



Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>
editorial e-mail: chem.dnu@gmail.com



UDC 663.533

IMPACT OF BIOTECHNOLOGICAL FACTORS ON THE EFFICIENCY OF CORN MASH FERMENTATION IN THE PRODUCTION OF RECTIFIED ETHYL ALCOHOL

Iaroslav A. Boyarchuk¹, Yurii V. Bulii², Vitalii L. Prybylskyi², Olha S. Dulka²

¹LLC "LVN LIMITED", Ukrainian Street, 14, Nemirov, Vinnytsia region, 2280

²National University of Food Technologies, 168 Volodymyrska str., Kyiv, 01601

Received 11 April 2025; accepted 29 October 2025; available online 25 December 2025

Abstract

The article presents the results of studies on the influence of enzyme preparations, dry yeast, growth activators, and corn grain germs on the synthesis of ethanol and volatile impurities in the production of rectified ethyl alcohol. The research utilized enzyme preparations, dry distiller's yeast, and activators supplied by leading domestic suppliers. It was established that as the solids content in the mash increased from 24 % to 28 %, the ethanol concentration in the fermentation mash rose by 13–22 % (from 12.4 % to 14.3 % v/v), reaching its highest level when using preparations from LLC "BIOTEST." At the same time, the content of aldehydes, esters, and methanol in the experimental samples was the lowest. The minimum amount of aldehydes was formed in the fermentation mash with a solids content of 24 %, while the lowest concentration of fusel oils was observed in the wash obtained using preparations from LLC "A-PROFI." The concentration of methyl alcohol was highest when using preparations from LLC "Novokontakt" and PE "KOUROS." It was found that removing the grain germ before milling positively affects the qualitative composition of the fermentation mash. Processing raw materials with a lower content of ballast substances reduces the concentration of fusel oils, esters, and ethyl acetate in the fermentation mash, increases ethanol concentration by 7.7–8.9 %, and decreases methanol content by up to 40 %. Further processing of such wash in a distillation-rectification unit allows reducing energy consumption, lowering the production cost of rectified ethyl alcohol, and improving its quality indicators. The use of growth activators during yeast propagation increases ethanol concentration in the wash by 3.8 %, while the content of organic impurities rises insignificantly.

Keywords: corn; distiller's yeast; enzyme preparations; germ; nutrients; dry matter; mash; fermentation; fermentation mash; volatile impurities.

ВПЛИВ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ КУКУРУДЗЯНОГО СУСЛА У ВИРОБНИЦТВІ РЕКТИФІКОВАНОГО ЕТИЛОВОГО СПИРТУ

Ярослав А. Боярчук¹, Юрій В. Булій², Віталій Л. Прибильський², Ольга С. Дулька²

¹ТОВ «ЛВН ЛІМІТЕД», вул. Українська, 14, м. Немирів, Вінницька обл., 22800

²Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01601

Анотація

У статті наведені результати досліджень впливу ферментних препаратів, сухих дріжджів, активаторів їх росту і зародків зерна кукурудзи на синтез етанолу й летких домішок у виробництві ректифікованого етилового спирту. Для досліджень використовували ферментні препарати, сухі спиртові дріжджі та активатори провідних вітчизняних постачальників. Встановлено, що із збільшенням вмісту сухих речовин у суслі від 24 до 28 % концентрація етанолу в зрілій бражці зростала на 13–22 % (від 12.4 до 14.3 % об.) і була найбільшою в разі внесення препаратів ТОВ «БІОТЕСТ». Водночас вміст альдегідів, естерів і метанолу в дослідних зразках виявився найменшим. Мінімальна кількість альдегідів утворювалась у бражці зі вмістом сухих речовин у суслі 24 %, а вищих спиртів сивушного масла – в бражці, отриманій з використанням препаратів ТОВ «А-ПРОФІ». Концентрація метилового спирту була найбільшою в разі використання препаратів ТОВ «Новоконтакт» і ПП «КОУРОС». Досліджено, що видалення зародку зерна перед його подрібненням позитивно впливає на якісний склад бражки. Переробка сировини з меншим вмістом баластних речовин дозволяє зменшити вміст у бражці вищих спиртів сивушного масла, естерів та етилацетату, збільшити концентрацію етилового спирту в бражці на 7.7–8.9 %, зменшити в ній вміст метанолу до 40 %. Подальша переробка такої бражки в брагоректифікаційній установці дає можливість скоротити енерговитрати, зменшити собівартість ректифікованого етилового спирту і підвищити його якісні показники. Використання активаторів росту на стадії дріжджегенерації дозволяє збільшити концентрацію етилового спирту в бражці на 3.8 %. Водночас вміст органічних домішок в бражці зростає несуттєво.

Ключові слова: кукурудза; спиртові дріжджі; ферментні препарати; зародок; живлення; сухі речовини; сусло; зброджування; зріла бражка; леткі домішки.

*Corresponding author: e-mail: iaroslav.boiarчук@nemiroff.pro

Вступ

Починаючи із середини 90-х років минулого сторіччя в Україні спостерігався значний спад у виробництві ректифікованого спирту із крохмалевмісної сировини, зумовлений різними чинниками. Основними з них є втрата ринків збуту, нелегальні схеми виробництва спирту та недостатнє використання інноваційних технологій. У 2020 р. виробники ректифікованого спирту отримали шанс для розвитку галузі: в Україні припинила діяти державна монополія на виробництво спирту, розпочалась приватизація спиртових заводів. Такі зміни в господарчій політиці відкрили нові можливості для реконструкції і модернізації вітчизняних підприємств, підвищення якості готової продукції та її конкурентоспроможності на світовому ринку, збільшення виходу ректифікованого етилового спирту та зменшення енерговитрат на його виробництво [1; 2].

Для реалізації поставлених задач першочерговим завданням було покращення якісних показників зрілої бражки в залежності від особливостей технологічних процесів, зокрема якості основної і допоміжної сировини, способу приготування сусла, умов його зброджування, а також технологічних режимів перегонки бражки і очищення ректифікованого спирту від летких домішок.

Одним із ключових процесів у виробництві ректифікованого етилового спирту є зброджування сусла. Саме на цій стадії утворюється етиловий спирт і відбувається біосинтез вторинних і побічних продуктів. До них відносяться вищі спирти, естери, альдегіди, метиловий спирт та інші леткі домішки, вміст яких у бражці суттєво впливає на органолептичні та фізико-хімічні показники готової продукції. Інтенсивність утворення цих речовин значною мірою залежить від функціональної активності дріжджової клітини і технологічних параметрів процесу (температури, pH, концентрації сухих речовин, складу поживного середовища, тривалості ферментації, використання ферментних препаратів тощо) [3].

