

Increasing the Efficiency of the Charcoal Production Process through the Pyrolysis of Woody Agricultural Waste with the Application of Microwaves

¹Popescu V.S., ²Golubev V.P., ²Degterov D.V., ²Vasilevich S.V., ³Asadchyi A.N.,
²Shevchik N.E.

¹Technical University of Moldova
Kishinau, Republic of Moldova

²Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

³Belarusian State Aviation Academy
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The purpose of the work is to increase the efficiency of the charcoal production process by pyrolysis of woody agricultural waste with the application of microwaves. To achieve the goal, an experimental installation was developed, which allows the application of the pyrolysis method with the application of microwaves in the charcoal production process from wood. The research was focused on the example of pyrolysis of woody agricultural waste, but in particular, fruit waste from apple orchards was selected as the main object of the research. These agricultural wastes were specifically researched, because at the moment they have a fairly large share and are not efficiently utilized, and so far no one has studied the possibilities of processing them by pyrolysis and obtaining charcoal from these fruit wastes. The main results obtained with the application of the developed installation are increasing the efficiency of the coal production process by pyrolysis of woody agricultural waste based on the application of the microwaves tartarization method, increasing the speed of the process and, respectively, reducing the processing time and improving the quality of the resulting coal. Thus, the pyrolysis plant with the application of microwaves demonstrated an increase in productivity per unit of time and a high yield of charcoal production from the processed raw material. The significance of these results lies in solving some essential problems in the field with a contribution to the development of the energy sector through the efficient utilization of woody agricultural waste.

Keywords: wood charcoal, pyrolysis plant, woody agricultural waste, microwaves treatment, efficiency, fuel, productivity.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.04>

UDC: 662.71

Sporirea eficienței procesului de producere a cărbunelui prin piroliza deșeurilor agricole lemnoase cu aplicarea microundelor

¹Popescu V.S., ²Golubev V.P., ²Degterov D.V., ²Vasilevici S.V., ³Asadchyi A.N., ²Şevchik N.E.

¹ Universitatea Tehnică a Moldovei
Chişinău, Republica Moldova

²Institutul de Energetică al Academiei Naţionale de Ştiinţe din Belarus,
Minsk, Republica Belarus

³Academia de Aviaţie de Stat din Belarus
Minsk, Republica Belarus

Rezumat. Scopul lucrării constă în sporirea eficienței procesului de producere a cărbunelui de lemn prin piroliza deșeurilor agricole lemnoase cu aplicarea microundelor (MU). Pentru atingerea scopului propus a fost elaborată o instalație experimentală, care permite aplicarea în procesul de producere a cărbunelui de lemn anume metoda de piroliză sub influența microundelor. Cercetările realizate au fost axate pe exemplul pirolizei deșeurilor agricole lemnoase, însă în mod special, în calitate de obiect principal al cercetărilor au fost selectate deșeurile pomicele colectate din livezile de măr. Au fost cercetate anume aceste deșeuri agricole, deoarece la moment ele au o pondere destul de mare și nu sunt valorificate eficient, iar până în prezent nimeni nu a studiat posibilitățile de prelucrare prin piroliză a lor și de obținere a cărbunelui din reziduurile respective. Rezultatele principale obținute cu aplicarea instalației elaborate sunt sporirea eficienței procesului de producere a cărbunelui prin piroliza deșeurilor agricole lemnoase în baza aplicării metodei de tartare cu MU, cu creșterea vitezei procesului și respectiv cu reducerea duratei de prelucrare. Rezultatele experimentelor indică faptul că utilizarea metodei de

piroliză cu microunde permite creșterea intensității procesului și îmbunătățirea calității cărbunelui rezultat datorită evitării schimbărilor bruște de temperatură în reactor. Astfel, instalația de piroliză cu aplicarea microundelor a demonstrat o creștere a productivității pe unitate de timp și un randament ridicat de producere a cărbunelui din materia primă prelucrată. Semnificația acestor rezultate constă în soluționarea unor probleme esențiale din domeniu cu o contribuție la dezvoltarea sectorului energetic, prin valorificarea eficientă a deșeurilor agricole lemnoase.

Cuvinte-cheie: cărbune din lemn, instalație de piroliză, deșeuri agricole lemnoase, tratarea cu MU, eficiență, combustibil, productivitate.

Повышение эффективности процесса получения угля путем пиролиза древесных сельскохозяйственных отходов с применением СВЧ

¹Попеску В.С., ²Голубев В.П., ²Дегтерев Д.В., ²Василевич С.В., ³Асадчий А.Н., ²Шевчик Н.Е.

¹Технический университет Молдовы

Кишинев, Республика Молдова

²Институт Энергетики Национальной Академии Наук Беларуси,

Минск, Республика Беларусь

³Белорусская Государственная Авиационная Академия

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Целью работы является повышение эффективности процесса производства древесного угля путем пиролиза древесных отходов сельскохозяйственного производства с применением СВЧ. Для достижения поставленной цели была разработана экспериментальная установка, позволяющая использовать метод пиролиза с применением микроволн в процессе производства древесного угля. Проведенные исследования были сосредоточены на примере пиролизной переработки древесных отходов сельского хозяйства, но в качестве основного объекта исследования были выбраны именно древесные отходы яблоневых садов. Эти отходы сельского хозяйства были специально исследованы, так как на данный момент они имеют достаточно большой объем и не утилизируются эффективно, а возможности их переработки методом пиролиза и получения древесного угля из этих отходов плодородства пока никто не изучал. На сегодняшний день проведены лишь отдельные исследования по анаэробной ферментации веток и получению биогаза, а также изучены возможности производства пеллет и брикетов из этих отходов. Основными результатами, полученными при использовании разработанной установки, являются повышение эффективности процесса производства древесного угля пиролизом древесных отходов сельскохозяйственного производства на основе применения метода СВЧ, увеличение скорости процесса и, соответственно, сокращение времени переработки. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что использование метода микроволнового пиролиза позволяет повысить интенсивность процесса за счет достижения более высоких температур и увеличить производительность за счет сокращения времени прокали, а также улучшить качество получаемого угля за счет отсутствия резких перепадов температуры в реакторе. Таким образом, пиролизная установка с применением микроволн продемонстрировала увеличение производительности и высокий выход древесного угля из переработанного сырья. Значимость полученных результатов заключается в решении важных проблем в данной области и содействии развитию энергетического сектора за счет эффективной утилизации древесных отходов сельского хозяйства.

