

**PIROLIZA DEȘEURILOR AGROINDUSTRIALE LEMNOASE CU APLICAREA UNUI CÂMP
ELECTROMAGNETIC DE FREVENȚĂ ULTRAÎNALTĂ**

**PYROLYSIS OF WOODY AGRO-INDUSTRIAL WASTE WITH THE APPLICATION OF AN
ULTRA-HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD**

Victor POPESCU

Universitatea Tehnică a Moldovei

E-mail: victor.popescu@ie.utm.md

ORCID ID: 0000-0002-4634-2255

Viktor GOLUBEV

Institutul de Energetică al Academiei Naționale de Științe din Belarus

E-mail: vpgolubev@mail.ru

ORCID ID: 0009-0007-4062-3455

Dmitry DEGTEROV

Institutul de Energetică al Academiei Naționale de Științe din Belarus

E-mail: ddegterov@mail.ru

ORCID ID: 0009-0006-0209-2852

Siarhei VASILEVICH

Academia de Aviație de Stat din Belarus

E-mail: svasilevich@yandex.ru

ORCID ID: 0000-0002-9250-2926

Andrei ASADCHYI

Institutul de Energetică al Academiei Naționale de Științe din Belarus

E-mail: asadchyi@tut.by

ORCID ID: 0009-0000-7758-0435

Nikolai SHEVCHIK

Institutul de Energetică al Academiei Naționale de Științe din Belarus

E-mail: neshevchik@gmail.com

ORCID ID: 0009-0007-5270-2302

Mihail MELENCIUC

Universitatea Tehnică a Moldovei

E-mail: mihail.melenciuc@pmai.utm.md

ORCID ID: 0000-0001-6575-8814

Rezumat: În lucrare se prezintă un studiu privind dezvoltarea sectorului energetic și utilizarea pe scară largă a biocombustibililor lemnoși, proveniți din deșeuri agroindustriale. Se observă că conversia termochimică fără oxigen a biomasei este promițătoare. Este dată descrierea echipamentelor experimentale pentru producerea cărbunelui din lemn. O caracteristică specială a acestui echipament este implementarea procesului de conversie termică a materiilor prime lemnoase și post-arderea amestecului de gaze de piroliză în camere echipate cu surse de câmp electromagnetic de frecvență ultraînaltă. Echipamentul de piroliză include un bloc pentru generarea de gaz, generator din deșeuri organice, un bloc pentru piroliza lemnului, un sistem de purjare a camerei de piroliză cu gaz inert, o cameră de post-ardere pentru un amestec de gaze, o unitate de control al temperaturii produsului de ardere, un schimbător de căldură, o pompă de fum, un sistem de control și monitorizare a funcționării instalației. Rezultatele testelor indică faptul că utilizarea echipamentelor de piroliză cu aplicarea unui câmp electromagnetic de frecvență ultraînaltă permite creșterea intensității post-ardere a amestecului de gaz prin atingerea unor temperaturi

mai ridicate în camera de post-ardere, creșterea productivității procesului de producere a cărbunelui prin reducerea timpului de calcinare și îmbunătățirea calității cărbunelui rezultat datorită absenței schimbărilor bruște de temperatură în reactor. Astfel, performanța instalației de piroliză în absența câmpului electromagnetic de frecvență ultraînaltă a fost de 1,45 kg/h, iar în prezența câmpului electromagnetic de frecvență ultraînaltă – 1,75 kg/h.

Cuvinte-cheie: producerea carbunelui; piroliza lemnului; câmp electromagnetic de frecvență ultraînaltă; deșeuri agroindustriale

Abstract: The paper presents a study on the development of the energy sector and the widespread use of wood biofuels from agro-industrial waste. It is noted that the oxygen-free thermochemical conversion of biomass is promising. A description of experimental equipment for the production of charcoal from wood is given. A special feature of this equipment is the implementation of the process of thermal conversion of wood raw materials and post-combustion of the pyrolysis gas mixture in chambers equipped with ultrahigh frequency electromagnetic field sources. The pyrolysis equipment includes a block for gas generation, a generator from organic waste, a block for wood pyrolysis, a system for purging the pyrolysis chamber with inert gas, a post-combustion chamber for a gas mixture, a combustion product temperature control unit, a heat exchanger, a smoke pump, a system for controlling and monitoring the operation of the installation. The test results indicate that the use of pyrolysis equipment with the application of an ultrahigh frequency electromagnetic field allows increasing the intensity of post-combustion of the gas mixture by achieving higher temperatures in the post-combustion chamber, increasing the productivity of the coal production process by reducing the calcination time and improving the quality of the resulting coal due to the absence of sudden temperature changes in the reactor. Thus, the performance of the pyrolysis plant in the absence of an ultrahigh frequency electromagnetic field was 1.45 kg/h, and in the presence of an ultrahigh frequency electromagnetic field – 1.75 kg/h.