Розроблення ефективних технологій високоякісного ректифікованого етилового спирту обумовлена необхідністю дослідження впливу технологічних режимів на біосинтез побічних і вторинних продуктів у процесі ферментації сусла. Визначення оптимальних режимів дозволяє суттєво зменшити вміст

небажаних летких домішок у бражці (ізопропілового, метилового спиртів, акролеїну, кротонового альдегіду та ін.), наявність яких ускладнює процес очищення етилового спирту в брагоректифікаційній установці і негативно впливає на смакові, ароматичні та токсикологічні характеристики продукту, особливо для спирту харчового призначення [4].

Для оптимізації процесу брагоректифікації, зменшення ресурсо- та енерговитрат на одиницю виробленої продукції і покращення якісних показників етилового спирту, призначеного для використання в різних сферах народного господарства, необхідно мати достовірну інформацію про якісний склад зрілої бражки залежно від особливостей технологічних процесів [5].

Відомо, що біосинтез вторинних і побічних продуктів у процесі зброджування сусла визначається фізіологічними функціями дріжджової клітини, які в значній мірі залежать від обраних технологічних режимів його приготування. Ефективність процесу ферментації тісно пов'язана з вибором ферментних препаратів, особливостями використання сухих спиртових дріжджів, а також впливом додаткового живлення на активність дріжджової клітини [6].

Метою роботи було дослідження впливу ферментних препаратів, сухих дріжджів, активаторів їх росту, а також зародку зерна кукурудзи на ефективність процесу ферментації кукурудзяного сусла та якості зрілої бражки в виробництві ректифікованого етилового спирту.

Матеріали і методи досліджень

Для досліджень використовували кукурудзу згідно з ДСТУ 4525:2006. Для розрідження замісу, оцукрювання та ферментації кукурудзяного сусла застосовували ферментні препарати і сухі дріжджі провідних вітчизняних постачальників:

ТОВ «А-PROFI» (1):

- α -амілаза APRO ZYME AA-85;
- глюкоамілаза APRO ZYME AG-5;
- сухі спиртові дріжджі APRO FERM TERMOSTA B.

ТОВ «А-PROFI» (2):

- α -амілаза APRO ZYME AA-85;
 - глюкоамілаза APRO ZYME AG-5;
 - сухі спиртові дріжджі APRO FERM SP 1.
- ДП «ЕНЗИМ»:

- α -амілаза АЛЬФАЛАД БТ Л;
- глюकोамілаза AG;
- сухі спиртові дріжджі.
- ТОВ «ТРИСТАН» (1):
- α -амілаза Амилекс 5Т;
- глюकोамілаза Діазим TGA;
- сухі спиртові дріжджі QuickfermSuper.
- ТОВ «ТРИСТАН» (2):
- α -амілаза Амилекс 5Т;
- глюकोамілаза Діазим TGA;
- сухі спиртові дріжджі Fermiol.
- ТОВ «БІОТЕСТ»:
- α -амілаза TEGAMYL BLHL;
- глюकोамілаза TEGAMYL AG90L;
- сухі спиртові дріжджі TEGA-YEAST-T.
- ПП «КОУРУС»:
- α -амілаза LiquaStar;
- глюकोамілаза Fermentase L;
- сухі спиртові дріжджі Safspirit HG-1.
- ТОВ «НОВОКОНТАКТ»:
- α -амілаза LpHera;
- глюकोамілаза Saczyme Plus 2X;
- сухі спиртові дріжджі Thermosacc DRY.

Дозування ферментних препаратів з амілолітичною та глюकोамілазною активністю здійснювалося відповідно до рекомендацій виробників, тобто в грамах препарату на 1 тону умовного крохмалю. Такий підхід є поширеним у промисловій практиці, оскільки дозволяє забезпечити ефективний гідроліз крохмалю без необхідності перерахунку на одиниці ферментативної активності. Зазначимо, що виробники ферментів використовують різні методики визначення активності та різні одиниці її вимірювання (наприклад, SKB, AGU, U/g тощо), що ускладнює їхнє порівняння. Водночас, під час застосування препаратів згідно з інструкціями виробника технологічна ефективність ферментів може бути співставною, навіть за різних одиниць активності.

Видалення зародків із кукурудзи здійснювали на експериментальному обладнанні від компанії ТОВ «ОЛІС» (м. Одеса).

Зерна кукурудзи подрібнювали до розміру частинок із 100 %-ним проходженням крізь сито з розміром отворів 1 мм. Вміст крохмалю в зерні становив 62.1 %. Замість розріджували за температури 88–92 °C протягом 3 год з використанням ферментних препаратів, які містили α -амілазу в рекомендованих виробниками дозах. Розріджену масу охолоджували до температури 32 °C і вносили ферментні препарати, які містили

оцукрюючий фермент глюкоамілазу, відповідно до рекомендацій виробника. Отримане сусло зброджували за температури 30–32 °C [11].

Для досліджень дії активаторів росту дріжджових клітин використовувалися «Активатор 1», «Активатор 2» і «Активатор 3», розроблені ТОВ «НВП БІОТЕНОЛ». Активатори представляли собою наноккомпозити, склад яких виробником не розголошувався з міркувань комерційної таємниці. Активатори для живлення дріжджових клітин готували згідно з рекомендаціями виробника і вносили в середовище бродіння в кількості 0.006 г діючих речовин на 600 см³ сусла.

Вміст крохмалю в зерні визначали методом Еверса, вологість зерен – методом висушування до постійної маси, гранулометричний склад помелу – розсівом на ситах, а концентрацію сухих речовин (СР) у суслі – за допомогою ареометра і рефрактометра.

Концентрацію альдегідів визначали реакцією з фуксинсірчистим реактивом І; сивушного масла – методом, заснованому на реакції вищих спиртів з розчином саліцилового альдегіду в присутності сірчаної кислоти; вільних кислот – за кількістю розчину гідроксиду натрію, витраченого на титрування; складних естерів – титрометричним методом після їх омилення розчином гідроксиду натрію; об'ємну частку метилового спирту – методом, заснованому на реакції окислення метанолу калію перманганатом і сульфатною кислотою з утворенням формальдегіду, що утворює забарвлення з фуксинсірчистим реактивом ІІ [7; 8].

