

СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗОВАНОГО ОТРИМАННЯ БІОЕТАНОЛУ З ВИРОБЛЕНИХ В УКРАЇНІ БУРЯКІВ ЦУКРОВИХ (2019-2023pp.)

Волоха М., д-р техн. наук, проф.,

<https://orcid.org/0000-0002-0112-7324>, e-mail: volmp@i.ua

Лазарчук М., здобувач PhD, ст. викладач,

<https://orcid.org/0000-0001-6192-6825>, e-mail: mlazarchuk@ukr.net

Лебедєва О., здобувач PhD, ст. викладач,

<https://orcid.org/0000-0003-1569-5987>, e-mail: meganom8@ukr.net

Грубич М., здобувач PhD, ст. викладач,

<https://orcid.org/0009-0003-9056-3826>, e-mail: Mariya.grubich@gmail.com

Шепель Г., ст. викладач,

<https://orcid.org/0000-0002-6993-5045>, e-mail: shepel.hanna.s@gmail.com

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Анотація

Підвищення енергетичної безпеки нашої країни в умовах воєнного стану та дефіциту вичерпних викопних джерел енергії тісно пов'язане з проблемою забезпечення альтернативними видами палива, у тому числі біоетанолом.

Метою досліджень є створення статистичної моделі для прогнозування валового отримання біоетанолу на основі даних загальної площі посіву та середньої урожайності буряків цукрових в Україні за останні п'ять років.

Матеріали і методи. Проаналізовано економетричні дані та перевірено на релевантність наукові видання; застосовувалися аналітичний і статистичний методи дослідження.

Результати. У статті наведений аналіз публікацій відомих дослідників із проблем отримання, зберігання та переробки різних видів джерел енергії. Відмічено, що біоетанол є найбільш технологічним видом біопалива в усьому світі. Встановлено, що в Україні одним із перспективних напрямків розвитку біоенергетики є відновлювальні джерела енергії переважно з цукрового буряка як найбільш привабливої і перспективної сільськогосподарської культури всупереч проблемам, що виникають при зберіганні та переробці коренеплодів, неякісно викопаних машинами.

Опрацьовані наукові статті та економетричні дані досліджувалися математично-статистичними методами задля вирішення важливої енергетичної проблеми – прогнозовано-обґрунтованого отримання біоетанолу з вироблених в Україні протягом останніх п'яти років буряків цукрових у випадку їхньої переробки на біопаливо. Визначено, що, наприклад, у 2023 році за площі посівів буряків цукрових 249,9 тис.га та середньої урожайності коренеплодів 52,5 т/га статистично прогнозований і достовірно підтверджений вихід біоетанолу становив 137,7 тис.т. Загалом в Україні протягом п'яти останніх років (2019-2023) можна було б отримати 487,8 тис.т біоетанолу, тобто важливість залучення бурякоцукрового сектору нашої країни у біоенергетику є незаперечною.

Ключові слова: статистична модель, регресійний аналіз, буряки цукрові, цукрова тростина, біоетанол, біопаливо.

Актуальність. Добути з копалин планети Земля вугілля, нафта та природний газ походять із мертвих організмів [Leonard et al., 2020] і, за даними багатьох дослід-

ників, наприклад [Jacobson et al., 2018], становлять більше 80% енергетичного балансу світу. Однак, враховуючи значну залежність промислового розвитку від

