

УДК: 66.092-977

## ТЕРМІЧНЕ РОЗКЛАДАННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО БІОПАЛИВА, ОТРИМАНОГО РІЗНИМИ СПОСОБАМИ АКТИВАЦІЇ

Корінчевська Т.В.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Михайлик В.А.<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна, ORCID: 10000-0002-6638-4743, tvkorin@gmail.com

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, ORCID: 0000-0003-2712-1382, mhlk45@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2020.6>

Методами термогравіметрії та диференційного термічного аналізу досліджені зразки гранульованого палива з деревини сосни, виготовленого холодним пресуванням подрібненої сировини, її механоактивації та термічної активації. Вивчено вплив способу активації сировини на термічне розкладання гранульованого палива.

Методами термогравіметрії та диференціального термічного аналізу досліджені образці гранульованого палива из древесины сосны, изготовленного холодным пресованием измельченного сырья, его механоактивации и термической активации. Изучено влияние способа активации сырья на термическое разложение гранулированного топлива.

Samples of granular fuel from pine wood made by cold pressing of crushed raw materials, its mechanical activation and thermal activation were studied by thermogravimetry and differential thermal analysis. The influence of the activation method of raw material on the thermal decomposition of granular fuel has been studied.

Бібл. 17, табл. 3, рис. 3.

**Ключові слова:** дериватографія, термічне розкладання, біопаливо, сосна, гранулювання, активація сировини.

ДТА – крива диференціального термічного аналізу;

ДТГ – крива диференціальної термогравіметрії;

КФ – крупна фракція;

МА – механоактивація;

МФ – мікрофракція;

ПДФ – полідисперсна фракція;

СМ – суха маса;

Т – крива температури;

ТА – термічна активація;

ТГ – крива термогравіметрії;

ХП – холодне пресування.

### Вступ

На сьогодні гостро стоїть питання скорочення викидів парникових газів, які генеруються викопним паливом. Разом з цим, вартість такого палива постійно зростає. Тому актуальною є необхідність розвитку нових технологій виробництва енергії з відновлюваних джерел. Одним з поширених відновлюваних джерел є біомаса, яка має значний потенціал для розширення виробництва електроенергії та теплоти [1–3]. При спалюванні біомаси, безперечно, виділяється CO<sub>2</sub>, проте така ж його кількість була поглинута рослинами на протязі їхнього життєвого циклу [4]. Тому, з огляду на об'єм викидів парникових газів, використання біомаси як палива дозволить їх зменшити та поліпшити екологічний стан довкілля.

Біомаса використовується для виробництва різних видів палива – твердого (брикети, пелети, деревне вугілля), рідкого (спирти, піролізні масла) та газоподібного (біогаз, біоводень) [5]. Тверде біопаливо

набуває все більшого поширення завдяки порівняно дешевій технології отримання.

Найбільш вживаною сировиною є деревина, зокрема сосна. При лісозаготівлі та деревообробці, як відомо, лише 28% первинного дерева є пиломатеріалом [6], все інше йде на відходи, які займають багато місця та забруднюють оточуюче середовище. Деревинні відходи є екологічно безпечним паливом, яке має достатньо високу теплотворну здатність [7–9]. Окрім традиційного використання деревини у вигляді дров все більшої популярності набувають деревинні пелети та брикети [3, 10, 11].

Оскільки деревинні відходи різних розмірів та вологості, спалювання їх напряму викликає певні труднощі. Щоб забезпечити ефективний процес спалювання, відходи повинні мати приблизно однакові розміри та форму, що дозволить забезпечити необхідний контакт з киснем і отримати найбільшу теплогенерацію [8]. Гранулювання є ефективним способом вироб-

ництва твердого біопалива, яке дозволяє стабілізувати та гомогенізувати сировину, покращити механічні, термічні та горючі властивості, а також поліпшити умови транспортування [12].

Виготовлення гранульованого біопалива зазвичай умовно поділяють на стадії: підготовка сировини та її подрібнення, сушіння, дозоване зволоження (додавання води або обробка паром), гранулювання (пресування), охолодження та упаковка [12, 13]. При сушінні, обробці паром, пресуванні спостерігається зміна деяких хімічних та фізико-механічних властивостей деревини, в результаті яких деревина набуває нових властивостей, необхідних для виробництва пелет та брикетів [14]. Зокрема в деревині активується лігнін, що переходить в пластичний стан та виступає в якості внутрішнього зв'язуючого [14].

