

ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ БІОМАСИ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИХ МІКРОВОДОРОСТЕЙ CHLORELLA VULGARIS

Дячок В.В., д. т. н. професор, Кочубей В.В., к. х. н. доцент,
Національний університет «Львівська Політехніка», м. Львів

Анотація. В роботі представлено результати досліджень щодо можливостей використання біопалива на основі біомаси хлорофілсинтезуючих мікробіодоростей як сировини для карбонізації з одночасним зменшення вуглецевого сліду (пов'язаних з біо-CCU). Переробка біомаси мікробіодоростей у біовугілля знаходить застосування для секвестрації вуглецю, сировини для виробництва теплової енергії, а також активованого вугілля для адсорбції токсичних сполук із забрудненого повітря, води та ґрунту. Біопаливо вважається вуглецево-нейтральним, оскільки CO₂, що виділяється після їх спалювання, використовується рослинами та водоростями для фотосинтезу, що призводить до фіксації вуглекислого газу. Отримання енергії за рахунок спалювання карбонізованої біомаси мікробіодоростей базується на ефекті нейтралізації вуглекислого газу, що суттєво відрізняє цей спосіб від відомих традиційних методів, і не спричиняє забруднення навколишнього середовища парниковими газами. Результати комплексного термогравіметричного та диференційного термічного аналізів теплотвірної здатності біовугілля на основі біомаси хлорофілсинтезуючих мікробіодоростей *Chlorella vulgaris* отриманої в результаті сорбції парникових газів, утворених при спалюванні твердого, рідкого чи газоподібного палива засвідчують перспективність розвитку цього напрямку. Встановлено, що біомаса мікробіодоростей, отримана при поглинанні діоксиду карбону – продукту спалювання палива із домішками діоксиду сульфору, має більшу теплотвірну здатність у порівнянні із біомасою, отриманою при поглинанні чистого діоксиду карбону. Горіння біомаси мікробіодоростей, яка містить у внутрішньому об'ємі клітин сполуки сульфору, які утворюються внаслідок метаболізму діоксиду сульфору, супроводжується більші значними екзотермічними ефектами. За результатами термічних досліджень було встановлено, що теплотвірна здатність такої біомаси мікробіодоростей перевищує теплотвірну здатність осики, яка є альтернативним джерелом енергії на теренах України, та близькою до теплотвірної здатності селективно виведеної енергетичної верби *Energetic willow (Salix Viminalis)*.

Ключові слова: термічний аналіз, диференційного термічний аналіз, мікробіодорості *Chlorella vulgaris*, парникові гази, альтернативне паливо.

Постановка проблеми. Сьогодні біомаса рослинної сировини (деревини), як в Україні так і в світі є четвертим видом палива для вироблення енергії [1-5]. Як джерело енергії застосовують близько 20 видів рослин. До них найчастіше відносять вербу (*Salix*), тополь (*Populus*), *Miscanthus*, евкаліпт (*Eucalyptus*), осика (*Populus tremula L.*), топінамбур (*Heliánthus tuberósus*), тощо. Особливо популярною і поширеною в усьому світі є «Вербова енергетика». Енергетична верба – селективно виведена, невибаглива до умов зростання та поглинає у рази більше вуглекислого газу в порівнянні з іншими видами деревини. Теплотвірна здатність верби близька до вугілля. Вербова енергетика є наближена до виробництв замкнутого циклу.

Одноклітинні хлорофіл синтезуючі мікробіодорості в тому числі і *Chlorella vulgaris*, також відносять до рослин, а їх біомаса подібно до деревини може бути використана, як альтернативне джерело енергії. Як показують результати власних досліджень та аналізу літератури джерел, тепловий ефект при спалюванні біомаси мікробіодоростей є близьким, а, в деяких випадках, більшим від теплового ефекту спалювання деревини. Значні запаси біомаси хлорофілсинтезуючих мікробіодоростей накопичуються у випадку її застосування для біологічного очищення промислових газових викидів від діоксиду карбону та інших продуктів спалювання палива. В основу цього методу очищення покладено фотосинтез [6-8].

