

ISSN 2073 – 8730

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ODESA NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

НАУКОВІ ПРАЦІ SCIENTIFIC WORKS

ТОМ 89
ВИПУСК 1

VOLUME 89
ISSUE 1



ОДЕСА

2025

ББК 36.81 + 36.82
УДК 663 / 664

Міністерство освіти і науки України



НАУКОВІ ПРАЦІ

Том 89, Випуск 1

Засновник:
Одеський національний
технологічний університет

Засновано в Одесі
у 1937 р.
Відновлено з 1994 р.

Науково-виробниче видання «Наукові праці» включено до категорії "Б" Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (відповідно Порядку формування Переліку наукових фахових видань України, затвердженого наказом МОН України від 15 січня 2018 року № 32) згідно наказу МОН України від 11.07.2019 № 975 «Про затвердження рішень атестаційної колегії міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 23 квітня 2019 року» за спеціальностями 131, 133, 144, 161, 162, 181.

Головний редактор
Заступники головного редактора

Відповідальний редактор

Редакційна колегія:

Bo Ekstrand, PhD, Professor emeritus
Iztayev Auyebek, Director of the Research Institute of Food Technologies
Жигунов Д.О., д-р техн. наук, проф.
Капельяниц Л.В., д-р техн. наук, проф.
Косой Б.В., д-р техн. наук, проф.
Коваленко О.О., д-р техн. наук, проф.
Ковальський Р., PhD., доцент
Крусір Г.В., д-р техн. наук, проф.
Манана Кевлішвілі, Doctor of Agricultural Sciences
Мардар М.Р., д-р техн. наук, проф.
Тележенко Л.М., д-р техн. наук, проф.
Ткаченко Н.А., д-р техн. наук, проф.
Ткаченко О.Б., д-р техн. наук, доцент
Терзієв С.Г., д-р техн. наук, доцент
Тітлов О.С., д-р техн. наук, проф.
Федосова К.С., к.т.н., доцент
Хмельнюк М.Г., д-р техн. наук, проф.
Хобін В.А., д-р техн. наук, проф.
Черно Н.К., д-р тех. наук, проф.
Шит М.Л., к.т.н., доцент
Шульга О.С., д-р тех. наук, проф.

Станкевич Г.М., д-р техн. наук, проф.
Поварова Н.М., к.т.н., доцент
Бурдо О.Г., д-р техн. наук, проф.
Солоницька І.В., к.т.н., доцент.

Технічний редактор
Ружицька Н.В., *Сиволян О.С.*

Зареєстровано Національною радою України з питань телебачення та радіомовлення. Рішенням ради №1549, протокол №15 від 09.05.2024 (Ідентифікатор медіа: R30-04051)

Реєстраційне свідоцтво
КВ № 25376-15316ПР
від 26.12.2022р. Видано Міністерством юстиції України.

Усі права захищені.
Передрук і переклади дозволяються лише зі згоди автора та редакції.

Рекомендовано до друку та розповсюдження в мережі Internet Вченою радою Одеського національного технологічного університету, протокол № 01 від 02.09.2025 р.

Мова видання: українська, англійська

Матеріали друкуються мовою оригінала. Передрукування матеріалів журналу дозволяється лише за згодою редакції. Ліцензія CC-BY.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



До уваги авторів. З 01.01.2016 було змінено нумерацію випусків журналу «Наукові праці». Номер тому відповідає року з моменту заснування журналу, номер випуску – випуску журналу в поточному році.

Одеський національний технологічний університет

Наукові праці – Одеса, Одеський національний технологічний університет: 2025. – Том 89, Вип. 1. – 239 с.

Адреса редакції:

вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039, e-mail:
naukovipraci2chapter@gmail.com
terma_onaft@ukr.net

Founder: **Odesa National
University of Technology**

SCIENTIFIC WORKS

Founded in Odessa, 1937

Volume 89, Issue 1

The scientific-production edition "Scientific Works" is included in category "B" of the List of scientific professional editions of Ukraine, in which the results of the dissertation works for obtaining the scientific degrees of doctor and candidate of sciences can be published (according to the Procedure of forming the List of scientific professional publications of Ukraine approved by the order of the Ministry of Education and Science Ukraine dated January 15, 2018 No. 32) according to the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 No. 975 "On approval of the decisions of the Ministry's Attestation Board on the activity of specialized scientific councils of April 23, 2019" specialties 131, 133, 144, 161, 162, 181.

Editor-in-chief: Stankevich G.N., Dr. Sci. Tech, prof.
Deputy chief editor: Burdo O.G., Dr. Sci. Tech, prof.
Povarova N.N., PhD, accos. prof.
Executive editor: Solonitskaya I.V., PhD, accos. prof.

Editorial Board:

Bo Ekstrand, PhD, Professor emeritus
Iztayev Auyebek, Director of the Research Institute of Food Technologies
Zhyhunov D.O., Dr. Sci. Tech, prof.
Kapelyants L.V., Dr. Sci. Tech, prof.
Kosoy B.V., Dr. Sci. Tech, prof.
Kovalenko O.O., Dr. Sci. Tech, prof.
Kowalski Ryszard, PhD., accos. prof.
Krusir H.V., Dr. Sci. Tech, prof.
Mardar M.R., Dr. Sci. Tech, prof.
Manana Kevlishvili, Doctor of Agricultural Sciences
Telezhenko L.M., Dr. Sci. Tech, prof.
Tkachenko N.A., Dr. Sci. Tech, prof.
Terziev S.G., Dr. Sci. Tech, accos. prof.
Tkachenko O.B., Dr. Sci. Tech, accos. prof.
Titlov O.S., Dr. Sci. Tech, prof.
Fedosova K.C., PhD., accos. prof.
Khmelnik M.H., Dr. Sci. Tech, prof.
Khobin V.A., Dr. Sci. Tech, prof.
Cherno N.K., Dr. Sci. Tech, prof.
Sheet M. L., PhD., accos. prof.
Shulga O.S., Dr. Sci. Tech, prof.

Technical editor: Ruzhitska N.V., Syvolap O.S.

It's recommended for printing and publishing online by
academic council of Odesa National University of
Technology
02 September 2025, protocol № 1

Languages of issue:
Ukrainian, English

Articles are printed in original language.

**It's allowed to use materials from the journal
according to the Creative
Commons license: CC-BY**
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



To the attention of the authors. From 01.01.2016 the issues numbering of "Scientific works" was changed.
The number therefore corresponds to the year since the journal was founded, issue number - issue of the magazine
this year

Odesa National University of Technology

Scientific Works – Odessa, Odesa National University of Technology: 2025. – Volume 89, Issue 1. – 229 p.

Address of the editorial office:

Ukraine, Odessa, Kanatnaya str, 112, 65039, e-mail:

terma_onaft@ukr.net

naukovipraci2chapter@gmail.com

© Odesa National University of Technology, 2025

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СУШАРКИ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ, РОЗРОБЛЕНІ В ІТТФ НАН УКРАЇНИ

Снісжкін Ю.Ф. доктор технічних наук, академік НАН України
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Анотація. Стаття присвячена актуальній для України проблемі ефективного зневоднення вологих матеріалів в харчовій промисловості. Зневоднення колоїдних капілярно-пористих матеріалів біологічної природи є складним та енергоємним процесом. Як показують останні статистичні дані, на процеси зневоднення в світі припадає близько 12 % усієї енергії. Зокрема, для України цей показник становить 10 %, в промисловості – 28 %. Додатковою проблемою в процесах сушіння є випаровування води, що відноситься до парникових газів, та потребує термінового вирішення, враховуючи екологічну ситуацію в світі. Тому є екологічно та енергетично доцільним постійно розробляти нові та вдосконалювати існуючі теплотехнології і обладнання для зневоднення колоїдних капілярно-пористих матеріалів, які б дали можливість зменшити витрати на процес, зберегти якісні показники сушеної продукції.

Ефективність теплотехнологій залежить, певною мірою, як від властивостей досліджуваного матеріалу, так і від характеристик та можливостей сушильного обладнання. В статті представлені ефективні розпилювальні, тунельні, камерні, однострічкові і багатострічкові, вакуумні, роторно-дискові, шинкові сушарки, а також сушильні установки, які для нагріву теплоносія використовують альтернативні джерела енергії (теплові насоси, геотермальна і сонячна енергія).

Загалом, в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено біля 30 таких сушарок, які впроваджені на підприємствах харчової промисловості.

Наведені схеми і конструктивні особливості сушарок, характерних для кожного з розроблених видів і їх технічні характеристики. Стиль викладення матеріалу – логічний, стислий, зрозумілий для спеціалістів даного напрямку та більш широкого кола читачів. Представлений в статті матеріал має наукову і інформаційну новизну та може бути цікавим для технологів виробництва переробки харчової рослинної сировини на сушений продукт, при сушінні зернових культур, за розробки технологій біопалива, палива з твердих побутових відходів та інше.

Ключові слова: сушильні установки, альтернативні джерела енергії, енергоефективність, теплоносії, тепловий насос.

В Інституті технічної теплофізики НАН України (ІТТФ) на основі багаторічних аналітичних та експериментальних досліджень було розроблено основи процесів тепломасопереносу при сушінні різноматеріальних колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Розвинені концепція і методологічні принципи аналітичного і експериментального дослідження процесів тепловологопереносу в складних аеродинамічних і температурно-вологісних умовах в сушильних камерах. Розроблені нові методи управління кінетичними характеристиками системи матеріал-парагове середовище.

В результаті розроблено понад 140 нових конструкцій сушильних установок в тому числі понад 30 сушарок для харчової промисловості, створено 10 типів обладнання, яке використовують при роботі сушарок (теплогенератори, циклони, озонатори та інше). Вся конструкторська документація на це обладнання зберігається в архіві ІТТФ.