Гранулювання – це добре вивчений процес з традиційним обладнанням. На ефективність процесу впливає багато факторів: вологість сировини її фракційний та гранулометричний склад, температурний режим гранулювання, тощо [15]. Встановлено, що варіювання такими змінними як вологість, розмір і форма часток сировини, а також температура, тиск та геометрія матриці пресу дає можливість отримати гранули високої якості [4, 16].

До якісних показників гранульованого палива відносяться вологість, теплотворна здатність, вміст легких речовин, зольність, поведінка золи під час плавлення та вміст домішок [1]. Більшість з цих показників можливо оцінити методами термічного аналізу.

#### Матеріали і методи

Як вихідний матеріал в дослідженні використано висушену тирсу деревини сосни. Щоб виявити вплив розміру часток на якість гранул тирсу подрібнювали та розділяли на фракції: полідисперсну (ПДФ) з розміром частинок 0,2...3 мм, крупну (КФ) – 2...3 мм та мікрофракцію (МФ) –  $\leq 0,2$  мм.

Експериментальні гранули отримували в спеціальному пристрої, що розміщався в розривній машині типу МР100, налаштованій для пресування. Щоб уникнути впливу тиску пресування всі гранули були виготовлені за тиску 100 – 120 МПа. Сам пристрій для формування гранул складається із розбірної матриці та пуансона. Висота гранул регулювалась об'ємом закладеного в матрицю матеріалу. В результаті пресування отримували гранули в вигляді таблеток діаметром 8 мм та висотою 2,5 – 3,0 мм.

В дослідженні реалізовані наступні способи активації внутрішніх зв'язуючих деревини:

- холодне пресування (ХП) – активація контактних центрів матеріалу в результаті дії високого тиску за температур зовнішнього середовища ( $\sim 20$  °С);

- механоактивація (МА) – технологічний процес диспергування сировини з метою одержання частинок з розміром  $\leq 0,2$  мм, в результаті чого збільшується кількість контактних центрів матеріалу за рахунок зростання питомої поверхні;

- термічна активація (ТА) подрібненої сировини здійснювалась під час її пресування в прогрійтій до 150 °С камері матриці пристрою для пресування.

Дослідження термічного розкладання палива проведено в модернізованому в ІТТФ НАН України дериватографі Q-1000 системи Paulik-Paulik-Erdey (фірма «МОМ», Угорщина) в діапазоні 19 – 1009 °С при швидкості нагрівання 7,4 К/хв. Зразки розміщували в відкритий конічний платиновий тигель. В якості інертної речовини в тиглі порівняння використовували оксид алюмінію. Корекцію шкали температур здійснювали за температури переходу кварцу з  $\alpha$ - в  $\beta$ -форму (573 °С). Збір та обробку інформації з дериватографа здійснювали за допомогою прикладної комп'ютерної програми «Derivatograph». Реєстрували температуру (Т), масу зразка (ТГ), швидкість зміни маси (ДТГ) та тепловий ефект (ДТА).

#### Результати досліджень та їх аналіз

Криві зміни Т, ТГ, ДТГ та ДТА при термічному розкладанні гранульованого палива деревини сосни, отриманого різними способами її активації, представлені на дериватограмах.

Процес термічного розкладання деревини сосни (рис. 1 – 3) має виражений загальний екзотермічний характер і протікає в декілька етапів. Перший етап – це видалення води. Зневоднення супроводжується ендотермічним ефектом, що представлений піком на кривій ДТА. На кривій ДТГ, в цьому ж температурному інтервалі, теж спостерігається пік, що характеризує етап зневоднення.

При нагріванні швидкість процесу поступово зростає, проходить через максимум та спадає до мінімального значення, яке відповідає температурі повного видалення води.

Другий етап – розкладання органічних складових деревини сосни (переважно геміцелюлози, целюлози та лігніну), що супроводжується активним газоутворенням та тепловиділенням. Температура початку розкладання співпадає з кінцевою температурою зневоднення. На цьому етапі характерні низько- та

високотемпературна стадії. На низькотемпературній стадії спочатку спостерігається висока швидкість зміни маси зразка та значне тепловиділення, а потім відбувається їх спад. Спад тепловиділення пов'язаний з ендотермічним ефектом, який супроводжує видалення газоподібних продуктів. На висотемпературній стадії розкладання органічних речовин починається зростання тепловиділення при невисокій зміні швидкості маси гранули. Після завершення тепловиділення та виходу на пряму кривої ТГ другий етап завершується.