Концентрацію вторинних і побічних домішок в бражці визначали на газовому хроматографі з колонкою HP FFAP 50 m×0.32 m [9; 10].

Стан дріжджових клітин оцінювали пробою забарвлення розчином Люголя, а їх життєздатність – за метиленовим синім. Кількість клітин у процесі розмноження та їх загальний вміст визначали за допомогою камери Горяєва.

Сухі дріжджі готували відповідно до інструкцій виробників; зброджування сусла здійснювали методом «бродильної проби» в конічних колбах із сульфатнокислотними затворами. Кількість діоксиду вуглецю визначали ваговим методом. У бражці визначали активну кислотність (рН)

електрометричним методом і концентрацію етанолу – пікнометричним методом.

Сухі дріжджі вносили в усі варіанти досліду в однаковій кількості – 40 млн клітин на 1 см³ середовища. Підрахунок кількості клітин здійснювали за допомогою камери Горяєва, що дозволило отримати достовірні дані щодо інокуляційної щільності.

Визначення всіх показників проводили в триразовій повторності. Визначальними обиралися їх середні значення.

Результати та їх обговорення

Зріла бражка як проміжний продукт спиртового виробництва має складний хімічний склад [12]. Багатокомпонентна система складається з води (73–91 % мас.), сухих речовин (4–15 % мас.) та етилового спирту із супровідними леткими домішками (5–12 % мас. або 6–15 % об.). Якісний склад бражки значно змінюється в залежності від виду вихідної сировини, прийнятих технологічних режимів її приготування, а також від ефективності дії ферментних препаратів і спиртових дріжджів.

Для вирішення поставленої задачі досліджували вплив ферментних препаратів, сухих дріжджів різних виробників та зародку кукурудзи на синтез етилового спирту і утворення летких органічних домішок, а також доцільність використання активаторів росту дріжджових клітин.

Відомо, що амілолітичні ферментні препарати відіграють важливу роль у процесах гідролізу крохмалю з утворенням цукрів, які є основними субстратами для синтезу спирту, побічних і вторинних продуктів бродіння [13]. Останнім часом на більшості підприємств спиртової галузі використовують сухі дріжджі, які забезпечують не тільки утворення етанолу, але й синтез вторинних метаболітів, зокрема летких органічних домішок. Ці сполуки значною мірою впливають на якість кінцевого продукту [14; 15]. Вирішальне значення мають фізіологічні характеристики дріжджів, які обумовлюють накопичення етилового спирту та побічних і вторинних продуктів бродіння [16; 17].

На першому етапі досліджували ефективність дії ферментних препаратів і сухих спиртових дріжджів різних виробників.

Критеріями для вибору найефективніших ферментних препаратів і дріжджів були концентрація в зрілій бражці етилового спирту, головних (альдегідів та естерів),

проміжних (вищих спиртів) і кінцевих (метанолу) домішок [18; 19]. Додатковими критеріями були вміст в бражці етилацетату та ізопропілового спирту – домішки, яка навіть у незначних кількостях суттєво погіршує органолептичні показники ректифікованого спирту [20].

На рис. 1 наведена залежність концентрації етанолу в зрілій бражці від ефективності дії ферментних препаратів і сухих дріжджів у разі зброджування сусла з концентрацією СР 24, 26 і 28 %.

Встановлено, що концентрація етилового спирту в дослідних зразках бражки, отриманих із сусла з вмістом СР 24 %, становила 11.3–12.0 % об. Із збільшенням вмісту СР у суслі від 24 до 28 % концентрація етанолу в зрілій бражці зростала на 13–22 %. Розбіжність отриманих результатів була найменшою. В зразках бражки, отриманих шляхом зброджування сусла з вмістом СР 26 %, концентрація етанолу змінювалась більшою мірою – від 11.9 до 13.1 % об. Це пояснюється збільшенням у суслі вмісту редуруючих цукрів. Найбільший вплив на синтез етилового спирту мали ферментні препарати, які вносили в більш концентроване сусло – з вмістом СР 28 %. В цих зразках концентрація етанолу зростала і змінювалась від 12.4 до 14.3 % об.

Концентрація етилового спирту була найменшою в бражці, отриманій з використанням ферментних препаратів від ДП «ЕНЗИМ», а найбільшою – в разі використання препаратів від ТОВ «БІОТЕСТ». Під час використання ферментних препаратів ПП «КОУРОС» концентрація етанолу в бражці зменшувалась на 2.8 %, а в разі використання препаратів ТОВ «НОВОКОНТАКТ», ТОВ «ТРИСТАН» і ТОВ «А-PROFI» його концентрація в дослідних зразках майже не змінювалась. Ефективність синтезу етилового спирту говорить про активність ферментних препаратів.

Результати досліджень щодо впливу ферментних препаратів і сухих дріжджів на вміст летких домішок у зрілій бражці наведені в табл. 1.

Шляхом порівняльного аналізу експериментальних даних, наведених в табл. 1, визначали найефективніші ферментні препарати і сухі дріжджі, використання яких дозволило зменшити вміст у бражці небажаних супровідних домішок спирту.

Шляхом порівняльного аналізу експериментальних даних, наведених в

табл. 1, визначали найефективніші ферментні дозволило зменшити вміст у бражці препарати і сухі дріжджі, використання яких небажаних супровідних домішок спирту.

