

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА З БУРЯКОВОГО ЖОМУ

Івашук О.С. к.т.н., с.н.с., доцент, Атаманюк В.М. д.т.н., професор,

Чижович Р.А. аспірант, Манастирська В.А. студент,

Собечко І.Б. д.х.н., доцент

Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів

Анотація. У даній роботі представлено результати досліджень щодо можливості виготовлення альтернативного брикетованого твердого палива з бурякового жому, що сприятиме утилізації відходів цукрового виробництва та раціональному використанню природних ресурсів. Для збільшення терміну зберігання вторинної сировини та можливості подальшого формування альтернативного твердого палива, буряковий жом попередньо було осушено методом фільтраційного сушіння. За допомогою методу калориметричного спалювання було досліджено основні показники дослідного матеріалу: вміст води, вміст золи та теплота згорання. Визначено, що для несформованої рослинної сировини теплотворна здатність становить ≈ 15900 кДж/кг, вологість $< 1\%$ мас., зольність $\approx 4,3\%$ мас. Одержані результати показали доцільність подальших досліджень щодо створення брикетованих твердопаливних зразків із осушеного бурякового жому. Встановлено, що одержані за допомогою гідравлічного пресу брикети мають теплотворну здатність ≈ 16318 кДж/кг, вологість $< 1\%$ мас., зольність $\approx 4,8\%$ мас. Виготовлені твердопаливні брикети з бурякового жому за своїми параметрами близькі до існуючих європейських стандартів щодо твердого палива. Отримані результати вказують на перспективність використання бурякового жому як альтернативного твердого палива, що дозволить знизити залежність від традиційних повільновідновлювальних паливних ресурсів і забезпечити додаткове використання великих об'ємів відходів цукрової промисловості, що сприятиме раціональному використанню вторинної рослинної сировини.

Ключові слова: альтернативне тверде паливо, буряковий жом, біомаса, вторинна сировина, брикети, раціональне природокористування.

Вступ. Цукровий буряк є другим за значимістю джерелом цукру у світі після цукрової тростини і вирощується приблизно в 57 країнах-виробниках цукру [1]. У 2009 році приблизно 20 % світового виробництва цукру (153,4 млн тон) було отримано з цукрового буряка [1].

Буряковий жом – це кормовий відхід цукробурякового виробництва, що утворюється після видалення соку з бурякової стружки, становить основну частину відходів цукрового виробництва. З однієї тони буряків на суху масу можна отримати приблизно 130 кг цукру та 50 кг сушеного жому [1]. Зважаючи на значні щорічні обсяги переробки цукрових буряків в Україні, обсяг бурякового жому є величезним – навіть під час російської збройної агресії, обсяги врожаю цукрового буряка були на рівні ≈ 10 млн. тон у 2023 році [2].

Буряковий жом, як і більшість відходів рослинного походження харчової промисловості [3–5], володіє надлишковою вологістю ($< 65\%$ мас.), що призводить до його швидкого псування. На сьогодні висушують приблизно 9 % від загального обсягу жому, і не всі цукрові заводи обладнані сушильними установками та пресами глибокого віджиму, тому більша його частина направляється у жомосховища. Тривале зберігання неосушеного жому не тільки призводить до втрати поживних речовин, але й погіршує екологічну ситуацію навколо заводу [6, 7].

Один із основних традиційних напрямків застосування свіжого бурякового жому – його використання як корм у тваринництві [6, 8]. На одну тонну перероблених буряків можна отримати приблизно 50 кг сухого жому, що містить $48\div 50\%$ пектинових речовин, $22\div 25\%$ целюлози, $21\div 23\%$ геміцелюлози, $1,8\div 2,5\%$ азотистих речовин, $0,8\div 1,3\%$ золи, $0,15\div 0,20\%$ цукру, а також органічні кислоти, вітаміни та мікроелементи [9]. Пектинові речовини з бурякового жому можуть бути використані у виробництві харчових волокон, що додаються до хліба, печива, спагеті та м'ясних продуктів [10].