Keywords: coal production; wood pyrolysis; ultrahigh frequency electromagnetic field; agro-industrial waste

Introducere

În prezent, vectorul dezvoltării resurselor de energie regenerabilă într-un număr mare de țări, are ca scop creșterea generării de energie electrică și termică prin extinderea nișei de combustibil solid și implicarea diferitelor tipuri de combustibil regenerabil în circulație [1-6,14-17].

Unul dintre procesele eficiente de prelucrare termochimică a compușilor organici este piroliza. În același timp, unul dintre cele mai importante domenii de cercetare în domeniul pirolizei biomasei este studiul cineticii reacțiilor care determină cursul acestui proces [3-5].

Piroliza este un proces de prelucrare termochimică a compușilor organici care are loc la temperaturi ridicate fără participarea oxigenului. Cercetarea teoretică și aplicată în piroliza biomasei s-a dezvoltat cu succes în ultimele decenii în Marea Britanie, SUA, India și alte țări [4-7]. Acest domeniu de cercetare și dezvoltare prezintă un interes semnificativ pentru alte țări. Bioenergia începe să se dezvolte intens în contextul necesității de a atinge un anumit nivel de securitate energetică, iar scopul final al dezvoltării este crearea propriului ciclu de combustibil și energie pe tipuri regenerabile de biocombustibili, ținând cont de avantajele de mediu și economice ale acestei zone.

Există diferite moduri de a folosi biomasa ca sursă de energie. În primul rând, aceasta este arderea tradițională pentru obținerea energiei electrice și termice (lemn de foc, așchii de lemn, peleți, deșeuri municipale solide de origine vegetală); în al doilea rând, fermentarea anaerobă a plantelor agricole (porumb și altele), a deșeurilor agricole, precum și a deșeurilor de animale și păsări de curte; în al treilea rând, obținerea combustibilului pentru motor (biodiesel) din semințele plantelor agricole (rapită). Aceste tehnologii au fost dezvoltate de mult timp și s-au răspândit.

Prelucrarea biomasei uscate (cu conținut de umiditate de până la 15%) este posibilă folosind tehnologii termochimice (gazeificare, piroliză). Astfel de procese au rate de conversie ridicate, sensibilitate scăzută la compoziția materiei prime, dar necesită temperaturi ridicate și se caracterizează printr-o selectivitate scăzută [8-11].

Costurile energetice pentru asigurarea procesului termochimic nu depășesc de obicei 5% din căldura de ardere a produselor energetice rezultate. Un astfel de nivel ridicat de eficiență energetică a ciclului de producție nu poate fi asigurat de tehnologia biogazului, în care costurile energetice pentru menținerea procesului biochimic pot ajunge la 70% din căldura de ardere a biogazului produs [15-18].

Dintre tehnologiile moderne de utilizare energetică a biomasei vegetale, cea mai universală, eficientă și ieftină, potrivit experților de la Agenția Internațională pentru Energie (IEA), este conversia termochimică prin piroliză [9-12].

Ca urmare a pirolizei, se formează gaz combustibil, produse lichide de înaltă energie și cărbune. Cantitatea de produse ale transformărilor termochimice depinde în primul rând de temperatura și timpul procesului, de viteza de încălzire și de parametrii mediului gazos. În plus, compoziția și proprietățile produselor de piroliză sunt afectate de tipul și calitatea lemnului, de dimensiunea particulelor de materie primă și de conținutul său inițial de umiditate, de viteza de circulație a fluxului de gaz prin stratul de lemn și de alți factori [11-14].

Astăzi, cărbunele este cel mai popular produs țintă al pirolizei lemnului. Cărbunele este un produs solid poros al pirolizei biomasei vegetale (descompunere termică fără acces la oxigen), care se formează împreună cu produse lichide (rășini) și gaze combustibile. Cărbunele este folosit ca combustibil solid regenerabil de înaltă calitate (căldura de ardere 30-35 MJ/kg), precum și în industrie, de exemplu, în producția de siliciu tehnic. În prezent, utilizarea cărbunelui în producția de adsorbanti de carbon este în expansiune, care sunt utilizați în diverse tehnologii de purificare și separare prin adsorbție [13-18].

Această lucrare descrie echipamente experimentale pentru obținerea cărbunelui. O caracteristică specială a acestui echipament este implementarea procesului de conversie termică a materiilor prime lemnoase într-o cameră de piroliză echipată cu surse de creare a unui câmp electromagnetic de frecvență ultra-înaltă (UHF).