запасів викопного палива, цикл утворення якого становить мільйони років, таке паливо не є стійким ресурсом, що підтверджують австралійські та малазійські вчені в огляді про різні види джерел енергії [Mofijur et al., 2019]. Водночас викопні енергоресурси є однією з причин екологічних проблем [Yuan et al., 2022], оскільки вони не тільки сприяють викидам вуглекислого газу, посилюючи парниковий ефект, але й забруднюють повітря, погіршуючи стан здоров'я та рівень смертності людей [De Santis et al., 2022]. Тож з метою заміни традиційного викопного палива все більший інтерес, зокрема у вчених США і Індії [Kushwaha, Kumar & Verma, 2023], Ефіопії [Duraism, Salelgn & Bereketete, 2017] та інших країн, викликає розробка зеленої, екологічно чистої та стійкої біоенергетики на засадах сучасних нанотехнологій. Наразі між 175 країнами світу (Україною зокрема) замість Кіотського протоколу діє нова Кліматична Угода, підписана 22.04.2016 р. у Нью-Йорку, де щорічно передбачається виділяти \$100 млрд. для освоєння біоенергетики на базі відновлювальних джерел енергії, що зрештою у другій половині поточного століття призведе до уповільнення темпів зростання середньорічної температури та зменшення викидів парникових газів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найбільш продуктивною сировиною для виробництва біоетанолу на основі цукру та крохмалю (біопаливо першого покоління) в США є кукурудза [Swain & Mohanty, 2018], цукрова тростина – в Бразилії [Ayodele, Alsaffar & Mustapa, 2020], пшениця, цукрові буряки, ячмінь тощо – у Європі (рис. 1) [Li et al., 2022; Гелету́ха,

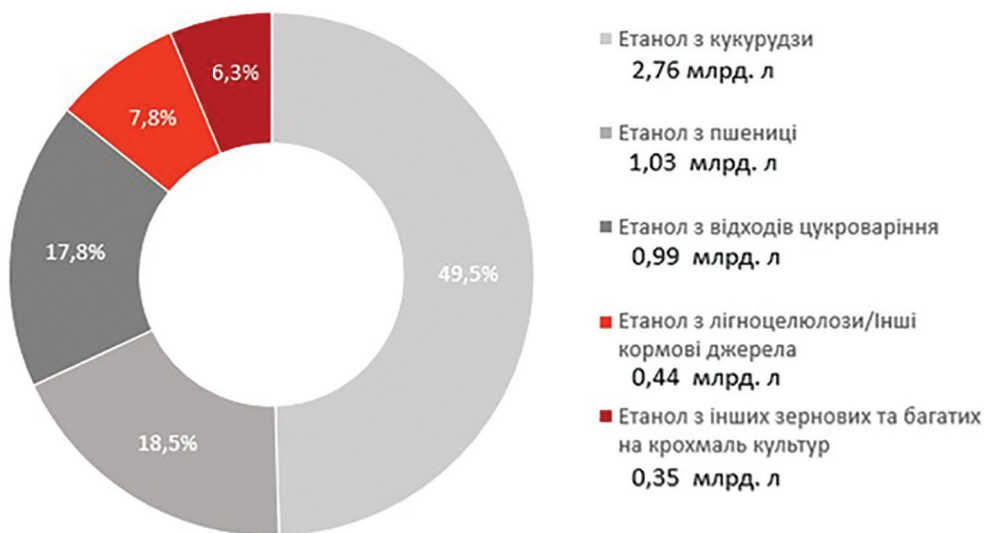


Рисунок 1 – Структура сировини для виробництва біоетанолу в Європі [Гелету́ха, Желєзна, 2023]

Желєзна, 2023].

Окрім вищезазначених сільськогосподарських культур, використовуються також сорго цукрове, цикорій, кормові буряки тощо, основним компонентом яких, на відміну від зернових і бобових, є не крохмаль, а прості моносахариди (глюкоза та фруктоза) й особливо дисахариди з незначним вмістом білка і жиру [Marzo et al., 2019]. Однак перелічені рослини передовсім є основою отримання продуктів харчування людей і кормів для тварин, їхнє вирощування пов'язане з конкуренцією за ґрунт [Pramanik et al., 2023], тому вчені з Індії, Ефіопії, Бразилії та США акцентують увагу на використанні для виробництва біопалива другого покоління лігноцелюлозної сировини, основні компоненти якої (целюлоза, геміцелюлоза) можуть бути відновлені термохімічними процесами [Krishna et al., 2023], чи багатої білком високопродуктивної промислової водорості *Picochlorum celeri* [LaPanse et al., 2024].

Основними джерелами сахарози для споживання людиною є дві основні цукрові культури: цукровий буряк (*Beta vulgaris* L.) та цукрова тростина (*Saccharum officinale* L.). Приблизно 80% сахарози надходить із цукрової тростини, яка вирощується переважно в тропічних і субтропічних країнах, а решта – 20%

— видобувається з буряків цукрових, які вирощуються переважно в країнах із помірним кліматом у північній півкулі. На початок поточного сторіччя сорок три країни у світі виробляли цукор із буряків цукрових, 71 — з цукрової тростини, 9 — із обох видів сировини [FAOSTAT, 2009].