Після ензиматичної або хімічної обробки пектин з жому може бути перетворений на пектин-олігосахариди, які мають пребіотичні властивості [11]. Ще одним важливим вуглеводом у пектині буряка є арабінан, який також може використовуватись як пребіотик [12].

Буряковий жом є перспективною сировиною для виробництва біоетанолу, який є альтернативним джерелом відновлюваної енергії. Використання бурякового жому для біоетанолу не вимагає складної підготовки, оскільки цукровий буряк, може бути безпосередньо перетворений в етанол. Це робить процес менш енергозатратним порівняно з іншими видами сировини, такими як крохмалісті або лігноцелюлозні матеріали [9, 13, 14].

Також існують дослідження щодо використання бурякового жому як зв'язуючого компонента у вугільних брикетах [15, 16]. Додавання жому підвищує міцність на стиск та зменшує вміст летких речовин. Отри-

мані брикети мають трохи меншу теплотворну здатність, ніж брикети без додавання рослинної сировини, але вона залишається в допустимих межах.

Загалом, буряковий жом як відхід цукрової промисловості вважається цінним ресурсом з погляду концепції циркулярної економіки [17].

З урахуванням позитивного результату використання відходів харчової промисловості рослинного походження [3–5] та свідчень про успішне застосування бурякового жому як в'язучого компонента у альтернативному твердому паливі [15, 16], доцільним було проведення досліджень з використання бурякового жому для виробництва альтернативного твердого палива.

Експериментальна частина. Об'єктом дослідження був буряковий жом, отриманий на виробничій лінії локального цукрового заводу у Львівській області України (рис. 1). Для збільшення терміну зберігання вторинної сировини та можливості подальшого формування альтернативного твердого палива, дослідний матеріал було осушено методом фільтраційного сушіння на експериментальній установці згідно методики [18], зважаючи на переваги даного методу [18] для збільшення тривалості зберігання сировини [3–5].

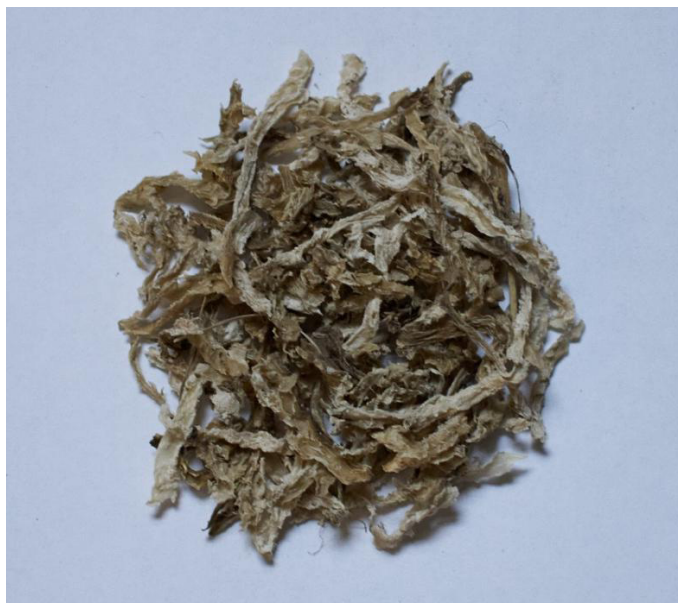


Рис. 1 – Осушений буряковий жом

Три основні показники дослідного матеріалу були визначені методом калориметричного спалювання: вміст води, вміст золи та теплота згорання. Всі ці вимірювання проводилися відповідно до Державних стандартів України [19–21]. Детально методику проведення калориметричних досліджень наведено у роботі авторів [4].

Формування твердопаливних брикетів з висушеного бурякового жому здійснювали за допомогою гідровлічного пресу марки П474А. Пресування дослідного матеріалу проводили за тиску 100 кгс/см² за температури 150 °С та рекомендаціями [3–5].

