

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ ТА ПЕЛЕТ ПРИ ВИРОЩУВАННІ КУЛЬТИВАРІВ ЦУКРОВОГО СОРГО НА РЕКУЛЬТИВОВАНИХ ЗЕМЛЯХ

**М. Харитонов, д. с.-г. н.**

*ORCID ID: 0000-0002-9886-678X*

**М. Бабенко, к. с.-г. н.**

*ORCID ID: 0000-0002-6074-0145*

**І. Рула, к. т. н.**

*ORCID ID: 0000-0003-4229-6463*

**С. Лемішко, к. с.-г. н.**

*ORCID ID: 0000-0002-4973-7455*

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет*

**Н. Мартинова, к. б. н.**

*ORCID ID: 0000-0002-1523-1886*

*Дніпровський національний університет*

**В. Гамандій, к. с.-г. н.**

*ORCID ID: 0000-0002-7151-4098*

*Селекційно-генетичний інститут*

*Національного центру насінництва та сортовипробування НААНУ*

<https://doi.org/10.31734/agronomy2023.27.074>

### **Харитонов М., Бабенко М., Рула І., Лемішко С., Мартинова Н., Гамандій В. Перспективи виробництва біоетанолу та пелет при вирощуванні культиварів цукрового сорго на рекультивованих землях**

Польові дослідження з вирощування українських та американських культиварів сорго цукрового були проведені в умовах степової зони України на Покровській навчально-дослідній станції рекультивації земель. Станцію заснували майже 50 років тому на відвалі заввишки 60 м після виконання робіт із гірничо-технічної рекультивації, пов'язаних із відкритим видобутком марганцевої руди на кар'єрі. У польових умовах у 2017–2018 роках досліджено три гібриди сорго цукрового української селекції, зокрема Медове, Зубр, Покровське, та сорт Силосне – 42, і чотири американські гібриди (SS506, Sioux, Mohawk, G1990). Був закладений двофакторний польовий дослід. Фактор А – культивари цукрового сорго вітчизняного та американського походження; фактор Б – два типи ґрунту (чорноземна маса та фітомеліорований лесоподібний суглинок). Оцінено перспективи виробництва якісної біосировини при вирощуванні культиварів сорго цукрового на рекультивованих землях. Рослини, вирощені на чорноземній масі, мали дещо вищі значення Брікса, ніж на лесоподібних суглинках. Теоретична врожайність етанолу для високопродуктивних гібридів (Зубр, Медове, Mohawk, SS506) становила 2500–3600 л га<sup>-1</sup>, а для малопродуктивних культиварів (Sioux і Силосне – 42) – 705–1600 л га<sup>-1</sup>. Дослідження процесів термолізу біомаси українських і американських культиварів сорго цукрового виявили схожість і відмінність за трьома показниками (втратою маси, швидкістю процесів розкладання, тепловим ефектом). Хімічні реакції деструкції зразків українських культиварів характерні більшим виділенням енергії, ніж деструкція зразків американських гібридів. На насипному шарі чорнозему різниці в характері втрачання маси всередині сортових груп майже не було. У зразках групи українських культиварів швидкість втрачання маси збільшилася на більш ранніх етапах за температурах 170–175 °С, тоді як зразки американських гібридів почали швидко втрачати масу лише за температур 230–240 °С. Тривалість термолізу на чорноземі була довшою, ніж на лесоподібному суглинку й становила 40–50 °С – 550–580 °С в українських культиварів та 50–60 °С – 550–590 °С в американських.

Отже, отримані результати оцінки теоретичного врожаю етанолу та процесів термолізу багаси дозволили виявити деякі американські та українські культивари для вирощування на двох типах рекультивованих земель.

**Ключові слова:** сорго цукрове, культивари, рекультивовані землі, теоретичний етанол, термоліз.

### **Kharytonov M., Babenko M., Rula I., Lemishko S., Martynova N., Hamandii V. Prospects of bioethanol and pellet production based on sweet sorghum cultivars growing on reclaimed lands**

Field experiments on the growing of Ukrainian and American cultivars of sugar sorghum were conducted in the conditions of the steppe zone of Ukraine at the Pokrov educational and research station of land reclamation. The station was founded almost 50 years ago on a 60 m high dump after mining and technical reclamation works related to the open pit quarry of manganese ore. Three sweet sorghum hybrids of Ukrainian selection including Medove, Zubr, Pokrovske, one variety called Silosne – 42, and four American hybrids (SS506, Sioux, Mohawk, G1990) were studied in the field conditions in 2017–2018. A two-factor field experiment was launched, namely Factor A – sweet sorghum hybrids of domestic and American origin; factor B – two types of soil (chernozem mass and phytomeliorated loess-like loam). The main goal of the study was to assess prospects for production of high-quality biological raw material after sweet sorghum cultivars growing on reclaimed lands.