Ключевые слова: древесный уголь, пиролизная установка, древесные сельскохозяйственные отходы, СВЧ-обработка, эффективность, топливо, производительность.

Introducere

Actualmente, creșterea prețurilor la toate resursele energetice impune eficientizarea de urgență a tuturor proceselor din sectorul agroindustrial, îndeosebi a celor de valorificare a deșeurilor din acest sector și utilizarea lor în scopuri energetice.

Studiile realizate până în prezent, au confirmat că modernizarea tehnologiilor și instalațiilor din toate domeniile, tot timpul a fost în vizorul cercetătorilor, iar problemele principale de interes stringent au fost mereu

creșterea productivității, a eficienței energetice și a calității produselor finite [1-3, 7-9].

Pînă în prezent, deșeurile din sectorul agroindustrial au găsit aplicare în multe ramuri, inclusiv fiind utilizate și în scopuri energetice. Însă, trebuie de remarcat că în scopuri energetice au fost utilizate fiind arse în calitate de combustibil fără prelucrare specială.

Totodată, trebuie de menționat că pînă la moment, au fost realizate doar numai unele studii cu privire la fermentarea anaerobă a ramurilor și obținerea biogazului și au fost cercetate posibilitățile de producere a peleților și brichetelor din aceste deșeuri. Au mai fost efectuate cercetări privind fermentare aerobă și

obținerea alcoolilor utilizați ulterior ca combustibili. Însă, nimeni pînă la acest moment nu a cercetat posibilitățile de utilizare a acestor deșeuri pentru piroliză și producerea cărbunelui.

Astfel, de multiple ori s-a evidențiat faptul că în mare parte, efortul cercetătorilor este axat nemijlocit pe exploatarea deșeurilor în diferite scopuri și dezvoltarea unei economii non reziduri, fapt ce urmărește soluționarea problemelor sus menționate [4-6, 10-12, 15-19].

Mai mult decât atât, actualmente se accentuează o tendință de utilizare a tehnologiilor inovative, îndeosebi în sectoarele cu probleme stringente, ca în cazul utilizării deșeurilor [13-16, 19-21, 23-29].

În prezent, vectorul dezvoltării cercetării resurselor energetice are ca scop creșterea generării de energie prin extinderea nișei de combustibil [5-7].

Unul dintre procesele eficiente de prelucrare termochimică a compușilor organici cum sunt deșeurile agricole lemnoase este piroliza. În același timp, unul dintre cele mai importante domenii de cercetare în domeniul pirolizei biomasei agricole este sporirea eficienței prin diverse metode, care determină cursul acestui proces [17-22, 29-34, 50].

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 mai multe țări avansate. Acest domeniu de cercetare și dezvoltare prezintă un interes semnificativ la momentul actual. 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 unui ciclu de combustibili și energie, ținând cont de avantajele de mediu și economice ale sectorului [35-40].

Livezile sunt una dintre principalele resurse naturale regenerabile, dar trebuie să fie exploatate corect ca și pădurile și alte resurse naturale. Aceste estimări iau în considerare lemnul non-construcții, deșeurile agricole organice, fitomasa de pomi, arbuști și ierburi cu creștere rapidă [45-50].

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 solide de origine vegetală); în al doilea rând, fermentarea anaerobă 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 (rapiță). Aceste tehnologii au fost dezvoltate de mult timp și s-au răspândit [21-25, 39-44].

Prelucrarea biomasei uscate (cu conținut de umiditate de până la 15%) este posibilă folosind tehnologii termochimice (gazificare, 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 relativ scăzută [15-19, 43-48].

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 biotermochimic pot ajunge la 70% din căldura de ardere a biogazului produs [47-50].

Dintre tehnologiile moderne de utilizare energetică a biomasei vegetale, cea mai universală, eficientă și ieftină, potrivit ultimelor tendințe, este conversia termochimică prin piroliză [25-28, 37-40, 42-50].

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 [30-36, 41-48].

În plus, compoziția și proprietățile produselor de piroliză sunt afectate de tipul și calitatea materiei, de dimensiunea particulelor de materie primă și de conținutul său inițial de umiditate, de viteza de circulație a fluxului de gaz prin stratul de substanță și de alți factori, cum ar fi în cazul dat microundele [3-8, 22-26].

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 absorbant de carbon este în expansiune, care sunt utilizați în diverse

tehnologii moderne de purificare și separare prin adsorbție [24-26, 44-49].

Această lucrare prezintă echipamentele experimentale create pentru obținerea cărbunelui prin piroliza deșeurilor agricole lemnoase. O caracteristică specială a acestui echipament este implementarea procesului de conversie termică a materiilor prime lemnoase într-o cameră de piroliză, care este suplinită cu o sursă de creare a unui câmp electromagnetic de frecvență ultra-înaltă (MU).