Результати та обговорення. Дослідні суміші для формування зразків твердого палива готували з попередньо висушеного бурякового жому з вмістом води ~9,81 % (рис. 1).

Враховуючи неоднорідність вторинної рослинної сировини для визначення середнього значення параметрів досліджуваного об'єкта проводили три паралельні експерименти. Результати калориметричних досліджень осушеного бурякового жому представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати експериментального визначення вищої теплотворної здатності осушеного бурякового жому

№ експ.	m^* , г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,		Зольність, % мас.
						кДж/кг	ккал/кг	
1	0,38585	0,59024	76,3	4,7	111,5	15908	3802	4,0
2	0,19735	0,29960	79,2	3,0	132,8	15965	3816	5,1
3	0,21821	0,33620	75,2	1,2	50,0	15826	3782	3,8
Середнє значення:						15900	3800	4,3

* m – маса речовини, яка згоріла за час досліді; q_n , q_{HNO_3} , q_c – кількість енергії, яка виділялась при згорянні бавовняної нитки (16704,2 Дж/г), утворенні розчину нітратної кислоти (59 Дж/г) та утворенні сажі (32800 Дж/г), відповідно; ΔT – істинне зростання температури у калориметричному досліді [4].

Порівнюючи отримані експериментальні дані калориметрії спалювання дослідних зразків бурякового жому (табл. 2), помітно, що значення вищої теплотворної здатності дещо менші за показники для енергетичної верби та міскантуса, які широко використовуються у промисловому виробництві твердопаливних брикетів з відновлювальної рослинної сировини [22, 23]. Також для порівняння наведені характеристики рослинної сировини, що була досліджена авторами раніше [3–5]. Незважаючи на це, буряковий жом залишається перспективною сировиною для виготовлення твердопаливних брикетів, оскільки його енергетичні характеристики знаходяться в межах європейських стандартів, що висуваються до твердого палива [24] і, таким чином, є достатніми для ефективного використання у паливній промисловості.

Таблиця 2

Значення вищої теплотворної здатності об'єктів дослідження та їх аналогів

Сировина рослинного походження	Осушений кавовий шлам	Осушена пивна дробина	Осушена кукурудзяна післяспиртова барда	Енергетична верба	Міскантус	Осушений буряковий жом
Теплотворна здатність, кДж/кг	≈ 21583	≈ 20005	≈ 19545	≈ 17600	≈ 17500	≈ 15900

Для формування зразків твердопаливних брикет було використано гідравлічний прес марки П474А. Приклад одержаного твердопаливного брикету з бурякового жому наведено на рис. 2. З урахуванням високого вмісту лігніну, пресування відбувалося без додавання додаткових в'язучих речовин, що є додатковою перевагою при формуванні твердого палива.

**Рис. 2 – Зразок брикетованого альтернативного твердого палива з осушеного бурякового жому**

Дані результатів дослідження вищої теплотворної здатності та зольності зразків, виготовлених із бурякового жому, наведено у табл. 3. Вологість усіх брикетованих зразків становила <1% мас.

Таблиця 3

Результати експериментального визначення вищої теплотворної здатності за даними калориметрії спалювання зразків твердопаливних брикет з осушеного бурякового жому

№ експ.	m, г	ΔT , В	$q_{нз}$, Дж	$q_{нз03}$, Дж	$q_{сз}$, Дж	Q,		Зольність, % мас.
						кДж/кг	ккал/кг	
1	0,66682	1,0450	77,5	7,7	168,9	16343	3906	4,7
2	0,58597	0,91697	83,9	5,9	144,3	16286	3892	5,0
3	0,93860	1,4664	76,8	8,9	234,5	16325	3902	4,8
Середнє значення:						16318	3900	4,8

Як видно з даних, наведених у табл. 1 та 3, значення вищої теплотворної здатності брикетованого палива з бурякового жому є дещо вищим, ніж у несформованого висушеного матеріалу. Це, найімовірніше, пов'язано зі збільшенням густини брикетів та додаткової втрати вологи під час пресування за підвищеної температури.