Провідні світові експортери цукру США та Бразилія, де біопаливо виробляється з половини врожаю цукрової тростини, останніми роками значно прискорили розвиток цього виробництва. У цих країнах застосовуються суміші з відношенням до бензину 5,7% (США) та 10% (Бразилія) [Курило та ін., 2013]. За оцінками «International Energy Agency», країни ЄС теж використовують біоетанол як суміш до бензину, виробництво якого як пального та для хімічної промисловості збільшиться до 60 млрд літрів щорічно.

Українськими дослідниками встановлено, що для отримання максимального виходу біогазу енергетичні буряки цукрові слід збирати в період третьої декади вересня — другої декади жовтня. Саме в цей період, незважаючи на поступове зменшення загальної маси листового апарату, врожайність коренеплодів і розрахунковий вихід біогазу значно перевищують показники серпня-вересня. Максимальний вихід біогазу та енергії з буряків цукрових гібрида ІЦБ 0902 досягається за збирання у середині жовтня та становить 9,4 тис. м³/га і 204,3 МДж/га» [Хіврич та ін., 2022].

Відомо, що коренеплоди буряка цукрового складаються з 75% води і 25% сухої речовини з вмістом цукру від 12% до 20%, а за хімічним складом така сировина є досить привабливою для етанольного бродіння [Mofijur et al., 2019; Marzo et al., 2019]. Водночас установлено, що до зниження якості цукросировини призводить фізична забрудненість вороху коренеплодів, які збираються механізовано, адже засмічені та сильно пошкоджені коренеплоди знижують вихід та якість цукру [ДСТУ 4327:2013; Волоха, 2020].

За даними Біоенергетичної асоціації, Україна має значний потенціал біомаси,

доступний для виробництва рідких і газоподібних моторних біопалив. За оцінками 2021 року, цей потенціал для виробництва біоетанолу становить 0,86 млн. т нафтового еквіваленту на рік, а до 2050-го може збільшитися до 1,29 млн. т. В Україні функціонують 22 невеликі біоетанолові заводи, які загалом можуть виробляти близько 500 млн. л/рік. Блокада українських портів і проблеми з експортом аграрної продукції змінили ситуацію у напрямку переробки цієї продукції всередині країни. Враховуючи значне зменшення посівних площ буряків цукрових, одним із можливих напрямків є виробництво біоетанолу з зерна [Гелетуха, Железна, 2023].

Метою досліджень є створення статистичної моделі для прогнозування валового отримання біоетанолу на основі даних загальної площі посіву та середньої урожайності буряків цукрових в Україні за останні п'ять років.

Матеріали і методи. Проаналізовано економетричні дані та перевірено на релевантність наукові видання; застосовувалися аналітичний і статистичний методи дослідження.

Результати дослідження. Поданий у вигляді таблиці Excel вихід біоетанолу у (y_p — розрахунковий, y_n — прогнозований) з м'яси буряків цукрових загалом по країні у 2019-2023 рр. залежить від таких основних змінних (техніко-економічних факторів) (табл. 1):

x_1 — загальна площа посіву, тис. га;

x_2 — середня урожайність, т/га.

Після обробітку даних рівняння багатовимірної лінійної регресії

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2$$

матиме вигляд:

$$y = -263,0674576 + 0,530130474x_1 + 5,111114103x_2,$$

а графік залежності $y = f(x_1, x_2)$ представлений на рисунку 2.

