнюється, що є запорукою ефективного диспергування в шарових або молоткових млинах електростанцій.

Висновки

Термічний аналіз торрефікованих гранул з деревини сосни показав, що ступінь їх розкладання залежить від температури і часу термічної обробки. Питома теплота термічного розкладання торрефікованого біопалива прямо залежить від ступеня його розкладання.

В процесі термообробки біопаливо значно втрачає гідрофільні та набуває гідрофобні властивості, що проявляється в зменшенні рівноважної вологості. Вміст золи в торрефікованому паливі у зв'язку зі зменшенням сухої маси підвищується.

Дослідження способу торрефікації біопалив при атмосферному тиску в умовах газоподібного середовища, що утворюється в обмеженому просторі при термічному розкладанні органічних речовин, показало його ефективність та можливість застосування без використання інертних газів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пушкин С. А., Грачев А. Н., Макаров А. А., Козлова Л. В., Горшкова Т. А. Термический анализ торрефицированной древесины сосны и березы. Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18, № 5. – С. 45–47.
2. Tumuluru J. S., Sokhansanj S., Hess J. R., Wright C. T., Boardman R. D. // A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. Industrial Biotechnology. – 2011. – Vol. 7, № 5. – pp. 384–401.
3. Granados D. A. Studies of the Torrefaction of Sugarcane Bagasse and Poplar Wood. Thesis submitted in partial fulfillments of requirements for the degree of Doctor in Engineering – Energetic Systems. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energia Medellin, Colombia. – 2017. – 219 p.

4. *Марьяндышев П.А., Попова Е.И., Чернов А.А., Любов В.К.* Изотермическое исследование древесного топлива и его органических компонентов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. – № 2. – С. 15–18.
5. *Shafizadeh F.* Pyrolytic reactions and products of biomass. In: Overend RP, Milne TA, Mudge LK, editors. *Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion*. London: Elsevier, 1985, – pp. 183–217. (cellulose, hemicellulose, lignin, devolatilization rate, products)
6. *Basu P.* Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Elsevier; – 2013. DOI:10.1016/B978-0-12-396488-5.00004-6.
7. *Cielkosz D., Wallace R.* A review of torrefaction for bioenergy feedstock production // *Biofuels, Bioprod. Bioref.* – 2011. – Vol. 5. – pp. 317–329.
8. *Марьяндышев П. А., Чернов А.А., Любов В. К.* Определение кинетических характеристик процесса термического разложения топлив с целью анализа топочных процессов (обзор) // *Arctic Environmental Research*. – 2015. – № 2. – С. 118–128.
9. *Bergman P.C.A., Boersma A.R., Zwart R.W.R., Kiel J.H.A.* Torrefaction for biomass cofiring in existing coal-fired power stations "Biocoal". Report ECN–C–05–013. The Netherlands: Energy Research Center of the Netherlands (ECN). – 2005. – 71 p.
10. *Prins M.J., Ptasiński K.J., Janssen F.J.J.G.* More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy*. – 2006. – Vol. 31. – pp.3458–3470.
11. *Сафин Р.Р., Кайнов П.А.* Влияние режимов предварительной термической обработки сырья на свойства и качество древесного топлива // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2016. – № 3. – С. 52–58
12. *Phanphanich M., Mani S.* Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass // *Bioresource Technology*. – 2011. № 102, – pp. 1246–1253.
13. *Kim D., Park K. Y., Yoshikawa, K.* Conversion of Municipal Solid Wastes into Biochar through Hydrothermal Carbonization // *Engineering Applications of Biochar*. – 2017. DOI:10.5772/intechopen.68221.
14. *Бычков А.Л., Денькин А.И., Тихова В.Д., Ломовский О.И.* Расчет теплоты сгорания лигноцеллюлозы на основании данных элементного анализа // *Химия растительного сырья*. – 2014. – № 3. – С. 99–104.
15. *Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г.* Изменение теплоты сгорания древесного топлива при торрефикации // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. – 2017. – Т. 21, № 1. – С. 64–68.
16. *Сафин Р. Р., Тимербаева А. Л., Зиатдинов Р. Р., Ахунова А. Л.* Химизм процесса торрефикации древесного топлива // *Вестник технологического университета*. – 2015. – Т. 18, № 14. – С. 148–151.
17. *Mykhailyk V. A., Snezhkin Yu. F., Dmitrenko N. V.* Investigation of the State of Water in Energy Trees in the Process of Drying by Differential Scanning Calorimetry. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2015. – Vol. 88, № 5. – pp. 1093–1099.
18. *Михайлик В.А., Снежкін Ю.Ф., Корінчук Д.М.* Термічне розкладання гранул палива на основі торфу та деревини // *Промышленная теплотехника*. – 2014. – Т. 36, № 2. – С. 13–21.