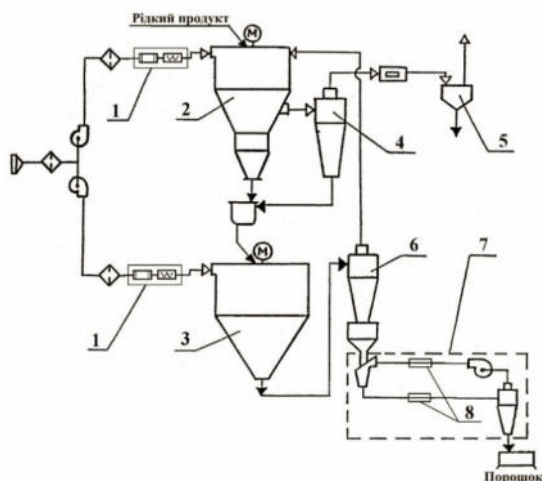
Всі розроблені установки захищені авторськими свідоцтвами і патентами, а також більшість з них впроваджені на виробництві, загальна кількість яких понад 300.

Розпилювальні сушильні установки.

Одним із сучасних способів конвективного сушіння матеріалів у рідкому стані є сушіння розпилюванням. Цей спосіб широко застосовується для зневоднення істинних і колоїдних розчинів, суспензій, емульсій, пульпи та «ароматизованих паст» в харчовій та інших галузях промисловості.

Випарювально-сушильний агрегат АРС-Х-200.

Призначений для одержання порошкової форми рідких харчових продуктів таких, як фруктові та овочеві соки, водні екстракти шипшини, крушини, яєць та інші.



1 – система нагріву повітря, які включає калорифери паровий та електричний; 2 – випарювальна камера з краплевловлювачем, вмонтованим у нижній конусній її частині; 3 – сушильна камера; 4 – циклон «вологий»; 5 – спеціальний «вологий» вловлювач; 6 – циклон «сухий»; 7 – система охолодження порошку; 8 – теплообмінники.

Рис. 1 – Схема випарювально-сушильного агрегату APC-X-200

Таблиця 1

Технічні характеристики

Показники	
Продуктивність по випареній волозі, кг/год:	
випарювальної камери	140
сушильної камери	70
агрегату в цілому	210
Температура теплоносія на вході, °C:	
у випарювальну камеру	150-200
в сушильну камеру	150-200
Температура теплоносія на виході, °C:	
з випарювальної камери	40-50
з сушильної камери	85-95
Споживана потужність, кВт	200
Габаритні розміри (висота x ширина x довжина), м	9,0 x 6,0 x 12,5
Маса (матеріаломісткість) Агрегату, кг	13000

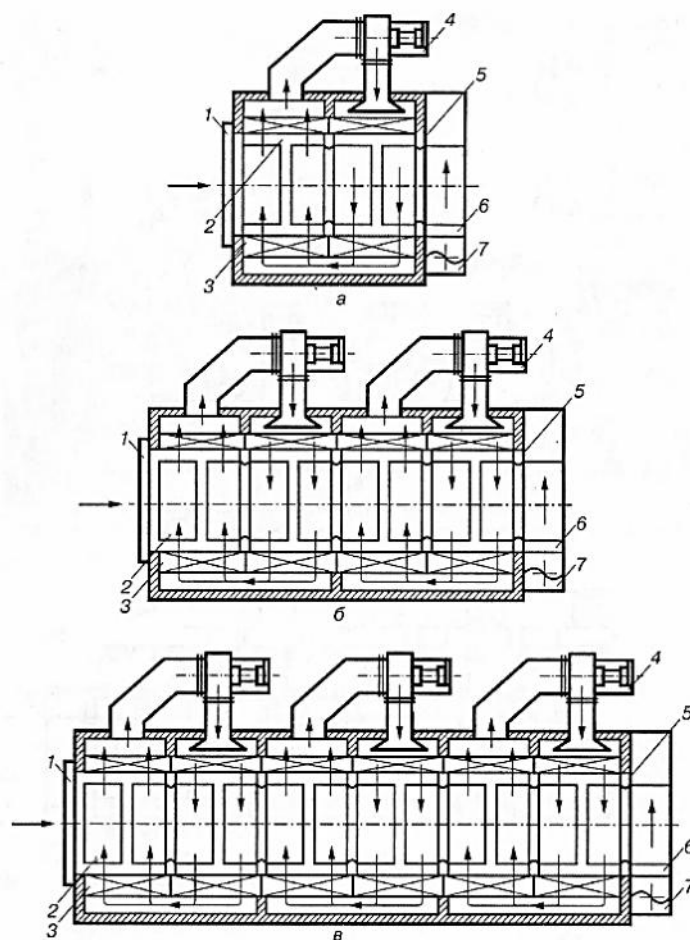
Агрегат заснований на двостадійному зневодненні методом розпилювання високовологих термолабільних продуктів в окремих апаратах, де випарювання основної маси води відбувається при температурі вологого термометру (40 – 55 °C), а завдяки короткочасному перебуванню в зоні термічної дії створюються умови для збереження біологічно активних речовин вихідного продукту [1].

Загалом розроблено 5 різних енергоефективних розпилюючих сушарок, які використовують для отримання кавових напоїв на основі кави і цикорію, вітамінних комплексів натрієвих і кальцієвих солей, концентрату рекомбінованого тютюну та інші. Всі сушарки широко впроваджені.

Тунельні сушарки. Одним з сучасних способів конвективного сушіння твердих матеріалів є їх зневоднення в тунельних сушарках. Твердий матеріал може бути різноманітної форми, структури і різних розмірів. Теплоносій (нагріте повітря, продукти спалювання палива, газоповітряна суміш) обтікає матеріал в різних умовах і є одночасно теплопередатчиком та вологопоглиначем.

В тунельних сушарках ІТТФ НАН України використані розроблені в Інституті високотемпературні режими зневоднення. Відомо, що в першому періоді сушіння, коли перенос води не лімітує цей процес і температура матеріалу дорівнює температурі мокрого термометру, підвищення температури в цей час безпечно з точки зору збереження якості матеріалу і суттєво пришвидшує процес зневоднення.

Суттєвий ефект пришвидшення зневоднення відбувається при одночасно значному підвищенні температури теплоносія в 1,5 – 3 рази і його вологовмісту в 2 – 10 разів. Це дозволяє підвищити температуру матеріалу в процесі сушіння, пришвидшити процес переносу води в ньому, відділити або зовсім уникнути (особливо для тонких виробів) заглиблення зони випарювання. Використання високотемпературного високовологого теплоносія в сушарках дозволило в кілька разів пришвидшити зневоднення ряду рослинних, тваринних та інших матеріалів [2].



а – однозонна; б – двузонна; в – тризонна;

1 – ворота сушарки; 2 – вагонетка; 3 – калорифер; 4 – центробіжний вентилятор; 5 – ущільнювач;
6 – зона охолодження; 7 – осьовий вентилятор

Рис. 2 – Схеми зонних парових тунельних сушарок

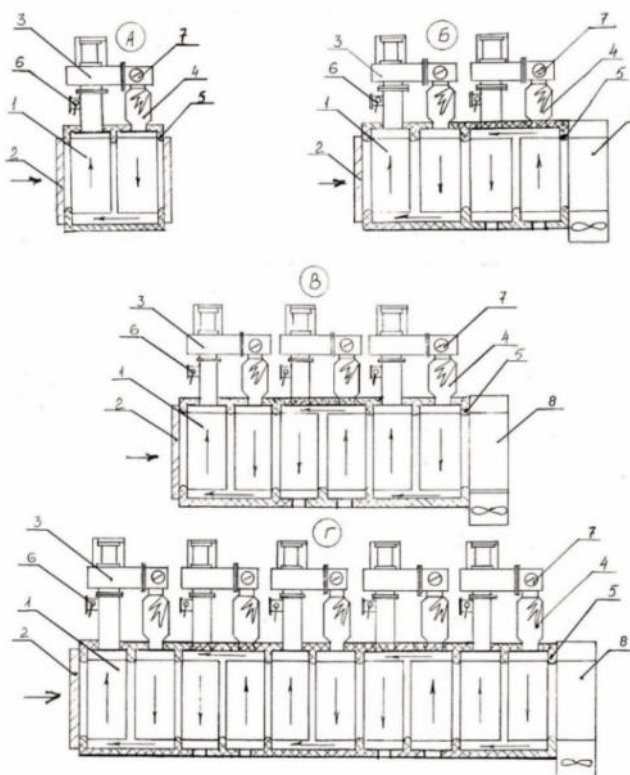
Тунельні зонні сушильні установки на парових калориферах СП-1, СП-2, СП-3 і теплогенераторах СО-1, СО-2, СО-3, СО-5. Сушарки призначені для зневоднення колоїдних капілярно-пористих матеріалів (деревина, фрукти та їх вичавки, овочі, ягоди, пряно-ароматичні трави, м'ясо, риба та інше)

Таблиця 2

Технічні характеристики сушарок СП-1; СП-2; СП-3

Показники	СП-1	СП-2	СП-3
Температура сушіння, °С	30-140	30-140	30-140
Продуктивність по випареній вологі, кг/год при зневодненні до $W \leq 6\%$	350-370	740-770	1150-1200
Випаровування вологи з одиниці поверхні, кг/м ²	1,4-1,48	1,48-1,54	1,54-1,6
Випаровування вологи з одиниці об'єму, кг/м ³	19,7-20,9	20,9-21,5	21,5-22,6
Коефіцієнт використання об'єму сушильної камери	0,24	0,24	0,24
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної вологи, кДж/кг	3768-4187	3768-4187	3768-4187
Габарити сушарки, (довжина x висота x ширина) м:	15x3x10	17x3x10	22x3x10
Матеріалоємність, т	16	24	32

Тунельна сушарка СП-3 у 1982 році була успішно здана Всесоюзній міжвідомчій комісії Укрконсервпрому СРСР при зневодненні вичавок насінневих фруктів до низької кінцевої вологості і рекомендована для серійного виробництва, а також рекомендована до атестації на вищу категорію якості. Загалом розроблено 7 різних видів тунельних сушарок, які впроваджені в Україні та за кордоном.