Одержані твердопаливні брикети з бурякового жому за своїми параметрами практично відповідають німецькому стандарту DIN 51731: вміст води (<12 %), вміст золи (<1,5 %), теплотворна здатність (15512÷19515 кДж/кг) [24]. В той час як вологість та вища теплотворна здатність зразків знаходяться у встановлених межах, значення зольності виготовлених зразків твердого палива з бурякового жому перевищують верхню межу стандарту. Невідповідність стандартам можна регулювати, створюючи композитні брикети – поєднуючи буряковий жом з іншими видами біомаси для досягнення оптимальних характеристик брикетів.

ваного твердого палива.

Висновки. В результаті досліджень було отримано готові до використання зразки твердого палива з бурякового жому, які характеризуються високою теплотворною здатністю, низькою зольністю та екологічною чистотою. За результатами дослідження теплотворна здатність складала ≈ 16318 кДж/кг, вологість < 1 % мас., а зольність — 4,8 % мас. Одержані зразки відповідають вимогам існуючих стандартів до твердого палива, за виключенням підвищеної зольності. Дану невідповідність можна регулювати шляхом створення композитних твердопаливних брикетів, поєднуючи буряковий жом з іншими видами біомаси для досягнення оптимальних характеристик.

Отримані результати вказують на перспективність використання бурякового жому як альтернативного твердого палива. Зокрема, це дозволить знизити залежність від традиційних повільновідновлювальних паливних ресурсів і покращити екологічну ситуацію.

Виготовлення альтернативного твердого палива з бурякового жому забезпечує додаткове використання великих об'ємів відходів цукрової промисловості, що сприяє раціональному використанню вторинної рослинної сировини. Додатковою перевагою є низька вартість вихідної сировини, що вказує на економічні перспективи. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку оптимальних композитних складів для досягнення відповідності стандартам, що висуваються до твердого палива, а також розрахунок енергозатрат на осушення бурякового жому для оцінки економічної ефективності.