При нагріванні швидкість процесу поступово зростає, проходить через максимум та спадає до мінімального значення, яке відповідає температурі повного видалення води.

Другий етап – розкладання органічних складових деревини сосни (переважно геміцелюлози, целюлози та лігніну), що супроводжується активним газоутворенням та тепловиділенням. Температура початку

розкладання співпадає з кінцевою температурою зневоднення. На цьому етапі характерні низько- та високотемпературна стадії. На низькотемпературній стадії спочатку спостерігається висока швидкість зміни маси зразка та значне тепловиділення, а потім відбувається їх спад. Спад тепловиділення пов'язаний з ендотермічним ефектом, який супроводжує видалення газоподібних продуктів. На висотемпературній стадії розкладання органічних речовин починається зростання тепловиділення при невисокій зміні швидкості маси гранули. Після завершення тепловиділення та виходу на пряму кривої ТГ другий етап завершується.

На завершальному етапі відбувається розкладання деяких мінеральних речовин, що могли потрапити у зразок ззовні.

Аналіз термічного розкладання зразків гранул палива (табл. 1) дозволив визначити інтервали температур різних етапів термічного розкладання, вміст води, органічних та мінеральних речовин, а також золи.

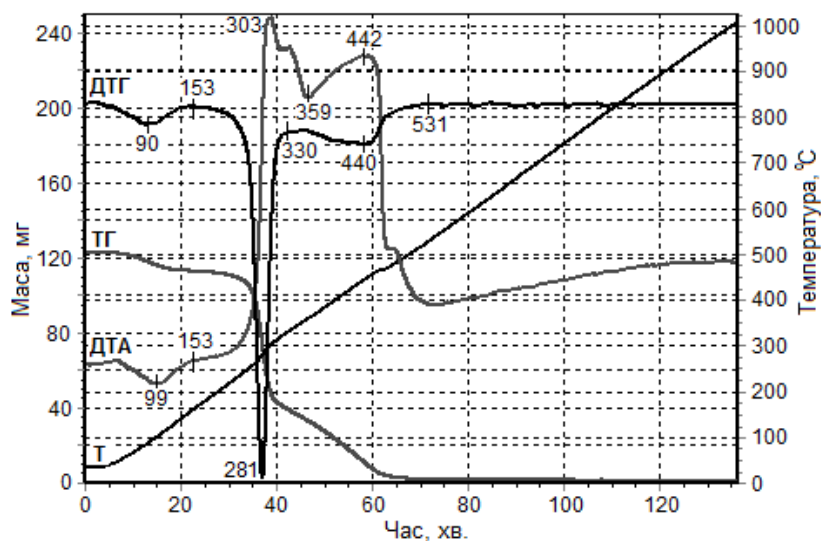


Рис. 1. Дериватограма гранули з вмістом 100% ПДФ тирси деревини сосни. ХП

Таблиця 1. Результати аналізу термічного розкладання гранул палива з деревини сосни

№ з/п	Склад та умови отримання гранул	Видалення води		Термічне розкладання речовин				Зола %
		інтервал, °C	вологість, %	органічних		мінеральних		
				інтервал, °C	вміст, % СМ	інтервал, °C	вміст, % СМ	
1	100 % ПДФ. ХП	19–153	7,31	153–531	98,19	531–1006	0,83	0,97
2	30%МФ та 70%КФ. ХП	23–188	8,89	188–510	98,51	510–1009	0,61	0,88
3	30%МФ та 70%КФ. ТА	19–185	8,41	185–547	98,30	547–1002	0,57	1,13
4	100% МФ. ХП	19–184	9,11	184–515	98,89	515–1005	0,18	0,93
5	100% МФ. ТА	19–182	8,09	182–527	99,00	–	–	1,00

Всі зразки гранул мають низьку рівноважну вологість, яка варіюється в межах 7,31 – 9,11 %. Після ТА в результаті зменшення доступних гідрофільних активних центрів і збільшення щільності рівноважна вологість гранул (табл. 1, позиції 3 та 5) нижча за таку для гранул, виготовлених ХП (табл. 1, позиції 2 та 4).

Для гранули з вмістом 100% ПДФ тирси деревини сосни, виготовленої ХП (рис. 1, табл. 1, позиція 1) видалення води відбувається в інтервалі температур 19 – 153 °С. Маса гранули змінюється на першому етапі незначно, що свідчить про низьку вологість зразка. Максимальна швидкість зневоднення реєструється при 90 °С.