а – однозонна (CO-1), б – тризонна (CO-2), в – трьохзона (CO-3), г – п'ятизонна (CO-5);
1 – вагонетка, 2 – ворота сушарки, 3 – вентилятор, 4 – теплогенератор, 5 – ущільнення, 6 – заслінка з біофільтром; 7 – заслінка вихлопу; 8 – зона охолодження

Рис. 3 – Схема зонних тунельних сушарок на теплогенераторах

Таблиця 3

Технічні характеристики сушарок CO-1; CO-2; CO-3; CO-5

Показники	CO-1	CO-2	CO-3	CO-5
Температура сушіння, °С	30-140	30-140	30-140	30-140
Продуктивність по випареній волозі, кг/год (при зневодненні до $W \leq 6\%$)	150-160	490-510	640-670	900-940
Випаровування волози з одиниці поверхні, кг/м ²	1,20-1,28	1,30-1,36	1,36-1,4	1,44-1,51
Випаровування волози з одиниці об'єму, кг/м ³	16,9-18,1	18,4-19,2	19,4-20,1	20,3-21,2
Коефіцієнт використання об'єму сушильної камери	0,24	0,24	0,24	0,24
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної волози, кДж/кг	4605-4815	4187-4605	4150-4170	3977-4187
Габарити сушарки, (довжина x висота x ширина), м:	10x3x5	15x4x10	20x4x10	35x4x10
Матеріалоємність	8	28,5	36	42

Камерні сушарки. Камерні сушарки є конвективними апаратами періодичної дії, які, в основному, працюють за атмосферного тиску. Використовуються головним чином в невеликих виробництвах для зневоднення різноманітних продуктів і матеріалів. Матеріал в цих сушарках сушиться на лотках (деках, піддонах), встановлених на стелажах, або вагонетках, які знаходяться в сушильній камері. Сушильну камеру завантажують і вивантажують матеріалом періодично. В цих сушарках матеріал під час зневоднення знаходиться в стані спокою.

Установка бездимного копчення риби. Установка призначена для процесу гарячого бездимного нагріву в пару копильних препаратів за рахунок нагріву риби високотемпературною пароповітряною сумішшю, рециркулюючою в замкнутому аеродинамічному контурі. Також вона використовується для термообробки рибних виробів.

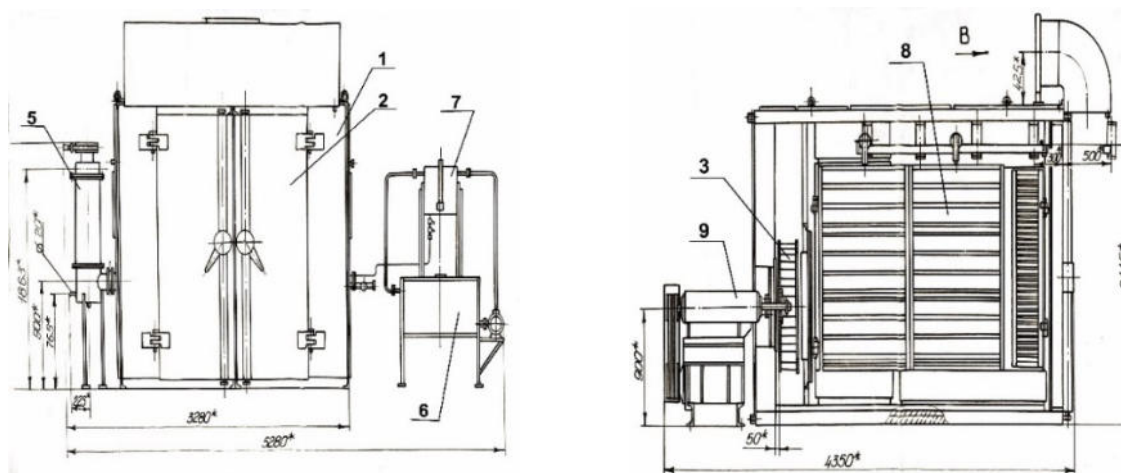
Установка працює наступним чином: після вмикання приводу аеродинамічного колеса (9, рис. 4) та групи тенів (4) установка виводиться на заданий температурний режим. Нагріте повітря рециркулює в камері (1), переміщується через бокові канали в камеру та на всмоктування колеса (3). Потім, в установку завантажуються дві клітини з рибою і вмикають подачу порції копильної рідини. Перед завантаженням в одну з

рибою вставляють термопару для виміру температури в тілі риби. Процес копчення проводиться або по часу, або по температурі в тілі риби. Загалом розроблено 2 типи камерних сушарок, які широко впроваджені в Україні.

Таблиця 4

Технічні характеристики

Показники	
Продуктивність, кг/год	200-400
Температура в камері, °C	120-180
Час обробки, год (не більш)	1,0
Встановлена потужність, кВт: електродвигуна електронагрівачів	30 120
Габаритні розміри (без короба відсмоктування та копильної рідини) довжина x ширина x висота, м:	4,35x3,28x2,51
Маса (без клітей), т	4,5



1 – камера; 2 – двері; 3 – аеродинамічне колесо; 4 – електронагрівач; 5 – конденсатор;
6 – бак копильної рідини; 7 – мірний бачок; 8 – кліть з піддонами; 9 – привід аеродинамічного колеса

Рис. 4 – Креслення установки копчення риби:

Однострічкові та багатострічкові сушарки. В однострічкових та багатострічкових сушарках зневоднення матеріалів здійснюється безперервно за атмосферного тиску [3]. В камері сушарки шар матеріалу, що зневоднюється, рухається по нескінченній стрічці, яку натягнуто між ведучим і відомим барабанами. Вологий матеріал подається на один кінець стрічки, а зневоднений відводиться з іншого кінця. Матеріал розміщують невеликим елементарним шаром або на перфорованих листах, або на ситах чи стрічках, які постійно перебувають у русі.

В інституті розроблено 4 однострічкових та багатострічкових сушарок які використовуються в харчовій промисловості для зневоднення фруктово-овочевої сировини та для отримання порошку із жому цукрового буряку і сушарка для отримання рекомбінованого тютюну.

Двосекційна багатозонна стрічкова сушарка АГСО. Сушарка призначена для зневоднення колоїдних капілярно-пористих матеріалів (фрукти, овочі, пряно-ароматичні трави та інше) .

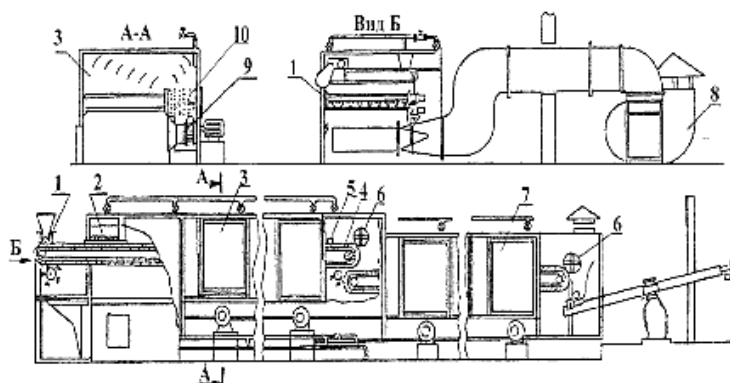
На рисунку 5 зображена схема агрегату гіротермічної обробки, ділянки зневоднення та охолодження (АГСО), що має вигляд двосекційної багатозонної стрічкової сушильної установки, в якій чисте повітря нагрівається у парових калориферах (10) [4].

Секції сушильної установки з'єднано загальним повітропроводом, а вихідна частина стрічкового конвеєра першої секції (4) розташована над прийомною частиною стрічкового конвеєра другої секції. На початковій частині стрічкового конвеєра встановлено шнек-розкладник (1), за допомогою якого регулюють висоту шару матеріалу на стрічці [4].

Останні дві зони другої секції сушильної установки є рекуператором-охолоджувачем, при цьому повітря нагрівається і надходить далі в сушильну зону, маючи температуру значно вищу за зовнішнє повітря. Протитечійний рух теплоносія здійснюється викидним вентилятором (8), розташованим на початку установки. Перехресний рух теплоносія відносно матеріалу, що знаходиться на стрічці, здійснюється вентиляторами сушильних зон і зони охолодження [4].

Технічні характеристики

Показники	
Температура сушіння, °С	30-140
Потужність по сировині, т/год	1,0-1,2
Потужність по сухому продукту (при кінцевій вологості $W \leq 6\%$)	0,16-0,20
Витрати пару, т/год	3,0-4,0
Витрати теплоти на 1 кг випареної води кДж/кг	3400-3800
Габарити сушарки (довжина x ширина x висота), м	45,0 x 2,5 x 2,2
Матеріалоємність, т	60,0



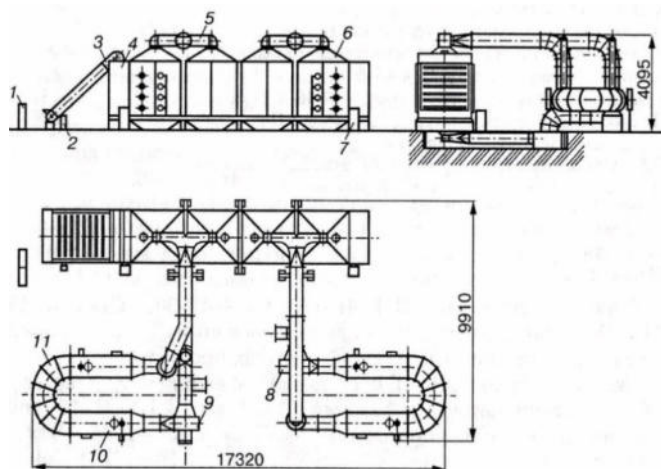
1 – шнек-розкладник; 2 – зона гіротермічної обробки; 3 – зона сушіння; 4 – сушильна стрічка;
5 – розпушувач; 6 – скидач; 7 – зона охолодження; 8 – викидний вентилятор; 9 – вентилятор сушильної зони; 10 – паровий калорифер

Рис 5 – Схема стрічкової сушильної установки АГСО

Особливістю цієї сушарки є поєднання кількох технологічних процесів – це гіротермічна обробка сировини, зневоднення та його детермопластифікація висушеного до низької вологості матеріалу і низькі витрати енергії на 1 кг випареної води [5].