Обговорення. На високу якість запропонованої в цій роботі моделі вказує тіс-

Таблиця 1 – Вихідні дані та обчислені показники

Роки	Площа посіву*, тис. га	Середня урожайність*, т/га	Розрахунковий вихід біоетанолу*, тис. т	Коефіцієнти b_0, b_1, b_2	Прогнозований вихід біоетанолу, тис. т
	x_1	x_2	y_p	Coefficients	y_n
2019	218,7	44,8	81,6	-263,0674576 0,530130474 5,111114103	81,84998883
2020	215,0	42,3	72,2		67,11072082
2021	226,0	46,3	85,4		93,38661244
2022	178,0	54,1	108,1		107,8070397
2023	249,9	52,5	140,6		137,7456382
	200,0	50,0			98,5143423

* Джерело: дані «Укрцукор», «НАЦУ»

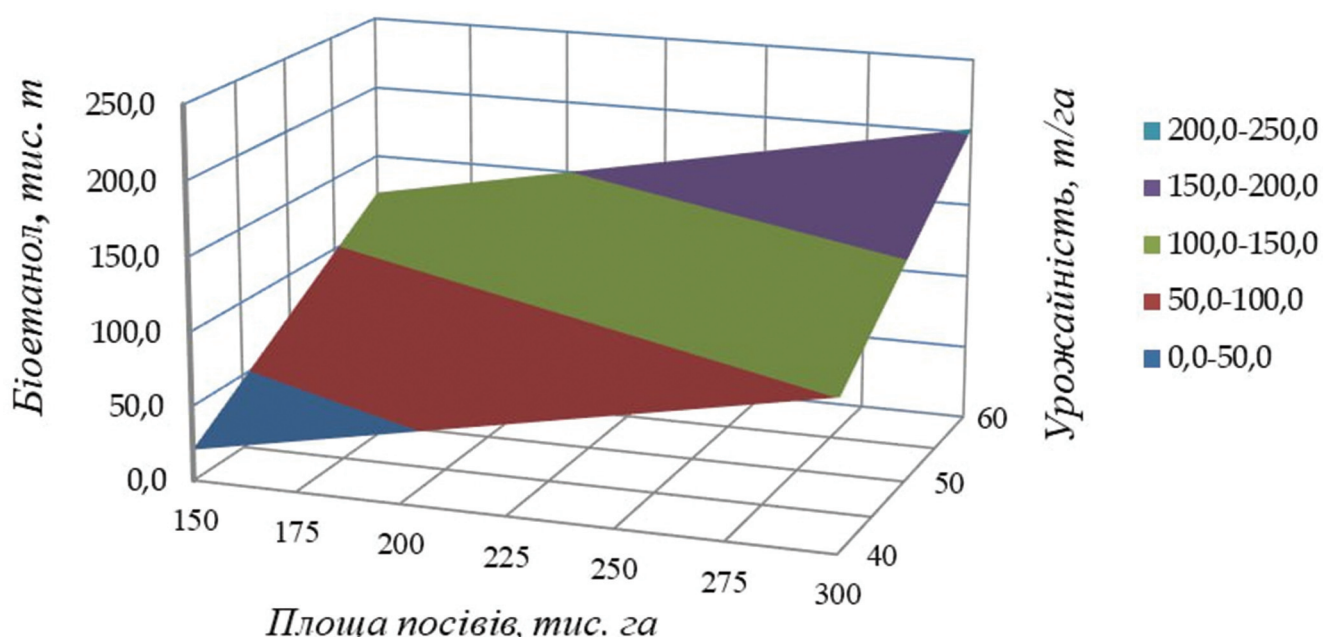


Рисунок 2 – Прогнозований вихід біоетанолу залежно від площі посівів та урожайності буряків цукрових в Україні (2019-2023 рр.)

нота кореляції між змінними x_1 , x_2 , яка є низькою (-0,18837 по модулю значно менше 1), (рис.3, зліва).

Множинний коефіцієнт кореляції $R = 0,983585054$ показує сумарний зв'язок або сумарну кореляцію між відгуком y і двома незалежними змінними x_1 , та x_2 .

$R^2 = 0,967439559$ – коефіцієнт детермінації показує загальну якість моделі. Він лежить у межах від нуля до 1, чим ближче до 1, тим вище якість. Виправлений коефіцієнт детермінації 0,934879118 враховує число ступенів вільності.