На другому етапі розпочинається розпад органічних речовин у дві стадії – низькотемпературну (153 – 330 °С) та високотемпературну (330 – 531 °С). В досліджених зразках ці стадії явно розділені зниженням швидкості розкладання та спадом тепловиділення. Максимальна швидкість розкладання спостерігається на низькотемпературній стадії при 281 °С.

У гранули з 30 % МФ та 70 % КФ, отриманої ХП (рис. 2а, табл. 1, позиція 2), спостерігається розширення етапу зневоднення на 31 °С порівняно з гранулою з вмістом 100% ПДФ (рис. 1). Реєструється зсув температури максимальної швидкості зневоднення в область більш високих температур на 8 °С. Також зміщується на 21 °С в область більш низьких температур кінцева температура розкладання органічних сполук. При цьому температурний інтервал низькотемпературної стадії зменшився на 24 °С, а високотемпературної – на 32 °С. Тобто механоактивація 30 % сировини зменшує інтенсивність зневоднення та збільшує інтенсивність розкладання органічних речовин. Характер ДТГ кривої залишається

подібним, а от крива ДТА має відмінний характер на етапі розкладання органічних сполук. Стає більш вираженим ендотермічний ефект внаслідок видалення газоподібних продуктів деструкції. Тепловиділення наростає на високотемпературній стадії розкладання та досягає максимуму при 494 °С. Тобто механоактивація знижує інтенсивність тепловиділення на першій стадії термічного розкладання.

Термічна активація суміші з вмістом 30% МФ та 70% КФ (рис. 2б, табл. 1, позиція 3) викликає зміщення початку розкладання на 3 °С в сторону нижчих температур та повного завершення розкладання на 64 °С в сторону вищих температур. При цьому інтервал низькотемпературної стадії зменшився на 6 °С, а високотемпературної збільшився на 73 °С. Характер кривої ДТА подібний до зразка без ТА (рис. 2а), проте максимумами, що характеризують етапи термічного розкладання зміщені в область більш високих температур. Більш вираженим є ендотермічний ефект виділення газоподібних продуктів з максимумом при 324 °С. Отже термічна активація призводить до інтенсивного викиду газів в першому періоді з втратою теплоти термічного розкладання.

Збільшення механоактивованої деревини до 100 % при холодному пресуванні (рис. 3а, табл. 1, позиція 4) призводить до зміщення максимуму та завершення зневоднення в область більш низьких температур на 4 °С. Інтервал розкладання розширюється на 9 °С. При цьому інтервал низькотемпературної стадії розкладання звужується на 6 °С, а високотемпературної – розширюється на 15 °С. Судячи з кривої ДТА найбільше тепловиділення реєструється на низькотемпературній стадії при 333 °С.

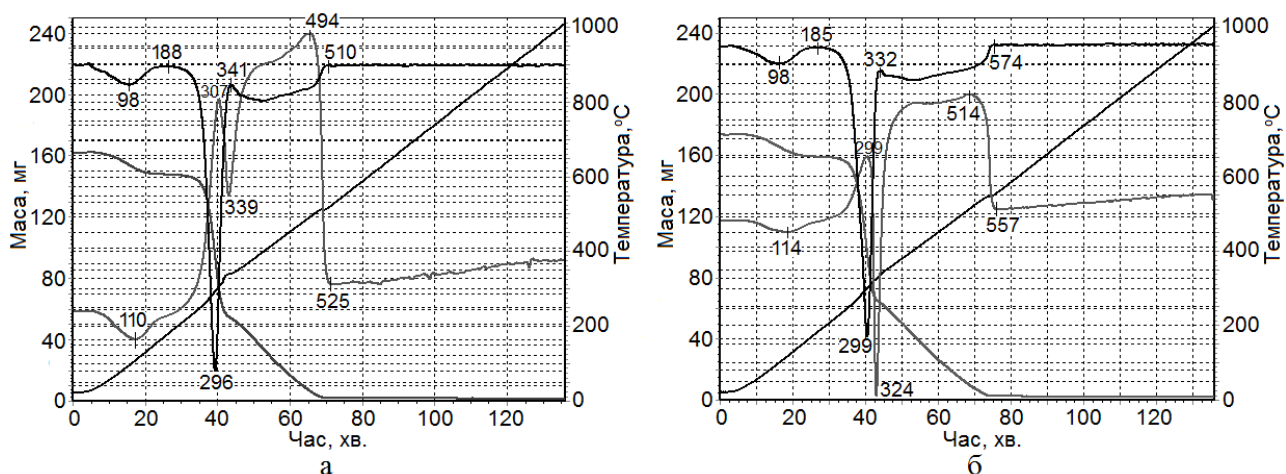


Рис. 2. Дериватограми гранул з вмістом 30% МФ та 70% КФ тирси деревини сосни, виготовлені за допомогою ХП (а) та ТА (б)