Конвеєрна сушарка на теплогенераторах СКО-90. Конвеєрна сушарка на теплогенераторах СКО-90 призначена для сушіння рослинної сировини – фруктів та овочів. Особливістю даної моделі є можливість пересипання матеріалу із однієї стрічки конвеєру на іншу.

Сушарка має п'ять безмежних стрічкових конвеєрів, які здвигнуті один відносно іншого по довжині сушильної камери (4) які приводяться до руху приводом (7) (рис. 5). З метою загрузки продукту до сушарки та розміщення його на конвеєрній стрічці застосовується спеціальний загрузочний конвеєр (3), який підключений до автономної привідної станції (2). Над верхньою поверхнею трьох конвеєрів для перемішування матеріалу встановлені воружники, а стрічки очищуються від продукту, який налипнув, за рахунок щіток, для очищення поверхні барабанів застосовуються скребки.



1 – щит управління; 2 – привідна станція; 3 – загрузочний конвеєр; 4 – сушильна камера; 5 – колектор;
6 – витяжний короб; 7 – привод стрічок; 8, 9 – вентилятори; 10 – теплогенератор; 11 – повітропровод.

Рис. 6 – Сушарка СКО-90 на теплогенераторах

Таблиця 6

Технічні характеристики сушарки СКО-90

Показники	
Продуктивність по випареній волозі, кг/год	630
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної вологи кДж/кг,	5577
Встановлена потужність електродвигунів, кВт	41,2
Кількість теплогенераторів ТГ-2,5А	4
Кількість вентиляторів у14-46-8	2
Робоча площа конвеєрних стрічок, м ²	90
Габарити сушарки (довжина х ширина х висота), мм:	17320 х 9910 х 4095
Матеріалоемність, кг	13700

Сушарка працює на підприємствах, де немає промислового пару, теплогенератор працює на дизельному, пічному паливі або газу; між продуктами спалювання палива та теплоносієм нема контакту. Сушарка СКО-90 успішно здана Міжвідомчий приймальній комісії в 1990 році при зневодненні насінних фруктів, винограду до рівноважної вологості і рекомендована в серійне виробництво, а також рекомендована к атестації на вищу категорію якості.

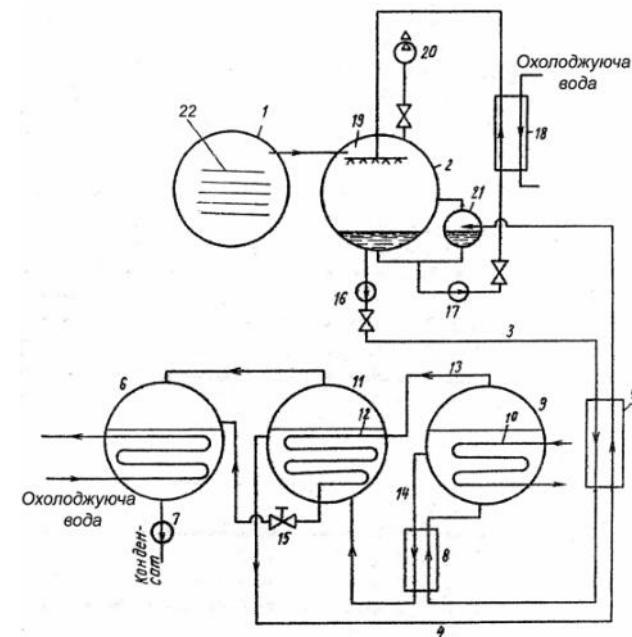
Вакуумні сушарки. Вакуум сушінню піддають матеріал в тому випадку, коли контакт з киснем повітря і нагрів до високих температур може призвести до погіршення його якості. Пари, які виходять з матеріалу шкідливі або мають цінність і повинні бути уловлені (наприклад, пара спирту).

В середньо і глибоко вакуумних сушарках волога видаляється під тиском нижче трійної точки (для водяної пари 0,61 кПа при температурі біля 0 °С). В цих умовах в матеріалі відбувається сублімація (возгонка) льоду.

В Інституті створені абсорбційні установки для сублімаційного сушіння, які мають менші енерговитрати в порівнянні з існуючими сублімаційними сушарками за рахунок значно менших витрат електроенергії для її роботи. Загалом було розроблено 2 вакуум сушарки.

Адсорбційна установка для сублімаційного сушіння з двома теплообмінниками-регенераторами. Сушарка призначена для поглинання водяних парів при сублімаційному сушінні термолабільних матеріалів.

Особливістю функціонування сушарки є низькі витрати теплоти на роботу абсорбційної установки за рахунок того, що пари холодоагенту, які видалені



1 – субліматор; 2 – абсорбер; 3, 4 – лінії слабого і міцного розчинів; 5, 8 – кип'ятильники-регенератори; 6 – конденсатор; 7, 16 – насоси, 9, 11 – перша і друга ступені кип'ятильника; 10, 12 – гріючі поверхні; 13, 14 – трубопроводи; 15 – регулюючий вентиль; 18 – охолоджувач; 19 – зрошувач; 20 – вакуум-насос; 21 – змішувач; 22 – матеріал

Рис. 7 – Схема абсорбційної установки з двома теплообмінниками-регенераторами

з розчину першої ступені кип'ятильника використовуються для кінцевого випарювання розчину в його другій ступені.

Таблиця 7

Технічні характеристики

Показники	
Продуктивність по випареній волозі, кг/год	80 – 90
Температура теплоносія, °С	8 – 10
Максимальна швидкість сушіння, %/хв.	7 – 13
Тиск в субліматорі, кПа	0,27 – 0,31

Роторно-дисккові або білові сушарки. Роторно-дискова або білова сушарка представляє із себе горизонтальну установку з проходженням через неї нагрітого теплоносія, що забезпечує зневоднення рідких та пастоподібних матеріалів. Ефективність зневоднення матеріалу основана на теплообміні між тонким шаром матеріалу, що знаходиться на поверхні диску і теплоносієм, який обдуває ці диски з матеріалом. Побіч-

на теплопередача забезпечує м'який і екологічно безпечний процес сушіння. Конструкція дисків, які закріплені на роторі сушарки і на яких знаходиться тонкий шар матеріалу при контакті з нагрітим теплоносієм забезпечує високу ступінь випаровування вологи з матеріалу. Матеріал що зневоднюється безперервно подається на вхід сушарки, інтенсивно висушується на дисках і спеціальними скребками видаляється з них. Роторно-білові сушарки застосовують для зневоднення, перш за все, матеріалів, які мають підвищену адгезію.

Створені та впроваджені в Інституті роторно-дисків сушарки для зневоднення кислих розчинів, морквяного коагулянту та отримання дистильованої рідини на содових заводах підтвердили високу ефективність і надійність при експлуатації.

Загалом було розроблено 2 роторно-дисків сушарки.

Роторно-дисків сушарка для зневоднення кислих розчинів. Сушарка призначена для зневоднення кислого розчину для вилучення сульфату натрію з відпрацьованих кислих розчинів, що дозволяє використати його, як товарний продукт при спеціальній обробці та повернення сірчаної кислоти в існуючий технологічний процес. (Сушарка може використовуватись і для отримання морквяного коагулянту).

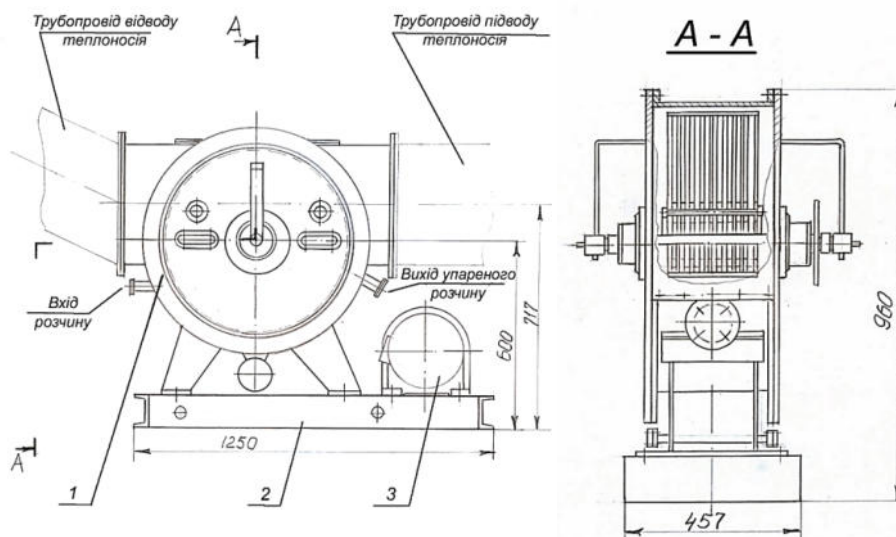
Відпрацьовані кислі розчини, які мають 76-170 г/л H_2SO_4 та 52-90 г/л Na_2SO_4 при температурі 90°C надходять в друк-фільтр, де відбувається їх очистка від механічних частинок. Очищений розчин насосом подають в випарну роторно-дисків сушарку.

Сушарка має велику поверхню тепло масообміну в одиниці об'єму, а спосіб упарювання розчину в плівці є найбільш ефективний в порівнянні з іншими способами.