Перевірка моделі на адекватність проводилася за допомогою критерію Фішера,

тобто порівнянням двох відповідних дисперсій. Цифри 2 і 2 у другому стовпчику табл. 2 є ступені вільності для порівнювальних дисперсій. Величина 29,71211463 є значення критерію, який спостерігається і потім порівнюється з табличним значенням для визначення значимості гіпотези. Задаємо коефіцієнт надійності 0,95, рівень значимості гіпотези відповідно буде дорівнювати 0,05. Значення 0,032560441, що є менше 0,05, автоматично перевіряє Excel і дає змогу стверджувати про адекватність моделі за критерієм Фішера за рівня надійності 0,95.

У табл. 3 (другий стовпчик) – коефі-

X1	1	
X2	-0,18837	1

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0,983585054
R Square	0,967439559
Adjusted R Square	0,934879118
Standard Error	6,999372911
Observations	5

Рисунок 3 – Оцінка кореляції змінних (зліва), коефіцієнти кореляції (справа)

Таблиця 2 – Коефіцієнти адекватності моделі за критерієм Фішера

ANOVA	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	2	2911,265558	1455,632779	29,71211463	
Residual	2	97,9824423	48,99122115		
Total	4	3009,248			0,032560441

Таблиця 3 – Коефіцієнти отриманої моделі

	Coefficients	t Stat	P-value	Lower 95%
Intercept	-263,0674576	-5,349845502	0,033208906	-474,6414019
x_1	0,530130474	3,857896529	0,041096274	-0,041115899
x_2	5,11114103	7,281127644	0,018345193	0,030792235

цієнти отриманої моделі. Враховуючи, що обробляємо не генеральну сукупність даних, а деяку їхню вибірку, значимість (точність) коефіцієнтів як випадкових величин, перевіряємо за критерієм Стюдента.

Третій стовпчик таблиці дає значення критеріїв Стюдента, що спостерігаються для кожного коефіцієнта окремо, а програма Excel автоматично їх перевіряє, порівнюючи з табличним значенням, і видає результат. За рівня значимості нульової гіпотези (0,05) величини у 4-му стовпчику мають бути меншими, ніж 0,05 (5%). Як бачимо з таблиці, всі коефіцієнти є статистично значимі.

Висновки. Важливість залучення бурякоцукрового сектору в біоенергетику України є незаперечною. У результаті статистичного аналізу в Excel даних загальної площі посіву, середньорічної урожайності буряків цукрових у країні протягом останніх п'яти років (2019-2023) і можливої (розрахункової) кількості біоетанолу

шляхом створення математичної моделі двофакторної лінійної регресії отримано обґрунтовано-прогнозований вихід цього продукту.

Визначено, що, наприклад, у 2023 році за площі посівів буряків цукрових 249,9 тис.га та середньої урожайності 52,5 т/га, статистично прогнозований, достовірно підтверджений за критеріями Фішера та Стюдента, вихід біоетанолу склав 137,7 тис.т. Всього за п'ять останніх років (2019-2023) можна було б отримати 487,8 тис.т біоетанолу.

Перелік літератури

- Волоха, М. (2020). Підвищення якості цукросировини шляхом інтенсифікації очищення коренеплодів при їх викопуванні. Наукові обрії. 7 (92). 120-125. doi: 10.33249/2663-2144-2020-92-7-120-125.
- Гелетуша, Г., & Железна, Т. (2023). Ви-

робництво біоетанолу в Україні: стан і перспективи розвитку. Молоко і Ферма. №2.

ДСТУ 4327:2013 Коренеплоди цукрового буряку для промислового перероблення. Технічні умови [Чинний від 2014-01-01]. К.:2013. 11 с. (Національний стандарт України).

Курило, В. Л., Гументик, М. Я. & Копак О. М. (2013). Сучасний стан виробництва та використання біоетанолу у Бразилії та світі. Наукові праці інституту біоенергетичних культур та цукрових буряків. Вип. 19. 199-203.

Хіврич, О. Б., Ганженко, О. М., Атаманюк, О. М., Сенчук, С. М. & Клименко, В. П. (2022). Вплив строків збирання енергетичних буряків цукрових в зоні Лісостепу України на вихід біогазу. Агробіологія, 2, 48–55. doi: 10.33245/2310-9270-2022-174-2-48-55.