Plants grown on chernozem had little higher Brix values than those on loess loam. The theoretical yield of ethanol of the high-yield hybrids (Zubr, Medove, Mohawk, SS506) was 2500–3600 l ha<sup>-1</sup>, and of the low-yield hybrids (Sioux and Silosne-42) – 705–1600 l ha<sup>-1</sup>.

The study of biomass thermolysis processes of the Ukrainian and American cultivars of sweet sorghum revealed both similarities and differences in three indicators (mass loss, speed of decomposition processes, thermal effect). Chemical reactions of destruction of the samples of the Ukrainian cultivars were characterized by a greater release of energy than destruction of the samples of the American hybrids. There was almost no difference in the nature of mass loss within hybrid groups on the black soil. In the samples of the Ukrainian cultivars, the rate of mass loss increased at earlier stages at temperatures of 170–175 °C, while the samples of the American hybrids began to rapidly lose the mass only at temperatures of 230–240 °C. The duration of thermolysis on chernozem was longer than on loess like loam and was 40–50 °C – 550–580 °C in the Ukrainian cultivars and 50–60 °C – 550–590 °C in the American hybrids.

Therefore, the obtained results of the evaluation of the theoretical yield of ethanol and processes of thermolysis of bagasse made it possible to identify some American and Ukrainian cultivars for growing on the two types of reclaimed land.

**Key words:** sweet sorghum, cultivars, reclaimed land, theoretical ethanol, thermolysis.

**Постановка проблеми.** Під час відкритих розробок гірські породи минулих геологічних епох виносяться на земну поверхню та внаслідок взаємодії з атмосферою піддаються інтенсивному вивітрюванню [13; 19]. Сформовані так техноземи суттєво відрізняються від зональних ґрунтів за рівнем родючості, фізичними, фізико-хімічними та іншими екологічно важливими характеристиками [8]. Ось чому їх перетворення в «молоді ґрунти» потребує застосування додаткових меліоративних заходів та вибору культури, яка має достатній адаптивний потенціал для вирощування на таких маргінальних землях [3; 11]. Сорго цукрове – перспективна, посухостійка рослина з низкою корисних властивостей для використання в різних сферах народного господарства [18].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сорго цукрове має такі агрономічні властивості, як короткий життєвий цикл (близько чотирьох місяців) та тип фотосинтезу C<sub>4</sub>, який сприяє більшій ефективності використання води й поживних речовин [15; 16; 20]. Невиблагливість сорго до умов навколишнього середовища створює перспективу вирощування цієї рослини на малопродуктивних і рекультивованих землях, не допускаючи таким чином конфлікту між виробництвом продуктів харчування та біопаливом [2; 12]. Сік сорго можна використовувати для виробництва цукру, сиропу та біоетанолу першого покоління [1]. Багасу можна використовувати як корм, добриво, біоетанол другого покоління або як сировину для паперової промисловості [7]. Високий вміст цукру та легкість екстракції роблять цукрове сорго однією з провідних сировинних культур для виробництва біопалива [14; 21]. Стебла сорго містять легкодоступні розчинні вуглеводи, тому ферментативне перетворення крохмалю на цукор не потрібне [10]. Це дає сорго економічну перевагу перед іншими культурами на основі крохмалю. Є деякі дані про вирощування сорго на маргінальних землях. Наприклад, у Північному та Східному Китаї досліджено вихід біомаси, поживних речовин (N, P, і K), акумулятивну та енергетичну продуктивність сорго на

маргінальних землях у посушливих та напівпосушливих умовах [6; 17].

Проте питання визначення найбільш продуктивних культиварів в умовах малопродуктивних угідь вивчені недостатньо.