THERMAL ANALYSIS OF GRANULAR BIOFUEL TORIFIED IN THE ATMOSPHERE OF ITS OWN GASEOUS ENVIRONMENT

Mykhailyk V.A., Korinchevska T.V., Korinchuk D.M., Dakhnenko V.L.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2019.10>

The article substantiates the need to study the torrefaction of fuel from biomass in the atmosphere of its own gaseous medium formed during the thermal decomposition of organic substances. The methodology, equipment and devices for heat treatment of pine wood pellets are given. The results of a study using the TGA and DTA methods of the degree of thermal decomposition, equilibrium humidity, ash content and specific heat of thermal decomposition of torrefied at 250, 270 and 290 °C and the initial biofuel are presented. It is shown that an increase in the heat treatment temperature leads to an increase in the degree and temperature range of fuel decomposition, an increase in the specific heat of thermal decomposition, a decrease in hydrophilicity, and an increase in ash content. The degree of decomposition of torrefied biofuel with an increase in the treatment temperature within the indicated limits decreased from 7.81 to 4.89%, which indicates an insignificant balance of hemicellulose. Heat treatment caused an increase in hydrophobicity, which manifested itself in a 2.8-fold decrease in the equilibrium moisture content of biofuel torrefied at 290 °C. Due to the invariability of the mineral composition and the decrease in dry weight, the ash content in torrefied fuel is higher than in the original. The specific heat of thermal decomposition of biofuel torrefied at 290°C increased by 65.4% compared to the initial one. The study of the method of torrefaction of biofuels at atmospheric pressure in a gaseous environment formed in a confined space during the thermal decomposition of organic substances, showed its effectiveness and the possibility of using it for heat treatment of biomass without the use of inert gases.

References 18, tables 3, figures 5.

Keywords: derivatography, granular biofuel, torrefaction, temperature and heat of thermal decomposition, equilibrium humidity, ash content.

1. *Pushkin S.A., Grachev A.N., Makarov A.A., Kozlova L.V., Gorshkova T.A.* [Thermal analysis of torrefied pine and birch wood] *Vestnik technologicheskogo universiteta [University of Technology Herald]*, 2015. V. 18, №5. – P. 45–47. (in Rus.)

2. *Tumuluru J. S., Sokhansanj S., Hess J. R., Wright C. T., Boardman R. D.* // A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*. 2011. Vol. 7, №. 5. pp. 384–401.

3. *Granados D. A.* Studies of the Torrefaction of Sugarcane Bagasse and Poplar Wood. Thesis submitted in partial fulfillments of requirements for the degree of Doctor in Engineering – Energetic Systems. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energia Medellin, Colombia. – 2017. – 219 p.

4. *Maryandyshv P.A., Popova E.I., Chernov A.A., Lyubov V.K.* [Isothermal study of wood fuel and its organic components], [*Bulletin of the Cherepovets State University*], 2016. №2. P. 15–18. (Rus.)

5. *Shafizadeh F.* Pyrolytic reactions and products of biomass. In: Overend RP, Milne TA, Mudge LK, editors. *Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion*. London: Elsevier, 1985, – pp. 183–217. (cellulose, hemicellulose, lignin, devolatilization rate, products)

6. *Basu P.* Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Elsevier, – 2013. DOI:10.1016/B978-0-12-396488-5.00004-6.

7. *Cielkosz D., Wallace R.* A review of torrefaction for bioenergy feedstock production // *Biofuels, Bioprod. Bioref.* – 2011. – Vol. 5. – pp. 317–329.

8. *Maryandyshv P. A., Chernov A. A., Lyubov V. K.* [Determination of kinetic characteristics of the process of thermal decomposition of fuels for the purpose of analysis of combustion processes (review)] // *Arctic Environmental Research*. 2015. №. 2. P. 118–128. (Eng.)

9. *Bergman P.C.A., Boersma A.R., Zwart R.W.R., Kiel J.H.A.* Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations "Biocoal". Report ECN–C–05–013. The Netherlands: Energy Research Center of the Netherlands (ECN). 2005. 71 p.

10. *Prins M.J., Ptasiński K.J., Janssen F.J.J.G.* More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy*. 2006. Vol. 31. pp.3458–3470.

11. *Safin R.R., Kainov P.A.* [The influence of pre-heat treatment of raw materials on the properties and quality of wood fuel] [*Wood processing industry*], 2016. № 3. P. 52–58 (Rus.)

12. *Phanphanich M., Mani S.* Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass // *Bioresource Technology*. 2011. №102, p. 1246–1253.

13. *Kim D., Park K. Y., Yoshikawa, K.* Conversion of Municipal Solid Wastes into Biochar through Hydrothermal Carbonization // *Engineering Applications of Biochar*. 2017. DOI:10.5772/intechopen.68221.

14. *Bychkov A.L., Denkin A.I., Tikhova V.D., Lomovsky O.I.* [Calculation of the calorific value of lignocellulose based on elemental analysis], *Chimia rastitelnogo siria* [Chemistry of plant raw materials], 2014. № 3. P. 99–104. (Rus.)
15. *Ermochenkova M.G., Evstigneev A.G.* [The change in the calorific value of wood fuel during torrefaction] *Lesnoi vesnik* [Forestry Bulletin], 2017. V. 21. № 1. P. 64–68. (Rus.)
16. *Safin R. R., Timerbaeva A. L., Ziatdinov R. R., Akhunova A. L.* [Chemistry of the process of torrefaction of wood fuel], *Vestnik technologicheskogo universiteta* [University of Technology Herald], 2015. V.18, №14. P. 148–151. (Rus.)
17. *Mykhailik V. A., Snezhkin Yu. F., Dmitrenko N. V.* Investigation of the State of Water in Energy Trees in the Process of Drying by Differential Scanning Calorimetry. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. Vol. 88, № 5. pp. 1093–1099.
18. *Mikhaylik V.A., Snezhkin Yu.F., Korinchuk D.M.* [Thermal distribution of granules of sand on the basis of peat and village], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2014. V. 36. № 2. P. 13-21. (Ukr.)

Отримано 29.09.2019
Received 29.09.2019