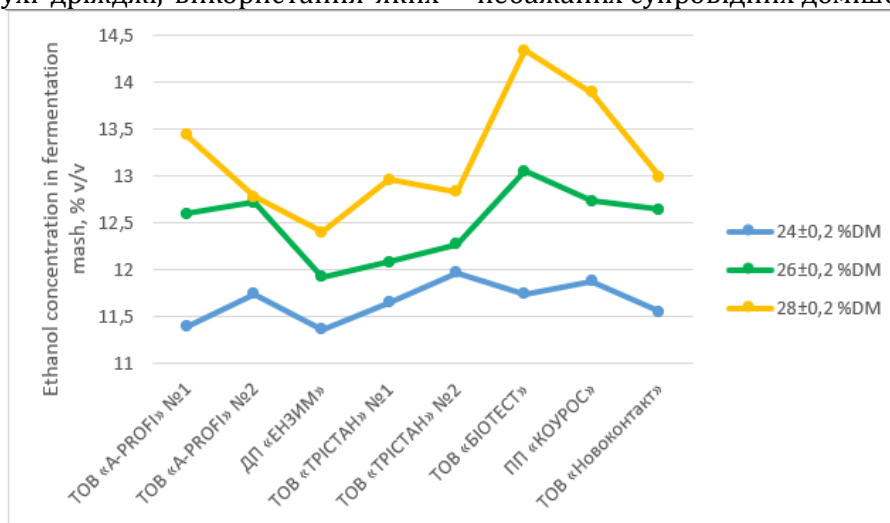


Fig. 1. Dynamics of ethanol concentration in fermentation mash when using enzyme preparations and dry yeast from different suppliers

Рис. 1. Динаміка концентрації етанолу в зрілій бражці під час використання ферментних препаратів і сухих дріжджів різних виробників

Відомо, що для виробництва лікеро-горілчаних напоїв використовують ректифікований етиловий спирт, у якому вміст ізопропанолу не повинний перевищувати 1.5 мг/дм³ у перерахунку на безводний спирт (б.с.) [20]. Аналіз даних табл. 1 показав, що за цим показником всі дослідні зразки відповідали таким вимогам. Досліджено, що в зразках бражки, отриманої з

використанням препаратів ТОВ «А-PROFI» (1), ТОВ «ТРИСТАН» (2), ТОВ «БІОТЕСТ», ПП «КОУРОС» і ТОВ «НОВОКОНТАКТ» ізопропіловий спирт був відсутній.

Концентрація альдегідів була найменшою в дослідних зразках бражки з вмістом СР 24 %. За цієї концентрації суслу найменша кількість альдегідів утворювалась у разі використання препаратів від ДП «ЕНЗИМ».

Table 1

Influence of enzyme preparations and dry yeast from different suppliers on the content of volatile impurities in the fermentation mash

Таблиця 1

Вплив ферментних препаратів і сухих дріжджів різних виробників на вміст летких домішок у зрілій бражці

№ зразка	Постачальник	Вміст сухих речовини у суслі, %	Альдегіди, мг/дм ³ б.с.	Ізопропанол, мг/дм ³ б.с.	Вміст спирту сивушного масла, мг/дм ³ б.с.	Естери, мг/дм ³ б.с.	Метанол, % б.с.	Етилацетат, мг/дм ³ б.с.
1	ТОВ «А-PROFI» (1)	24±0.2	73.33	сліди	2362.50	184.12	0.014	166.29
2		26±0.2	96.33	сліди	2738.81	178.48	0.009	160.01
3		28±0.2	106.37	сліди	2617.55	142.57	0.010	130.17
4	ТОВ «А-PROFI» (2)	24±0.2	80.87	1.49	5493.40	229.05	0.009	201.17
5		26±0.2	78.34	1.23	5137.33	203.09	0.010	178.26
6		28±0.2	215.71	2.34	5115.45	192.08	0.009	161.82
7	ДП «ЕНЗИМ»	24±0.2	52.70	1.71	3078.40	119.10	0.007	105.80
8		26±0.2	99.20	1.24	2750.70	139.80	0.009	125.50
9		28±0.2	193.60	1.21	2801.00	137.14	0.009	118.70
10	ТОВ «ТРИСТАН» (1)	24±0.2	80.56	сліди	4479.13	239.66	0.009	221.01
11		26±0.2	130.99	1.31	4550.17	211.81	0.010	189.19
12		28±0.2	155.85	0.73	4680.68	255.05	0.010	228.03
13	ТОВ «ТРИСТАН» (2)	24±0.2	85.67	сліди	4999.26	236.28	0.011	211.96
14		26±0.2	72.18	сліди	4102.00	236.72	0.009	216.47

Продовження Таблиці 1								
15	ТОВ «БІОТЕСТ»	28±0.2	138.99	сліди	3483.71	207.38	0.009	187.07
16		24±0.2	92.20	сліди	3047.16	131.50	0.008	120.01
17		26±0.2	86.09	сліди	2918.10	130.09	0.008	114.55
18		28±0.2	114.34	сліди	2846.28	104.59	0.009	91.03
19	ПП «КОУРОС»	24±0.2	128.11	сліди	4470.88	191.58	0.013	177.59
20		26±0.2	163.89	сліди	3903.80	178.46	0.012	163.14
21		28±0.2	201.70	сліди	3785.00	165.54	0.013	150.21
22		24±0.2	265.61	сліди	4249.70	195.69	0.016	179.55
23	ТОВ «Новоконтакт»	26±0.2	205.24	сліди	3598.80	173.67	0.014	158.17
24		28±0.2	216.27	сліди	3605.70	156.69	0.014	141.82

У разі використання препаратів компанії ТОВ «А-PROFI» (1) їх концентрація зростала на 39 %, ТОВ «А-PROFI» (2) або ТОВ «ТРИСТАН» (1) – на 53 %, ТОВ «ТРИСТАН» (2) на 62.6 %, ТОВ «БІОТЕСТ» – на 74.9 %, ПП «КОУРОС» – у 2.43 рази, ТОВ «Новоконтакт» – у 5 разів. Аналіз зразків бражки з вмістом СР 26 % показав, що найбільше альдегідів утворювалось під час використання препаратів від ТОВ «ТРИСТАН» (1), ПП «КОУРОС» і ТОВ «Новоконтакт». У порівнянні з іншими виробниками, концентрація альдегідів у цих зразках зростала на 36, 69 і 113 % відповідно. Найменше альдегідів містилось у зразках, отриманих шляхом внесення препаратів від ТОВ «ТРИСТАН» (2) і ТОВ «А-PROFI» (2). За вмістом альдегідів у бражці зі вмістом СР 28 % кращими виявилися зразки, отримані з використанням препаратів ТОВ «А-PROFI» (1) і ТОВ «БІОТЕСТ».

Концентрація естерів була найменшою в дослідних зразках бражки, отриманої у разі використання препаратів ТОВ «БІОТЕСТ». Після внесення в сусло препаратів від ДП «ЕНЗИМ» в зразках бражки зі вмістом СР 24, 26 і 28 % їхня концентрація зростала на 10.4; 7.9 і 31 % відповідно. Після використання препаратів від ТОВ «ТРИСТАН» концентрація естерів у дослідних зразках зростала в середньому на 80 % і була максимальною.