**Постановка завдання.** Наше завдання – оцінити межі отримання теоретичного врожаю етанолу при вирощуванні культиварів американської та української селекції на рекультивованих землях; дослідити процеси термолізу біомаси сорго за втратою маси, швидкістю процесів розкладання та тепловому ефекту щодо придатності для виготовлення пелет.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження проводили в умовах степової зони України на Покровській навчально-дослідній станції рекультивації земель ДДАЕУ [19]. Станцію заснували майже 50 років тому на відвалі заввишки 60 м після виконання робіт з гірничо-технічної рекультивації, пов'язаних з відкритим видобутком марганцевої руди на кар'єрі. У польових умовах у 2017–2018 роках досліджено чотири гібриди сорго цукрового української селекції (Медове, Зубр, Покровське, Силосне – 42) та чотири американські гібриди (SS506, Sioux, Mohawk, G1990). Було закладено двофакторний польовий дослід. Фактор А – гібриди цукрового сорго вітчизняного та американського походження; фактор Б – два типи ґрунту (чорноземна маса та фітомеліорований лесоподібний суглинок). Вміст гумусу в лесоподібних суглинках близько – 1,1 %, у чорноземах – 3,3. Досліджено продуктивність, консервативний вихід цукру та теоретичний вихід етанолу. Концентрація цукру в стеблах сорго цукрового вимірюється в одиницях Брікса (Brix), які становлять відсоток розчинних цукрів. Один градус Брікса дорівнює 1 г цукру на 100 г соку. Брікс визначали за допомогою ручного рефрактометра «RHBO – 50ATC». Консервативний вихід цукру (КВЦ) у т га<sup>-1</sup> розраховували на основі підходу, згідно з яким концентрація цукру становить 75 % від Brix, вираженого в г кг<sup>-1</sup> цукрового соку [5; 22]. Для цих розрахунків скористалися рівнянням:

$$КВЦ = (VBC - VCC) \cdot Brix \cdot 0,75, \quad (1)$$

де  $KВЦ$  – консервативна врожайність цукру ( $t\text{ га}^{-1}$ );  $УСС$  – урожайність вологого стебла ( $t\text{ га}^{-1}$ );  $УСС$  – урожайність сухого стебла ( $t\text{ га}^{-1}$ ). Теоретичний вихід етанолу ( $TBE$ ) розраховували як вихід цукру, помножений на коефіцієнт перетворення – 0,58 л етанолу на кг цукру [5]:

$$TBE = KВЦ \cdot 0,58, \quad (2)$$

де  $TBE$  – теоретична врожайність етанолу ( $л\text{ га}^{-1}$ );  $KВЦ$  – консервативна врожайність цукру ( $кг\text{ га}^{-1}$ ).

Термічний аналіз рослинної біомаси проводили за допомогою деріватографа Q – 1500D (Угорщина). Диференціальні втрати маси та ефекти нагрівання були досліджені. Результати вимірювань обробляли за допомогою програмного комплексу, що входить до комплекту поставки приладу. Зразки біомаси аналізували динамічно за швидкості нагрівання  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$  в атмосфері повітря. Маса зразків становила 100 мг. Речовиною порівняння слугував оксид алюмінію. Всі отримані результати обробляли статистичними

методами з використанням програмного пакета StatGraphics Plus5 на рівні значущості 0,95 % ( $P$  – value < 0,05).

Під час дослідів встановлено, що вміст соку у стеблах українських культиварів на 5–10 % більший, ніж в американських. При цьому концентрація цукру в ньому була меншою, 16–19 % порівняно з 18–21 %. Рослини, вирощені на насипному шарі чорнозему (НШЧ), мали дещо вищі значення Брікса, ніж на фітомеліорованих лесоподібних суглинках (ЛС). У результаті на лесоподібних суглинках консервативна врожайність цукру коливалася від 1,2 до 6,2  $t\text{ га}^{-1}$ , а на чорноземі від 2,2 до 4,9  $t\text{ га}^{-1}$ . Теоретична врожайність біоетанолу для високопродуктивних гібридів (Зубр, Медове, Мохавк, SS506) становила 2500–3600  $л\text{ га}^{-1}$ , а для малопродуктивного гібрида Sioux і сорту Сілосне-42 – 705–1600  $л\text{ га}^{-1}$  (рис. 1).