Obiectivul general al cercetărilor este sporirea eficienței procesului de producere a cărbunelui prin piroliza deșeurilor agricole lemnoase cu aplicarea SHF. Pentru atingerea acestui obiectiv a fost elaborată instalația experimentală, care permite aplicarea în procesul de producere a cărbunelui din lemn anume metoda de piroliză cu aplicarea microundelor.

Cercetările realizate au fost axate pe exemplul pirolizei diferitor deșeuri agricole lemnoase, însă în mod special, în calitate de obiect principal al cercetărilor au fost selectate deșeurile pomicole provenite din plantațiile de livezi de măr.

Au fost cercetate anume aceste deșeuri agricole, deoarece la moment ele au o pondere destul de mare și nu sunt valorificate eficient, iar pînă în prezent nimeni nu a studiat posibilitățile

de prelucrare prin piroliză a lor și de obținere a cărbunelui din aceste deșeuri pomicole.

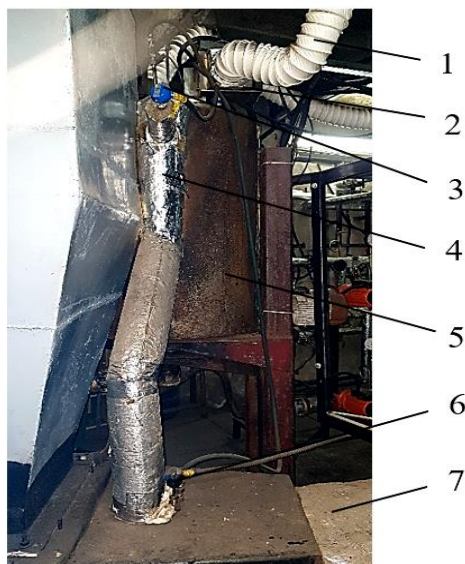
Rezultatele principale obținute cu aplicarea instalației elaborate sunt sporirea eficienței procesului de producere a cărbunelui prin piroliza deșeurilor agricole lemnoase în baza aplicării metodei de tartare cu SHF, cu creșterea vitezei procesului și respectiv cu reducerea duratei de prelucrare.

Experimentele realizate indică faptul că utilizarea metodei de piroliză cu microunde permite creșterea intensității procesului și îmbunătățirea calității cărbunelui rezultat datorită absenței schimbărilor bruște de temperatură în reactor.

Astfel, productivitatea instalației de piroliză cu aplicarea microundelor a demonstrat respectiv o creștere esențială, totodată confirmînd și o rată mai înaltă a cărbunelui produs din materia primă utilizată.

Semnificația rezultatelor obținute în cercetare constă în soluționarea unor probleme esențiale din domeniu cu o contribuție la dezvoltarea sectorului energetic prin valorificarea eficientă a deșeurilor agricole lemnoase și utilizarea în calitate de combustibil calitativ, cu spectru de aplicare largă.

MATERIALE ȘI METODE



1 – conductă de alimentare cu aer; 2 – sursa SHF; 3 – traductor pentru controlul temperaturii la ieșirea din reactor; 4 – colector; 5 – reactor; 6 – termocuplu, 7 – camera de post-ardere.

Figura 1. Instalația experimentală elaborată pentru realizarea cercetărilor.

1 – air supply pipe; 2 – SHF source; 3 – transducer for controlling the temperature at the reactor outlet; 4 – collector; 5 – reactor; 6 – thermocouple, 7 – afterburner chamber.

Figure 1. Experimental installation developed for conducting research.

Instalația experimentală care a fost elaborată pentru realizarea cercetărilor asupra procesului de obținere a cărbunelui prin piroliză cu aplicarea microundelor la prelucrare, este prezentată în Figura 1.

În baza acestei instalații a fost estimată eficiența procesului de aplicare a microundelor, iar rezultatele au fost comparate cu cele obținute prin metoda clasică de prelucrare (fără aplicarea tratamentului cu microunde).

Camera de post-ardere reprezintă o cutie metalică din oțel inoxidabil rezistent la căldură și rezistent la agresiune chimică, cu perete dublu, asigurând arderea uniformă a amestecului de gaz cu răcirea sa eficientă.

Temperaturile de ardere în camera de post-ardere pot ajunge la 1300° C, ceea ce asigură purificarea eficientă a amestecului de gaze din compușii cu moleculă mare (rășini).

Sistemul de control și dirijare pentru funcționarea instalației de piroliză include traductoarele, dispozitivele de comandă, conexiunile electrice la toate elementele unității, ridicarea/coborârea platformei de încărcare, dirijarea ventilatoarelor sistemului de alimentare cu aer și răcire, evacuarea fumului, pornirea elementelor de încălzire ale unității de piroliză (reactorul), pornirea generatorului SHF, monitorizarea parametrilor procesului, conexiunea cu calculatorul, etc.

Emisia gazelor de ardere în atmosferă, trecând prin schimbătorul de căldură recuperator al sistemului de încălzire al apei din proces a sistemului de încălzire, este realizată de un aspirator de fum cu coș.

Controlul și dirijarea funcționării sistemului de piroliză, cu monitorizarea parametrilor procesului, se efectuează de la calculator, după cum e prezentat în Figura 2.



Figura 2. Controlul computerizat al parametrilor procesului de piroliză.

Figure 2. Computerized control of pyrolysis process parameters.

Vizualizarea parametrilor principali de funcționare ai instalației în mod digital cât și grafic este realizată folosind un soft special elaborat și adaptat pentru PC, care asigură atât înregistrarea parametrilor, cât și trasarea principalelor caracteristici ale procesului de piroliză și producere a cărbunelui.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

În timpul efectuării experimentelor privind testarea deșeurilor agricole examinate, cercetările realizate au fost axate pe exemplul pirolizei diferitor probe de reziduri lemnoase pomicole, iar în mod special, în calitate de obiect principal al cercetărilor în cauză au fost selectate deșeurile lemnoase uscate, colectate din livezile de măr.