Термічна активація матеріалу перед пресуванням (рис. 3 б, табл. 1, позиція 5) зрушує кінцеву температуру термічного розкладання в область більш високих температур на 12 °С. Спостерігається розширення інтервалу низькотемпературної стадії на 4 °С і високотемпературної – на 10 °С. Максимуми теплових ефектів (крива ДТА) зміщуються в область більш високих температур.

Аналіз кінетики термічного розкладання показав (табл. 2), що на низькотемпературній стадії найвищу швидкість розкладання мають гранули, що були виготовлені на 100% з МФ, а на високотемпературній – гранули з 30 % МФ та 70 % КФ. Найвища загальна середня швидкість розкладання органічних речовин 2,39 % СМ/хв. виявилась для гранули з 30 % МФ та 70 % КФ, отриманої ХП. При цьому гранула з ПДФ має найнижчі показники швидкостей розкладання

органічних речовин. Отримані результати свідчать, що механоактивація підвищує середню швидкість розкладання, а термічна активація знижує її (табл. 2).

Щоб порівняти теплові ефекти термічного розкладання зразків гранул було визначено умовний тепловий ефект. Тепловий ефект був обчислений як площа, що знаходиться між ДТА та найбільш вірогідною передбачуваною базовою лінією ДТА (пряма, що з'єднує точки повного зневоднення та завершення тепловиділення). Площу під кривими екзотермічних теплових ефектів визначали методом трапецій за допомогою програми «Derivatograph».

Для зразка з 100 % ПДФ через технічні можливості цю величину не було визначено. Середнє значення умовного питомого теплового ефекту термічного розкладання органічних речовин в гранулах (табл. 3), що були виготовлені з використанням 100% МФ, складає

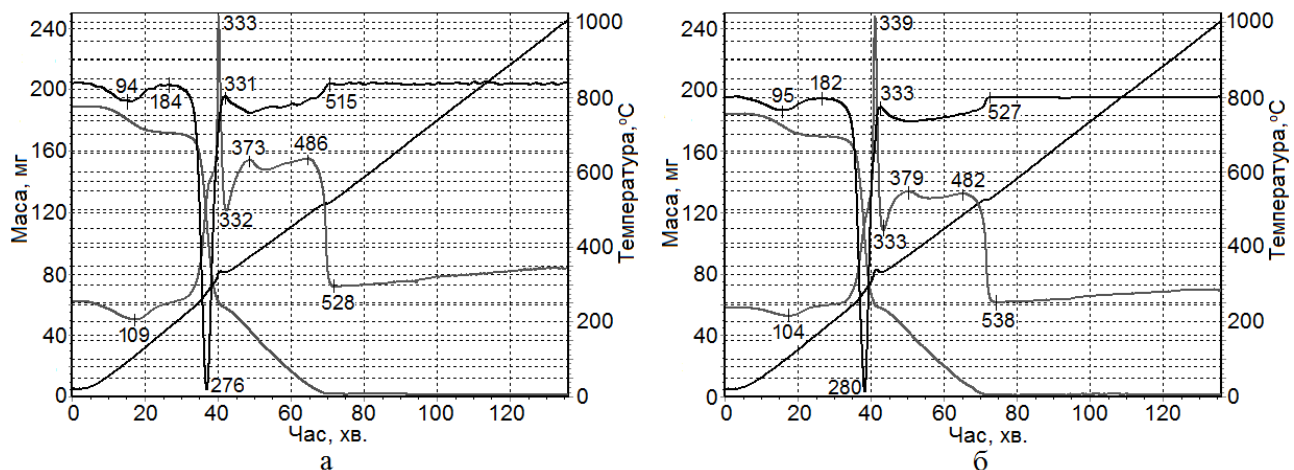


Рис. 3. Дериватограми гранул з вмістом 100% МФ тирси деревини сосни, виготовлені за допомогою ХП (а) та ТА (б)

Таблиця 2. Кінетика розкладання органічних сполук деревини сосни в гранульованому паливі

