

УДК 664.68:664.661

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.2.2026.46>

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ХЛІБА ПШЕНИЧНОГО НА ЗАКВАСЦІ З ТЕФОВИМ БОРОШНОМ

Валентина Миколаївна Чиж

Аспірантка

<https://orcid.org/0000-0001-9488-4385>

Інститут продовольчих ресурсів НААН України

02002, вул. Євгена Сверстюка, 4а, м. Київ, Україна

Оксана Василівна Науменко

Доктор технічних наук, професор

<https://orcid.org/0000-0002-1691-1381>

Інститут продовольчих ресурсів НААН України

02002, вул. Євгена Сверстюка, 4а, м. Київ, Україна

Анотація. Борошно тефу є цінною та перспективною сировиною для збагачення пшеничного хліба. За вмістом білків, харчових волокон, вітаміну В₅, калію, фосфору, заліза, міді та марганцю тефове борошно суттєво перевершує пшеничне. Для покращення реологічних характеристик виробів з тефовим борошном було застосовано біотехнологічний спосіб приготування тіста на заквасці з чистих культур молочнокислих бактерій вітчизняної селекції «Біолайт». Встановлено, що використання борошна тефу у кількості 10 % та закваски в кількості 10% поліпшувало як якість, так і харчову цінність пшеничного хліба. Проведення багатофакторного експерименту ПФЕ 2³ дозволяє всебічно оцінити вплив всіх факторів на технологічну систему виробництва пшенично-тефового хліба та чітко встановити оптимальні концентрації інгредієнтів та параметри процесу.

Предметом досліджень є технологічний процес виробництва пшенично-тефового хліба на пшеничній заквасці. Метою дослідження є встановлення оптимальної рецептурної композиції та параметрів технологічного процесу виробництва хліба пшеничного на заквасці з тефовим борошном.

Було використано метод математичного планування експерименту. Планування експерименту виконано за ортогональним симетричним планом Бокса–Бенкіна.

На основі проведених досліджень здійснено математичну обробку експериментальних даних та отримано функції відгуку для всіх досліджуваних параметрів з використанням форми, створеної в MS Excel. Встановлено інтервали оптимізувальних факторів: x_1 – кількість борошна тефу, %; x_2 – кількість пшеничної закваски, %; x_3 – тривалість вистоювання тіста, τ·60с. Критеріями оптимальності обрано Y_1 (питомий об'єм) та Y_2 (кислотність титрована). Отримані поверхні відклику функцій Y_1 та Y_2 показали досягнення оптимальних показників критерію оптимальності, які відповідають бажаним значенням якості готового хліба за відповідних значень оптимізаційних факторів x_1 , x_2 та x_3 . Таким чином встановлено технологічні параметри та кількість рецептурних компонентів (борошна тефу, пшеничної закваски) при виготовленні пшенично–тефового хліба безопарним прискореним способом: кількість борошна тефу (x_1) – 13%, кількість пшеничної закваски (x_2) – 15%, тривалість вистоювання тіста (x_3) – 34·60 с.

Ключові слова: хліб пшеничний, харчова цінність, борошно тефове, закваска, математичне моделювання, багатофакторний експеримент.

УДК 664.68:664.661

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.2.2026.46>

OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SOURDERED WHEAT BREAD PRODUCTION WITH TEA FLOUR

Valentyna Chyzh

Postgraduate

<https://orcid.org/0000-0001-9488-4385>

Institute of Food Resources of the NAAS of Ukraine

02002, 4A Yevgen Sverstyuk Str., Kyiv, Ukraine

Oksana Naumenko

Doctor of Technical Sciences, Professor

<https://orcid.org/0000-0002-1691-1381>

Institute of Food Resources of the NAAS of Ukraine

02002, 4A Yevgen Sverstyuk Str., Kyiv, Ukraine

Abstract. Teff flour is a valuable and promising raw material for enriching wheat bread. In terms of protein, dietary fiber, vitamin B, potassium, phosphorus, iron, copper, and manganese, teff flour is significantly superior to wheat flour. To improve the rheological properties of products containing teff flour, a biotechnological method for preparing sourdough from pure cultures of the domestic lactic acid bacteria selection «Biolight» was used. It was found that using 10% teff flour and 10% sourdough improved the quality and nutritional value of wheat bread. Conducting a multifactorial experiment, PFE 23, allows a comprehensive assessment of the influence of all factors on the technological system of wheat–teff bread production and clearly establishes the optimal concentrations of ingredients and process parameters.

The research subject is the technological process of wheat–teff bread production using wheat sourdough. The aim of the study is to establish the optimal recipe composition and technological process parameters for the production of wheat bread made with teff flour using sourdough.

The method of mathematical experimental planning was used. The experimental design was conducted according to an orthogonal, symmetrical Box–Behnken design.

Based on the conducted studies, the experimental data were mathematically processed, and response functions were obtained for all studied parameters using a custom Excel form. The intervals for the optimization factors were established: x_1 – amount of teff flour, %; x_2 – amount of wheat sourdough, %; x_3 – duration of dough proofing, $\tau \times 60$ s. The optimality criteria were selected as Y_1 (specific volume) and Y_2 (titrated acidity). The obtained response surfaces for the functions Y_1 and Y_2 showed the achievement of optimal values of the optimality criterion, corresponding to the desired quality of the finished bread for the optimization factors x_1 , x_2 , and x_3 . Thus, the technological parameters and the amount of recipe components (teff flour, wheat sourdough) in the manufacture of wheat–teff bread by the unleavened accelerated method were established: the amount of teff flour (x_1) – 13%, the amount of wheat sourdough (x_2) – 15%, the duration of dough proofing (x_3) – 34·60 s.

Keywords: wheat bread, nutritional value, teff flour, sourdough, mathematical modeling, multivariate experiment.

ВСТУП. Відомо, що хліб з пшеничного борошна вищого та першого сортів незбалансований за амінокислотним складом, збіднений за вмістом харчових волокон, вітамінів і мінеральних речовин (Hrishchenko, 2025). Тому такі вироби першочергово потребують корегування за вмістом важливих для організму нутрієнтів. З цією метою їх збагачують рослинною сировиною, яка є джерелом корисних речовин для організму людини, наприклад, борошном спельтовим, амарантовим, конопляним, горіхами, насінням льону тощо

(Pakhomska, 2019). Одним із перспективних інгредієнтів для покращення харчової цінності пшеничного хліба є тефове борошно (Barretto et al., 2021; Zięc et al., 2021).