În cazul dat, au fost selectate pentru a fi cercetate anume aceste probe de deșeuri agricole, deoarece la moment ele au o pondere destul de mare și fiind o masă de lemn tare care nu este valorificată eficient, deaceia necesită de studiat amănunțit posibilitățile de prelucrare prin

piroliză și de obținere a cărbunelui de lemn din aceste deșeuri pomicole.

Obiectivul principal urmărit al cercetărilor realizate a fost sporirea eficienței procesului de producere a cărbunelui prin piroliza deșeurilor examinate cu aplicarea SHF.

Înainte de testare, s-a determinat conținutul de umiditate a lemnului pomicol supus examinării și s-a cântărit controlând retorta goală și încărcată.

Conținutul de umiditate a masei lemnoase din probele colectate și supuse prelucrării a fost în mediu de 12,20%. Densitatea lemnului studiat a fost de 589,20 kg/m³, iar conținutul de cenușă a fost de 0,23%.

După cântărire, retorta a fost instalată pe platforma de încărcare a unității de piroliză.

Platforma are un mecanism de antrenare care asigură rotirea retortei în jurul axei sale verticale. Apoi platforma cu retorta instalată a fost ridicată în camera de lucru a reactorului.

Ridicarea retortei în camera unității de piroliză este controlată automat de sistemul de control și monitorizare a funcționării instalației.

La etapa inițială a ridicării platformei, mecanismul de ridicare funcționează la viteză maximă pentru a reduce timpul de pregătire al sistemului de piroliză pentru funcționare.

La etapa finală a ridicării, mecanismul de ridicare funcționează la viteză minimă pentru a asigura cea mai ermetică presare a platformei.

Trecerea de la viteza maximă la cea minimă de încărcare se realizează automat. De asemenea, mecanismul de ridicare se oprește automat când platforma atinge punctul de ridicare superior.

Figura 3 prezintă procesul de încărcare a retortei în camera reactorului.



Figura 3. Procesul de încărcare a retortei cu proba de masă lemnoasă în camera reactorului.

Figure 3. The process of loading the retort with the wood sample into the reactor chamber.

Pentru compararea rezultatelor privind eficiența aplicării metodei propuse și atingerea scopului cercetărilor, instalația experimentală elaborată și utilizată, permite aplicarea în procesul de producere a cărbunelui din lemn atât metoda de piroliză cu aplicarea microundelor, cât și metoda clasică de prelucrare – fără tratament cu microunde.

După încărcarea materiilor prime, sunt pornite elementele sistemului de piroliză, iar în cazul aplicării metodei propuse se activează inclusiv și generatorul SHF.

Pe tot parcursul ciclului de piroliză, controlul parametrilor de funcționare se realizează pe PC.

Începutul etapei endotermice a pirolizei probei lemnoase are loc cu absorbția de căldură, cu o scădere a creșterii temperaturii în camera de

lucru a unității de piroliză și absența unei arderi pronunțate în camera de post-ardere.

S-a observat că gazele de ardere sunt albe. Începutul etapei exotermice are loc odată cu eliberarea de căldură și 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 o 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 coșul de evacuare.

După terminarea procesului de piroliză, se efectuează calcinarea (temperatura și durata sunt determinate folosind sistemul de control și monitorizare pentru unitatea de piroliză).

După calcinare, elementele de încălzire și generatorul MU 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.

Trebuie de menționat că, 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.

În Figura 4, pentru exemplificare se prezintă ca fiind selectată în mod arbitrat o probă de cărbune obținut din deșeurile lemnoase examinate, de proveniență agropomicolă colectate din livadă.



Figura 4. Probă de cărbune obținut cu aplicarea instalației elaborate.

Figure 4. Sample of coal obtained with the application of the developed installation.

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 în posibilitatea de a susține arderea independentă.

Prin urmare, la efectuarea acestei analize comparative prin experimente în prezența microundelor, a fost efectuată o întârziere de zece minute pentru pornirea SHF și a elementelor de încălzire. O astfel de întârziere la etapa inițială a experimentului permite de a evita suprapunerea curbelor de temperatură și o analiză comparativă mai detaliată a pirolizei lemnului pentru a obține cărbune în absența și cu prezența microundelor.

În Figura 5 se indică dependența temperaturii de ardere în funcție de durata procesului de piroliză, în prezența și absența câmpului electromagnetic de microunde. Din analiza rezultatelor experimentale obținute reiese

că în stadiul inițial al pirolizei fără microunde, se observă o creștere viguroasă a temperaturii până la 420°C , apoi apare o scădere bruscă la 105°C și se atinge un mic platou. În acest caz, este logic să deducem că lemnul este uscat cu formarea unei cantități semnificative de vapori de apă, ceea ce reduce temperatura. După ce proba este uscată, temperatura crește brusc la niveluri de peste 500°C (interval de 24-51 de minute). Apoi, începe distrugerea termochimică a substanțelor cu legături chimice slabe și se eliberează produse gazoase (de exemplu, acid acetic). După care, nivelul temperaturii scade din nou, deoarece substanțele care susțin și nu susțin arderea (hidrocarburi ușoare, apă, oxizi de carbon, azot etc.) se formează ca urmare a transformărilor chimice. Odată cu debutul etapei exoterme de piroliză, temperatura crește la 800°C și rămâne în jurul acestui nivel cu o ușoară creștere la 870°C (197 minute). Etapa exotermă a pirolizei este finalizată și începe calcinarea. Această etapă se caracterizează printr-o scădere treptată, lină a temperaturii.