Як відомо, використання мікробіодоростей для поглинання парникових газів вважається екологічно чистим виробництвом [11-14]. Проте у продуктах спалювання палива, завжди містяться інші оксиди, зокрема діоксид сульфору. За хімічною будовою молекули вуглекислого газу (CO₂) та двоокису сірки (SO₂) подібні, що є причиною проникнення SO₂ за механізмом пасивного транспорту у внутрішній об'єм клітин мікробіодоростей. На етапі фотосинтезу SO₂ не може бути засвоєним і більше того, виступає блокаторм процесу фотосинтезу, проте залишаються у внутрішньому об'ємі клітини у вигляді хімічних сполук - продуктів метаболізму які стають складовими компонентами що формують біомасу. Обсяги такої біомаси мікробіодоростей, як згадувалось раніше є надзвичайно великими.

Сьогодні є очевидним, що накопичені відходи біотехнологічних виробництв, зокрема очищення промислових газових викидів від парникових газів становлять серйозну загрозу навколишньому середовищу, а від так потребують утилізації. Методи вторинного використання біомаси слід розробляти аналогічними до тих, що реалізуються у природному середовищі, зокрема в біосфері. Як відомо – біосфері в цілому властиве явище кругообігу основних біогенних елементів. Тому в основу технологій рециклізації та утилізації

накопиченої біомаси мікроводоростей слід максимально запозичувати процеси притаманні біосфері. Саме це визначає необхідність створення і погоджених глобальних заходів у напрямках реалізації принципів сталого розвитку. Такий стан справ спонукає до розроблення способів і методів використання біомаси хлорофілсинтезуючих мікроводоростей, як потенційного джерела альтернативного палива. Від так це питання потребує більш ретельного вивчення на предмет можливого застосування біомаси мікроводоростей, одержаної при очищенні промислових газових викидів, як потенційного альтернативного джерела енергії.

Мета роботи полягає у дослідженні методом комплексного термічного аналізу теплотвірної здатності зразків біомаси мікроводоростей *Chlorella vulgaris*, одержаних внаслідок очищення промислових газових викидів від діоксиду карбону із домішками діоксиду сульфуру, а також оцінити вплив діоксиду сульфуру на теплотвірну здатність біомаси мікроводоростей та ефективність протікання процесів її горіння, як потенційного біопалива.

Теоретична частина. У попередніх роботах авторів [10-12] описані механізми поглинання парникових газів із залученням фотосинтезу та включення їх у цінні біомолекули. Клітини мікроводоростей використовують CO₂ як попередники макромолекул, включаючи ліпіди, білки, вуглеводи та пігменти. Для цих мікроводоростей характерне явище фотосинтезу. Цей фізико-хімічний процес унікальний у своєму відношенні тим, що збільшує вільну енергію речовини за рахунок універсального джерела енергії – Сонця. Фотосинтез сприяє зменшенню вуглекислого газу в атмосфері. Хлорофілсинтезуючі мікроводорості, до прикладу хлорела *Chlorella vulgaris*, поглинають вуглекислий газ та складають його вигляді складних біомолекул – найчастіше вуглеводів. На відміну від наземних рослин вони в десятки разів швидше ростуть та відповідно поглинають на багато більше діоксиду карбону. Крім цього володіють здатністю адаптуватися у край несприятливих умовах [9,10]. Водночас мікроводорості не потребують багато місця на відміну від наземних рослин, зокрема дерев. Фактично вони створюють потужну конкуренцію традиційним зеленим насадженням які є потенційними поглиначами вуглекислого газу і можуть рости будь-де, отримуючи штучне світло, воду і діоксид карбону, який поглинають. Водночас самі нейтралізують речовини, які забруднюють воду при їх культивуванні.

Експериментальна частина. Для досліджень були взяті зразки біомаси мікроводоростей *Chlorella vulgaris*, одержані внаслідок очищення промислових газових викидів від діоксиду вуглецю в одному випадку та в іншому біомаса отримана внаслідок очищення промислових газових викидів від діоксиду вуглецю з домішками діоксиду сульфуру в межах від 0,0001 мг/мл до 0,004 мг/мл в середовищі культивування. Комплексний термічний аналіз зразків біомаси мікроводоростей проводили на дериватографі Q –1500D системи “F. Paulik – J. Paulik – L. Erdey”, під’єднаного до IBM сумісного персонального комп’ютера. Взірці біомаси піддавались дослідженню в динамічних умовах, а саме швидкість нагрівання 10 С/хв в середовищі повітря. Маса наважки кожного досліджуваного зразку становила 100 мг. Як еталонну речовину було взято алюмінію оксид. Комплексний термічний аналіз включав термогравіметрію (TG), диференційну термогравіметрію (DTG) та диференційний термічний аналіз (DTA). Результати комплексного термічного аналізу зразків представлені у вигляді термограм зображено на рисунках 1 і 2, зведених кривих DTG, рисунок 3 та таблиці 1.