Встановлено, що за вмістом білків, харчових волокон, вітаміну B₅, калію, фосфору та заліза тефове борошно суттєво перевершує пшеничне (Alemneh et al., 2022). Наприклад, у ньому міститься більше білка в 1,3 рази, ніацину – в 2,8 разів, заліза – в 6,3 рази, порівняно з пшеничним борошном вищого сорту. Також, борошно тефове на відміну від пшеничного містить мідь та марганець (Woldemariam et al., 2019; Pulivarthi et al., 2022).

Наукові дослідження з цієї теми є актуальними, оскільки дозволяють розширити сегмент пшеничного хліба оздоровчого–профілактичного призначення для масового споживання населенням.

В роботі (Falendysh et al., 2020) пропонують вносити тефове борошно в кількості 20% до маси пшеничного вищого сорту в технології пшеничного хліба. Але обраний безопарний спосіб тістоприготування в технології пшенично–тефового хліба є недостатньо ефективним, оскільки не забезпечує повне набухання оболонкових частинок тефового борошна.

Тефове борошно відрізняється високим умістом клітковини, тому при включенні його до рецептури хліба погіршуються реологічні властивості тіста, і як наслідок, якість хліба, що ускладнює його застосування в технології хліба. Пошук ефективних технологічних способів покращення якості пшеничного хліба з тефовим борошном є актуальним завданням та потребує вирішення.

Попередніми дослідженнями було встановлено, що дозування тефового борошна в кількості 20 % замість маси пшеничного борошна призводить до зниження якості клейковини та погіршення показника пружності тіста, при цьому якість готових виробів погіршувалась із зростанням дозувань з 10% до 20%. Для покращення якості пшенично–тефового хліба застосовано біотехнологічний спосіб приготування тіста на заквасці з чистих культур МКБ «Біолайт». Шляхом пробних лабораторних випікань встановлено, що використання борошна тефу у кількості 10 % та закваски в кількості 10% поліпшувало якість та харчову цінність пшеничного хліба (Naumenko et al., 2023).

Але в даній технологічній системі змінним фактором було лише дозування тефового борошна, при цьому кількість закваски була однаковою. Проведення однофакторного експерименту не дозволяє всебічно оцінити вплив всіх факторів на технологічну систему та чітко встановити оптимальні концентрації інгредієнтів, параметри процесу.

Тому поставлено завдання пошуку оптимальних умов функціонування даної технологічної системи шляхом математичного моделювання з позицій системного аналізу та реалізувати план повного трьохфакторного експерименту ПФЕ 2³.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ – встановити оптимальну рецептурну композицію та параметри технологічного процесу виробництва хліба пшеничного на заквасці з тефовим борошном.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. Для покращення якості пшенично–тефового хліба деякі автори рекомендують застосовувати технології виробів на опарах, спонтанній ферментації тощо (Chochkov et al., 2022).

Однак, закваски–підкислювачі, що пропонують у роботі (Chochkov et al., 2022) мають в складі органічні кислоти, які можуть негативно впливати на технологічний процес, зокрема, життєдіяльність дріжджових клітин та органолептичні показники готової продукції.

Спонтанне заквашування борошна має тривалий час циклу розведення, не дає повною мірою забезпечити стабільність та надійність процесу. Такі закваски мають нижчу підймальну силу та активність молочнокислих бактерій (МКБ) та не забезпечують мікробіологічну чистоту готових виробів.

Закваски на чистих культурах дріжджів та МКБ є більш стабільними та надійними, з вищими показниками якості, порівняно зі спонтанними заквасками, мають у складі стійку мікробіоту для пригнічення діяльності сторонніх мікроорганізмів. Використання таких

заквасок позитивно впливає на прискорення дозрівання тіста, розпушення тістових заготовок, реологічні характеристики тіста завдяки збалансованому співвідношенню летких та нелетких кислот (Naumenko, Chizh, 2022).

Результати досліджень щодо встановлення раціонального дозування борошна тефу до пшеничного борошна, яке б забезпечувало високу харчову цінність готового хліба також відрізняються. За даними науковців, дозування варіюється в доволі широких межах – від 5 до 77,5 % (Zięć et al., 2021; Pulivarthi et al., 2022).

Незважаючи на практичну цінність таких результатів недостатньо вивченими залишаються способи приготування тіста, які б покращували об'єм та структурно-механічні властивості пшенично-тефогового хліба. Тому доцільним є встановлення ефективних технологічних підходів до виготовлення пшенично-тефогового хліба, що дозволить отримати вироби з високими споживчими характеристиками.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ. У дослідженнях використовували сировину українського виробництва: борошно пшеничне вищого сорту ТМ «Зернарі», дріжджі ТМ «Криворізькі дріжджі», сіль ТМ «Дрогобицька солеварня», олія соняшникова ТОВ «Кама», цукор ТзОВ «Радехівський цукор», вода.

Тефове борошно готували з насіння тефу сорту «Манія», вирощеного в умовах агрофірми «Колос» Київській області. У лабораторних умовах насіння очищали від домішок, подрібнювали на млинку лабораторному та потім послідовно просіювали на капронових ситах із діаметром отворів 160 та 250 мкм.