№ з/п	Склад та умови отримання гранул	Низькотемпературна стадія		Високотемпературна стадія		Загальна середня швидкість розкладання, % СМ/хв.
		інтервал, °С	швидкість розкладання, % СМ/хв	інтервал, °С	швидкість розкладання, % СМ/хв.	
1	100 % ПДФ. ХП	153–330	3,21	330–531	1,12	1,98
2	30% МФ та 70%КФ. ХП	188–341	3,98	341–510	1,37	2,39
3	30% МФ та 70%КФ. ТА	185–332	3,61	332–547	1,23	2,09
4	100 % МФ. ХП	184–331	4,43	331–515	1,16	2,32
5	100 % МФ. ТА	182–333	4,32	333–527	1,12	2,21

Таблиця 3. Умовний питомий тепловий ефект термічного розкладання органічних речовин в зразках гранул

№ з/п	Склад та умови отримання гранул	Умовний питомий тепловий ефект термічного розкладання, мВ•с•мг <sup>-1</sup> СМ
1	30%МФ та 70%КФ. ХП	226,7
2	30%МФ та 70%КФ. ТА	237,7
3	100% МФ. ХП	259,3
4	100% МФ. ТА	263,1

261,2 мВ•с•мг<sup>-1</sup> СМ. Для композиційних гранул ця величина нижча – 232,2 мВ•с•мг<sup>-1</sup> СМ, що може бути наслідком різного хімічного складу фракцій. Відомо, що основні горючі органічні компоненти деревини геміцелюлоза, целюлоза та лігнін мають різну теплотворну здатність [17]. До того ж вони мають різну пружність та властивість до подрібнення і диспергування. Тому при сегрегації вони можуть не рівномірно розподілятися по фракціям. Судячи з вмісту органічних та мінеральних речовин, що розкладаються, склад фракцій має відмінність (табл. 1).

#### Висновки

В результаті дослідження методами термогравіметрії та диференційного термічного аналізу гранульованого палива деревини сосни визначено температурні інтервали зневоднення, термічного розкладання органічних і мінеральних речовин, вологість та вміст золи. Оцінено теплоту та швидкість термічного розкладання органічних речовин. Визначено, що швидкість та температурний інтервал термічного розкладання гранульованих палив залежить від способу активації сировини.

Результати термічного аналізу свідчать, що механоактивація сировини для підвищення міцності та щільності гранул позитивно впливає на процес термічного розкладання. Подрібнення деревини до часток розміром  $\leq 0,2$  мм призводить до часткового руйнування складних високомолекулярних сполук (геміцелюлози, целюлози та лігніну), тим самим зменшує ступінь міжмолекулярної взаємодії та інтенсифікує процес. З результатів випливає, що достатньо додавання 30 % МФ, не змінюючи при цьому умови пресування, щоб прискорити процес у 1,2 рази.

В той же час показано, що термічна активація має зворотній ефект. Незважаючи на підвищення механічної якості гранул, швидкість розкладання таких гранул зменшується. Тому енергетична ефективність термічної активації сировини перед пресуванням вимагає додаткових досліджень.

Виявлено, що умовний тепловий ефект термічного розкладання гранул залежить від фракційного складу подрібненої сировини. Цей факт може бути пов'язаний з різним хімічним складом фракцій.

Більша частина теплоти термічного розкладання органічних речовин гранульованих палив вивільняється в другому періоді при швидкості розкладання від 1,12 до 1,37 % СМ/хв.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Malik B., Pirzadah T., Islam S., Tahir I., Kumar M., Rehman R.* Biomass pellet technology: A green approach for sustainable development // *Agricultural Biomass Based Potential Materials* / K. Hakeem et al. (eds). – Switzerland: Springer, 2015. – P. 403–433. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13847-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13847-3_19).
2. *Parikka M.* Global biomass fuel resources // *Biomass Bioenergy*. – 2004. – Vol. 27, Is. 6. – P. 613–620. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.005>.
3. *Sikkema R., Steiner M., Junginger M., Hiegl W., Hansen M.T., Faaij A.* The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020 // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. – 2011. – Vol. 5, Is. 3. – P. 250–278. <https://doi.org/10.1002/BBB.277>.
4. *Ungureanu N., Vladut V., Voicu Gh., Dinca M.-N., Zabava B.-St.* Influence of biomass moisture content on pellet properties – review // *Conference: 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development At: Jelgava, Latvia 23.–25.05.2018.* <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N449>.
5. *Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S.* Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 127. – P. 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.042>.
6. *Евдокимов Н.В., Александров А.В.* Разработка технологии брикетирования древесных отходов с использованием связующей композиции на основе механоактивированного гидролизного лигнина // *Актуальные*

направлення научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – № 2-3(7-3). – С.65–68. <https://doi.org/10.12737/3190>.