Найменший вміст вищих спиртів сивушного масла виявився в бражці, отриманій з використанням препаратів від ТОВ «А-PROFI». У разі використання препаратів від ДП «ЕНЗИМ» і ТОВ «БІОТЕСТ» їхня концентрація в зразках із вмістом СР 24 % збільшувалась на 30 %, а в інших зразках зростала незначно (в середньому на 6.7 %). Найбільша кількість вищих спиртів утворювалось за умови використання препаратів ТОВ «А-PROFI» (2) і ТОВ «ТРИСТАН».

Концентрація метилового спирту виявилась найбільшою під час використання препаратів ТОВ «Новоконтакт» і ПП «КОУРОС». У разі використання препаратів інших

виробників його концентрація зменшувалась в середньому на 35 %. Найменше метанолу утворювалось у бражці, отриманої із застосуванням препаратів ТОВ «БІОТЕСТ» і ДП «ЕНЗИМ». Концентрація етилацетату в цих зразках також була найменшою і становила 91–120 мг/дм³ у перерахунку на б.с. Після використання препаратів інших виробників вміст етилацетату в зрілій бражці зростав на 84–150 % в залежності від концентрації СР у суслі. Найбільший вміст етилацетату виявився в бражці, отриманій з використанням препаратів ТОВ «ТРИСТАН».

Узагальнюючи результати, отримані на першому етапі досліджень, можливо стверджувати, що концентрація етилового спирту і вміст вторинних та побічних продуктів бродіння в зрілій бражці значною мірою залежать від особливостей ферментних препаратів і сухих дріжджів різних виробників. Аналіз дослідних зразків бражки показав, що найефективнішими виявилися препарати ТОВ «БІОТЕСТ». Отримані експериментальні результати мають важливе значення для удосконалення процесів зброджування сусла і отримання високоякісного етилового спирту з контрольованим вмістом органічних домішок [21].

На другому етапі досліджень визначали вплив зародку зерна кукурудзи на концентрацію етилового спирту і вміст органічних домішок у спиртовій бражці. Для досліджень були сформовані три варіанти дослідних зразків, які дозволили комплексно проаналізувати технологічні аспекти процесу ферментації кукурудзяного субстрату.

1. Контрольний зразок – використовували цілі зерна кукурудзи з природним вмістом зародку; слугував базою для порівняння, оскільки відображав стандартні умови виробництва.

2. Зразок із видаленим зародком – зерно піддавалось дежермінації перед подрібненням.

3. Зразок із видаленим зародком із збереженням маси – зерно без зародка використовувалося в тій самій кількості, що й у контрольному зразку. Це дозволило оцінити, як змінюється вихід спирту за однакової маси сировини, але з покращеним хімічним складом (більший вміст крохмалю, менше баластних речовин).

Такий підхід дозволив не лише порівнювати ефективність процесу ферментації, але й оцінити вплив дежермінації зерен на утворення побічних продуктів, зокрема метанолу, сивушного масла, естерів та альдегідів.

Фізико-хімічні показники дослідних зразків зрілої спиртової бражки наведені в табл. 2.

Table 2

Indicators of fermentation mash obtained from corn grain milling

Таблиця 2

Показники зрілої бражки, отриманої із помелу зерна кукурудзи

№ зразка	Характеристика	Крохмалистість сировини, %	Вміст сухих речовин у суслі, %	Альдегіди, мг/дм ³ б.с.	Ізопропанол, мг/дм ³ б.с.	Вищі спирти сивушного масла, мг/дм ³ б.с.	Естери, мг/дм ³ б.с.	Метанол, %об. б.с.	Етилацетат, мг/дм ³ б.с.
1	Із зародком (контроль)	66.10	22.9±0.2	99.91	сліди	4747.21	263.89	0.010	251.39
2			24.8±0.2	85.78	сліди	3701.66	218.55	0.010	205.28
3			26.7±0.2	141.00	сліди	4273.88	216.97	0.013	203.51
4	Із видаленим зародком(1)	66.99	20.2±0.2	119.22	1.73	4563.62	243.74	0.008	237.69
5			21.9±0.2	130.03	1.57	4434.86	289.01	0.008	272.54
6			23.7±0.2	78.82	сліди	3336.49	184.88	0.005	175.18
7	Із видаленим зародком(2)	66.99	22.9±0.2	101.58	0.70	3824.65	231.16	0.006	218.45
8			24.8±0.2	87.21	сліди	2982.29	191.44	0.006	178.38
9			26.7±0.2	143.36	сліди	3443.31	190.06	0.008	176.84

Встановлено, що в контрольних зразках (1, 2, 3) ізопропіловий спирт був відсутній. В дослідних зразках 4, 5 і 7, отриманих із зерна з видаленим зародком, його вміст зростав до 0.70–1.73 мг/дм³ у перерахунку на б.с., і в зразках 4 і 5 його вміст перевищував нормативний. У зразках з більшим вмістом СР (6, 8, 9) ізопропіловий спирт не був ідентифікований.

Поява ізопропанолу у зразках 4, 5 7 зумовлена активністю *Clostridium acetobutylicum*, яка стала можливою через зменшення антимікробного впливу зародка кукурудзи. Відсутність ізопропанолу в контрольному зразку 1 свідчить про блокуючу дію зародка на розвиток цієї мікрофлори. В дослідних зразках 6, 8, 9 з концентрацією СР у суслі 23.7–26.7 % ізопропанол також не виявлений. Це дозволяє припустити, що висока концентрація СР у суслі додатково пригнічує розвиток *Clostridium acetobutylicum*, навіть за відсутності зародка.

Таким чином, видалення зародку з одного боку сприяє зменшенню вмісту баластних речовин і покращенню крохмалистості, але з іншого – може створювати умови для розвитку небажаної мікрофлори. Для запобігання цьому

під час переробки зерна без зародка доцільно підтримувати концентрацію сухих речовин не нижче 24 %, що є рекомендованим значенням, базуючись на результатах зразків 6, 8, 9.