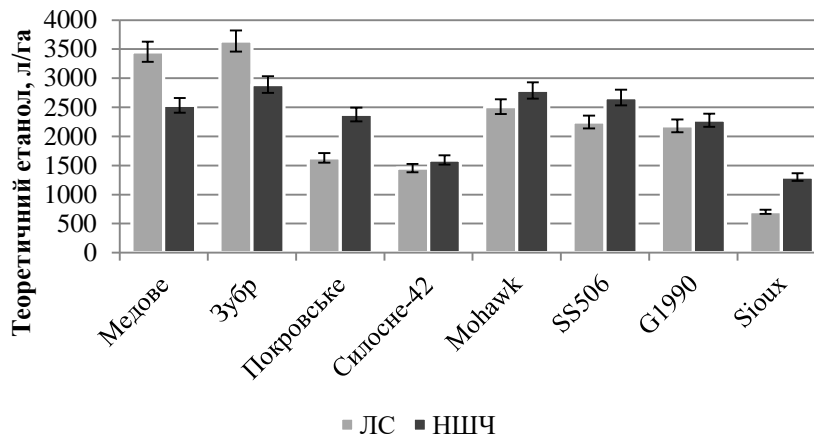


Рис. 1. Теоретичний урожай етанолу сорго цукрового

У зразках біомаси американських гібридів, узятих з лесоподібного суглинку, характер втрати маси був майже ідентичним (рис. 2). Вирощування гібридів Медове і Зубр дає змогу отримати максимальну кількість біоетанолу на лесоподібних суглинках, інших гібридів – на насипному шарі чорнозему.

Дослідження процесів термолізу біомаси українських і американських культиварів сорго цукрового виявило і схожість, і відмінність за трьома показниками (втрата маси, швидкість процесів розкладання, тепловий ефект). Спостерігали досить повільне зниження маси в інтервалі температур 20–270  $^\circ\text{C}$ .

Втрата маси у межах температур 275–335  $^\circ\text{C}$  була швидкою через високу швидкість процесів розкладання геміцелюлози та целюлози і становила 35–38 %. На останньому етапі втрата маси була рівномірною на невеликих швидкостях. В українських гібридів Медове, Зубр та Покровське перший та останній етапи втрачання маси суттєво не відрізнялися від американських

гібридів. На другому та третьому етапах маса втрачалася швидше, ніж в американських гібридів. Зразки сорту Сілосне-42 зі згорянням втрачали масу досить швидко та рівномірно на всіх етапах термічної деструкції, яка закінчилась за температури 420–430  $^\circ\text{C}$ . Тривалість термолізу інших гібридів була значно більшою. В інших українських культиварів розкладання біомаси закінчилося за температур 530–550  $^\circ\text{C}$ , у американських гібридах – за температур 550–570  $^\circ\text{C}$ . Найбільш повне згоряння біомаси спостерігали у зразках гібридів Покровське та SS506, найменш повне – у зразках гібридів G1990 та Sioux. На насипному шарі чорнозему різниці в характері втрачання маси всередині сортових груп майже не було (рис. 3). У зразках групи українських культиварів швидкість втрати маси збільшилася на більш ранніх етапах за температур 170–175  $^\circ\text{C}$ , тоді як зразки американських гібридів почали швидко втрачати масу лише за температур 230–240  $^\circ\text{C}$ . Тривалість термолізу на чорноземі була довшою, ніж на лесоподібному суглинку,

й становила 40–50 °С – 550–580 °С в українських культиварів та 50–60 °С – 550–590 °С в американських. Найбільш повне згоряння спосте-

рігали у гібридів Покровське, Медове, Mohawk, сорту Силосне-42, та найменш повне – у гібрида Sioux.