7. *Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M., Gulczyński P., Mleczek M.* Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass // *Renewable Energy*. – 2013. – Vol. 57. – P. 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.005>.

8. *Севастьянова С.Н.* Биоэнергетика. Древесные (топливные) гранулы // *Вестник Оренбургского государственного университета*. – 2009. – № 10. – С. 133–138.

9. *Lehtikangas P.* Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark // *Biomass Bioenergy*. – 2001. – Vol. 20, Is. 5. – P. 351–360. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1).

10. *Sikkema R., Junginger H.M., Pichler W., Hayes S., Faaij A.P.C.* The international logistics of wood pellets for heating and power production in Europe: costs, energy-input and greenhouse gas balances of pellet consumption in Italy, Sweden and the Netherlands // *Biofuels Bioproducts and Biorefining*. – 2010. – Vol. 4, Is. 2. – P. 132–153. <https://doi.org/10.1002/bbb.208>.

11. *Demirbas A., Sahin-Demirbas A.* Briquetting properties of biomass waste materials // *Energy Sources*. – 2004. – Vol. 26, No. 1. – P. 83–91. <https://doi.org/10.1080/00908310490251918>.

12. *Zeng T., Kallio M., Ovarainen H.* Critical review on the pelletizing technology, combustion technology and industrial-scale systems. – 2012. [https://www.dbfz.de/fileadmin/MixBioPells/publications/D31\\_Critical\\_Review\\_about\\_pelletising\\_and\\_combustion\\_technology\\_FINAL.pdf](https://www.dbfz.de/fileadmin/MixBioPells/publications/D31_Critical_Review_about_pelletising_and_combustion_technology_FINAL.pdf).

13. *Protić M., Mitić D., Stefanović V.* Wood pellets production technology // *Safety Engineering*. – 2011. – Vol. 1, No. 1. – P. 23–26. <https://doi.org/10.7562/SE2011.1.01.05>.

14. *Судакова И.Г., Руденко Н.Б.* Получение твердых биотоплив из растительных отходов (обзор) // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. – 2015. – Т.8, № 4. – С. 499–513. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-2015-8-4-499-513>.

15. *Stelte W., Holm J.K., Sanadi, A.R., Barsberg S., Ahrenfeldt J., Henriksen U.B.* Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions // *Fuel*. – 2011. – Vol. 90. – P. 3285–3290. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>.

16. *Mani S., Tabil L., Sokhansanj S.* Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses // *Biomass & Bioenergy*. – 2006. – Vol. 30. – P. 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>.

17. *Михайлик В.А., Корінчевська Т.В., Корінчук Д.М., Дахненко В.Л.* Термічний аналіз гранульованого біопалива торрефікованого у атмосфері власного газоподібного середовища // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2019. – Т. 41, № 4. – С. 70–77. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.10>.

## THERMAL DECOMPOSITION OF GRANULAR BIOFUEL OBTAINED BY DIFFERENT METHODS OF ACTIVATION

Korinchevska T.V., Mykhailyk V.A.

*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2020.6>

The article considers the effect of the granulo-metric composition of pine wood sawdust and granulation modes on the thermal decomposition of biofuel. Mechanical activation and thermal activation of raw materials before pressing were used in the study. Thermal decomposition of granular fuel was carried out by the methods of thermogravimetry and differential thermal analysis. The temperature ranges of dehydration, thermal decomposition of organic and mineral substances, moisture and ash content of the fuel have been determined. The rates of thermal decomposition of organic substances in granular fuel were also determined. The thermal effects of thermal decomposition of the granule samples were compared. It is registered that the equilibrium moisture content of granules obtained after thermal activation of the raw material is lower than that for granules made by cold pressing. This is indirect evidence of their increased density. It has been determined that most of the heat of thermal decomposition of organic substances in granular fuels is released in the high-temperature period at a decomposition rate of 1,12 to 1,37 % dry matter per minute. It was revealed that the thermal effect of thermal decomposition of granules depends on the fractional composition of the ground raw materials. This may be due to the difference in the chemical composition of the fractions. The analysis of obtained results made it possible to determine that the mechanical activation of raw materials increases the average rate of granule decomposition, and thermal activation reduces it. That is, the mechanical activation of raw materials has a positive effect on the thermal decomposition process. Grinding wood sawdust to particles smaller than 0,2 mm can lead to partial destruction of complex macromolecular compounds (hemicellulose, cellulose and lignin). Thus, this leads to a decrease in the degree of intermolecular interaction and intensification of the decomposition process.