Ayodele, B. V., Alsaffar, M. A. & Mustafa, S. I. (2020). An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 245, 118857. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118857.

Duraisam, R., Salelgn, K. & Berekete, A. K. (2017). Production of beet sugar and bioethanol from sugar beet and its bagasse: an overview. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. Vol. 43, 4. 222-233. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V43P237.

De Santis, M. A., Kosik, O., Passmore, D. Flagella, Z., Shewry, P. R. & Lovegrove, A. (2018). Comparison of the dietary fibre composition of old and modern durum wheat (*Triticum turgidum* spp. durum) genotypes. *Food Chemistry*. Vol. 244. 304-310. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.09.143.

FAOSTAT. (2009). Sugar beet/white sugar. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Cameron, M. A. & Mathiesen, B. V. (2018). Matching demand with supply at low cost in 139 countries among 20 world regions with 100% intermittent wind, water, and sunlight (WWS) for all purposes. *Renewable Ener-*

gy. Vol. 123. 236-248. doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.009.

Krishna, K. V., Bhavana, S., Koujalagi, K. & Malaviya A. (2023). Biofuels From Bio-Waste and Biomass. *Biomass and Bioenergy Solutions for Climate Change Mitigation and Sustainability*. 75-118. doi: 10.4018/978-1-6684-5269-1.ch006.

Kushwaha, R. Kumar, S. & Verma, M. L. (2023). Chapter 6 - A way from biofuels to biorefinery: nanotechnological perspectives. *Nanotechnology for Biorefinery*. P. 163-203. doi.org/10.1016/B978-0-323-95965-0.00002-0.

LaPanse, A. J., Krishnan, A., Dennis, G., Karns, D. A., Dahlin, L. R., Van Wychen, S., Burch, T. A., Guarnieri, M. T., Weissman, J. C. & Posewitz, M. C. (2024). Proximate biomass characterization of the high productivity marine microalga *Picochlorum celeri* TG2. *Plant Physiology and Biochemistry*, 207, 108364. doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108364.

Leonard, M. D., Michaelides, E. E. & Michaelides, D. N. (2020). Energy storage needs for the substitution of fossil fuel power plants with renewables. *Renewable Energy*. Vol. 145. 951-962. doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.066.

Li, J., Zhao, R., Xu, Y., Wu, X., Bean, S. R. & Wang, D. (2022). Fuel ethanol production from starchy grain and other crops: An overview on feedstocks, affecting factors, and technical advances. *Renewable Energy*. Vol. 188. 223-239. doi: 10.1016/j.renene.2022.02.038.

Marzo, C., Dhaz, A. B., Caro, I. & Blandino, A. (2019). Status and Perspectives in Bioethanol Production From Sugar Beet. *Bioethanol Production from Food Crops. Sustainable Sources, Interventions, and Challenges*. 61-79. doi: 10.1016/B978-0-12-813766-6.00004-7.

Mofijur, M., Rasul, M. G., Hyde, J., Azad, A.K., Mamat, R. & Bhuiya M. M. K. (2019). Role of biofuel and their binary (diesel–biodiesel) and ternary (ethanol–biodiesel–diesel) blends on internal combustion engines emission reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 53. 265-278. doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.046.

Pramanik, A., Sinha, A., Chaubey, K. K., Hariharan, S., Dayal, D., Bachheti, R. K., Bachheti, A. & Chandel, A. K. (2023). Second-Generation Bio-Fuels: Strategies for Employing Degraded Land for Climate Change Mitigation Meeting United Nations-Sustainable Development Goals. *Sustainability*, 15(9), 7578. doi.org/10.3390/su15097578.

Swain, M. R. & Mohanty S. K. (2018). Bioethanol Production From Corn and Wheat: Food, Fuel, and Future: Production of bioethanol from food crops. *Sustainable Sources, Interventions and Issues*. Edition: 1, Chapter: 3, Publisher: Academic Press, 45-59. doi: 10.1016/C2017-0-00234-3.

Yuan, X., Chen, X., Shen, G., Chen, S., Yu, J., Zhai, R., Xu, Z. & Jin, M. (2022). Densifying lignocellulosic biomass with sulfuric acid provides a durable feedstock with high digestibility and high fermentability for cellulosic ethanol production. *Renewable Energy*. Vol. 182. 377-389. doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.015.