На першій стадії термолізу в температурному інтервалі 20 – 175°C зразки втрачають фізично зв’язану вологу. Цей процес супроводжується появою чіткого ендотермічного ефекту на кривих DTA, з максимумом за температури 101°C. Слід відмітити, що зразок 1 відзначається більшим вмістом адсорбованої вологи (11,20%), у порівнянні із зразком 2 (10,35%).

На другій стадії термолізу зразки втрачають хімічно зв’язану воду. Цей процес супроводжується незначною втратою маси зразків та відхиленням каналу DTA в область ендотермічних ефектів. У зразку 1 втрата хімічно зв’язаної води (1,78%) спостерігається в області температур 175 – 220°C. Цей процес супроводжується характерним вигином на кривій DTG. Зразок 2 втрачає хімічно зв’язану воду (0,71%) в області температур 166 – 204°C.

Слід відмітити, що зразок 1 характеризується більшим вмістом зв’язаної води.

Таблиця 1

Результати термічного аналізу зразків

Зразок	Стадія	Температурний інтервал, °C	Втрата маси, %	Ефект (t _{max})
Зразок 1 Отриманий за присутності CO ₂	I	20 - 175	11,20	ендо- (100 °C)
	II	175 - 220	1,78	ендо-
	III	220 - 480	50,41	екзо-(354 °C)
	IV	480 - 740	33,61	екзо-(564 °C)
Зразок 2 Отриманий за присутності CO ₂ і SO ₂	I	20 - 166	10,35	ендо- (101 °C)
	II	166 - 204	0,71	ендо-
	III	204 - 445	51,64	екзо- (354 °C)
	IV	445 - 660	35,30	екзо- (525 °C)

На третій стадії термолізу, яка для зразка 1 протікає в температурному інтервалі 220 – 480° С, а для зразка 2 в області температур 204 – 445°С, відбуваються активні термоокисні та деструктивні процеси, які завершуються полуменевим горінням летких продуктів розкладу. Про це свідчить інтенсивна втрата маси зразків та поява стрімкого екзотермічного ефекту на кривих DTA, з максимумом за температури 354°С. В цьому ж температурному інтервалі можливе окислення сполук сульфуру, які містяться у зразку 2, до вищих оксидних форм.