Крім того, видалення зародку приводило до зменшення вмісту метилового спирту в зрілій бражці в середньому на 40 %. Враховуючи нижчу крохмалистість зерна в контрольному зразку, можна стверджувати, що видалення зародку практично не вплинуло на вміст альдегідів, але дозволило зменшити концентрацію вищих спиртів сивушного масла, естерів та етилацетату в бражці в середньому на 19.5, 12.5 і 13.2 % відповідно. Слід зазначити, що найменша кількість органічних домішок утворювалась у бражці, отриманій із зерна з видаленими зародками шляхом зброджування сусла з вмістом СР 23–24 %. Пояснюється це тим, що зародок кукурудзи містить 84–86 % олії, завдяки чому процес бродіння уповільнюється, погіршуються якісні показники зрілої бражки і зменшується вихід спирту. Видалення зародку сприяло інтенсифікації процесу ферментації кукурудзяного сусла і дозволило зменшити в бражці вміст побічних і вторинних продуктів спиртового бродіння [22; 23].

Важливим критерієм для визначення кукурудзи була концентрація етилового доцільності видалення зародку зерна спирту в дослідних зразках бражки (рис. 2).

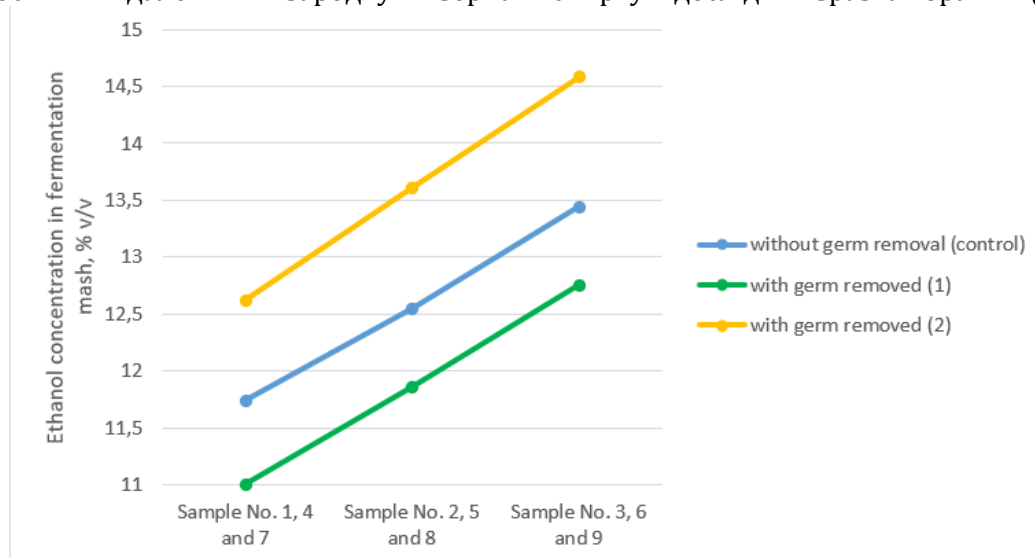


Fig. 2. Dependence of ethanol concentration in fermentation mash on the presence of germ in corn kernels
Рис. 2. Залежність концентрації етилового спирту в зрілій бражці від наявності зародку в зернах кукурудзи

Встановлено, що концентрація спирту в зрілій бражці в першу чергу залежить від вмісту СР у суслі незалежно від складу вихідної сировини. Так, концентрація етанолу була найменшою в бражці, отриманої після зброджування сусла найнижчої концентрації (зразки 1, 4, 7). Закономірно, що із зменшенням вмісту СР у суслі вміст етанолу в бражці зменшувався, що підтверджено проведеними дослідженнями. Так, у зразках 4, 5 і 6, отриманих із зерна із видаленням зародком, концентрація етилового спирту зменшилась в середньому на 6.4 % в порівнянні з контролем (зразки 1, 2, 3). Найефективніше відбувався синтез етанолу під час зброджування сусла з підвищеною концентрацією СР (зразки 1–3, 7–9), але максимальний його вміст спостерігався в бражці, отриманої із зерна з видаленням зародком (2). У порівнянні з контролем його концентрація збільшувалась на 7.7–8.9 % в залежності від вмісту СР у суслі. Варто відзначити, що синтез етанолу мав лінійну залежність від кількості крохмалю в сировині. Пояснюється це тим, що видалення зародку сприяло збільшенню частки крохмалю в загальному складі помелу і дозволяло отримати еквівалентну кількість етилового спирту за меншої концентрації СР у суслі, що позитивно впливало на вихід етилового спирту із одиниці сировини. Водночас покращувались якісні показники вихідної сировини: видалялися баластні речовини, які містяться в зародку і не беруть участі в процесі

спиртового бродіння, але негативно можуть впливати на утворення побічних продуктів.

Таким чином, аналіз отриманих результатів показав, що видалення зародку зерна кукурудзи позитивно впливає на якісний склад бражки. Переробка сировини з меншим вмістом баластних речовин дозволяє зменшити вміст у бражці вищих спиртів сивушного масла, естерів та етилацетату й збільшити концентрацію етилового спирту. Подальша переробка такої бражки в брагоректифікаційній установці дає можливість зменшити енерговитрати і собівартість ректифікованого етилового спирту, а також покращити його якісні показники [24; 25].

На третьому етапі досліджували вплив активаторів росту дріжджів на фізико-хімічні показники зрілої бражки. Метою застосування нанокмполімерів біологічного потенціалу було підвищення активності дріжджових клітин, оптимізація процесу бродіння та потенційне збільшення виходу кінцевого продукту. Поетапний аналіз ефективності кожного із активаторів дозволяв оцінити їхній вплив на ключові параметри процесу – швидкість бродіння, концентрацію спирту в бражці, вміст залишкових цукрів та ін.

Активатори росту вносили в сусло з вмістом СР 25 % на стадії дріжджегенерації. Тривалість процесу становила 20 год. Виробничі дріжджі вносили в чотири зразки сусла в кількості 10 % від загального його об'єму. В перший (контрольний зразок)

вносили виробничі дріжджі без використання активаторів росту, а в інші три – дріжджі з використанням різних активаторів. Сусло зброджували протягом 72 год. В зрілій бражці визначали фізико-хімічні показники. Отримані результати наведені в табл. 3.

Аналіз даних табл. 3 показав, що ізопропіловий спирт був відсутній у контролі і зразку 2 (активатор 1). У разі використання активаторів росту 2 і 3 концентрація ізопропанолу в бражці зростала, причому його вміст у зразку 4 перевищував його вміст у зразку 3 на 5.1 %, але не перевищував

нормативне значення згідно з вимогами до якості алкогольних напоїв (1.5 мг/дм³ б.с.). Разом з тим, найменша кількість летких домішок спирту (головних, проміжних і кінцевих) була ідентифікована в зразку 4. Використання активатора росту 3 дозволило зменшити концентрацію метанолу в бражці на 21.4 % у порівнянні з контролем, і на 26.7 % у порівнянні із зразками 2 і 3. Водночас концентрація вищих спиртів сивушного масла зменшилась на 13.9 %, естерів – на 17.3 %, а етилацетату – на 17.7 % у порівнянні з контролем.