References

Ayodele, B. V., Alsaffar, M. A. & Mustapa, S. I. (2020). An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 245, 118857. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118857.

De Santis, M. A., Kosik, O., Passmore, D. Flagella, Z., Shewry, P. R. & Lovegrove, A. (2018). Comparison of the dietary fibre composition of old and modern durum wheat (*Triticum turgidum* spp. durum) genotypes. *Food Chemistry*. Vol. 244. 304-310. doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.143.

DSTU 4327:2013 Sugar beet roots for industrial processing. Technical specifications [Effective from 2014-01-01]. K.:2013. 11 p. (National standard of Ukraine).

Duraisam, R., Salelgn, K. & Berekete, A. K. (2017). Production of beet sugar and bioethanol from sugar beet and its bagasse: an overview. *International Journal of Engineer-*

ing Trends and Technology (IJETT). Vol. 43, 4. 222-233. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V43P237.

FAOSTAT. Sugar beet/white sugar, 2009. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Geletukha, G., & Zhelezna, T. (2023). Production of bioethanol in Ukraine: status and development prospects. *Milk ra Farm*. No. 2.

Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Cameron, M. A. & Mathiesen, B. V. (2018). Matching demand with supply at low cost in 139 countries among 20 world regions with 100% intermittent wind, water, and sunlight (WWS) for all purposes. *Renewable Energy*. Vol. 123. 236-248. doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.009.

Khivrych, O. B., Ganzhenko, O. M., Atamanyuk, O. M., Senchuk, S. M. & Klymenko, V. P. (2022). The effect of harvesting time of energy sugar beets in the forest-steppe zone of Ukraine on the yield of biogas. *Agrobiology*, 2, 48-55. doi: 10.33245/2310-9270-2022-174-2-48-55.

Krishna, K. V., Bhavana, S., Koujalagi, K. & Malaviya A. (2023). Biofuels

From Bio-Waste and Biomass. *Biomass and Bioenergy Solutions for Climate Change Mitigation and Sustainability*. 75-118. doi: 10.4018/978-1-6684-5269-1.ch006.

Kurylo, V. L., Gumentik, M. Y. & Kopak, O. M. (2013). Current state of bioethanol production and utilization in Brazil and the world. *Scientific works of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*. Vol. 19. 199-203.

Kushwaha, R. Kumar, S. & Verma, M. L. (2023). Chapter 6 - A way from biofuels to biorefinery: nanotechnological perspectives. *Nanotechnology for Biorefinery*. P. 163-203. doi.org/10.1016/B978-0-323-95965-0.00002-0.

LaPanse, A. J., Krishnan, A., Dennis, G., Karns, D. A., Dahlin, L. R., Van Wychen, S., Burch, T. A., Guarnieri, M. T., Weissman, J. C. & Posewitz, M. C. (2024). Proximate biomass characterization of the high productivity marine microalga *Picochlorum celeri* TG2. *Plant Physiology and Biochemistry*, 207, 108364. doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108364.