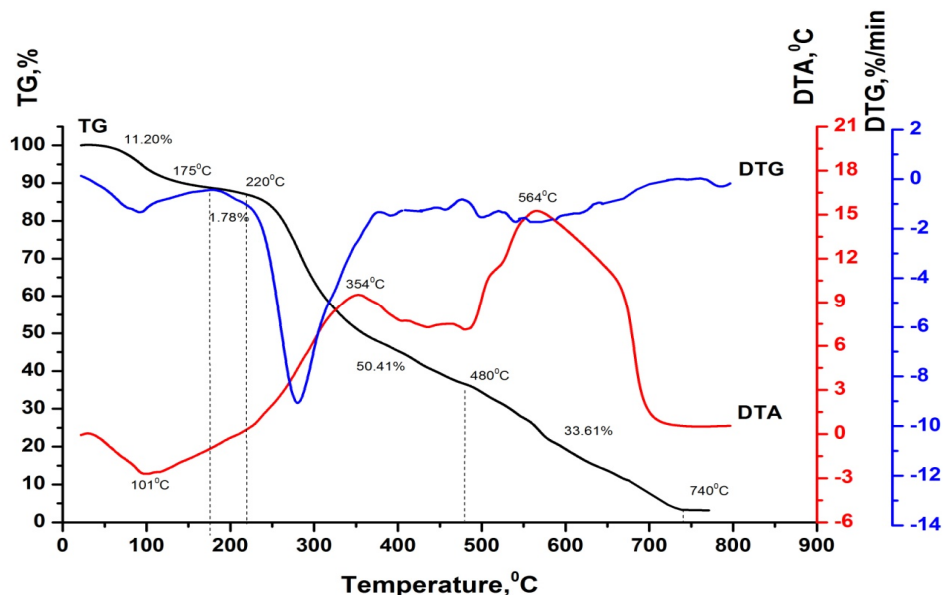


Рис. 1 – Термограма зразку

Слід зазначити, що зразок 2 відзначається нижчою термічною стійкістю, у порівнянні із зразком 1. Термоокисні та деструктивні процеси в цьому зразку протікають за більш низьких температур, вони супроводжуються більш глибоким екстремумом на кривій DTG (рис. 3) та більш стрімким екзотермічним ефектом на кривій DTA.

На четвертій стадії термолізу, яка для зразка 1 протікає в температурному інтервалі 480 – 750°С, а для зразка 2 в області температур 445 – 750°С, відбувається згорання піролітичного залишку біомаси мікрководоростів. Цьому процесу відповідає значна втрата маси зразків (33,61% - зразок 1, 35,30% - зразок 2) та поява стрімких екзотермічних ефектів на кривих DTA. В цьому ж температурному інтервалі можливе завершення згорання сполук сульфуру, присутнього в зразку 2.

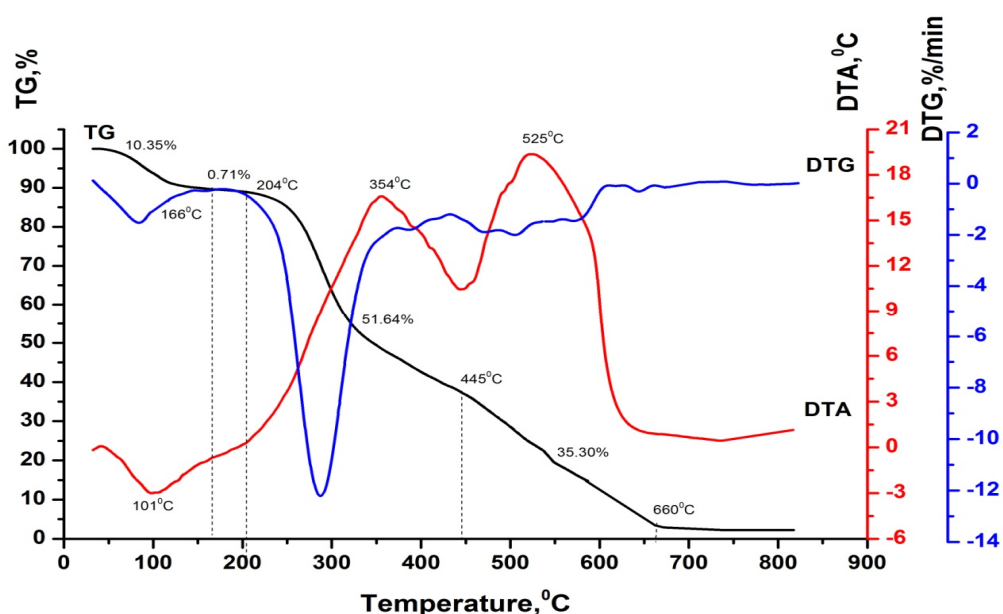


Рис. 2 – Термограма зразка 2

Слід зауважити, що згорання карбонізованого залишку зразка 2 протікає більш інтенсивно, ніж зразка 1. Про це свідчить поява більш стрімких екзотермічних ефектів на кривих ДТА зразка 2 та зміщення екстремумів диференційних кривих ДТА та DTG в область вищих температур. Максимум екзотермічного ефекту зразка 2 проявляється на кривій ДТА за температури 525°C, а зразка 1 – за температури 564°C. Екстремум кривої DTG зразка 2 відповідає температурі 505°C, а зразка 1 – температурі 564°C (рис. 3).