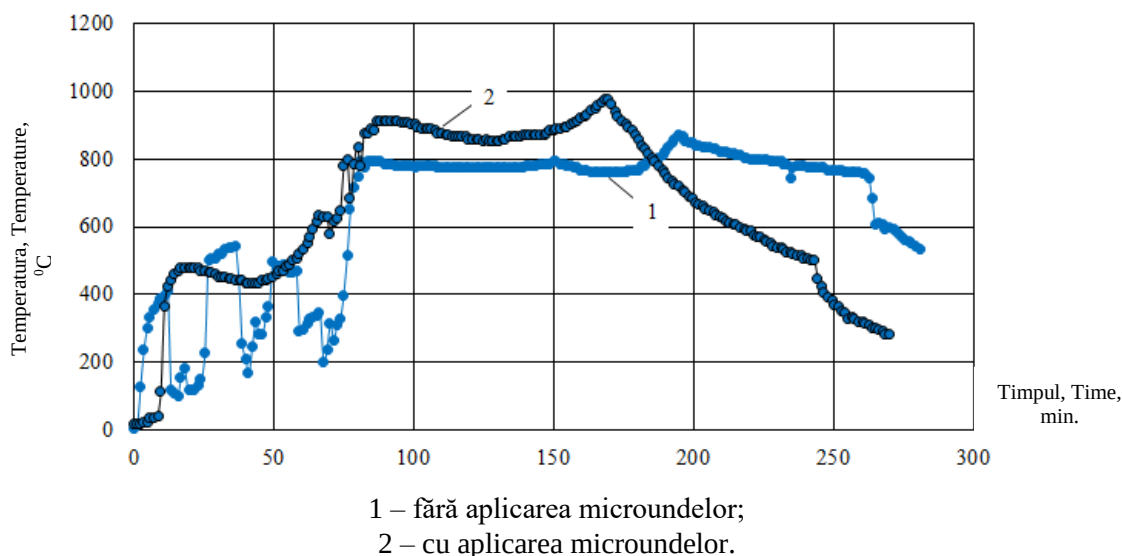


Figura 5. Variația temperaturii în dependență de durată procesului.

1 – without the application of microwaves;

2 – with the application of microwaves.

Figure 5. Temperature variation depending on the process duration.

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.

Totodată, 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.

Durata 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 multiple probe de cărbune cu sistemul pentru crearea unui câmp electromagnetic de frecvență ultra-înaltă (SHF) atât pornit și oprit.

Masa probelor de masă lemnoasă utilizate ca materie primă a fost în mediu de 30,10 kg (în mod similar, atât la metoda fără microunde, cât și la metoda cu microunde).

Randamentul relativ în masă al cărbunelui fără aplicarea microundelor a fost de circa 23,68% (masa cărbunelui a fost de 7,13 kg). La aplicarea microundelor, randamentul relativ în

mediu a fost de 26,77% (masa cărbunelui a fost de 8,06 kg).

În același timp, durata procesului la aplicarea microundelor a fost cu circa 14,5% mai redusă decât în absența microundelor, pentru aceleași probe similare de masă lemnoasă utilizate.

Principalele caracteristici ale probelor de cărbune obținut sunt prezentate mai jos:

a) produs fără aplicarea microundelor:

- energia specifică de ardere – 30434,35 kJ/kg;

- conținutul de cenușă – 1,27%.

b) produs cu aplicarea microundelor:

- energia specifică de ardere – 32067,78 kJ/kg;

- conținutul de cenușă – mai puțin de 1,13%.

Trebuie de menționat că aceste caracteristici ale cărbunelui obținut din masa lemnoasă a deșeurilor agricole îndeplinesc cerințele pentru cărbunele de calitate.

În afară de aceasta, pe unitate de timp, productivitatea instalației de piroliză fără aplicarea microundelor a fost de 1,43 kg/h, iar cu aplicarea microundelor – 1,74 kg/h, demonstrând respectiv o creștere de 21,67%.

Totodată, instalația elaborată pe parcursul cercetărilor a demonstrat ușurință în utilizare și siguranță în funcționare, permițând și un control riguros al parametrilor procesului.

Rezultatele obținute arată că utilizarea unui câmp electromagnetic SHF permite creșterea productivității procesului de producere a cărbunelui și îmbunătățirea calității produsului rezultat. Prin urmare, dezvoltarea de echipamente pentru producția industrială de cărbune cu aplicarea microundelor este o necesitate viabilă și trebuie aplicată.

Cercetările realizate au demonstrat că masa lemnoasă obținută din deșeurile agricole colectate din plantațiile pomicole din livezile de măr are calități bune pentru a fi utilizată la producerea cărbunelui din lemn prin procesul de piroliză.

În Tabelul 1 se prezintă sinteza rezultatelor experimentale obținute privind aplicarea instalației elaborate.

Tabelul 1. Sinteza rezultatelor principale obținute privind aplicarea instalației elaborate.
Table 1. Summary of the results obtained regarding the application of the developed installation.

Num.	Parametrul determinat The determined parameter	Unitatea de măsură Unit of measurement	Metoda aplicată și valoarea stabilită a parametrului examinat Method applied and established value of the parameter examined	
			Fără aplicarea microundelor Without the application of microwaves	Cu aplicarea microundelor With the application of microwaves
1	Randamentul producerii cărbunelui Coal production efficiency	%	23,68	26,77
2	Energia specifică de ardere Specific combustion energy	kJ/kg	30434,35	32067,78
3	Conținutul de cenușă Ash content	%	1,27	1,13
4	Productivitatea pe unitate de timp Plant productivity	kg/h	1,43	1,74

Sinteza rezultatelor obținute arată că utilizarea câmpului electromagnetic SHF permite atât creșterea randamentului și productivității instalației, cât și îmbunătățirea calității cărbunelui obținut.