Metodologia cercetării

Pentru realizarea experimentelor a fost utilizată instalația de piroliză pentru obținerea cărbunelui, care permite îndeplinirea procesului de conversie termică a lemnului cu moduri de generare a microundelor activate. Schema structurală a instalației elaborate și aplicate în practică este prezentată în figura 1.

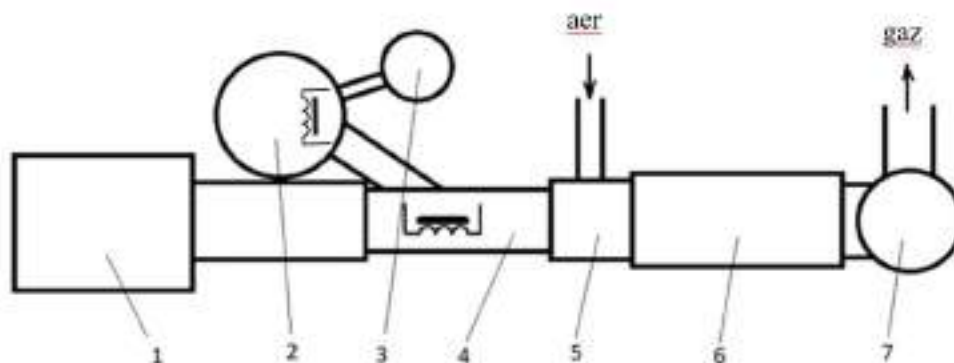


Figura 1. Schema funcțională a instalației aplicate la realizarea experimentelor:

- 1 – unitate de producere a gazului, 2 – unitate de piroliză, 3 – sistem de purjare a camerei de piroliză, 4 – cameră de post-ardere, 5 – unitate de control al temperaturii de ardere, 6 – schimbător de căldură, 7 – evacuare fum.

Sistemul de purjare a camerei de piroliză cu gaz inert include un cilindru cu gaz inert (CO_2), un regulator de debit de gaz, un colector de gaz și o supapă. Purjarea permite evacuarea rapid reziduurilor combustibile ale gazului de piroliză din camera reactorului, ceea ce face posibilă încărcarea unui nou lot de material pirolizat fără a aștepta ca camera reactorului să se răcească complet. Acest lucru reduce timpul de piroliză al următoarelor probe cu circa 40 de minute, datorită timpului economisit la încălzirea camerei reactorului de piroliză.

Rezultate

Începutul etapei endotermice a pirolizei lemnului în unitatea de piroliză are loc cu absorbția de căldură, o scădere a creșterii temperaturii în camera de lucru a unității de piroliză și absența unei arderi pronunțate în camera de post-ardere. Gazele de ardere sunt albe. Începutul etapei exoterme are loc odată cu eliberarea de căldură - se observă o creștere a temperaturii în camera de lucru a unității de piroliză și se eliberează o cantitate mare de gaze de piroliză combustibile. În camera de ardere se observă ardere intensă, iar din coș apar gaze de ardere gri. Sfârșitul procesului de piroliză este însoțit de absența arderii pronunțate

în camera de post-ardere și absența gazelor de ardere care ies din coș. După terminarea procesului de piroliză, se efectuează calcinarea (temperatura și durata sunt determinate de operator folosind sistemul de control și monitorizare pentru unitatea de piroliză). După calcinare, elementele de încălzire și magnetronii unității de piroliză sunt oprite și alimentarea cu gaz inert (CO_2) este pornită pentru a îndepărta gazele combustibile din camera de lucru a unității de piroliză (durata de suflare este de 15 minute) și pentru a răci în continuare cărbunele finit și pentru a-l stabiliza. În același timp, ventilatoarele evacuatorului de fum și sistemul de răcire al camerei de ardere a unității de control al temperaturii produselor de ardere sunt oprite. După răcirea completă, retorta cu cărbunele obținut este scoasă din camera reactorului și cântărită (Fig. 2).