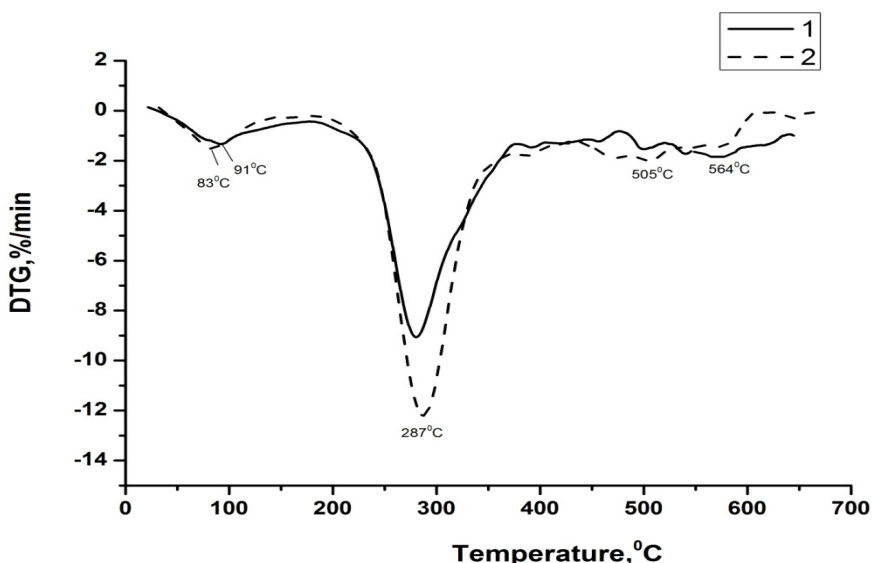


Рис. 3 – Термогравіметричні криві: крива 1 – зразок 1, крива 2 – зразок 2

На рис. 4 наведено порівняння кривих ДТА зразків трьохрічної енергетичної верби *Salix Viminalis* з розміром частинок приблизно рівним 0,5мм та одноклітинних мікроводоростей *Chlorella vulgaris*, культивованих за присутності оксиду сульфуру. Термічний аналіз зразків верби (*Salix Viminalis*) та мікроводоростей проводили за однакових умов

Екзотермічний ефект, який спостерігається на кривій ДТА зразка верби в температурному інтервалі 170 - 430°C відповідає термоокисній деструкції целюлози, яка завершується полуменевим горінням легких продуктів розкладу. Наступний екзотермічний ефект, який проявляється на кривій ДТА в температурному інтервалі 430 - 552 °C, відповідає згоранню карбонізованого залишку зразка.

Слід відмітити, що теплотвірні здатності зразків швидкоростучої трьохрічної верби та одноклітинних мікроводоростей є близькими, однак, характер горіння є дещо відмінним. Полуменеве горіння продуктів деструкції зразка верби протікає більш інтенсивно, ніж зразка мікроводоростей. Про це свідчить поява більш стрімкого екзотермічного ефекту, у порівнянні із екзо ефектом зразка мікроводоростей *Chlorella vulgaris*. Проте згорання піролітичного залишку зразка верби (*Salix Viminalis*) супроводжується менш значним виділенням тепла. Цьому процесу відповідає менший екзотермічного ефекту на кривій ДТА, який завершується за нижчих температур, у порівнянні із зразком мікроводоростей рисунок 4.

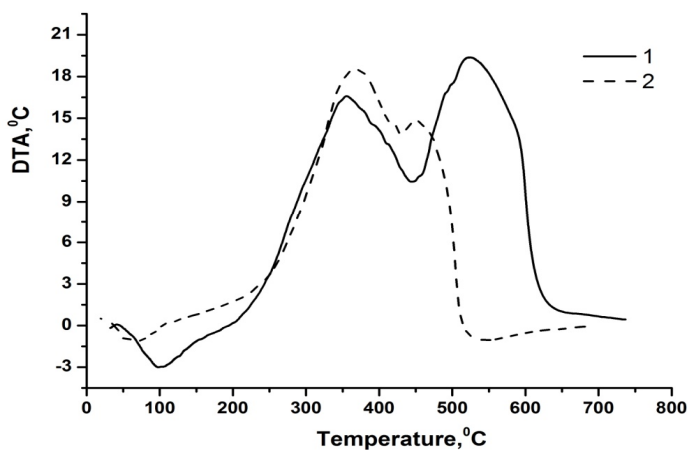


Рис. 4 – Порівняння кривих ДТА зразків: 1- біомаса мікроводоростей *Chlorella vulgaris*; 2- енергетичної верби (*Salix Viminalis*) [15].