Таблиця 8

Технічні характеристики

Показники	
Продуктивність, кг вологи/год	80-100
Ступінь упарювання, %	10-32
Температура теплоносія, °C:	
на вході	400-700
на виході	200-220
Температура розчину, °C:	
на вході	90
на виході	75
Поверхня тепломасообміну, м ²	75
Число дисків, шт.	21
Число обертання дисків, об/год	5-15
Габарити (довжина x ширина x висота), м	1,25x0,69x0,96
Маса, кг	550



1 – корпус сушарки; 2 – рама; 3 – мотор-редуктор; 4 – патрубок підводу розчину; 5 – горловина входу теплоносія; 6 – горловина виходу теплоносія; 7 – патрубок відводу розчину; 8 – диски

Рис. 8 – Схема роторно-дисків сушарки

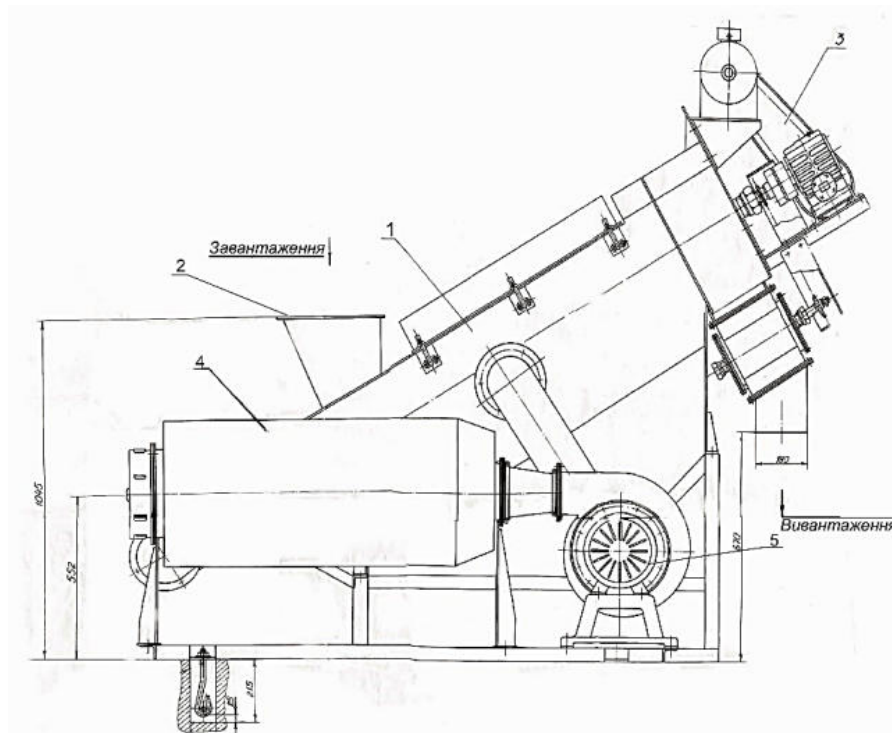
Шнекові сушильні установки. Шнекова сушарка призначена для зневоднення сипучих матеріалів. Основною частиною сушарки є короб сферичної форми, в середині якого знаходиться шнековий транспортер

закритого типу. Шнек обертається за допомогою електроприводу. З одного кінця сушарки розташовується завантажувальний устрій, з іншого вивантажувальний. Теплоносій може подаватись в шнекову сушарку прямою, або протитоку, в залежності від термолабільності матеріалу. Для термолабільних використовують прямоток, а для термічно стійких матеріалів протиток.

Шнекова сушарка є одним з типів контактних сушарок, які дозволяють механізувати зневоднення матеріалу за рахунок обертання шнеку. Ці сушарки можливо застосовувати і для охолодження матеріалів.

Сушарка для ясної шкарлупи. Сушарка призначена для термообробки та сушіння відходів при використанні яєць в харчовій промисловості з метою їх використання в якості мінеральної добавки.

Особливістю функціонування сушарки є процес коли в одному апараті відбувається зневоднення та стерилізація.



1 – шнековий апарат; 2 – завантажувальний бункер; 3 – привід шнека; 4 – електрокалорифер; 5 – вентилятор.

Рис. 9 – Креслення сушарки

Таблиця 9

Технічні характеристики

Показники	
Продуктивність сушарки, кг	28
Температура теплоносія, °C	110-120
Абсолютна вологість матеріалу, %:	
начальна	30-40
кінцева	2,0-4,0
Потужність електрокалорифера, кВт	20
Число обертів шнека, об/хв	1,0; 1,4; 2,2
Габаритні розміри (довжина x ширина x висота), м	2,1 x 0,65 x 2,0
Маса, кг	600

Сушарки на альтернативних джерелах енергії. Враховуючи той факт, що деякі види сушарок при своїй роботі мають негативний вплив на екологічний стан навколишнього середовища (наприклад, теплове забруднення середовища, парниковий ефект), то актуальними стають розробки сушарок на альтернативних джерелах енергії [6].

Застосування енергоефективної системи підготовки сушильного агента за рахунок альтернативних джерел енергії для конвективних сушарок є одним із перспективних можливостей в сфері зневоднення. Було створено 5 сушарок на альтернативних джерелах енергії, ось деякі з них.

Чотирихонна тунельна сушарка на теплогенераторах і тепловому насосі. Сушарка призначена для зневоднення фруктів, овочів, ягід, пряно-ароматичних трав до низької вологості в умовах високого вологов-

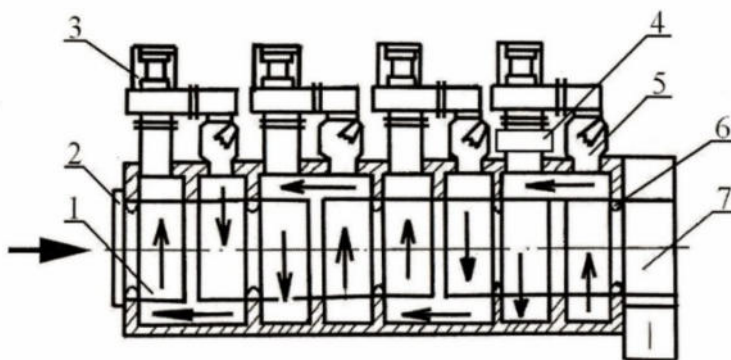
місту повітря.

Сушарка складається із чотирьох робочих зон (рис. 10), в кожній із якої підтримуються свої тепловолісні параметри сушильного агента, і зони охолодження (7). Перші три зони працюють за традиційною схемою з викидом вологого повітря та підживленням свіжого повітря з атмосфери. Четверта зона має замкнутий контур циркуляції з теплонасосною системою осушки повітря. В цій зоні підтримується температура біля 60°C і вологовміст сушильного агента 20 г/кг сухого повітря [7]. Принцип роботи сушарки загалом такий, як у тунельних сушарках на теплогенераторах марки СО. Дві сушарки впроваджені у В'єтнамі [8].

Таблиця 10

Технічні характеристики

Показники	
Температура сушіння, °C	30-140
Продуктивність по випареній волозі, кг/год при зневодненні до $W \leq 6\%$	550-600
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної волози, кДж/кг	4200-4400
Габарити сушарки (довжина x висота x ширина), м:	29 x 4 x 10



1 – вагонетка; 2 – ворота сушарки; 3 – вентилятор; 4 – тепловий насос; 5 – теплогенератор; 6 – ущільнювач; 7 – зона охолодження.

Рис. 10 – Схема чотирьохзонної тунельної сушарки на теплогенераторах і тепловому насосі

Теплонасосна зерносушарка на базі газового двигуна ДвГА. Зерносушарка призначена для зневоднення різних зернових чистим гарячим повітрям.

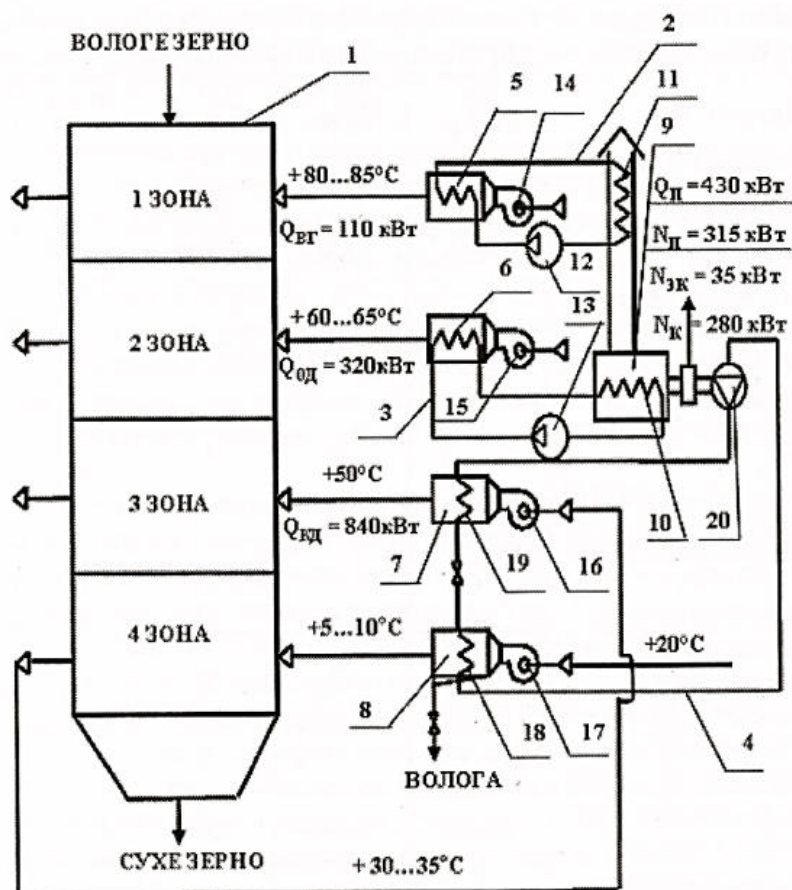
Теплонасосна зерносушарка безперервної дії на базі газового двигуна генератора ДвГА-315, або ДвГА-800 складається з шахти зерносушарки 1 (рис.11), яка має чотири відокремлених по ходу сушильного агента зони (три – зневоднення і одна – охолодження), три контури циркуляції робочої речовини (2, 3, 4), теплообмінники (5, 6, 7, 8), тепловий двигун (9), теплоутилізатори (10, 11), циркуляційні насоси (12, 13), напірні вентилятори (14, 15, 16, 17) та тепловий насос, що складається з випарника (18), конденсатора (19), компресора (20) та терморегулюючого вентиля (21) [3].

Таблиця 11

Технічні характеристики:

Показники	ДвГА-315	ДвГА-800
Температура сушіння, °C	50-85	50-85
Продуктивність видаленої волози, кг/год	945,5	3495,0
Продуктивність по сухому зерну, кг/год	13500	50000
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної волози, кДж/кг	3000,0	2200,0
Теплопродуктивність, кВт	1270,0	4180,0

Теплонасосна зерносушарка на базі газового двигуна генератора ДвГА-315 забезпечує виробництво електричної енергії в кількості $N_n = 315$ кВт і теплової $Q_n = 430$ кВт. Вироблена електрична енергія перерозподіляється між електричною енергією на експлуатаційні потреби (робота вентиляторів, насосів системи охолодження, елеваторів та ін.) в кількості $N_{ek} = 35$ кВт і електричної енергії на роботу компресора теплового насосу $N_k = 280$ кВт [3].