Хлібопекарська закваска, виготовлена з пшеничного борошна та бактеріальної композиції «Біолайт» (ІУ 00419880.01:2023) з чистих культур *Lactobacillus plantarum*, *L. ramosus*, *L. fermentum* та *L. brevis* у відділі технологій хліба та біотрансформації зернових продуктів Інституту продовольчих ресурсів НААН. Закваску розведено за способом згідно з (Naumenko et al., 2023). Показники якості закваски у виробничому циклі наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Показники якості закваски у виробничому циклі

Показник	Значення
Масова частка вологи, %	68±0,1
Тривалість бродіння, год	8±0,1
Кінцева кислотність, град	18,0±0,1
Активність МКБ, хв	35±1

Джерело: розроблено авторами

Пшеничний хліб виготовляли за рецептурою паляниці «Кременецька», до якої входить, у кг на 100 кг борошна: борошно пшеничне вищого сорту 100 кг, дріжджі хлібопекарські пресовані 2,0 кг, сіль кухонна харчова 1,5 кг, цукор 2,0 кг, олія соняшникова 2,0 кг, вода 56,4 кг. Тісто для контролю готували безопарним способом, а зразки з борошном тефу – безопарним прискореним способом на заквасці. Тривалість бродіння становила 100±2 хв за температури 32±2 °С до збільшення об'єму в 1,5 рази. Замішування проводили на тістомісильній машині KVL4100S (Китай) впродовж 15±1 хв, формування проводили вручну. Вистоювання заготовок проводили впродовж 30–40 хв за температури 35±2 °С в шафі для вистоювання XLT 133–UNOX (Італія), маса тістових заготовок становила 290±10 г. Готовність тістових заготовок у процесі вистоювання визначали за їх об'ємом. Далі тістові заготовки направляли до печі Unox XFT133 (Італія), де вони випікались за температури 180–200 °С впродовж 32±2 хв.

При проведенні оптимізації технологічного процесу було використано метод математичного планування експерименту. На основі проведених досліджень здійснено

математичну обробку експериментальних даних та отримано функції відгуку для всіх досліджуваних параметрів з використанням форми, створеної в MS Excel (Kumar et al., 2021).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ. На першому етапі було встановлено інтервали оптимізувальних (змінних) факторів: x_1 – кількість борошна тефу, %; x_2 – кількість пшеничної закваски, %; x_3 – тривалість вистоювання тіста, τ -60с. Тривалість вистоювання обрана з огляду на те, що кількість закваски знаходиться в прямій залежності від тривалості вистоювання, при зростанні дозування закваски тривалість вистоювання скорочується. Планування експерименту виконано за ортогональним симетричним планом Бокса–Бенкіна (Kumar et al., 2021). На основі попередніх досліджень було підібрано фактори експерименту на верхньому та нижньому рівнях варіювання. Умови проведення ПФЕ 2³ наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Рівні та інтервали факторів варіювання

Рівні	Фактори		
	Кількість борошна тефу (X ₁), %	Кількість закваски (X ₂), %	Тривалість вистоювання тіста (X ₃), τ -60с
Основний (x _{i0})	16	14	35
Інтервал варіювання (Δx_i)	6	6	5
Нижній (x _{i min})	10	8	30
Верхній (x _{i max})	22	20	40

Джерело: розроблено авторами

Критерієм оптимальності обрано питомий об'єм хліба, як найбільш чутливий до зміни оптимізувальних факторів показник, який легко вимірюється та повинен досягати максимального значення. Обмежувальним критерієм оптимальності обрано кислотність хліба, оскільки за ДСТУ 7517:2014 «Хліб із пшеничного борошна. Загальні технічні умови» цей показник не повинен перевищувати 5,0 град. Таким чином, в якості функцій відклику прийнято: Y_1 – питомий об'єм хліба, $\text{cm}^3/100 \text{ г}$; Y_2 – кислотність титрована, град.

Результати експерименту з визначення питомого об'єму хліба в залежності від кількості борошна тефу, закваски та тривалості вистоювання тіста представлено в табл. 3.

Таблиця 3. Результати експерименту по визначенню питомого об'єму хліба, $\text{cm}^3/100 \text{ г}$

j	Фактори			Y _{1;сер}
	x ₁	x ₂	x ₃	
1	-1	-1	-1	2,21
2	1	-1	-1	2,15
3	-1	1	-1	2,25
4	1	1	-1	2,17
5	-1	-1	1	2,24
6	1	-1	1	2,16
7	-1	1	1	2,30
8	1	1	1	2,20
9	-1,21532	0	0	2,28
10	1,215319	0	0	2,17
11	0	-1,2153189	0	2,23

12	0	1,21531889	0	2,27
13	0	0	-1,2153189	2,24
14	0	0	1,2153189	2,29
15	0	0	0	2,28

Джерело: розроблено авторами

Для побудованих функцій відгуку сформовано систему рівнянь, на основі якої проведено пошук оптимальних параметрів з використанням нелінійного методу узагальненого зведеного градієнта за допомогою надбудови «Пошук рішень» (Solver) у пакеті MS Excel ($n=3$; $p \geq 0,95$; $\delta=3-5\%$) (Kumar et al., 2021).

У результаті обробки експериментальних даних було отримано регресійні залежності параметра оптимізації (питомого об'єму) від оптимізувальних факторів.

Після розрахунків та перетворень у натуральних змінних поліном Y_1 має вигляд:

$$Y_1 = 1,1925 + 0,0340x_1 + 0,0172x_2 + 0,0384x_3 - 0,0001x_1x_2 - 0,0002x_1x_3 + 0,0002x_2x_3 - 0,001x_1^2 - 0,0006x_2^2 - 0,0005x_3^2$$

Критерій Фішера для отриманої математичної моделі становив $F = 0,000437 \leq 8,72868$, що свідчить про адекватність отриманої регресії. Отже, функція відгуку параметра оптимізації статистично достовірно відображає показники якості хліба, які досліджуються. З рівняння видно, що в даній області факторного простору параметри оптимізації різною мірою залежать від вхідних параметрів, що варіюють: функція Y_1 найбільшою мірою зумовлена впливом фактора x_3 (тривалість вистоювання); якщо значення Y_1 максимальне, до оптимальних значень функції призводить збільшення тривалості вистоювання (коефіцієнт $x_3=+0,0384$).

Поверхні відклику питомого об'єму залежно від кількості борошна тефу, закваски та тривалості вистоювання тіста наведено на рис. 1–3. Дані наведені з урахуванням похибки експерименту.