Класичним джерелом енергії рослинного походження на даний час також є осика. Це швидкоростуче дерево широко розповсюджене на європейській території. Його часто використовують в паливній енергетиці як енергетичну сировину.

На рисунку 5 наведено порівняння кривих ДТА одноклітинних хлорофілсинтезуючих мікроводоростей *Chlorella vulgaris* та зразка стовбурової деревини осики, змішаної в рівних пропорціях з корою осики. Термічний аналіз зразків проводили за однакових умов. Піроліз, який супроводжується різким зниженням ступеня полімеризації целюлози, термоокисна деструкція та горіння продуктів деструкції зразка осики протікає в температурному інтервалі 187 - 373°C. Цьому процесу відповідає значний екзотермічний ефект на кривій ДТА, з максимумом за температури 347°C.

Згорання піролітичного залишку зразка осики, яке супроводжується широким екзоелементом на кривій ДТА, протікає в області температур 373 - 564°C. Слід відмітити, що полуменеве горіння продуктів деструкції зразка осики (*Populus tremula* L.) та згорання його карбонізованого залишку супроводжується меншим виділенням теплоти. Про це свідчить поява менш стрімких екзотермічних ефектів на кривій ДТА зразка швидкоростучої осики, у порівнянні із зразком хлорофіл синтезуючих мікроводоростей.

За результатами термічних досліджень можна стверджувати, що зразок біомаси мікроводоростей *Chlorella vulgaris* відзначається більшою теплотвірною здатністю, у порівнянні із зразком осики (*Populus tremula* L.).

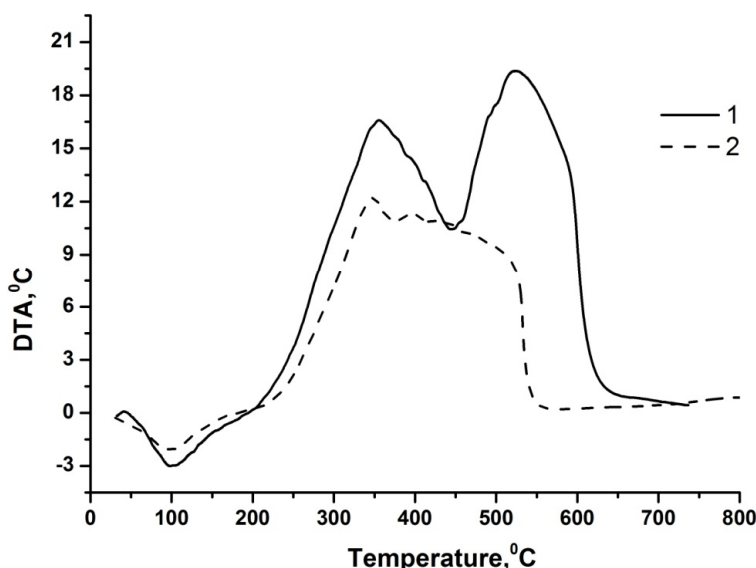


Рис. 5 – Порівняння ДТА зразків: крива – 1, біомаса мікроводоростей (*Chlorella vulgaris*) зразок 2; крива -2 швидкоростуча осика (*Populus tremula* L.)

Висновки. За даними комплексного термічного аналізу зразок біомаси мікроводоростей одержаний при культивуванні газовими викидами з діоксидом карбону та вмістом діоксиду сульфуру, зразок 2, має більшу теплотвірну здатність у порівнянні із зразком 1, отриманого при культивуванні мікроводоростей чистим діоксидом карбону. Полуменеве горіння летких продуктів розкладу зразка 2 та згорання його карбонізованого залишку супроводжується більш значним тепловим ефектом у порівнянні із зразком 1, одержаним при культивуванні чистим діоксидом карбону. Присутність сульфуру у зразку 2 підсилює інтенсивність протікання в них деструктивних, термоокисних та гетерогенно-окисних процесів при нагріванні.

Теплотвірна здатність зразку 2 біомаси мікроводоростей перевищує теплотвірну здатність осики (*Populus tremula* L.), яка вважається альтернативним джерелом енергії на теренах України, та є близькою до теплотвірної здатності селективно виведеної енергетичної верби *Salix Viminalis*.

Біомасу мікроводорості *Chlorella vulgaris*, обох зразків можна рекомендувати як сировину для виготовлення біопалива.