1 – сушильна шахта; 2, 3, 4 – контури циркуляції робочої речовини; 5, 6, 7, 8 – теплообмінники; 9 – газований двигун-генератор; 10, 11 – теплоутилізатори; 12, 13 – циркуляційні насоси; 14, 15, 16, 17 – напірні вентилятори; 18 – випарник; 19 – конденсатор; 20 – компресор [3]

Рис. 11 – Схема зерносушарки на базі газового двигуна-генератора ДвГА-315

Особливістю функціонування сушарки є високий коефіцієнт використання палива 0,86-0,88 та низькі питомі витрати теплоти на 1 кг випареної вологи, які в 1,5-2,0 рази менші ніж в традиційних зерносушарках [8].

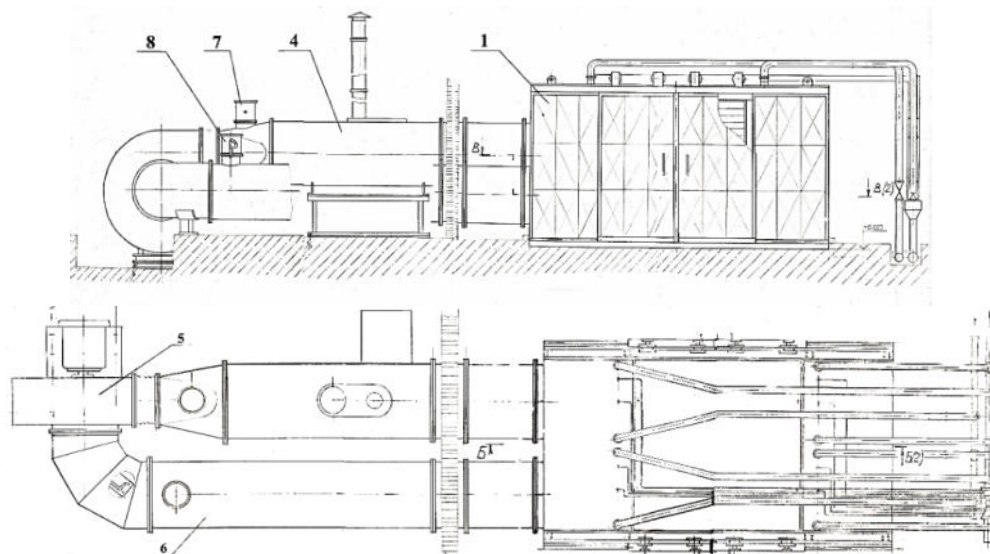
Геотермальна сушарка. Сушарка призначена для зневоднення фруктів, овочів, пряно-ароматичної сировини та інших термолабільних матеріалів.

Таблиця 12

Технічні характеристики

Показники	
Продуктивність по випареній волозі до (при зневодненні до $W \leq 6\%$), кг/год	160 - 200
Температура теплоносія, °C	30-140
Температура води на вході в калорифер, °C	80
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної вологи, кДж/кг	4400-4700
Витрати геотермальної води, м ³ /год	40-60
Витрати дизельного палива (при роботі ТГ), кг/год	28
Встановлена електропотужність, кВт:	15,0
Габарити сушарки (довжина x ширина x висота), м:	12,0 x 2,7 x 2,61
Маса, т	11,0

Для сушіння використовують чисте повітря, яке може нагріватись в залежності від режиму сушіння та матеріалу, що зневоднюється, тальки в водяних калориферах (10) та безконтактно тільки в теплогенераторі (4), або і в водяних калориферах (10) і в теплогенераторі (4) одночасно. Водяні калорифери використовують геотермальну воду з температурою до 80 °C. Теплогенератор працює на газу, рідкому паливі або біопаливі, і може нагрівати теплоносієм до 140 °C.



1 – сушарка; 2 – вагонетка; 3 – подача геотермальної води; 4 – теплогенератор; 5 – вентилятор;
6 – повітропровід; 7 – патрубок викиду теплоносія; 8 – патрубок всмоктування свіжого повітря;
9 – двері; 10 – водяні калорифери

Рис. 12 – Креслення сушарки:

Сонячна сушарка з тепловим акумулятором

Сонячна сушарка з тепловим акумулятором призначена для низькотемпературного сушіння термолабільних матеріалів рослинного та тваринного походження (фруктів, овочів, трав, м'яса, риби) [2.1].

При необхідності установка може працювати в режимі акумулювання теплової енергії. У цьому режимі заслінки (7 і 9, рис. 13) відкриті, а заслінки (6, 8, 10) закриті. Повітря циркулює через геліонагрівач (4) і теплоакумулятор (2) по замкнутому контуру.

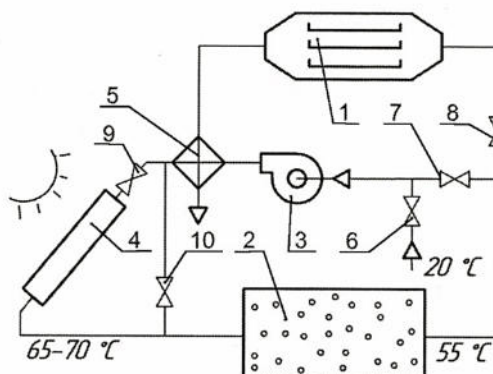
Таблиця 13

Технічні характеристики

Показники	
Температура сушіння, °C	40 – 55
Тривалість сушіння абрикос, год	43 – 48
Швидкість теплоносія в сушарці, м/с	0,5 – 1,0
Теплоакумулюючий матеріал (органічні сполуки) з температурою плавлення, °C	32 – 85
З температурою кристалізації, °C	73 – 30

Особливості функціонування установки є скорочення тривалості сушіння в порівнянні з чисто сонячною сушаркою в 1,3 – 1,5 рази та отримання продукту високої якості [9].

Розроблені в ІТТФ сушарки показали надійність при експлуатації і високі техніко-економічні показники.



1 – сушильна камера; 2 – теплоакумулятор; 3 – вентилятор; 4 – геліонагрівач; 5 – рекуперативний теплообмінник; 6, 7, 8, 9, 10 – заслінки

Рис. 13 – Схема сонячної сушарки з тепловим акумулятором

Висновки. Описані в статті енергоефективні сушильні установки мають низькі енерговитрати на 1 кг випареної вологи і широко впроваджені на підприємствах харчової промисловості. Представлені конструкції сушарок різних типів практично можуть зневоднювати всі види сировини, яка використовується в харчовій промисловості з отриманням якісної харчової продукції.

References

1. Dolinskyi A.A., Maletska K.D. *Rozpylyuyucha susharka*. K: Naukova dumka, 2011, 376. ISBN 978-896-360-175-5/
2. Kremnov O.O., Piievskiy I.M. *Teplomassoobminni protsesy v vyrobnytstvi hipsovykh i hipsobetonnykh materialiv*. K: Naukova dumka, 1989, 180. ISBN 5-12-000909.
3. Sniezhkin Yu.F., Paziuk V.M., Petrova Zh.O., Chalaiev D.M. *Teplonasosna zernosusharka dlya nasinnyevoho zerna*. Kyiv: TOV «Polihraf-Servis», 2012. – 154.
4. Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O. Enerhoefektyvne obladnannya dlya znevodnennya termolabil'nykh materialiv. *Teplofizyka ta teploenerhetyka*, 2020, 42 (2), 5-17.
5. Sniezhkin Yu.F., Boriak L.A., Khavin O.O. *Enerhozberihayuchi teplotekhnolohiyi kharchovykh poroshkiv i vtorynnykh syrovynnykh resursiv*. K.: Naukova dumka. 1983, 227. ISBN966-00-0158-4.
6. Zavytii O. Rol' enerhetyky v rozvytku suspil'stva. *XI Natsional'na naukovo-praktychna konferentsiya «Osvita, nauka, biznes: suchasnyy stan, problemy ta perspektyvy»*, 2023, 4-5. <http://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/49754>
7. Sniezhkin Yu.F., Chalaiev D.M., Shavrin V.S., Shapar R.O., Khavin O.O., Dabizha N.O. Vykorystannya teplovykh nasosiv u protsesakh sushynnya. *Promyslova teplotekhnika*, 2006, 28 (2), 106-110.
8. Sniezhkin Yu.F., Siun Tszian, Chalaiev D.M., Dabizha N.O. *Enerhozberihayuchi tekhnolohiyi sushynnya termolabil'nykh materialiv*. Zbirnyk tematychnykh sta-tey. Enerhoefektyvnist' protsesiv sushynnya. Tom 2. K.: TOV Pro Format, 2021, 268. ISBN 978-617-7894-28-4.
9. Korinchevska T.V. Perspektivni metody akumuluvannya teplovoyi enerhiyi. *Naukovi pratsi ONAKHT*, 2010, 37. 236-241.

ENERGY EFFICIENT DRYERS FOR THE FOOD INDUSTRY, DEVELOPED AT THE INSTITUTE OF ENGINEERING THERMOPHYSICS OF NAS OF UKRAINE

Sniezhkin Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. The article is devoted to the problem of effective dehydration of wet materials in the food industry, which is relevant for Ukraine. Dehydration of colloidal capillary-porous materials of biological nature is a complex and energy-intensive process. According to the latest statistics, dehydration processes account for about 12% of all energy in the world. In particular, for Ukraine this figure is 10%, in industry – 28%. An additional problem in drying processes is the evaporation of moisture, which is a greenhouse gas and requires an urgent solution, given the environmental situation in the world. Therefore, it is environmentally and energetically expedient to constantly develop new and improve existing thermal technologies and equipment for dehydration of colloidal capillary-porous materials, which would make it possible to reduce process costs and maintain the quality indicators of dried products.