Figura 2. Cărbune obținut

Obiectivul principal al cercetării efectuate a fost acela de a determina posibilitatea utilizării unui câmp electromagnetic cu microunde pentru obținerea cărbunelui și efectul acestuia asupra parametrilor tehnologici ai procesului. Prin urmare, atenția principală a fost acordată unei analize comparative a proceselor de piroliză a lemnului pentru obținerea cărbunelui în absența și prezența microundelor. În această serie de experimente, un amestec propan-butan a fost folosit ca gaz generator. Temperatura de ardere a amestecului propan-butan este constantă, ceea ce vă permite să creați puncte de referință stabile pentru determinarea contribuției gazului de piroliză la temperatura totală de ardere a amestecului propan-butan și a gazului de piroliză. Utilizarea temperaturii de ardere a propanului ca puncte de referință vă permite să identificați destul de precis chiar și schimbările mici de temperatură în timpul arderii unui amestec de gaz generator și gaz de piroliză. De asemenea, este necesar să se țină cont de faptul că în stadiul inițial al pirolizei, randamentul de produse gazoase inflamabile este încă prea mic pentru a susține arderea independentă, în stadiul final al pirolizei, randamentul de produse gazoase inflamabile este deja prea mic pentru a susține arderea independentă. Prin urmare, o torță constantă cu foc de propan vă permite să ardeți cele mai mici cantități de gaz de piroliză și să asigurați nivelul corespunzător de siguranță a mediului.

La efectuarea acestei analize comparative în experimente în prezența microundelor, a fost efectuată o întârziere de zece minute în pornirea magnetronilor și a elementelor de încălzire. O astfel de întârziere în etapa inițială a experimentului vă permite să evitați graficele de temperatură „suprapuse” și să efectuați o analiză comparativă mai detaliată a pirolizei lemnului pentru a obține cărbune în absența și prezența microundelor.

Discuții

În prezența microundelor, etapa inițială a pirolizei este caracterizată prin absența unor schimbări bruște ale creșterii și scăderii temperaturii, deoarece microundele contribuie la trecerea simultană a tuturor proceselor din etapa endotermă a pirolizei, care uniformizează graficul temperaturii. În același timp, în timpul funcționării unității de piroliză în stadiul exotermic, temperatura de ardere în camera de post-ardere a atins 1000°C , ceea ce contribuie la arderea ulterioară eficientă a amestecului de gaze. Timpul etapei exoterme cu microunde este mai mic decât cel al aceleiași etape fără microunde. Etapa de întărire este însoțită și de o scădere mai rapidă a temperaturii.

Aceste date indică în mod clar o rată mai mare de piroliză a lemnului și o temperatură mai mare de post-ardere a amestecului de gaze în prezența microundelor.

În timpul studiilor, s-au obținut probe de cărbune cu dispozitivele pentru crearea unui câmp electromagnetic de frecvență ultra-înaltă pornite și oprite. Masa probelor de lemn utilizate a fost de 31,2 kg (în absența cuptorului cu microunde) și de 31,3 kg (în prezența cuptorului cu microunde). Randamentul relativ în masă al cărbunelui în absența cuptorului cu microunde a fost de aproximativ 23% (masa cărbunelui a fost de 7,2 kg). În prezența microundelor, randamentul relativ în masă a fost de 25% (masa cărbunelui a fost de 7,9 kg). În același timp, timpul de proces în prezența microundelor a fost cu 10,5% mai mic decât în absența microundelor. În consecință, productivitatea instalației de piroliză în absența microundelor a fost de 1,45 kg/h, iar în prezența microundelor - 1,75 kg/h.

Concluzii

Rezultatele obținute arată că utilizarea unui câmp electromagnetic de ultra-înaltă frecvență permite creșterea productivității procesului de producere a cărbunelui și îmbunătățirea calității cărbunelui rezultat. Prin urmare, dezvoltarea de echipamente pentru producția industrială de cărbune din reziuri agroindustriale lemnoase poate fi realizată în baza aplicării microundelor, care constituie o soluție viabilă pentru sectorul energetic.

Bibliografie:

1. Raiza Manrique, Evan Terrell, Pavlo Kostetskyy, Farid Chejne, Mariefel Olarte, Linda Broadbelt, Manuel García-Pérez. Elucidating Biomass-Derived Pyrolytic Lignin Structures from Demethylation Reactions through Density Functional Theory Calculations. *Energy & Fuels*, 37(7), 2023. 5189-5205 p.
2. Eliezer A. Reyes Molina, Ravi Soneja, Maria Herrera Diaz, David C. Tilotta, Stephen S. Kelley. At-Line Sampling and Characterization of Pyrolytic Vapors from Biomass Feedstock Blends Using SPME-GC/MS-PCA: Influence of Char on Fast Pyrolysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(49), 2022. 15509-15516 p.
3. Benjamin Caudle, Victor D. Brandão, Maximilian B. Gorenssek, Chau-Chyun Chen. Process Model-Based Validation of the Intensification of Biomass Fast Pyrolysis in a Fluidized Bed via Autothermal Operation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(48), 2022. 15926-15938 p. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05260>
4. Haftom Weldekidan, Amar K. Mohanty, Manjusri Misra. Upcycling of Plastic Wastes and Biomass for Sustainable Graphitic Carbon Production: A Critical Review. *ACS Environmental Au*, 2(6), 2022. 510-522 p.
5. Md. Maksudur Rahman, Yun Yu, Hongwei Wu. Valorisation of Waste Tyre via Pyrolysis: Advances and Perspectives. *Energy & Fuels*, 36(20), 2022. 12429-12474 p.
6. Popescu V., Malai L., Balan M. et.al. Instalație robustă pentru întreprinderile din sectorul agrar. *Materialele Simpozionului Internațional Științifico-Practic „Reglementarea utilizării resurselor naturale: realizări și perspective” FCD, UASM, Chișinău*, 2021. 423-426 p. ISBN 978-9975-64-328-3.
7. Fan Lin, Mengze Xu, Karthikeyan K. Ramasamy, Zhenglong Li, Jordan Lee Klinger, Joshua A. Schaidle, Huamin Wang. Catalyst Deactivation and Its Mitigation during Catalytic Conversions of Biomass. *ACS Catalysis*, 12(21), 2022. 13555-13599 p.
8. Anastasiya Y. Yadykova, Saba Shariati, Elham H. Fini, Sergey O. Ilyin. Novel Bio-Nanocomposite for Asphalt Pavements: Montmorillonite Intercalated with Castor Oil. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(35), 2024. 13062-13079 p. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c01181>
9. George Kofi Parku, Santosh Reddy Pulicanti, Axel Funke, Nicolaus Dahmen. Phase Equilibria Aided Optimization of Levoglucosan Extraction during Condensation of Fast Pyrolysis Bio-Oils. *Energy & Fuels*, 38 (15), 2024. 14343-14350 p. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c01097>
10. Popescu V., Racul A., Bodarev G. Reliability index evaluation of electrical distribution systems. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6(4), 2015. 4229-4232 p. ISSN 2319-8753.
11. Nikolas Hagemann, Kurt Spokas, Hans-Peter Schmidt, Ralf Kägi, Marc Anton Böhler and Thomas D. Bucheli. Activated Carbon, Biochar and Charcoal: Linkages and Synergies across Pyrogenic Carbon's ABCs. *Water*, 10, 2018. 182 p. doi:10.3390/w10020182.

12. Mahmoud I. Awad, Yassir Makkawi, Noha M. Hassan. Yield and Energy Modeling for Biochar and Bio-Oil Using Pyrolysis Temperature and Biomass Constituents. *ACS Omega*, 9(16), 2024. 18654-18667 p. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01646>
13. Carmen Branca, Colomba Di Blasi. Demineralization Pretreatments for Reducing Biomass Variability in Pyrolysis. *ACS Omega*, 9(8), 2024. 9536-9546 p.
14. Ramesh Kumar Chowdari, Parameswaram Ganji, Blaž Likozar. Solvent-Free Catalytic Hydrotreatment of Lignin to Biobased Aromatics: Current Trends, Industrial Approach, and Future Perspectives. *Energy & Fuels*, 39(6), 2025. 2943-2985 p.
15. Xian Pan, Shiliang Wu, Jiahui Chen, Xin Zhou, Xinying Chen, Zhiqiang Xin, Peilin Ding, Rui Xiao. Toward Efficient Biofuel Production: A Review of Online Upgrading Methods for Biomass Pyrolysis. *Energy & Fuels*, 38(20), 2024. 19414-19441 p.
16. Shasha Zheng, Zhenlei Zhang, Songbo He, Huaizhou Yang, Hanan Atia, Ali M. Abdel-Mageed, Sebastian Wohlrab, Eszter Baráth, Sergey Tin, Hero J. Heeres, Peter J. Deuss, Johannes G. de Vries. Benzenoid Aromatics from Renewable Resources. *Chemical Reviews*, 124(19), 2024. 10701-10876 p.
17. Saima Zafar, Aswathi Cherakkara, Izan Izwan Misnon, Chun-Chen Yang, Rajan Jose. Graphene-Like Materials from Biomass Using Deep Eutectic Solvents: A Review. *ACS Sustainable Resource Management*, 1(9), 2024. 2047-2073 p.
18. Wladimir Ruiz, German Gascon, Ryan P. Rodgers, David C. Dayton, Caroline Barrère-Mangote, Pierre Giusti, Brice Bouyssiere, Martha L. Chacón-Patiño. Ultrasound-Assisted Sequential Extraction for Lignocellulose Pyrolysis Bio-oil Fractionation. Part II: Comparative Application. *Energy & Fuels*, 38(18), 2024. 17697-17705 p.