References

1. Vasylyshyn R.D. (2013). Energetics of forest ecosystems: main directions and trends of scientific research. *Scientific bulletin of NLTU of Ukraine: coll. science and technology works –Lviv: RVV NLTU of Ukraine.* 23(2), 31-36.
2. Lakyda P.I., Vasylyshyn R.D., Lashchenko A.G., Terentiev A.Yu and oll. *Species of Ukraine: reference book (normative and production edition):* ECO-inform, 192.

3. Geletukha H.G., Zhelezna T.A. (2012). Current state and prospects for the development of bioenergy in Ukraine. Non-traditional energy. *Prom. Heat engineering*. 3,73-79.
4. Ivakhiv V. (2012). Energy willow as a solution for small cities of Ukraine. *Ukrainian energy industry*. 12.
5. Climate change (in Ukrainian), (2020). Natsionalnyy ekolohichnyy tsentr Ukrainy. Retrieved from: necu.org.ua/climate.
6. Maria J.Lapponi, Mariana B.Méndez, Jorge A.Trelles, Cintia W.Rivero (2022). Cell immobilization strategies for biotransformations. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 33.
7. Manswama Boro, Ashwani Kumar Verma, Dixita Chettri, Vinod KumarYata, Anil Kumar Verma (2022). Strategies involved in biofuel production from agro-based lignocellulose biomass. *Environmental Technology; Innovation*, 28.
8. Yi An Lim, Meng Nan Chong, Su Chern Foo, I.M.S.K. (2021). Ilankoon. Analysis of direct and indirect quantification methods of CO₂ fixation via microalgae cultivation in photobioreactors: A critical review . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.137.
9. Harun Chowdhury (2019). Third-generation biofuels from microalgae: a review *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 20, 39-44.
10. Dyachok V., Huhlych S., Katysheva V.V., Mandryk S.T. (2021). About the Optimal Ratio Inhibitor and Activators of Carbon Dioxide Sorption Process by Using Chlorophyll-synthesizing Chlorella microalgae *Journal of Ecological Engineering* , 22(5), 26–31
11. Dyachok V., Huhlych S., Katysheva V.V., Mandryk S.T. (2017). Absorption of carbon dioxide from a mixture of air with sulfur dioxide *Scientific works*, 81(1), 59-65. (in Ukrainian).
12. Dyachok V.V., Mandryk S.T., Huhlych S.I., Slyvka M.M. (2020). Study on the impact of activators in the presence of an inhibitor on the dynamics of carbon dioxide absorption by chlorophyll-synthesizing microalgae. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5), 189-196.
13. Chlorella in sewage treatment, (2020). Retrieved from: <https://hlorella.jimdo.com/>. (in Ukrainian)
14. Zolotaryova O.K., Shnyukova Ye.I., Syvash O.O., Mykhaylenko N.F. (2008). *Prospects for the use of microalgae in biotechnology*. In: O.K. Zolotaryovoa (Ed.) Alterpres, 234. (in Ukrainian)
15. Yalchko V., Kochubey V, Hnatyshyn Y., Dzyadevych B. and. Zaikov G. (2015). Investigation of Thermal Power Characteristics of Wood Pulp. *The Chemistry and Physics of Engineering Materials – Two Volume Set.: Modern Analytical Methodologies*. Apple Academic Press, USA. 1, 171–178.
16. Tsapko Y.V. (2011).The study of kinetic parameters during pyrolysis of fire protected wood by impregnating agents. *Fire safety*, 19, 163 - 169.