Reieșind din analiza rezultatelor cercetărilor efectuate, se poate de menționat că aplicarea microundelor a demonstrat că are o influență benefică asupra proceselor, sporind eficiența acestora.

CONCLUZII

Rezultatele obținute în baza cercetărilor efectuate au demonstrat că instalația elaborată pentru producerea cărbunelui pe exemplul pirolizei deșeurilor agricole lemnoase, permite sporirea eficienței procesului, preponderent cu

creșterea productivității procesului și a calității produsului finit.

Studiile au demonstrat că randamentul procesului de producere a cărbunelui din materia primă prelucrată, fără aplicarea microundelor a fost circa 23,68% din masa probei lemnoase inițiale, iar la aplicarea microundelor randamentul a fost de 26,77%. Totodată, durata procesului la aplicarea microundelor a fost cu 11,5% mai redusă decât în absența microundelor, pentru probe similare de materie primă inițială utilizată.

Analiza probelor de cărbune obținute a demonstrat și o îmbunătățire a cărbunelui rezultat, observându-se o diferență a probelor finale produse în baza celor 2 metode investigate:

- 1) fără aplicarea microundelor:
 - energia specifică de ardere – 30434,35 kJ/kg;
 - conținutul de cenușă – 1,27%.
- 2) cu aplicarea microundelor:
 - energia specifică de ardere – 32067,78 kJ/kg;
 - conținutul de cenușă – mai puțin de 1,13%.

Mai mult decât atât, pe unitate de timp productivitatea instalației de piroliză fără aplicarea microundelor a fost de 1,43 kg/h, iar cu aplicarea microundelor – 1,74 kg/h, demonstrând respectiv o creștere de 21,67%.

În afară de toate acestea, instalația de piroliză elaborată, pe parcursul cercetărilor a demonstrat ușurință în utilizare și siguranță în funcționare, oferind și posibilitatea unui control riguros al parametrilor procesului tehnologic cu monitorizarea computerizată a datelor.

BIBLIOGRAFIE (REFERENCES)

- [1] Esposito B., Sessa M., Sica D., Malandrino O. Towards Circular Economy in the Agri-Food Sector. *Sustainability*, 2020, vol. 12, nr. 18, pp. 95–107, doi: 10.3390/su12187401.
- [2] Lan Xu, Xin Ma, Priya Murria, Abhijit Talpade, Huaming Sheng, Richard Meilan, Clint Chapple, Rakesh Agrawal, W. Nicholas Delgass, Fabio H. Ribeiro, Hilkka I. Kenttämä. Fast Determination of the Lignin Monomer Compositions of Genetic Variants of Poplar via Fast Pyrolysis/Atmospheric Pressure Chemical Ionization Mass Spectrometry. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2021, 32 (10), 2546–2551.
- [3] Pagotto M., Halog A. Towards a Circular Economy in Australian Agri-food Industry. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, vol. 20, nr. 5, pp. 1176–1186, doi: 10.1111/jiec.12373.
- [4] Frederico Gomes Fonseca, Axel Funke. Modeling of Liquid–Vapor Phase Equilibria of Pyrolysis Bio-oils: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, 63 (31), 13401–13420. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00775>.
- [5] Paiva T., Ribeiro M., Coutinho P. Collaboration, Competitiveness Development, and Open Innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2020, vol. 6, nr. 4, pp. 416–424, doi: 10.3390/joitmc6040116.
- [6] Feng H., Tang J., Cavalieri R. Combined microwave and spouted bed drying of diced apples: Effect of drying conditions on drying kinetics and product temperature. *Drying Technology: An International Journal*, 1999, nr. 17, pp. 1981–1998.
- [7] Kaya A., Aydın O. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management*, 2010, nr. 50, pp. 118–124.
- [8] Ranjbaran M., Emadi B., Zare D. Simulation of Deep-Bed Paddy Drying Process and Performance. *Drying Technology*, 2014, vol. 32, pp. 919–934, doi: 10.1080/07373937.2013.875561.
- [9] Sharma Y., Mangla S., Patil p., Liu S., When challenges impede the process: For circular economy-driven sustainability practices in food supply chain. *Management Decision*, 2019, vol. 57, nr. 4, pp. 995–1017, doi: 10.1108/MD-09-2018-1056.
- [10] Liu S., Fukuoka M., Sakai N. A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating. *Journal of Food Engineering*, 2013, nr. 115, pp. 49–62.
- [11] Hazervazifeh A., Nikbakht A., Moghaddam P. Novel hybridized drying methods for processing of apple fruit: Energy conservation approach. *Energy*, 2016, nr. 103, pp. 679–687.
- [12] Chou S., Chua K. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, vol. 12, p. 359–369, Bucharest, doi: 10.1016/S0924-2244(01)00102-9.
- [13] Haseeb M., Zandi G., Hartani H., Pahi M., Nadeem S. Environmental Analysis of the Effect of Population Growth Rate on Supply Chain Performance and Economic Growth of Indonesia. *Ekoloji*, 2019, vol. 28, nr. 107, pp. 417–426.
- [14] Ozbek B., Dadali G. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 2007, nr. 83, pp. 541–549.
- [15] Kahyaoglu L., Sahin, S., Sumnu, G. Spouted bed and microwave-assisted spouted bed drying of parboiled wheat. *Food and Bioproducts Processing*, 2012, nr. 90, pp. 301–308.
- [16] Karaaslan S., Tunçer I. Development of a drying model for combined microwave–Fan-assisted convection drying of spinach. *Biosystems Engineering*, 2007, nr. 100, pp. 44–52.
- [17] Junmeng Cai, Md. Maksudur Rahman, Shukai Zhang, Manobendro Sarker, Xingguang Zhang, Yuqing Zhang, Xi Yu, Elham H. Fini. Review on Aging of Bio-Oil from Biomass Pyrolysis and Strategy to Slowing Aging. *Energy & Fuels*, 2021, 35 (15), 11665–11692.
- [18] Rui Bao, Shuzhong Wang, Jiaqi Feng, Yuanwang Duan, Kai Liu, Junan Zhao, Hui Liu, Jianqiao Yang. A Review of Hydrothermal Biomass Liquefaction: Operating Parameters, Reaction Mechanism, and Bio-Oil Yields and Compositions. *Energy & Fuels*, 2024, 38 (10), 8437–8459. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c00240>.
- [19] Li Z., Raghavan G., Wang N., Vigneault C. Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 2012, nr. 104, pp. 234–238.