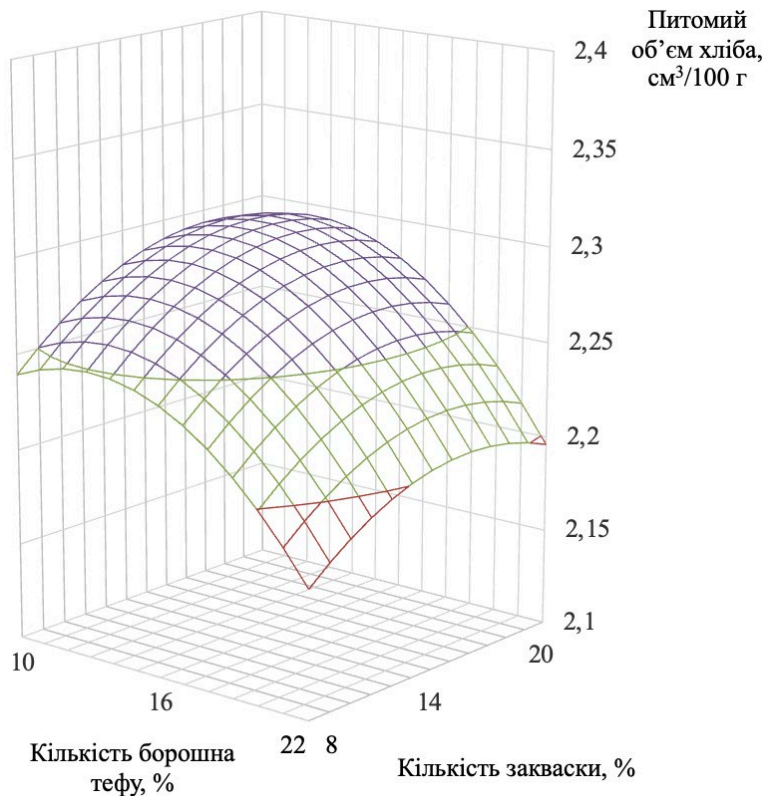


Рисунок 1. Залежність питомого об'єму від кількості борошна тефу та закваски при тривалості вистоювання тіста 35·60с

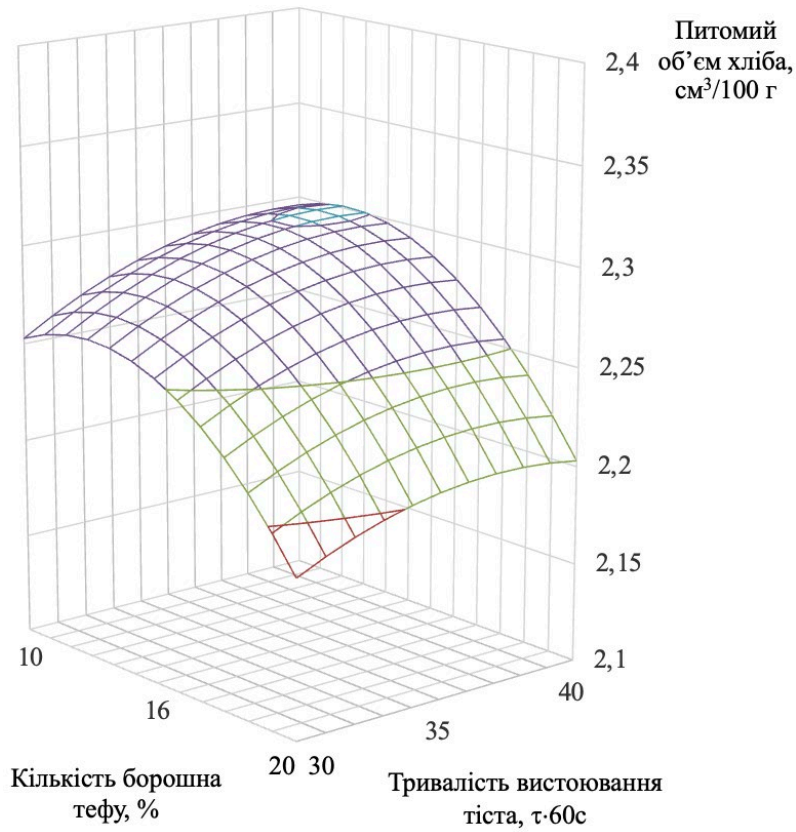


Рисунок 2. Залежність питомого об'єму від кількості борошна тefу та тривалості вистоювання тіста при кількості закваски 14%

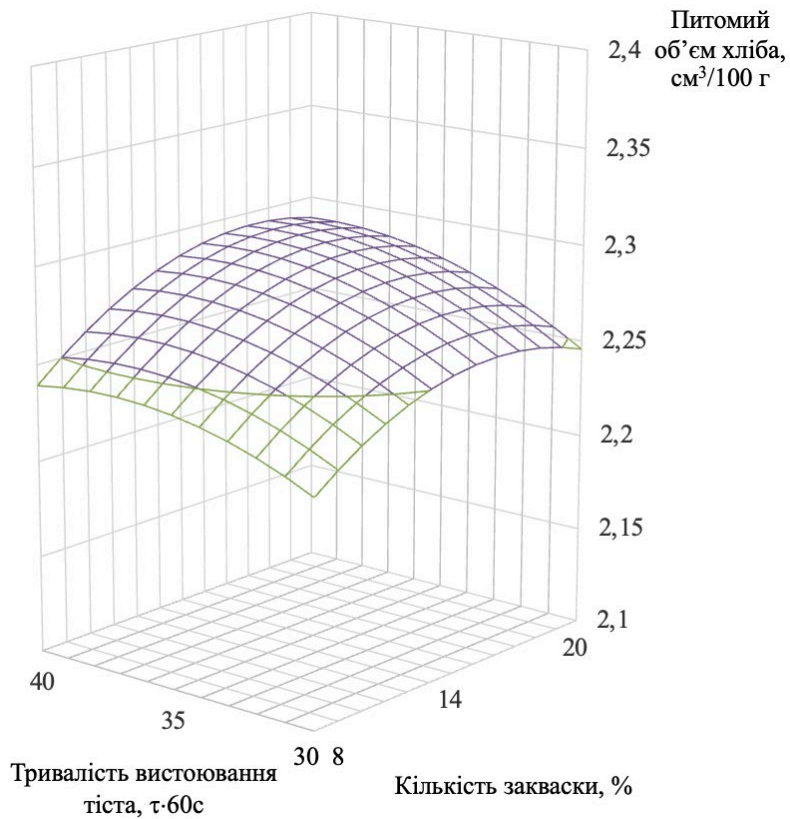


Рисунок 3. Залежність питомого об'єму від кількості закваски та тривалості вистоювання тіста при кількості борошна тefу 16%

Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження з визначення кислотності повного ряду модельних зразків наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Результати експерименту по визначенню кислотності, град

j	Фактори			Y ₂ ; сеп
	x ₁	x ₂	x ₃	
1	-1	-1	-1	3,1
2	1	-1	-1	3,1
3	-1	1	-1	3,8
4	1	1	-1	3,9
5	-1	-1	1	4,3
6	1	-1	1	4,4
7	-1	1	1	5,2
8	1	1	1	5,3
9	-1,21532	0	0	4,4
10	1,215319	0	0	4,9
11	0	-1,2153189	0	3,9
12	0	1,21531889	0	5,1
13	0	0	-1,2153189	2,8
14	0	0	1,2153189	4,9
15	0	0	0	4,5

Джерело: розроблено авторами

Після розрахунків та перетворень регресійних залежностей параметра оптимізації (кислотності титрованої) від оптимізувальних факторів поліном Y₂ в натуральних змінних має вигляд:

$$Y_2 = -22,0324 - 0,1243x_1 - 0,0109x_2 + 1,3843x_3 + 0,0028x_1x_2 + 0,0014x_1x_3 + 0,0024x_2x_3 - 0,0001x_1x_2x_3 + 0,0026x_1^2 - 0,0002x_2^2 - 0,0183x_3^2$$

Критерій Фішера для отриманої математичної моделі $F = 0,09114 \leq 8,72868$, що свідчить про адекватність отриманої регресії, тобто функція відгуку параметра оптимізації статистично достовірно відображає показники якості хліба, які досліджуються.

З рівняння видно, що в даній області факторного простору параметри оптимізації різною мірою залежать від вхідних параметрів, що варіюють: функція Y₂ найбільшою мірою зумовлена впливом фактора x₃ (тривалість вистоювання); якщо значення Y₁ максимальне, до оптимальних значень функції призводить збільшення тривалості вистоювання (коефіцієнт x₃=+1,3843).

Поверхні відклику кислотності залежно від кількості борошна тефу, закваски та тривалості вистоювання тіста наведено на рис. 4–6. Дані наведені з урахуванням похибки експерименту.

Для математичного пошуку оптимальних параметрів процесу виробництва хліба пшеничного на заквасці з тефовим борошном використовували спосіб рішення компромісних задач багатопараметричної оптимізації нелінійним методом узагальненого зведеного градієнта. Для рішення поставленої задачі нами була використана надбудова «Пошук рішень» пакету MS Excel (Kumar et al., 2021). Згідно методики обрано цільову функцію, яку лімітовано до бажаного значення. В якості цільової функції обрано питомий об'єм хліба, який має прийняти максимально можливе значення.

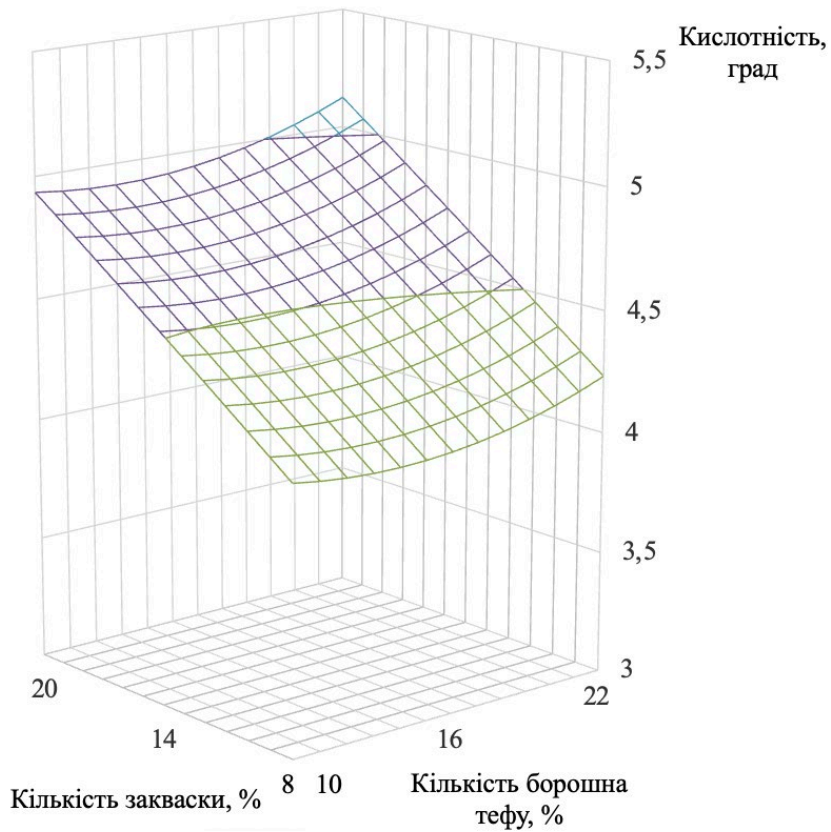


Рисунок 4. Залежність кислотності від кількості борошна тефу та закваски при тривалості вистоювання тіста 35·60с