THERMAL ANALYSIS OF BIOMASS OF CHLOROPHYLL SYNTHESIZED MICROALGAE *CHLORELLA VULGARIS*

Dyachok V., Doctor of Engineering Science, Professor,
Kochubei V., Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor;
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Abstract. The paper presents ways to reduce the carbon footprint through the reuse of microalgae biomass as biofuel (related to bio-CCU). Processing of microalgae biomass into biochar is used for carbon sequestration, raw material for the production of thermal energy, as well as activated carbon and adsorption of toxic compounds from polluted air, water and soil. Biofuels are considered carbon neutral because the CO₂ released after they are burned is used by plants and algae for photosynthesis, which leads to carbon dioxide fixation. Obtaining energy by burning carbonized biomass of microalgae is based on the effect of carbon dioxide neutralization, which significantly distinguishes this method from known traditional methods, and does not cause environmental pollution with greenhouse gases. The results of complex thermogravimetric and differential thermal analyzes of the calorific value of biochar based on the biomass of chlorophyll-synthesizing microalgae *Chlorella vulgaris* obtained as a result of the sorption of greenhouse gases formed during the burning of solid, liquid or gaseous fuels. It was established that the biomass of microalgae obtained by absorbing carbon dioxide, a product of fuel combustion with sulfur dioxide impurities, has a greater heat-generating capacity compared to the biomass obtained by absorbing pure carbon dioxide. Combustion of microalgae biomass, which contains sulfur compounds in the internal volume of cells, which are formed as a result of the metabolism of sulfur dioxide, is accompanied by more significant exothermic effects. According to the results of thermal studies, it was established that the heat-generating capacity of such microalgae biomass exceeds the heat-generating capacity of aspen (*Populus tremula*), which is an alternative source of energy in the territory of Ukraine, and is close to the heat-generating capacity of the selectively bred energetic willow (*Salix viminalis*).

Keywords: thermogravimetric analyses, differential thermal analyses, microalgae *Chlorella vulgaris*, greenhouse gases, alternative fuel.

Список використаної літератури

1. Vasylyshyn R.D. Energetics of forest ecosystems: main directions and trends of scientific research. Scientific bulletin of NLTU of Ukraine: coll. science and technology works –Lviv: RVV NLTU of Ukraine. 2013. 23(2), 31-36.
2. Лакида П.І., Василичин Р.Д., Лашенко А.Г., Терентьев А.Ю та інші. Нормативи оцінки компонентів надземної фітомаси дерев головних лісотвірних порід України: довідник (нормативно-виробниче видання) – К. : Вид. ЕКО-інформ, 2011. 192.
3. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Сучний стан та перспективи розвитку біоенергетики України. Нетрадиційна енергетика. Пром. Теплотехника. 2012. 3,73-79.
4. Івахів В. Енергетична верба як рішення для малих міст України. Українська енергетика. 2012. 12.
5. Climate change. Natsionalnyy ekolohichnyy tsentr Ukrainy. 2020. Retrieved from: necu.org.ua/climate.
6. Cell immobilization strategies for biotransformations / Lapponi M. J. et al. // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2022. № 33.
7. Strategies involved in biofuel production from agro-based lignocellulose biomass / Boro M. et al. // Environmental Technology; Innovation. № 28
8. Pankoon. Analysis of direct and indirect quantification methods of CO2 fixation via microalgae cultivation in photobioreactors: A critical review . / Yi A. L. et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. № 137.
9. Harun Chowdhury. Third-generation biofuels from microalgae: a review Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2019. 20, 39-44.
10. About the Optimal Ratio Inhibitor and Activators of Carbon Dioxide Sorption Process by Using Chlorophyll-synthesizing Chlorella microalgae / Dyachok V. et al. // Journal of Ecological Engineering ., No. 5 Vol. 22. P. 26-31.
11. Absorption of carbon dioxide from a mixture of air with sulfur dioxide / Dyachok V. et al. // Scientific Works .2017 ., No. 1 Vol. 81. P. 59-65.
12. Study on the impact of activators in the presence of an inhibitor on the dynamics of carbon dioxide absorption by chlorophyll-synthesizing microalgae. / Dyachok V. V. et al. // Journal of Ecological Engineering. 2020., No. 5 Vol. 21. P. 189-196.
13. Chlorella in sewage treatment (in Ukrainian), 2020. Retrieved from: <https://hlorella.jimdo.com/>.
14. Prospects for the use of microalgae in biotechnologyIn:, 234 / Zolotaryova O. K. et al. Zolotaryova O.K. Alterpres. 234 p.
15. Investigation of Thermal Power Characteristics of Wood Pulp. / Yalchko V. et al. // The Chemistry and Physics of Engineering Materials . № 1. P. 171-178.
16. Tsapko Y.V. The study of kinetic parameters during pyrolysis of fire protected wood by impregnating agents. Fire safety. 2011.19, 163 - 169.

Отримано в редакцію 05.06.2023
Прийнято до друку 26.09.2023

Received 05.06.2023
Approved 26.09.2023