References

1. Misra, V., & Shrivastava, A. K. (2022). Understanding the sugar beet crop and its physiology. *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing*, 11–25. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_2
2. Zhnyva-2023: V Ukraini namolocheno 71,5 mln tonn oliinykh ta zernovykh kultur. Ministerstvo ahraimoi polityky ta prodovolstva Ukrainy. [Harvest-2023: Ukraine harvested 71.5 million tonnes of oilseeds and grains. Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine.]. (2023, November 10). <https://minagro.gov.ua/news/zhnyva-2023-v-ukraini-namolocheno-715-mln-tonn-oliinykh-ta-zernovykh-kultur>
3. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Duleba, V. P., & Sobechko, I. B. (2022). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(2), 216–221. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.256749>
4. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Zhrebetskyi, R. R., & Sobechko, I. B. (2022). Preparation of an alternate solid fuel from alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 54–59. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-140-1-54-59>
5. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., & Sobechko, I. B. (2022). Using coffee production waste as a raw material for solid fuel. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(4), 588–594. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i4.265116>
6. Semenova, O. I., Bubliienko, N. O., & Vitiuk, O. I. (2013). Suchasni napriamky vykorystannia ta utylizatsii buriakovoho zhomu [Modern ways of using and utilising beet pulp]. *Efektivni Nastroje Modernich Ved – 2013 : Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*, 27.04. – 05.05.2013., 10–12. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/180c2d96-4ec7-4bfd-ad13-19349fc8aaaa/content>
7. Muir, B.M., Anderson, A.R. Development and Diversification of Sugar Beet in Europe. *Sugar Tech*, 24, 992–1009 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01036-9>
8. Joanna, B., Michal, B., Piotr, D., Agnieszka, W., Dorota, K., & Izabela, W. (2018). Sugar beet pulp as a source of valuable biotechnological products. *Advances in Biotechnology for Food Industry*, 359–392. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811443-8.00013-x>
9. Zheng, Y., Lee, C., Yu, C., Cheng, Y.-S., Zhang, R., Jenkins, B. M., & VanderGheynst, J. S. (2013). Dilute acid pretreatment and fermentation of sugar beet pulp to ethanol. *Applied Energy*, 105, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.070>
10. Yapo, B.M., Gnakri, D. (2015). Pectic Polysaccharides and Their Functional Properties. In: Ramawat, K., Mérillon, J.M. (eds) *Polysaccharides*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0_62
11. Prandi, B., Baldassarre, S., Babbar, N., Bancalari, E., Vandezande, P., Hermans, D., Bruggeman, G., Gatti, M., Elst, K., & Sforza, S. (2018). Pectin oligosaccharides from sugar beet pulp: Molecular characterization and potential prebiotic activity. *Food & Function*, 9(3), 1557–1569. <https://doi.org/10.1039/c7fo01182b>
12. Al-Tamimi, M. A. H. M., Palframan, R. J., Cooper, J. M., Gibson, G. R., & Rastall, R. A. (2006). In vitro fermentation of sugar beet Arabinan and Arabino-oligosaccharides by the human Gut Microflora. *Journal of Applied Microbiology*, 100(2), 407–414. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02780.x>
13. Mojovic, L., Pejin, D., Grujic, O., Markov, S., Pejin, J., Rakin, M., Vukasinovic, M., Nikolic, S., & Savic, D. (2009). Progress in the production of bioethanol on starch-based feedstocks. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 15(4), 211–226. <https://doi.org/10.2298/ciceq0904211m>
14. Gumienka, M., Szambelan, K., Jeleń, H., & Czarnecki, Z. (2014). Evaluation of ethanol fermentation parameters for bioethanol production from Sugar Beet Pulp and juice. *Journal of the Institute of Brewing*. <https://doi.org/10.1002/jib.181>

15. Zarringhalam-Moghaddam, A., Gholipour-Zanjani, N., Dorosti, S., & Vaez, M. (2011). Physical properties of solid fuel briquettes from bituminous coal waste and biomass. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 17(4), 434–438. <https://doi.org/10.1007/s12404-011-0415-7>
16. Zanjani, N. G., Moghaddam, A. Z., & Dorosti, S. (2013). Physical and chemical properties of beet pulp/mezino bituminous coal briquettes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(22), 2173–2180. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.532188>
17. Usmani, Z., Sharma, M., Diwan, D., Tripathi, M., Whale, E., Jayakody, L. N., Moreau, B., Thakur, V. K., Tuohy, M., & Gupta, V. K. (2022). Valorization of sugar beet pulp to value-added products: A Review. *Bioresource Technology*, 346, 126580. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126580>
18. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrskaya, V., Barabakh, S., & Hnativ, Z. (2024). Kinetic regularities of the filtration drying of barley brewer's spent grain. *Chemistry & Chemical Technology*, 18(1), 66–75. <https://doi.org/10.23939/chcht18.01.066>
19. State Standart of Ukraine "Solid biofuels. Determination of moisture content. Drying method in a drying oven. Total moisture" [Tverde biopalyvo. Vyznachennya vmistu volog. Metod vysushuvannya u sushilnij shafi. Zagalna vologa] (DSTU EN 14774-2:2013). (2013).
20. State Standart of Ukraine "Solid biofuels. Method for determination of ash content" [Biopalyvo tverde. Metod vyznachennya vmistu zoly] (DSTU ISO 18122:2017). (2017).
21. State Standart of Ukraine "Solid biofuels. Method for determining the calorific value" [Biopalyvo tverde. Metod vyznachennya teplotvirnoyi zdatsnosti] (DSTU EN 14918:2016). (2016).
22. Khivrych, O. B., Kvak, V. M., Kas'kiv, V. V., Mamajsur, V. V., & Makarenko, A. S. (2011). Energetychni roslyny yak alternatyva tradycijnym vydam palyva [Energy plants as an alternative to traditional fuels]. *Agrobiologiya*, 6, 153–156. http://nbuv.gov.ua/UJRN/agr_2011_6_39
23. Malyovanyi, M.S., & Bat', R.Y. (2012). Hranuliuvannya pavyvnykh materialiv [Fuels pelleting]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/8(59), 10–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.4599>
24. Garcia-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for Pellet Quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537–3540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.013>