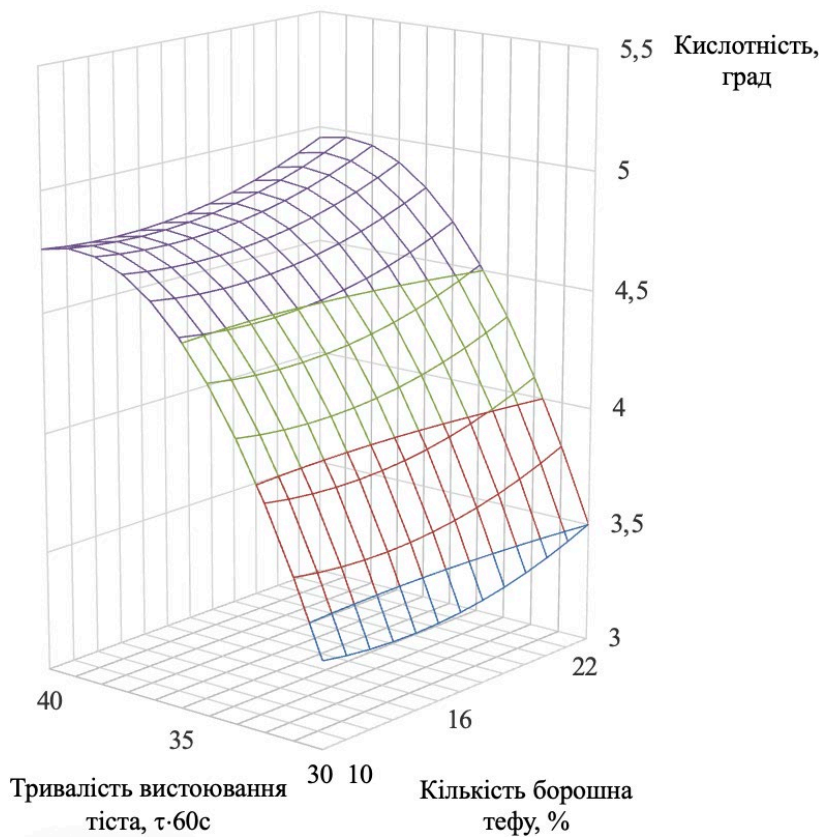


Рисунок 5. Залежність кислотності від кількості борошна тефу та тривалості вистоювання тіста при кількості закваски 14%

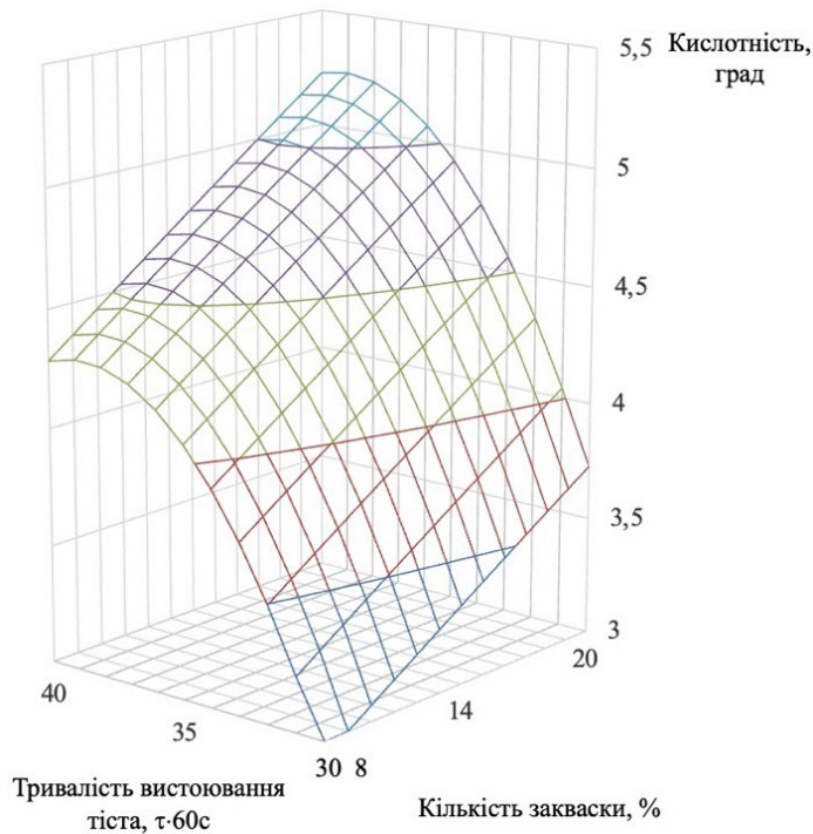


Рисунок 6. Залежність кислотності від кількості закваски та тривалості вистоювання тіста при кількості борошна тефу 16%
Джерело: розроблено авторами

Знайдене рішення оптимізаційної задачі відповідало всім необхідними вимогам. З допустимим відхиленням 5% процес виробництва хліба пшеничного на заквасці з тефовим борошном характеризується оптимальними рівнями дозування рецептурних компонентів та технологічними параметрами, які наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Оптимальні показники технологічного процесу виробництва хліба пшеничного на заквасці з тефовим борошном

Фактори оптимізації	Оптимізовані значення
Кількість борошна тефу, %	12,0...13,3
Кількість пшеничної закваски, %	14,6...16,1
Тривалість вистоювання тіста, τ·60с	32,7...36,1

Джерело: розроблено авторами

Враховуючи особливості інтепретації технологічних результатів прийнято такі значення: кількість борошна тефу – 13%, кількість пшеничної закваски – 15%, тривалість вистоювання тіста – 34·60 с.

Методи математично–статистичного моделювання широко застосовуються для розробок технологій хлібобулочних виробів, зокрема, з використанням процесу заквашування.

Так, V. Lanska (2025) було запропоновано метод планування експерименту за ортогональним симетричним планом Бокса–Бенкіна для оптимізації інгредієнтного складу і технологічних параметрів приготування рисової закваски з метою її використання в технології безглютенового рисово–соргового хліба. Для математичного пошуку оптимальних параметрів процесу бродіння закваски науковці використовували спосіб рішення компромісних задач багатопараметричної

оптимізації нелінійним методом узагальненого зведеного градієнта. З'ясовано, що адекватність отриманих рівнянь регресії забезпечується при таких значеннях факторів: масова частка стартової культури 0,38...0,40 % за температури бродіння 27,9...28,1°C протягом 20,9...21,9 год. При цьому забезпечується оптимальна кислотність і підйомна сила закваски, питомий об'єм та пористість готового хліба, які також були обрані критеріями оптимальності.

Для оптимізації ферментаційного субстрату та технології закваски для гамбургерського хліба було проведено однофакторний експеримент у поєднанні з експериментом з поверхнею відгуку Бокса–Бенкіна. Рівень бактеріостатичного впливу закваски на *Penicillium* був взятий як критерій оптимальності. Встановлено ефективні параметри ферментації закваски: внесення бактеріальної композиції з молочнокислих бактерій та сахарози, вміст сахарози – 4,1%, час ферментації – 20 год. температура ферментації – 30°C. За цих умов бактеріостатичний потенціал закваски був вищим на 32,67% порівняно з теоретично прогнозованим значенням, відносна похибка становила 4,41% (Zhao et al., 2021). Такі результати слугували підтвердженням коректності вибраного оптимізаційного методу для вирішення технологічних задач такого типу.