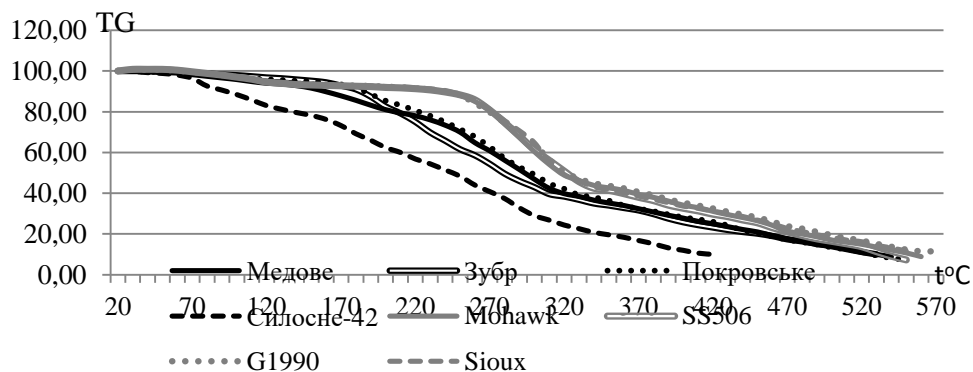


Рис. 2. Втрата маси на лесоподібному суглинку

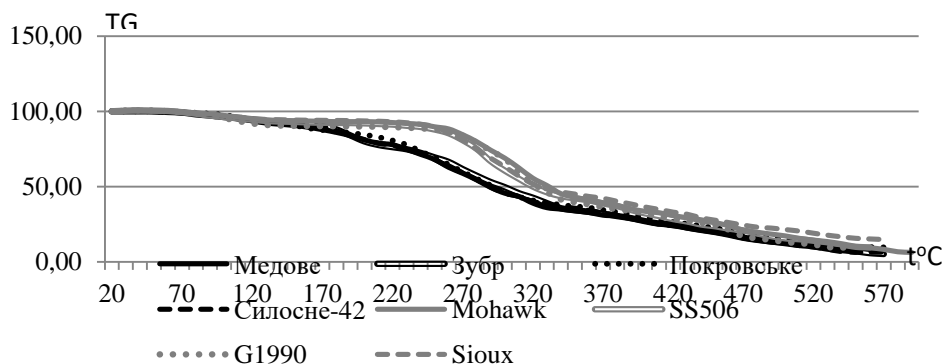


Рис. 3. Втрата маси на насипному шарі чорнозему

Серед американських гібридів, що зростали на лесоподібному суглинку, особливої різниці у проходженні процесів термолізу не виявлено. Лише швидкість розкладання целюлози

у гібрида Sioux була вища, ніж у інших культиварів групи, що добре простежується на кривих DTG (рис. 4).

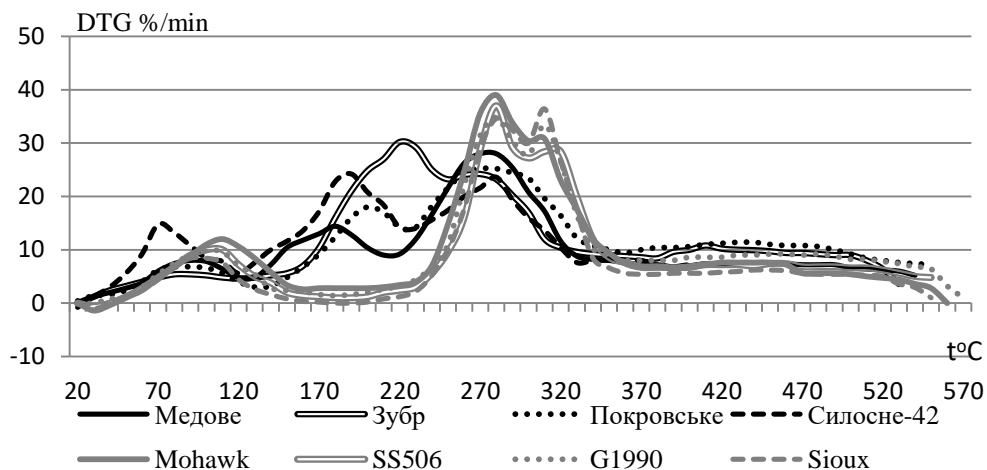


Рис. 4. Швидкість проходження етапів термічної деструкції біомаси сорго на лесоподібному суглинку

Швидкості розкладання геміцелюлози та целюлози у зразках українських гібридів були нижчими, ніж в американських. Крім того, ці процеси проходили в інтервалах більш низьких температур. Особливо це стосується гібрида Покровське та сорту Силосне-42. Проходження останнього етапу розкладання лігніну та утворення неспаленого залишку суттєво не відрізнялися між усіма дослідженими гібридами. На чорноземі у гібридів SS506, G1990 та Sioux процес розкладання геміцелюлози був зміщений у бік

вищих температур, тому на кривих DTG спостерігали лише один пік у температурах – 280–310 °C (рис. 5). У гібрида Mohawk геміцелюлоза та целюлоза розкладалися за вищих температур, тому піки деструкції були в діапазоні 290–320 °C.