- [20] Singh K. Development of a small capacity dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 1994, nr. 21, pp. 19–30.
- [21] Mohan D., Charles U. Pittman Jr., Philip H. Steele. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*, Vol 20/Issue 3.
- [22] Wennebro J., Vikström Th., Reinsdorf O., Wiinikka H. Influence of Feedstock Water Content on Renewable Carbon Black Production Through High-Temperature Pyrolysis of Upgraded Bio-Oils. *Energy & Fuels* 2025, 39 (16), 7805-7814.
- [23] Aparicio R. R., Goetten de Lima G., Perissutti G. E., Bassi M. de J., Jacumazo J., Schiavon M. A., Roman L. S., Bolzon de Muniz G. I., Magalhães W. L. E., Gonzalez de Cademartori P. H. Pyrolytic Lignin: A Promising Precursor for the Green Synthesis of Fluorescent Carbon Nanoparticles. *ACS Omega* 2025, 10 (11), 11054-11062.
- [24] Hwang J., Choi I.-H., Sung K., Im H., Hwang K.-R., Woo Han J. Unraveling the Influence of Water on the Catalytic Activity of Furfural-Acetone Aldol Condensation Over Metal Oxide Catalysts. *The Journal of Physical Chemistry C* 2025, 129 (10), 4964-4975.
- [25] Chowdari R. K., Ganji P., Likozar B.. Solvent-Free Catalytic Hydrotreatment of Lignin to Biobased Aromatics: Current Trends, Industrial Approach, and Future Perspectives. *Energy & Fuels* 2025, 39 (6), 2943-2985.
- [26] Pan X., Wu Sh., Chen J., Zhou X., Chen X., Xin Zh., Ding P., Xiao R. Toward Efficient Biofuel Production: A Review of Online Upgrading Methods for Biomass Pyrolysis. *Energy & Fuels*, 2024, 38 (20), 19414-19441.
- [27] Zheng Sh., Zhang Zh., He, S. Yang H., Atia H., Abdel-Mageed A. M., Wohlrab S., Baráth E., Tin S., Heeres H. J., Deuss de Vries P. J., J. G.. Benzenoid Aromatics from Renewable Resources. *Chemical Reviews* 2024, 124 (19), 10701-10876.
- [28] Zafar S., Cherakkara A., Misnon I. I., Yang Ch.-Ch., Jose R. Graphene-Like Materials from Biomass Using Deep Eutectic Solvents: A Review. *ACS Sustainable Resource Management*, 2024, 1 (9), 2047-2073.
- [29] Ruiz W., Gascon G., Chacón-Patiño M. L., Rodgers R. P., Dayton D. C., Barrère-Mangote C., Giusti P., Bouyssiére B. Ultrasound-Assisted Sequential Extraction for Lignocellulose Pyrolysis Bio-Oil Fractionation. Part I: Method Development. *Energy & Fuels*, 2024, 38 (18), 17687-17696.
- [30] Ruiz W., Gascon G., Rodgers R. P., Dayton D. C., Barrère-Mangote C., Giusti P., Bouyssiére B., Chacón-Patiño M. L. Ultrasound-Assisted Sequential Extraction for Lignocellulose Pyrolysis Bio-oil Fractionation. Part II: Comparative Application. *Energy & Fuels* 2024, 38 (18), 17697-17705.
- [31] Yadykova A. Y., Shariati S., Fini E. H., Ilyin S. O. Novel Bio-Nanocomposite for Asphalt Pavements: Montmorillonite Intercalated with Castor Oil. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2024, 12 (35), 13062-13079. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c01181>
- [32] Parku G. K., Pulicanti S. R., Funke A., Dahmen N. Phase Equilibria Aided Optimization of Levoglucosan Extraction during Condensation of Fast Pyrolysis Bio-Oils. *Energy & Fuels*, 2024, 38 (15), 14343-14350. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c01097>
- [33] Awad M. I., Makkawi Y., Hassan N. M. Yield and Energy Modeling for Biochar and Bio-Oil Using Pyrolysis Temperature and Biomass Constituents. *ACS Omega*, 2024, 9 (16), 18654-18667. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01646>
- [34] Branca C., Di Blasi C. Demineralization Pretreatments for Reducing Biomass Variability in Pyrolysis. *ACS Omega*, 2024, 9 (8), 9536-9546.
- [35] Wang M., Zhou H., Wang F. Photocatalytic Production of Syngas from Biomass. *Accounts of Chemical Research*, 2023, 56 (9), 1057-1069. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00039>
- [36] Cho Y., Kong S.-Ch. Modeling Biomass Particle Evolution at Pyrolysis Conditions Considering Shrinkage and Chemical Kinetics with Conjugate Heat Transfer. *Energy & Fuels*, 2023, 37 (8), 5926-5941.
- [37] Manrique R., Terrell E., Kostetskyy P., Chejne F., Olarte M., Broadbelt L., García-Pérez M. Elucidating Biomass-Derived Pyrolytic Lignin Structures from Demethylation Reactions through Density Functional Theory Calculations. *Energy & Fuels*, 2023, 37 (7), 5189-5205.
- [38] Reyes Molina E. A., Soneja R., Diaz M. H., Tilotta D. C., Kelley S. S. 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*, 2022, 70 (49), 15509-15516.
- [39] Caudle B., Brandão V. D., Gorenssek M. B., Chen Ch.-Ch. Process Model-Based Validation of the Intensification of Biomass Fast Pyrolysis in a Fluidized Bed via Autothermal Operation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10 (48), 15926-15938. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05260>
- [40] Weldekidan H., Mohanty A. K., Misra M. Upcycling of Plastic Wastes and Biomass for Sustainable Graphitic Carbon Production: A Critical Review. *ACS Environmental Au*, 2022, 2 (6), 510-522.
- [41] Lin F., Xu M., Ramasamy K. K., Li Zh., Klinger J. L., Schaidle J. A., Wang H. Catalyst