Table 3

Influence of yeast growth activators on the physicochemical parameters of fermentation mash

Таблиця 3

Вплив активаторів росту дріжджів на фізико-хімічні показники зрілої бражки

№ зразка	Характеристика	Крохмалистість, %	Сухі речовини, %	Альдегіди, мг/дм ³ б.с.	Ізопропанол, мг/дм ³ б.с.	Вищі спирти сивушного масла, мг/дм ³ б.с.	Естери, мг/дм ³ б.с.	Метанол, % об. б.с.	Етилацетат, мг/дм ³ б.с.
1.	Контроль			215.67	сліди	4368.24	443.03	0.014	418.53
2.	Активатор 1	62.1	24.93 ±0.2	270.70	сліди	4722.32	433.17	0.015	413.33
3.	Активатор 2			245.63	1.17	5118.75	466.40	0.015	441.36
4.	Активатор 3			197.68	1.23	3761.94	370.98	0.011	348.52

Вплив активаторів росту дріжджів на вміст етилового спирту в зрілій бражці наведено на рис. 3.

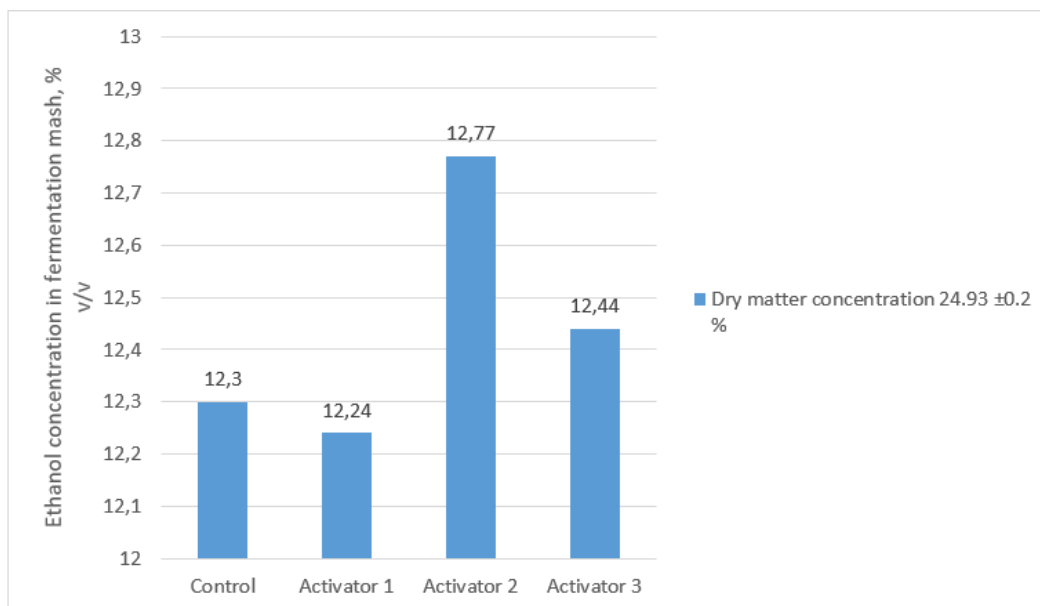


Fig. 3. Dependence of ethanol concentration in fermentation mash on the effect of yeast growth activators

Рис. 3. Залежність концентрації етилового спирту в зрілій бражці від дії активаторів росту дріжджів

Встановлено, що концентрація етилового спирту в зрілій бражці залежить від дії активаторів росту дріжджів [26]. Так, у разі додавання активатора 2, концентрація

етанолу збільшувалась на 3.8 % у порівнянні із контрольним зразком і була найбільшою. Зменшення вмісту етанолу в бражці за використання активатора 1 можна пояснити

пріоритетом впливу дріжджової клітини на утворення побічних і вторинних продуктів бродіння.

Застосування активатора 2 на стадії дріжджегенерування дозволяє підвищити концентрацію етилового спирту в зрілій бражці на 3.8 %, що позитивно впливає на загальний вихід спирту. Водночас це супроводжується зростанням концентрації побічних продуктів бродіння (домішок). Тому доцільність використання активатора 2 залежить від ефективності роботи брагоректифікаційної установки щодо видалення домішок: за умови її високої продуктивності – активатор 2 є оптимальним вибором.

Натомість, активатор 3 забезпечує менше зростання виходу спирту – на 1.1 %, але сприяє меншому утворенню домішок, що робить його більш придатним для використання на установках із обмеженою здатністю до видалення побічних продуктів бродіння. Таким чином, вибір активатора має базуватися на балансі між бажаним виходом спирту та технічними можливостями ректифікаційного обладнання.

Висновки

1. Для підвищення ефективності ферментації кукурудзяного сусла і покращення якісних показників бражки найефективнішими виявилися ферментні препарати ТОВ «БІОТЕСТ». Їх використання дозволяє збільшити концентрацію етилового

спирту в зрілій бражці на 13–22 % (від 12.4 до 14.3 % об.) в залежності від вмісту сухих речовин у суслі, виключити синтез ізопропанолу і зменшити вміст альдегідів, естерів і метилового спирту.

2. Видалення зародку зерна дозволяє підвищити ефективність процесу ферментації кукурудзяного сусла, зменшити в бражці вміст побічних і вторинних продуктів завдяки зменшенню вмісту баластних речовин і збільшенню крохмалистості. Водночас концентрація етилового спирту в зрілій бражці збільшується на 7.7–8.9 %, а вміст метанолу, вищих спиртів сивушного масла, естерів та етилацетату зменшується на 40, 19.5, 12.5 і 13.2 % відповідно.

3. Найменша кількість органічних домішок утворювалась у бражці, отриманій із зерна з видаленими зародками шляхом зброджування сусла з вмістом СР 23–24 %.