Порівняно з американськими, в українських гібридів, так само як у досліді на лесоподібному суглинку, процеси розпаду основних компонентів біомаси проходили в зоні більш низьких температур. Швидкість процесів також була нижчою.

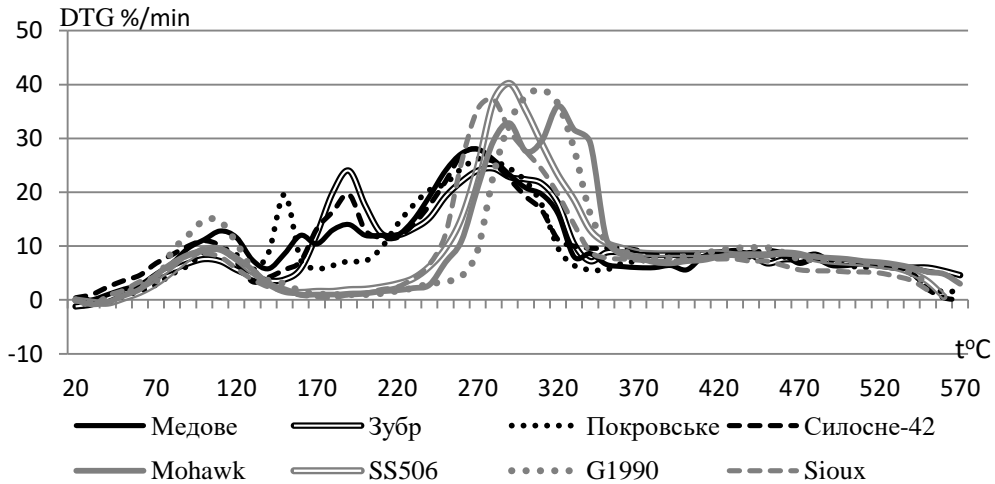


Рис. 5. Швидкість проходження етапів термічної деструкції біомаси сорго на чорноземі

Процес термічного розкладання біомаси сорго – це низка хімічних реакцій, які супроводжуються витратою або виділенням енергії [4]. Перший етап термолізу розкладання легколетких компонентів та випаровування води – це переважно ендотермічні реакції з відповідними тепловими

ефектами, що представлені на кривих DTA (рис. 6 та 7). На лесоподібному суглинку найбільше проявилися ендотермічні ефекти в сорту Силосне-42, а в гібридів Зубр та Покровське вони були майже непомітними.

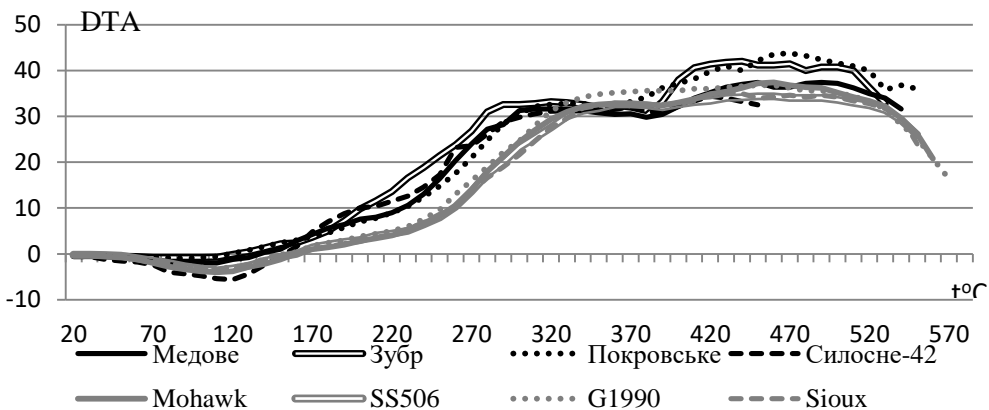


Рис. 6. Термічні ефекти термолізу біомаси сорго на лесоподібному суглинку

Етапи розкладання основних компонентів біомаси геміцелюлози, целюлози та лігніну являли собою екзотермічні реакції з найвищими тепловими ефектами в зоні температур 300–370 °C та 400–520 °C. Хімічні реакції деструкції зразків українських гібридів характерні більшим виділенням енергії, ніж деструкція зразків американських гібридів.