- Deactivation and Its Mitigation during Catalytic Conversions of Biomass. *ACS Catalysis*, 2022, 12 (21), 13555-13599.
- [42] Rahman Md. M., Yu Y., Wu H. Valorisation of Waste Tyre via Pyrolysis: Advances and Perspectives. *Energy & Fuels*, 2022, 36 (20), 12429-12474.
- [43] Bakshi S., Rover M. R., Smith R. G., Brown R. C. Conversion of Phenolic Oil from Biomass Pyrolysis into Phenyl Esters. *Energy & Fuels*, 2022, 36 (12), 6317-6328. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c00769>
- [44] Raheem A., He Q., Mangi F. H., Areeprasert Ch., Ding L., Yu G. Roles of Heavy Metals during Pyrolysis and Gasification of Metal-Contaminated Waste Biomass: A Review. *Energy & Fuels*, 2022, 36 (5), 2351-2368. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c04051>
- [45] Mishra R. K., Misra M., Mohanty A. K. Value-Added Bio-carbon Production through the Slow Pyrolysis of Waste Bio-oil: Fundamental Studies on Their Structure–Property–Processing Correlation. *ACS Omega*, 2022, 7 (2), 1612-1627.
- [46] Cross Ph., Iisa K., To A., Nimlos M., Carpenter D., Mayer J. A., Cushman J. C., Neupane B., Miller G. C., Adhikari S., Mukarakate C. Multiscale Catalytic Fast Pyrolysis of Grindelia Reveals Opportunities for Generating Low Oxygen Content Bio-Oils from Drought Tolerant Biomass. *Energy & Fuels*, 2022, 36 (1), 425-434.
- [47] Shafaghat H., Linderberg M., Janosik T., Hedberg M., Wiinikka H., Sandström L., Johansson A.-Ch. Enhanced Biofuel Production via Catalytic Hydropyrolysis and Hydro-Coprocessing. *Energy & Fuels*, 2022, 36 (1), 450-462.
- [48] Solar J., Caballero B. M., López-Urionabarrenechea A., Acha E., Arias P. L. Pyrolysis of Forestry Waste in a Screw Reactor with Four Sequential Heating Zones: Influence of Isothermal and Nonisothermal Profiles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60 (51), 18627-18639.
- [49] Hertzog J., Mase Ch., Hubert-Roux M., Afonso C., Giusti P., Barrère-Mangote C. Characterization of Heavy Products from Lignocellulosic Biomass Pyrolysis by Chromatography and Fourier Transform Mass Spectrometry: A Review. *Energy & Fuels*, 2021, 35 (22), 17979-18007.
- [50] Eschenbacher A., Fennell P., Jensen A. D. A Review of Recent Research on Catalytic Biomass Pyrolysis and Low-Pressure Hydropyrolysis. *Energy & Fuels*, 2021, 35 (22), 18333-18369.

Date despre autori.



Popescu Victor Serghei.

Doctor în inginerie, conferențiar universitar, Facultatea Energetică și Inginerie electrică, Universitatea Tehnică a Moldovei.

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



Golubev Viktor Petrovich.

Candidat în științe biologice, șeful sectorului „Tehnologii de Utilizare a Deșeurilor”, Institutul de Energetică al Academiei Naționale de Științe din Belarus.

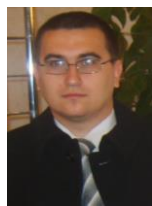
E-mail: vpgolubev@mail.ru



Degterov Dmitry Valentinovich.

Șeful sectorului „Bioenergie”, Institutul de Energetică al Academiei Naționale de Științe din Belarus.

E-mail: ddegterov@mail.ru



Vasilevich Sergey Vladimirovich.

Candidat în științe tehnice, cercetător științific superior, Academia de Aviație de Stat din Belarus.

E-mail: svasilevich@yandex.ru



Asadchiy Andrey Nikolaevich.

Cercetător, Institutul de Energetică al Academiei Naționale de Științe din Belarus.

E-mail: asadchiyi@tut.by



Shevchik Nikolay Evgenievich. Candidat în științe tehnice, director adjunct, Institutul de Energetică al Academiei Naționale de Științe din Belarus.

E-mail: neshevchik@gmail.com