References 17, table 3, figures 3.

**Key words:** derivatography, thermal decomposition, biofuel, pine, granulation, activation of raw materials.

1. Malik B., Pirzadah T., Islam S., Tahir I., Kumar M., Rehman R. Biomass pellet technology: A green approach for sustainable development. In: K. Hakeem et al. (eds.), *Agricultural Biomass Based Potential Materials*, Switzerland, Springer. 2015. P. 403–433. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13847-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13847-3_19).

2. Parikka M. Global biomass fuel resources. *Biomass Bioenergy*, 2004. Vol. 27. Is. 6. P. 613–620. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.005>.

3. Sikkema R., Steiner M., Junginger M., Hiegl W., Hansen M.T., Faaij A. The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2011. Vol. 5. Is. 3. P. 250–278. <https://doi.org/10.1002/BBB.277>.

4. Ungureanu N., Vladut V., Voicu Gh., Dinca M.-N., Zabava B.-St. Influence of biomass moisture content on pellet properties – review. Conference: 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development At: Jelgava, Latvia 23.–25.05.2018. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N449>.

5. Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S. Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. *Applied Energy*, 2014. Vol. 127. P. 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.042>.

6. Evdokimov N.V., Aleksandrov A.V. [Development of technology for briquetting wood waste using the binder composition on the basis of mechanically hydrolytic lignin], [Actual research directions of the XXI century: Theory and Practice], 2014. No. 2-3(7-3). P. 65–68. <https://doi.org/10.12737/3190>. (in Rus.)

7. Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworowski J., Krzyżaniak M., Gulczyński P., Mleczek M. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. *Renewable Energy*, 2013. Vol. 57. P. 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.005>.

8. Sevastyanova S.N. [Bioenergetics. Wood (fuel) granules], [Vestnik of the Orenburg State University], 2009. No. 10. P. 133–138. (in Rus.)

9. Lehtikangas P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass Bioenergy*, 2001. Vol. 20. Is. 5. P. 351–360. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1).

10. Sikkema R., Junginger H.M., Pichler W., Hayes S., Faaij A.P.C. The international logistics of wood pellets for heating and power production in Europe: costs, energy-input and greenhouse gas balances of pellet consumption in Italy, Sweden and the Netherlands. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 2010. Vol. 4. Is. 2. P. 132–153. <https://doi.org/10.1002/bbb.208>.

11. *Demirbas A., Sahin-Demirbas A.* Briquetting properties of biomass waste materials. *Energy Sources*, 2004. Vol. 26. No. 1. P. 83–91. <https://doi.org/10.1080/00908310490251918>.
12. *Zeng T., Kallio M., Ovarainen H.* Critical review on the pelletizing technology, combustion technology and industrial-scale systems. 2012.  
[https://www.dbfz.de/fileadmin/MixBioPells/publications/D31\\_Critical\\_Review\\_about\\_pelletising\\_and\\_combustion\\_technology\\_FINAL.pdf](https://www.dbfz.de/fileadmin/MixBioPells/publications/D31_Critical_Review_about_pelletising_and_combustion_technology_FINAL.pdf).
13. *Protić M., Mitić D., Stefanović V.* Wood pellets production technology. *Safety Engineering*, 2011. Vol. 1. No. 1. P. 23–26. <https://doi.org/10.7562/SE2011.1.01.05>.
14. *Sudakova I.G., Rudenko N.B.* [Obtaining of solid biofuels from plant waste (Review)], [Journal of Siberian Federal University. Chemistry], 2015. Vol. 8, No. 4. P. 499–513. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-2015-8-4-499-513>. (in Rus.)
15. *Stelte W., Holm J.K., Sanadi, A.R., Barsberg S., Ahrenfeldt J., Henriksen U.B.* Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 2011. Vol. 90. P. 3285–3290. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>.
16. *Mani S., Tabil L., Sokhansanj S.* Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass & Bioenergy*. 2006. Vol. 30. P. 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>.
17. *Mykhailyk V., Korinchevska T., Korinchuk D., Dakhnenko V.* [Thermal analysis of granular biofuel torified in the atmosphere of its own gaseous environment], [Thermophysics and Thermal Power Engineering], 2019. Vol. 41. No. 4. P. 70–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.4.2019.10>. (in Ukr.)

Отримано 04.11.2020

Received 04.11.2020