The effectiveness of thermal technologies depends, to a certain extent, on both the properties of the material under study and the characteristics and capabilities of the drying equipment. The article presents effective spray, tunnel, chamber, single-belt and multi-belt, vacuum, rotary-disk, screw dryers, as well as drying plants that use alternative energy sources (heat pumps, geothermal and solar energy) to heat the coolant).

In total, the Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine has developed about 30 such dryers, which are implemented at food industry enterprises.

The diagrams and design features of dryers characteristic of each of the developed types and their technical characteristics are presented. The style of presenting the material is logical, concise, and understandable for specialists in this field and a wider range of readers. The material presented in the article has scientific and informational novelty and may be interesting for technologists in the production of food plant raw materials for processing into dried products, in drying grain crops, in the development of biofuel technologies, fuel from solid household waste, etc.

Keywords: drying plants, alternative energy sources, energy efficiency, coolant, heat pump.

Список використаної літератури

1. Долінський А.А., Малецька К.Д. *Розпилююча сушарка*. К: Наукова думка, 2011, 376 с. ISBN 978-896-360-175-5/
2. Кремньов О.О., Пієвський І.М.. *Тепломасообмінні процеси в виробництві гіпсових і гіпсобетонних*

- матеріалів. К.: Наукова думка, 1989, 180 с. ISBN 5-12-000909.
3. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Чалаєв Д.М. *Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна*. Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2012. – 154 с.
 4. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Енергоефективне обладнання для зневоднення термолабільних матеріалів. *Теплофізика та теплоенергетика*, 2020, 42 (2), С 5-17.
 5. Снежкін Ю.Ф., Боряк Л.А., Хавін О.О. *Енергозберігаючі теплотехнології харчових порошків і вторинних сировинних ресурсів*. К.: Наукова думка. 1983, 227 с. ISBN966-00-0158-4.
 6. Завитій О. Роль енергетики в розвитку суспільства. *XI Національна науково-практична конференція «Освіта, наука, бізнес: сучасний стан, проблеми та перспективи»*, 2023, С 4-5. <http://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/49754>
 7. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Шапар Р.О., Хавін О.О., Дабіжа Н.О. Використання теплових насосів у процесах сушіння. *Промислова теплотехніка*, 2006, т. 28, № 2, С 106-110.
 8. Снежкін Ю.Ф., Сюн Цзян, Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О. *Енергозберігаючі технології сушіння термолабільних матеріалів*. Збірник тематичних статей. Енергоефективність процесів сушіння. Том 2. К.:ТОВ Про Формат, 2021, 268 с. ISBN 978-617-7894-28-4.
 9. Корінчевська Т.В. Перспективні методи акумулювання теплової енергії. *Наукові праці ОНАХТ*, 2010, 37. С 236-241.

Отримано в редакцію 11.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 11.06.2025
Approved 02.09.2025

ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ

Бурдо О.Г., д.т.н., проф., Бурдо А.К., к.т.н., доц.
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Проведено аналіз прогнозних моделей розвитку людства: «Римського клубу» та «Хвилі Кондрат'єва». Обґрунтовано пріоритет агропромислового комплексу України у відновленні економіки країни у повоєнний час. Інструментом відновлення мають стати інноваційні енерготехнології. Формуються інноваційні гіпотези процесів енергоефективного зневоднення, екстрагування та інактивації мікроорганізмів. Для реалізації таких гіпотез залучаються принципи організації гібридних процесів. Метою роботи є розробка інноваційних технологій та обладнання електродинамічного типу для переробки рослинної сировини. Науковою новизною роботи є новітні технології, що замінюють застарілі та забезпечать випуск продукції вищої якості, при менших витратах енергії та екологічного навантаження на довкілля. Розглядаються експерименти, які підтверджують такі можливості при реалізації ефектів «механодифузії» та «пародинамічного». Показано, що організація гібридних процесів спроможна виконувати роботу по транспортуванню рідини в капілярах сировини, що може на порядки інтенсифікувати масоперенесення, перейти на безвідходні технології.

Ключові слова: прогнозні моделі, енергоефективність, технології харчування, зневоднення, екстрагування

Вступ. Згідно прогнозної моделі «Римського клубу» до кінця століття людство буде стурбовано проблемами енергії, екології та їжі [1]. А ці проблеми сконцентровані в АПК. У повоєнний час енергія стане не тільки важливим техніко – економічним фактором, але й інструментом управління виробництвом, засобом рішення енерготехнологічних парадоксів в АПК. При відновленні зруйнованої економіки ключовим питанням буде: інвестувати у застарілі технології, чи впроваджувати інноваційні. Віковий досвід індустріального розвитку людства свідчить, що саме після пандемій, революцій та воєн йде бурхливий розвиток інноваційних технологій. Циклічність розвитку відображає запропонована сто років тому модель «Хвилі Кондрат'єва» [2]. Вражає точність прогнозу сьогодення у циклах підвищувальних та понижувальних хвиль (рис. 1).

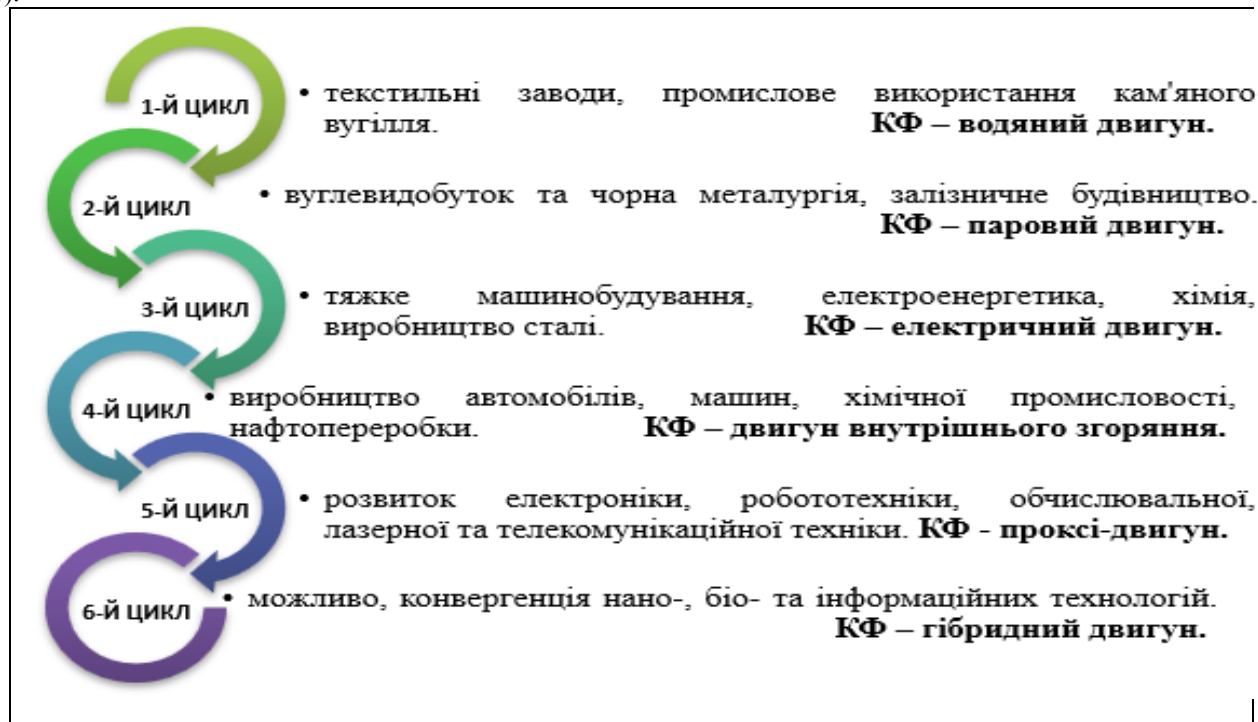


Рис. 1 - Цикли Кондрат'єва

На рис.1 КФ, це ключовий фактор. Для 6 циклу, що відповідає нашому часу, ключовий фактор не визначено, пропонуємо його прийняти як гібридний двигун [3]. За циклами Кондрат'єва з 2025 року почнеться підвищувальна хвиля індустріального розвитку економік, прогнозується конвергенція нано-біо та інформаційних технологій (рис. 1). Звісно, що впроваджуватись мають нові технічні рішення, вакуумні, низькотемпературні, мікрохвильові технології, електродинамічні апарати.

Особливості електродинамічних апаратів в тому, що мікрохвильове поле може впливати на нанорозмірні елементи харчової сировини, змінювати їх структуру. Саме харчові виробництва «працюють» із створеними природою нанорозмірними структурами. Оболонки кліток – 7... 30 нм, полісахариди – 1...10 нм, білки – 10...100 нм. Харчова сировина має нанопори, нанокапіляри, молекули води. Часто завданням харчової технології є руйнування оболонок кліток для підвищення виходу соку, вплив на нанокапіляри для зменшення внутрішнього дифузійного опору, вирішення проблем зневоднення. Тому революційні технологічні перетворення треба починати тут. Більш за те, саме в цьому напрямку вже є успішні напрацювання в ОНТУ [4].

Проблеми традиційних технологій термічної обробки сировини. В Україні більшість підприємств харчової індустрії працюють на застарілому обладнанні, потребують більші витрати енергії та сировинних ресурсів, ніж передові світові виробники. Так, при виробництві екстрактів у відходах залишається суттєва кількість повноцінного цільового компоненту, однак традиційні технології не в змозі їх вилучати. В технологіях пастеризації за 99% енергії витрачається на нагрівання термолабільного продукту, на його псування. При сушінні харчової сировини використовуються тільки методи вилучення вологи у вигляді пари, а це найбільш енерговитратні технології. При роботі із мікрохвильовими апаратами виявлено факти, які суперечать діючим нормам (табл. 1).

Таблиця 1

Результати досліджень мікрохвильових апаратів

№	система	Довідка о параметрах процесу	Факти в умовах дії електромагнітного поля
1	«Деревина – водно - спиртові розчини»	В розчин переходить до 46% деревини	В розчин перейшло 80% деревини
2	«Деревина – водно - спиртові розчини»		Підвищений вміст ароматичних компонентів
3	«зерна кави – вода»	В розчин переходить до 30% цільових компонентів	В екстракті за 40% цільових компонентів
4	«зерна кави – вода»		Підвищений вміст ароматичних компонентів
5	«зерна амаранту - спирт»	Спирт практично не вилучає сквален	В отриманій олії амаранту до 4% схвалено

Таким чином, отримано факти, які суперечать нормам. Але, як казав І.Ньютон, в науках факти важливіші за правил. Пояснення отриманих фактів базуються на запропонованих гіпотезах (табл. 2).