На насипному шарі чорнозему термічні ефекти проходження хімічних реакцій були дуже схожі в усіх досліджених гібридів. Можна лише зауважити, що в гібридах Покровське та G1990 реакції розкладання лігніну супроводжувались більш вираженими тепловими ефектами.

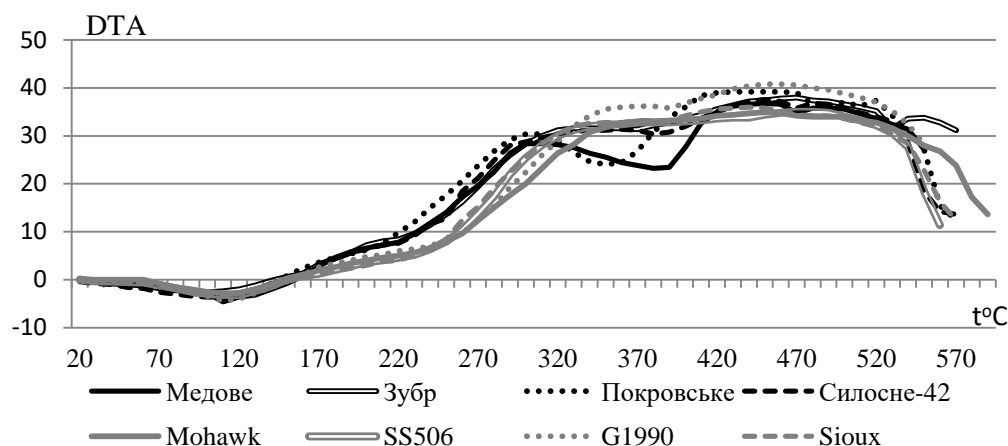


Рис. 7. Термічні ефекти термолізу біомаси сорго на чорноземі

**Висновки.** Теоретична врожайність етанолу для високопродуктивних гібридів (Зубр, Медове, Mohawk, SS506) становила 2500–3600 л га<sup>-1</sup>, а для малопродуктивного гібрида Sioux і сорту Силосне – 42 – 705 – 1600 л га<sup>-1</sup>.

Термоліз сухої біомаси сорго відбувався в діапазоні температур від 20–50 °С до 530–590 °С. У біомасі американських гібридів стадія випаровування води та видалення легких компонентів проходила в інтервалі вищих температур. Серед культиварів у зоні деструкції геміцелюлози найбільшу реакційну здатність зафіксували американські гібриди, тоді як процес розкладання целюлози найактивніше відбувався в українських культиварів. Для руйнування молекулярних зв'язків на стадії деградації основних компонентів біомаси американських гібридів потрібна більша кількість енергії, ніж українських, що свідчить про вищу термостійкість їх біомаси. Найбільш повне згоряння біомаси (крім Покровського, SS506 та Sioux) спостерігали на чорноземах.

Отримані результати оцінки теоретичного врожаю етанолу та процесів термолізу багаси дали змогу виявити деякі американські та українські культивари для вирощування на двох типах рекультивованих земель.

#### Бібліографічний список

1. Almorades A., Hadi M. R. Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African Journal of Agricultural Research*. 2009. No 4 (9). P. 772–780.
2. Ameen A., Yang X., Chen F., Tang C., Du F., Fahad S., Xie G. H. Biomass Yield and Nutrient Uptake of Energy Sorghum in Response to Nitrogen Fertilizer Rate on Marginal Land in a Semi – Arid Region. *BioEnergy Research*. 2017. No 10 (2). P. 363–367. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9804-5>.
3. Borůvka L., Vacek O., Jehlička J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils. *Geoderma*. 2005. No 128 (3–4). P. 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.010>.

4. Dhyani V., Kumar J., Bhaskar T. Thermal decomposition kinetics of sorghum straw via thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*. 2017. No 245. P. 1122–1129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.189>.

5. Ekefre D. E., Mahapatra A. K., Latimore J. M., Bellmer D. D., Jena U., Whitehead G. J., Williams A. L. Evaluation of three cultivars of sweet sorghum as feedstocks for ethanol production in the Southeast United States. *Heliyon*. 2017. No 3. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.20e00490>.