RESEARCH ON THE ALTERNATIVE SOLID FUEL PRODUCTION FROM BEET PULP

**Ivashchuk O.S. PhD, Senior Research Fellow, Associate Professor, Atamanyuk V.M. DSc, Professor,
Chyzhovych R.A. Post-graduate Student, Manastyrskaya V.A. Student,
Sobechko I.B. DSc, Associate Professor
Lviv Polytechnic National University, Lviv**

Abstract. This paper presents the results of studies on the possibility of producing alternative briquetted solid fuel from beet pulp, which will contribute to the utilization of sugar production waste and the rational use of natural resources. To increase the shelf life of secondary raw materials and the possibility of further forming an alternative solid fuel, beet pulp was pre-dried by filtration drying. Using the calorimetric combustion method, the main parameters of the experimental material were investigated: moisture content, ash content and calorific value. It was determined that for unformed plant material, a calorific value is about 15900 kJ/kg, a moisture content is less than 1% wt., and an ash content is about 4.3 % wt. The obtained results showed the feasibility of further research on the creation of briquetted solid fuel samples from the dried beet pulp. It was found that the produced with the hydraulic press briquettes have the calorific value of about 16318 kJ/kg, the moisture content less than 1% wt., and the ash content about 4.8 % wt. The developed solid fuel briquettes from beet pulp are close in their parameters to the existing European standards for solid fuels. The results obtained indicate the prospects of using beet pulp as an alternative solid fuel, which will reduce dependence on traditional slowly renewable fuel resources and ensure additional use of large volumes of sugar industry waste, which will contribute to the rational use of secondary plant materials.

Keywords: alternative solid fuel, beet pulp, biomass, secondary raw materials, briquettes, rational environmental management.

Список використаних джерел

1. Misra, V., & Shrivastava, A. K. (2022). Understanding the sugar beet crop and its physiology. *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing*, 11–25. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_2
2. Жнива-2023: В Україні намоложено 71,5 млн тон олійних та зернових культур. Міністерство аграрної політики та продовольства України. (2023, 10 листопада). <https://minagro.gov.ua/news/zhnyva-2023-v-ukraini-namolocheno-715-mln-tonn-oliinykh-ta-zernovykh-kulturn>
3. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Duleba, V.P., & Sobechko, I. B. (2022). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(2), 216–221. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.256749>

4. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Zhrebetskyi, R. R., & Sobechko, I. B. (2022). Preparation of an alternate solid fuel from alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 54–59. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-140-1-54-59>
5. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., & Sobechko, I. B. (2022). Using coffee production waste as a raw material for solid fuel. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(4), 588–594. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i4.265116>
6. Семенова, О. І., Бублиєнко, Н. О. & Вітюк, О. І. (2013). Сучасні напрямки використання та утилізації бурякового жому. *Efektivni Nastroje Modernich Ved – 2013: Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції*, 27.04. – 05.05.2013., 10–12. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/180c2d96-4ec7-4bfd-ad13-19349fc8aaaa/content>
7. Muir, B.M., Anderson, A.R. Development and Diversification of Sugar Beet in Europe. *Sugar Tech*, 24, 992–1009 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01036-9>
8. Joanna, B., Michal, B., Piotr, D., Agnieszka, W., Dorota, K., & Izabela, W. (2018). Sugar beet pulp as a source of valuable biotechnological products. *Advances in Biotechnology for Food Industry*, 359–392. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811443-8.00013-x>
9. Zheng, Y., Lee, C., Yu, C., Cheng, Y.-S., Zhang, R., Jenkins, B. M., & VanderGheynst, J. S. (2013). Dilute acid pretreatment and fermentation of sugar beet pulp to ethanol. *Applied Energy*, 105, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.070>
10. Yapo, B.M., Gnagri, D. (2015). Pectic Polysaccharides and Their Functional Properties. In: Ramawat, K., Mérillon, J.M. (eds) *Polysaccharides*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0_62
11. Prandi, B., Baldassarre, S., Babbar, N., Bancalari, E., Vandezande, P., Hermans, D., Bruggeman, G., Gatti, M., Elst, K., & Sforza, S. (2018). Pectin oligosaccharides from sugar beet pulp: Molecular characterization and potential prebiotic activity. *Food & Function*, 9(3), 1557–1569. <https://doi.org/10.1039/c7fo01182b>
12. Al-Tamimi, M. A. H. M., Palframan, R. J., Cooper, J. M., Gibson, G. R., & Rastall, R. A. (2006). In vitro fermentation of sugar beet Arabinan and Arabino-oligosaccharides by the human Gut Microflora. *Journal of Applied Microbiology*, 100(2), 407–414. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02780.x>
13. Mojovic, L., Pejin, D., Grujic, O., Markov, S., Pejin, J., Rakin, M., Vukasinovic, M., Nikolic, S., & Savic, D. (2009). Progress in the production of bioethanol on starch-based feedstocks. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 15(4), 211–226. <https://doi.org/10.2298/ciceq0904211m>
14. Gumienna, M., Szambelan, K., Jeleń, H., & Czarnecki, Z. (2014). Evaluation of ethanol fermentation parameters for bioethanol production from Sugar Beet Pulp and juice. *Journal of the Institute of Brewing*. <https://doi.org/10.1002/jib.181>
15. Zarringhalam-Moghaddam, A., Gholipour-Zanjani, N., Dorosti, S., & Vaez, M. (2011). Physical properties of solid fuel briquettes from bituminous coal waste and biomass. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 17(4), 434–438. <https://doi.org/10.1007/s12404-011-0415-7>
16. Zanjani, N. G., Moghaddam, A. Z., & Dorosti, S. (2013). Physical and chemical properties of beet pulp/mezino bituminous coal briquettes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(22), 2173–2180. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.532188>
17. Usmani, Z., Sharma, M., Diwan, D., Tripathi, M., Whale, E., Jayakody, L. N., Moreau, B., Thakur, V. K., Tuohy, M., & Gupta, V. K. (2022). Valorization of sugar beet pulp to value-added products: A Review. *Bioresource Technology*, 346, 126580. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126580>
18. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrskaya, V., Barabakh, S., & Hnativ, Z. (2024). Kinetic regularities of the filtration drying of barley brewer's spent grain. *Chemistry & Chemical Technology*, 18(1), 66–75. <https://doi.org/10.23939/chcht18.01.066>
19. Державний стандарт України “Тверде біопаливо. Визначення вмісту вологи. Метод висушування в сушильній шафі” (ДСТУ EN 14774-2:2013). (2013).
20. Державний стандарт України “Біопаливо тверде. Метод визначення вмісту золи” (ДСТУ ISO 18122:2017). (2017).
21. Державний стандарт України “Тверде біопаливо. Метод визначення теплотворної здатності” (ДСТУ EN 14918:2016). (2016).
22. Хіврич, О. Б., Квак, В. М., Каськів, В. В., Мамайсур, В. В., & Макаренко, А. С. (2011). *Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива*. 6, 153–157. http://nbuv.gov.ua/UJRN/agr_2011_6_39
23. Мальований, М. С., & Бать, Р. Я. (2012). Гранулювання паливних матеріалів. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/8(59), 10–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.4599>
24. García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for Pellet Quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537–3540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.013>

Отримано в редакцію 16.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 16.07.2024
Approved 25.09.2024