В роботі I. Hetman (2023) застосував багатофакторний експеримент ПФЕ 23 за ортогональним симетричним планом Бокса–Бенкіна для оптимізації технологічних параметрів приготування вівсяних, гречаних та рисових заквасок у виробничому циклі. Отримані закваски було використано в технології різного асортименту хліба: пшеничного, пшенично–житнього та безглютенового. А для відбору оптимальних параметрів приготування заквасок було застосовано інший метод – програму «крутого сходження» Бокса–Вілсона. З'ясовано, що збільшення кількості стиглої закваски, температури та тривалості бродіння зумовлює зростання критерію оптимальності – кислотності закваски. Встановлено технологічні параметри приготування заквасок (залежно від виду) у виробничому циклі: масова частка вологи (x_1) – 35–50 %; тривалість бродіння (x_2) – 12–14 год; температура бродіння (x_3) – 28 °C.

Необхідно зазначити, що метод Бокса–Вілсона є дуже чутливим до вибору кроку, а по мірі наближення до максимуму (екстремуму) градієнт зменшується, що призводить до дуже малих кроків та тривалішого пошуку.

В роботі (Korniienko et al., 2024) було розроблено інший метод оптимізації процесу отримання закваски – сплайн-модель, яка визначає оптимальний вміст інгредієнтів у рецептурі хлібної закваски (лактози, гідратованого насіння льону, розторопші, етанольного екстракту прополісу). Математична обробка експериментальних даних дозволила визначити мінімальний час бродіння борошняного компонента, який коливався від 66 год 27 хв до 72 год 40 хв. З'ясовано, що температура бродіння 40 °C призводить до розрідження закваски, збільшення титрованої кислотності та погіршення підйомної сили закваски, яка не повинна перевищувати 25 хв.

Даний метод має високу обчислювальну складність при великій кількості точок, які задані в плані експерименту. Крім того метод чутливий до наявності різних розривів у даних, що важко реалізувати при плануванні технологічного процесу виробництва хліба.

Розробку оптимізаційних моделей також було обрано в роботі (Farahmand et al., 2021). Шляхом апроксимації квадратичної моделі з використанням методу поверхні відгуку та шести параметрів: виходу тіста, температури, часу, вмісту фруктози, вмісту фенілаланіну та співвідношення висівок встановлено, що ферментація закваски була оптимальною при 25 °C протягом 66,5 год з виходом тіста 400 %, вміст фруктози – 6%; вміст фенілаланіну – 0,3%; вміст висівок – 20% для отримання ароматів троянди та меду з високою ефективністю (2–фенілетиловий спирт – 127,1 мг/л та 2–фенілетилацетат – 70,7 мг/л).

Для оптимізації умов ферментації рослини *Chenopodium formosanum*, яка поширена в Тайвані, для виробництва хлібної закваски також була застосована методологія поверхні відгуку. Оптимальними умовами були наступні: температура – 33,5 °C; вміст фруктози – 7,7% та вихід тіста – 332,8 %, що дозволило отримати антиоксидатну активність (критерій оптимальності) на рівні 6,82 ммоль/кг (Chen et al., 2021).

Використовуючи сенсорні оцінки як змінну відгуку, науковці оптимізували параметри процесу виробництва хліба на заквасці за допомогою методології поверхні відгуку. Результати показали, що оптимальний час дозрівання рідкої закваски коливався від 9 до 21 год. Після 4 днів безперервного поповнення кількість життєздатних клітин лактобактерій та штамів дріжджів стабілізувалися. Оптимальні параметри процесу для виробництва хліба на заквасці були наступними: час бродіння – 7 год; час дозрівання рідкої закваски – 15 год; дозування борошна в рідкій заквасці – 25%; дозування рідкої закваски – 40%. Хліб, виготовлений за цих умов, демонстрував більший об'єм, покращену текстуру та посилений смак (Tian, Zhao, 2025).

Однак, використання методу поверхні відгуку складно реалізувати під час вибору фізико-хімічних величин за критерій оптимальності, які стосуються якості хліба. Результати поверхні відгуку (її точність) залежать від точного розташування вибраних точок експерименту, а також від точності вимірювань. Крім того, чим більше факторів впливає на процес, тим важче інтерпретувати поверхню відгуку та знаходити екстремуми.

В роботі (Zhao et al., 2024) за допомогою ортогонального багатофакторного експерименту було отримано дві кращі рецептури захисних агентів для сушіння закваски. Перша рецептура: знежирене молоко – 35%; мальтодекстрин – 7,5% та трегалоза – 25%. При сублімаційному сушінні на такому захисному середовищі виживаність мікроорганізмів становила близько 93%. Друга рецептура: знежирене молоко – 35%, мальтодекстрин – 10% та трегалоза – 15%; коефіцієнт виживання клітин після сушіння методом розпилення становив близько 90%.

Для реалізації комплексних нелінійних залежностей параметрів технологічного процесу та інгредієнтного складу рецептури, які ми досліджуємо в роботі, використання ортогонального багатофакторного експерименту є не доцільним, оскільки не дозволяє виявити кривизну поверхні відгуку.

Як бачимо, оптимізаційні фактори та критерії оптимальності значно відрізняються навіть при однакових об'єктах дослідження, що здебільшого залежить від типів залежностей величин, мети дослідження та особливостей технологічної системи.

Використані нами оптимізаційні методи планування експерименту за ортогональним симетричним планом Бокса–Бенкіна та рішення компромісних задач багатопараметричної оптимізації нелінійним методом узагальненого зведеного градієнта є найбільш ефективним, оскільки дозволяє реалізувати нелінійні залежності між величинами, забезпечити гнучкість отриманого плану експерименту та виявити кривизну отриманої поверхні відгуку.

ВИСНОВКИ. З використанням методу експериментально-статистичного моделювання отримано математичні залежності якості пшенично-тефового хліба через показник питомого об'єму від кількості борошна тефу, кількості пшеничної закваски та тривалості вистоювання.