- Leonard, M. D., Michaelides, E. E. & Michaelides, D. N. (2020). Energy storage needs for the substitution of fossil fuel power plants with renewables. *Renewable Energy*. Vol. 145. 951-962. doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.066.
- Li, J., Zhao, R., Xu, Y., Wu, X., Bean, S. R. & Wang, D. (2022). Fuel ethanol production from starchy grain and other crops: An overview on feedstocks, affecting factors, and technical advances. *Renewable Energy*. Vol. 188. 223-239. doi: 10.1016/j.renene.2022.02.038.
- Marzo, C., Dhaz, A. B., Caro, I. & Blandino, A. (2019). Status and Perspectives in Bioethanol Production From Sugar Beet. *Bioethanol Production from Food Crops. Sustainable Sources, Interventions, and Challenges*. 61-79. doi: 10.1016/B978-0-12-813766-6.00004-7.
- Mofijur, M., Rasul, M. G., Hyde, J., Azad, A.K., Mamat, R. & Bhuiya M. M. K. (2019). Role of biofuel and their binary (diesel–biodiesel) and ternary (ethanol–biodiesel–diesel) blends on internal combustion engines emission reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 53. 265-278. doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.046.
- Pramanik, A., Sinha, A., Chaubey, K. K., Hariharan, S., Dayal, D., Bachheti, R. K., Bachheti, A. & Chandel, A. K. (2023). Second-Generation Bio-Fuels: Strategies for Employing Degraded Land for Climate Change Mitigation Meeting United Nation-Sustainable Development Goals. *Sustainability*, 15(9), 7578. doi.org/10.3390/su15097578.
- Swain, M. R. & Mohanty S. K. (2018). *Bioethanol Production From Corn and Wheat: Food, Fuel, and Future: Production of bioethanol from food crops. Sustainable Sources, Interventions and Issues*. Edition: 1, Chapter: 3, Publisher: Academic Press, 45-59. doi: 10.1016/C2017-0-00234-3.
- Volokha, M. (2020). Increasing Sugar Beet Feedstock Quality through Intensification of Root Cleaning at Harvesting. *Scientific Horizons*. 7 (92). 120-125. doi: 10.33249/2663-2144-2020-92-7-120-125.
- Yuan, X., Chen, X., Shen, G., Chen, S., Yu, J., Zhai, R., Xu, Z. & Jin, M. (2022). Densifying lignocellulosic biomass with sulfuric acid provides a durable feedstock with high digestibility and high fermentability for cellulosic ethanol production. *Renewable Energy*. Vol. 182. 377-389. doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.015.

UDC 338.43:620.92

STATISTICAL MODEL OF PREDICTED BIOETHANOL PRODUCTION FROM SUGAR BEETS PRODUCED IN UKRAINE (2019-2023)

Volokha M., Doctor of Technical Sciences, Professor,
<https://orcid.org/0000-0002-0112-7324>, e-mail: volmp@i.ua

Lazarchuk M., PhD candidate, Senior Lecturer,
<https://orcid.org/0000-0001-6192-6825>, e-mail: mlazarchuk@ukr.net

Lebedeva O., PhD candidate, Senior Lecturer,
<https://orcid.org/0000-0003-1569-5987>, e-mail: meganom8@ukr.net

Hrubykh M., PhD candidate, Senior Lecturer,
<https://orcid.org/0009-0003-9056-3826>, e-mail: Mariya.grubich@gmail.com

Shepel H., Senior Lecturer,
<https://orcid.org/0000-0002-6993-5045>, e-mail: shepel.hanna.s@gmail.com
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Summary

Enhancing our country's energy security under martial law and the shortage of finite fossil energy sources is closely linked to the issue of ensuring alternative fuel supplies, including bioethanol.

The research aims to develop a statistical model for forecasting the gross production of bioethanol based on data on the total sown area and the average yield of sugar beets in Ukraine over the past five years.

Materials and Methods. An analysis of econometric data and verified scientific publications for relevance was conducted; analytical and statistical research methods were used.

Results. The article presents an analysis of publications by well-known researchers on the issues of obtaining, storing, and processing various types of energy sources. It has been noted that bioethanol was the most technologically advanced type of biofuel worldwide. It has been established that one of the promising directions for the development of bioenergy in Ukraine was renewable energy sources, primarily derived from sugar beet plants, which are considered the most attractive and promising agricultural crop, despite the challenges associated with storing and processing machine-harvested, low-quality root crops.

The reviewed scientific articles and econometric data were analyzed using mathematical-statistical methods to address the critical energy issue of forecast-based, justified bioethanol production from sugar beets grown in Ukraine over the past five years, in the case of their processing into biofuel. It has been determined that, for example, in 2023, with a sugar beet sown area of 249.9 thousand hectares and an average root crop yield of 52.5 t/ha, the statistically predicted and reliably confirmed bioethanol yield amounted to 137.7 thousand tons. Overall, in Ukraine over the past five years (2019-2023) it would have been possible to produce 487.8 thousand tons of bioethanol, highlighting the undeniable importance of integrating the sugar beet sector into bioenergy.

Keywords: statistical model, regression analysis, sugar beet, sugarcane, bioethanol, biofuel.