4. Активатор 2 підвищує вихід етилового спирту на 3.8 %, але спричиняє більше утворення домішок, тому його доцільно використовувати за умови ефективного видалення побічних продуктів бродіння. Активатор 3 забезпечує менше зростання виходу (1.1 %), але утворює менше домішок, що робить його придатним для установок із обмеженою здатністю до їх видалення. Вибір активатора має базуватися на технічних можливостях брагоректифікаційної установки.

References

- [1] Babych, I., Boiko, P., Bondar, M., Kuts, A. (2022). Aspects of ethanol manufacture. Different purpose – different technological and economic solutions. *Danish Scientific Journal*, 60, 73–77.
- [2] Boiko, P. (2019). Technological and economic features of ethyl technical ethanol manufacture. Modern engineering and innovative technologies: *International periodic scientific journal*, 8(2), 39–42.
- [3] Ukrainets, A., Khomichak, L., Shyian, P., Oliinychuk, S. (2007). [Alcohol industry on the way to innovative development]. *Kharchova i pererobna promyslovist*, 12, 16–19 (in Ukrainian).
- [4] Balat, M., Balat, C. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(5), 551–573. doi:10.1016/j.pecs.2007.11.001
- [5] Franceschin, G., Franceschin, G., Zamboni, A., Bezze, F., Bertucco, A. (2008). Ethanol from corn: a technical and economical assessment based on different scenarios. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(5), 488–498. doi:10.1016/j.cherd.2008.01.001.
- [6] [News Service. Bioethanol industry of Ukraine. Assessment and prospects]. (in Ukrainian). <https://latifundist.com/analytics/30-bioetanol-stan-ta-otsinka-galuzi-v-ukrayini>
- [7] Arslan, M., Tahir, H., Zareef, M., Shi, J., Allah, A., Bilal, M., Xiaowei, H., Zhihua, Li., Xiaobo, Z. (2021). Recent trends in quality control, discrimination and authentication of alcoholic beverages using nondestructive instrumental techniques. *Trends in Food Science & Technology*, 107, 80–113, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.021>.
- [8] Dewulf, J. (2002). Analysis of volatile organic compounds using gas chromatography. *Trac-trends in Analytical Chemistry*, 21(9–10), 637–646. <http://hdl.handle.net/1854/LU-158121>.
- [9] Plutowska, B., Wardenski, W. (2008). Application of gas chromatography-olfactometry (GC-O) in analysis and quality assessment of alcoholic beverages – a review. *Food Chemistry*, 107, 449–463, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.08.058>.
- [10] Oliinychuk, F.T., Danilova, K.O. (2023). Dextrinization of starch with alpha-amylase in the conditions of ethyl alcohol production. *Journal of Chemistry and Technologies*. 31(3), 627–634. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3>.
- [11] Shyian, P. L., Sosnytskyi, V. V., Oliinychuk, S. T. (2009). [Innovative technologies of the alcohol industry. Theory and practice: a monograph]. Kyiv: Askaniia. (in Ukrainian).

- [12] Kosminska, O. S. (2021). [Improving the technology of alcohol from starch-containing raw materials with intensification of the processes of preparation of matured mash at the conditions of the Uladovsk distillery]. (Master's dissertation). (in Ukrainian).
- [13] Maicas, S. (2020). The Role of Yeasts in Fermentation Processes. *Microorganisms*, 8(8), 1142, <https://doi.org/10.3390/microorganisms8081142>.
- [14] Kovalchuk, S., Mudrak, T., Nakonechna A. (2021). Study of quality of alcohol obtained by fermentation of highly concentrated grain wine by different races of yeast. *Restaurant and hotel consulting. Innovations*, 1(4), 158–168. <https://doi.org/10.31866/2616-7468.4.1.2021.234836>
- [15] Diaz-Hellin, P., Ubeda, J., Briones A. (2013). Improving alcoholic fermentation by activation of *Saccharomyces* species during the rehydration stage. *LWT - Food Science and Technology*, 50, 126–131.
- [16] Bonassa, G., Schneider, L., Cremonez, P., de Jesus de Oliveira, C., Teleken, J. G., Frigo, E. P. (2015). Optimization of first generation alcoholic fermentation process with *Saccharomyces cerevisiae*. *Acta Scientiarum: Technology, Brazil*, 37(3), 313–320, <https://doi.org/10.4025>.
- [17] Hua, X., Yang, R. (2015). *Enzymes in starch processing*. In book *Enzymes in Food and Beverage Processing*. Boca Raton. CRC Press. <https://dx.doi.org/10.1201/b19408>.
- [18] Bednarska, K. A. (2015). Kinetic modelling of enzymatic starch hydrolysis. Wageningen: *Wageningen University*. <https://edepot.wur.nl/343988>
- [19] Mohammed Salah, Khadija Marakchi, Najia Komiha and Maria Luisa Senent (2024). Theoretical Spectroscopic Study of Isopropyl Alcohol ($\text{CH}_3\text{-CHOH-CH}_3$), *The Astrophysical Journal*, 963(143), 12. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad1fef>.
- [20] Mishchenko, O. S., Oliinyk, S. I. (2023). [Implementation of the national standard for ethyl alcohol]. *Naukovi pratsi DNU «UkrNDIspyrtbioprod»: «Biotekhnolohii prodovolchyykh produktiv: problemy i perspektyvy»*, 46–51. (in Ukrainian).
- [21] Ponnampalam, E., Steele, D.B., Burgdorf, D. (2004). Effect of Germ and Fiber Removal on Production of Ethanol from Corn. (February 2004). *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 113–116(1-3), 837–842. doi: 10.1385/ABAB:115:1-3:0837.
- [22] Ponnampalam, E., Steele, D. B., Burgdorf, D., McCalla, D. (2004). Effect of germ and fiber removal on production of ethanol from corn. *Appl Biochem Biotechnol*, 113–116, 837–42, doi: 10.1385/abab:115:1-3:0837.
- [23] Bulii, Y. V., Obodovych, O. M., Sydorenko, V. V. (2021). Increasing the degree of extraction organic impurities of rectified alcohol. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 43(1), 68–74. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.8>.
- [24] Bulii, Yu. V., Obodovych, O. M. (2019). [Energy-efficient bioethanol technology]. *Enerhiia. Biznes. Komfort*, Odesa: ONAKhT, 13–14. (in Ukrainian).
- [25] Shiyan, P., Mudrak, T., Korylenko, R., Kovalchuk, S. (2017). Effect of nitrogen and mineral composition of the high-concentrated wort made from starch-containing raw materials on the cultivation of yeast. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 11, 72–77.