Отримані поверхні відклику функцій Y_1 (питомий об'єм) та Y_2 (кислотність титрована) показали досягнення оптимальних показників критерію оптимальності, які відповідають бажаним значенням якості готового хліба за відповідних значень оптимізаційних факторів x_1 , x_2 та x_3 .

На підставі отриманих даних рішення оптимізаційної задачі встановлено технологічні параметри та кількість рецептурних компонентів (борошна тефу, пшеничної закваски) при виготовленні пшенично-тефового хліба безопарним прискореним способом: кількість борошна тефу (x_1) – 13%, кількість пшеничної закваски (x_2) – 15%, тривалість вистоювання тіста (x_3) – 34·60 с.

Подальші дослідження будуть спрямовані на побудову математичної моделі комплексного показника якості пшенично-тефового хліба, яка є нелінійною функцією значень окремих показників якості виробу та забезпечує повну оцінку якості готової продукції.

Подяки. Немає.

Конфлікт інтересів. Немає.

References

- Alemneh, S.T., Emire, S. A., Hitzmann, B., Zettel, V. (2022). Comparative study of chemical composition, pasting, thermal and functional properties of teff (*Eragrostis tef*) flours grown in Ethiopia and South Africa. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 144–158. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2027441>
- Barretto, R., Buenavista, R.M., Rivera, J. L., Wang, S., Prasad, P. V. V., Siliveru, K. (2021). Teff (*Eragrostis tef*) processing, utilization and future opportunities: a review. *The International Journal of Food Science & Technology*, 56, 3125–3137. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14872>
- Chen, H.–Y., Hsieh, C.–W., Chen, P.–C., Lin, S.–P., Lin, Y.–F., Cheng, K.–C. (2021). Development and Optimization of Djulis Sourdough Bread Fermented by Lactic Acid Bacteria for Antioxidant Capacity. *Molecules*, 26, 5658. <https://doi.org/10.3390/molecules26185658>
- Chochkov, R., Savova–Stoyanova, D., Papageorgiou, M., Rocha, J. M., Gotcheva, V., Angelov, A. (2022). Effects of teff–based sourdoughs on dough rheology and gluten–free bread quality. *Foods*, 11, 1012. <https://doi.org/10.3390/foods11071012>
- Falendysh, N., Zinchenko, I., Blazhenko, M. (2020). Technological aspects of using teff flour in the production of organic bread. *Food resources*, 8(14), 185–195. <https://doi.org/10.31073/foodresources2020–14–19>
- Farahmand, E., Razavi, S.H., Caboni, P., Mohtasebi, S.S., Pisano, M.B. (2021). Optimizing Sourdough Process for the Production of Honey and Rose–Like. Aromas in Breads. *Appl. Food Biotechnol.*, 8(3), 255–265. <http://dx.doi.org/10.22037/afb.v8i4.33499>
- Hetman, I. A. (2023). Improving bread technology using sourdough from cereal flour (PhD thesis, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine) <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/48961>
- Hrishchenko, A.V. (2025). Research on the development trends of the baking industry in Ukraine. *Agroworld*, 1, 77–89. <https://doi.org/10.32702/2306–6792.2025.1.77>
- Korniienko, I, Gulyaev, V., Kuznietsova, O., Anatskyi, A. (2024). Spline model optimization of the biotechnological process of obtaining sourdough for bakery needs using functional components. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(4), 1073–1097. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.308639>
- Kumar M., Vatsa S., Madhumita M., Prabhakar P. K. (2021). Mathematical modeling of food processing operations: a basic understanding and overview. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol. 2, No. 2. P. 472–492. <https://doi.org/10.46592/turkager.2021.v02i02.019>
- Lanska, V. D. (2025) Technology of gluten–free baked goods with potato fiber (PhD thesis, State University of Trade and Economics. Kyiv, Ukraine) <https://ur.knute.edu.ua/handle/123456789/10688>
- Naumenko, O., Hetman I., Chyzh, V., Gunko, S., Bal–Prylypko, L., Bilko, M., Tsentylo, L., Lialyk, A., Ivanytska, A., Liashenko, S. (2023). Improving the quality of wheat bread by enriching teff flour. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, 3(11 (123), 33–41. <https://doi.org/10.15587/1729–4061.2023.279286>
- Naumenko, O., Chyzh, V. (2022). Biotechnological properties of baking starters (literature review). *Food resources*, 10(19), 107–115. <https://doi.org/10.31073/foodresources2022–19–12>
- Pakhomska, O.V. (2019). Scientific approach to the creation of functional bakery products. *Scientific works of the NUHT*, 25 (2), 276–283. DOI: 10.24263/2225–2924–2019–25–2–30
- Pulivarthi, M. K., Selladurai, M., Nkurikiye, E., Li, Y., Siliveru, K. (2022). Significance of milling methods on brown teff flour, dough, and bread properties. *Texture Studies*, 53(4), 478–489. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12669>
- Tian, H., Zhao, R. (2025). Production of sourdough steamed bread by liquid sponge fermentation and parameters optimization. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 46(4), 1–9. [10.16433/j.1673–2383.202502120001](https://doi.org/10.16433/j.1673–2383.202502120001)

Woldemariam, F., Mohammed, A., Teferra, T. F., Gebremedhin, H. (2019). Optimization of amaranths–teff–barley flour blending ratios for better nutritional and sensory acceptability of injera. *Cogent Food & Agriculture*, 5 (1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1565079>

Zhao, L., Zhou, X., Zhao, P., Meng, X. (2021). Optimization of Sourdough Fermentation Process of Hamburger Bread by Response Surface Analysis. *Science and Technology of Food Industry*, 42(6), 79–87. [10.13386/j.issn1002-0306.2020070292](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070292)

Zhao, J., Yao, G.U., Yan, L.I., Qian, H., Wang, Li. (2024). Study on the optimization of sourdough starter with high activity. *Food & Machinery*, 41(2), 197–203 <http://dx.doi.org/10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.60132>

Zięć, G., Gambuś, H., Lukasiewicz, M., Gambuś, F. (2021). Wheat bread fortification: the supplement of teff flour and chia seeds. *Applied Sciences*, 11, 5238. <https://doi.org/10.3390/app11115238>