6. Fu H. M., Meng F. Y., Molatudi R. L., Zhang B. G. Sorghum and Switchgrass as Biofuel Feedstocks on Marginal Lands in Northern China. *Bioenerg. Res*. 2016. No 9 (2). P. 633–642. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9704-0>.

7. Holou R. A., Stevens G. Juice, sugar, and bagasse response of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench cv. M81E) to N fertilization and soil type. *GCB Bioenergy*. 2012. 4. P. 302–310. doi: 10.1111/j.1757 – 1707.2011.01126.x.

8. Kharytonov M. M., Babenko M. H., Mytsyk O. O., Gavryushenko O. O., Martynova N. V. Physical-chemical and biological testing of phytomeliorated rocks of the Pokrov land reclamation Station. *Agrology*. 2018. No 1 (3). P. 300–305. <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.13010>.

9. Kharytonov M. M., Babenko M. G., Kozechko V. I., Martynova N. V., Hamandii V. L. Sweet sorghum raw material production on reclaimed lands. *Agrology*. 2021. No 4 (2). P. 77–84. doi: 10.32819/021010.

10. Kim M., Day D. F. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 2011. No 38 (7). P. 803–807. <https://doi.org/10.1007/s10295-010-0812-8>.

11. Mathur S., Umakanth A. V., Tonapi V. A., Sharma R., & Sharma M. K. Sweet sorghum as biofuel feedstock: recent advances and available resources. *Biotechnol Biofuels*. 2017. No 10. 146. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0834-9>.

12. Mehmood M. F., M. Ibrahim Rashid U., Nawaz M., Ali S., Hussain A., Gull G. Biomass production for bioenergy using marginal lands. *Sustainable Production and Consumption*. 2017. No 9. P. 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.08.003>.
13. Menéndez J., Loredó J. Reclamation of Degraded Landscape due to Open Pit Coal Mining: Biomass for Renewable Power Plants. *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2018. No 14. P. 251–255.
14. Navarro M. C., Pérez-Sirvent C., Martínez-Sánchez M. J., Vidal J., Tovar P. J., Bech J. Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration*. 2008. No 96 (2–3). P. 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2007.04.011>.
15. Reddy B. V. S., Ramesh S., Reddy P. S., Ramaiah, B., Salimath P. M., Rajashekar K. Sweet Sorghum – A Potential Alternate Raw Material for Bio-Ethanol and Bioenergy. *International Sorghum and Millets Newsletter*. 2005. No 46. P. 79–86. URL:00b4952bd0439abc7e000000.pdf.
16. Regassa T. H., Wortmann C. S. Sweet sorghum as a bioenergy crop: literature review. *Biomass Bioenergy*. 2014. No 64. 348–355. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.052>.
17. Ren L. T., Liu Z. X., Wei T. Y., Xie G. H. Evaluation of energy input and output of sweet sorghum grown as a bioenergy crop on coastal saline-alkali land. *Energy*. 2012. No 47. P. 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.024>.
18. Rutto L. K., Xu Y., Brandt M., Ren Sh., Kering M. K. Juice, Ethanol, and Grain Yield Potential of Five Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Cultivars. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. 2013. No 3. P. 113–118. <http://dx.doi.org/10.4236/jsbs.2013.32016>.
19. Sheoran V., Sheoran A. S., Poonia P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*. 2010. No 3 (2), Art. 13. <http://scholarworks.umass.edu/intljssw/vol3/iss2/13>.
20. Shoemaker C., Bransby D. I. The role of sorghum as a bioenergy feedstock. In: *Sustainable alternative fuel feedstock opportunities, challenges and roadmaps for six US regions*. 2010. Chapter 9. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society. P. 149–159.
21. Taylor J. R. N., Schober T. J., Bean S. R. Novel food and non-food uses for sorghum and millets. Review. *Journal of Cereal Science*. 2006. No 44 (3). P. 252–271. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.009>.
22. Wortmann C. S., Liska A. J., Ferguson R. B., Lyon D. J., Klein R. N., Dweikat I. Dryland Performance of Sweet Sorghum and Grain Crops for Biofuel in Nebraska. *Agronomy Journal*. 2010. No 102 (1). P. 319–326. doi:10.2134/agronj2009.0271.

Стаття надійшла 05.06.2023