Таблиця 2

Формулювання гіпотез

№	парадокс	гіпотеза
1	При сушінні харчової сировини використовуються тільки методи вилучення вологи у вигляді пари, а це найбільш енерговитратні технології	можливі способи вилучення вологи у паро-рідинній фазі, у вигляді туману
2	При виробництві екстрактів у відходах залишається суттєва кількість повноцінного цільового компоненту, однак традиційні технології не в змозі їх вилучати	Використання електромагнітних джерел енергії дозволить ініціювати бародифузійний потік екстракту із всього об'єму сировини
3	Для інактивації мікроорганізмів використовуються переважно термічні методи. При цьому, 99% підведеної енергії витрачається на нагрівання самого продукту, т.е. на його псування	Можливі способи селективного підведення електромагнітної енергії безпосередньо до мікроорганізмів

Запропоновані гіпотези базуються на організації гібридних процесів. Ініціювання гібридних процесів переносу маси із мікроструктури сировини дозволить:

- при сушінні вилучати частину вологи без перетворення її в пару, знизить енергозатрати й тривалість сушіння та усунути другий період сушіння;

- при екстрагуванні організувати вилучення нерозчинних компонентів;
 - в біотехнологіях управляти процесом життєдіяльності мікроорганізмів.
- За допомогою гібридних процесів суттєво зростає інтенсивність процесів перенесення (табл.3).

Таблиця 3

Порівняння ефективності різних принципів інтенсифікації

№	Принцип інтенсифікації	Ефект інтенсифікації
1	Спеціальна обробка поверхні	До 2 разів
2	Використання ультразвуку	В 2...3 рази
3	Обертання чи вібрація реактору	В 20...30 разів
4	Ініціювання бародифузії	В 100...1000 раз

Інструментом реалізації гібридних процесів є електродинамічні системи та апарати, інтерес до яких динамічно зростає.

Аналіз останніх досліджень і формулювання проблеми. Інтерес до процесів зневоднення харчової сировини є стабільно актуальним. Перспективні схеми сушарок для харчових продуктів з тепловими насосами пропонує фірма ІКЕ [5]. Завдяки замкнутій системі циркуляції повітря ці низькотемпературні сушарки для харчових продуктів забезпечують дбайливе та рівномірне сушіння понад 99% видів продуктів, включаючи фрукти, овочі, м'ясо, морепродукти, трави, чаї, спеції тощо. Сушарки для харчових продуктів з тепловими насосами - ідеально підходять для збереження поживних речовин, кольору та текстури. ІКЕ пропонує повний асортимент сушарок для харчових продуктів з тепловими насосами, включаючи шафові сушарки, сушильні камери та системи безперервного стрічкового сушіння. Доступні індивідуальні конструкції, що відповідають вашій місткості, простору та потребам у продукті.

Вакуумні та сублімаційні установки для сушіння пропонуються на сайтах [6 та 7]. Недоліком сублімаційних технологій є високі витрати енергії.

Що стосується мікрохвильових технологій, то крім китайських сайтів, які мають рекламний характер, в доступній літературі інформації не знайдено. Проте, широко представлено лабораторні дослідження в різних напрямках та в різних країнах. Так, в Туреччині (2024 р.) в технічному університеті досліджувався процес зневоднення цукрози в мікрохвильовому (МХ) вакуумному випарному апараті. В порівнянні із традиційною технологією виявлено суттєва інтенсифікація процесу кристалізації [8]. В Бразилії (2021 р.) проведено зневоднення в умовах МХ поля солоду ячменя [9]. В порівнянні із конвективною сушаркою в діапазоні температур 50-70°C час сушіння в умовах МХ скоротився на порядок, додаткове вакуумування системи суттєво підвищило паропродуктивність. В США (2024 р.) вчені досліджували вплив МХ енергії та вакууму на процес зневоднення вершків [10]. Температура процесу не перевищувала 65°C, а тиск був від 2,2 до 2,8 кПа. Отримані за такою технологією вершки мали кращі якісні характеристики, більший термін зберігання ніж ті, що отримувались при заморожуванні, чи перетворенням у масло. В Німеччині, в Мюнхені, в технічному університеті (2024 р.) досліджувався вплив МХ поля на процес ліофільного зневоднення мальтодекстрина. Потужність поля змінювалась від 120 до 220 Вт (1,00—1,83 Вт/г) [11]. Температура не перевищувала 40°C. В Тайланді та Малайзії (2022 р.) вивчався процес сублімаційного зневоднення слайсів моркви. (13) при температурах від - 15°C до 40°C. Кінцевий вологовміст готового продукту складав 6%. В Китаю (2022 р.) в сільськогосподарському університеті досліджувались процеси нагрівання рідких продуктів та реологічних систем під дією МХ поля [14]. В [15] наведено критичний огляд та порівняння перспектив різних джерел енергії при обробці рослинної сировини, обґрунтовано позитивний вплив МХ поля, особливо комбінованого впливу МХ та ІЧ випромінювання. Сумісні дослідження Академії наук Китаю та Австралійського університету присвячено обґрунтуванню синергетичних ефектів при дії комбінованих із МХ впливами, наприклад, кавітації та ультразвуку. Такі самі висновки отримано в роботі [16]. Проблеми використання МХ поля та вакууму в процесах концентрування виноградного соку вирішувалась [17]. Отримано високу концентрацію готового продукту – 78 °Brix.

Наведений аналітичний огляд дозволяє зробити наступні висновки.

Інтерес до мікрохвильових технологій динамічно зростає. Підтверджено високу ефективність таких технологій. Але, наразі в доступній літературі представлено дослідження, що проведено на лабораторних установках. Досвід випробувань промислових електродинамічних апаратів відсутній.

В роботі поставлено завдання розробити наукові основи апаратів електродинамічного типу.

Моделювання процесів перенесення в умовах мікрохвильового поля.

Об'єктом дослідження є капілярно - пориста система, а предметом моделювання – процеси зневоднення та екстрагування. Розглядаються традиційна схема конвективного сушіння чи екстрагування (рис. 2,а) та інноваційного, в умовах мікрохвильового (МХ) поля (рис. 2, в). В традиційній схемі градієнти температур (t) та вологості (w) мають різні напрямки. найбільша температура у відкритого торця капіляру. В інноваційній схемі саме в глибині капіляру і найбільша температура, і найбільший вміст вологи. Взаємодія МХ поля та вологи приводить до формування в глибині капіляру парової бульбашки, її зростанню, підвищенню тиску в глибині й бурхливого виходу рідини. Таким чином, замість повільних процесів перенесення маси дифузій-

ними механізмами організується потужний гідравлічний потік, зумовлений гібридним процесом. В результаті отримано бародифузійний ефект, який в задачах зневоднення приводить до виходу із сировини суміші пари та вологи, а в задачах екстрагування – до вилучення як розчинних в екстрагенті компонентів, так і нерозчинних.



а) – традиційна схема; б) – в умовах МХ поля; 1 – тверда фаза; 2 – капіляр.

Рис. 2 - Фізична модель процесу зневоднення

Відмінності в схемі (б) як в джерелі енергії, потужності магнетрону (N), його ККД (η),

$$Q = \Delta U_I + A_I \quad Q) = \eta \times N_E \quad (2)$$

так і в розподіленні потоків енергії, частина - на підвищення внутрішньої енергії (3), частина – на створення роботи (4):

$$\Delta U_I = V \times \rho \times (i_K - i_H) \quad (3) \quad A_I = F \times L = \frac{\Delta P}{S} \times L \quad (4)$$

Так рідина транспортується за рахунок сил тиску.

Робота гібридного процесу визначає формування бародифузійного, пародинамічного потоків. Процес транспортування компонентів із капілярів здійснюється за допомогою електромагнітних джерел енергії. Їх вплив у рівнянні енергії відображається як дія джерел, що рівномірно розподілені у сировині, потужність яких (N) в об'ємі (V)

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_1 c_{1V} \rho_1}, \quad (5)$$

В рівняннях (1...5) F- сила, що діє на рідину, L- довжина її транспортування, ρ - щільність, i – ентальпія, ΔP – різниця тисків, S - переріз каналу, V - об'єм рідини, t - температура, a – коефіцієнт теплопровідності, τ - час, c - питома теплоємність, r, z, φ - координати.

За принципами діаграми Санкей при використанні парової турбіни конверсія енергії палива в електродинамічних дегідраторах має наступний вигляд:



Рис. 3 – Конверсія енергії палива при виробництві сухих продуктів в електродинамічних дегідраторах

В традиційних сушарках корисна енергія дорівнює 8%, а при використанні газової турбіни корисна енергія в схемі (рис. 3) становить 40%. Апарати електродинамічного типу можна класифікувати на теплообмінні (випарні), масообмінні (сушарки та екстрактори) та біореактори (стерилізатори та культиватори). Довідка за енергетичними показниками тепломасообмінних апаратів в табл. 4. Суттєвий вплив на енергетику мають реверсні потоки (табл. 4).

Розглянемо механізми технології мікрохвильової дегідrataції. Об'ємна обробка сировини здійснюється

при адресної дії безпосередньо на вологу при ГУ II роду. Використовуються електромагнітні генератори мікрохвильового діапазону. Обробка сировини проводиться при температурах 20 – 45 °С. Переваги в можливості отримання концентрованих розчинів (до 92 – 95 %гх.). Обмежуються наявністю в розчинах полярних молекул.

Таблиця 4

Порівняння енергетичних показників

Енерго технологія	Витрата на 1 кг видаленої води	ККД		
	Енергії, J, МДж,	Прямих потоків	Реверсних потоків	Загальний
Сушка традиційна	4 - 10	0,4 – 0,1	0	0,25
Сушка в ЕМП	3	0,5 – 0,3	0	0,4
Випарка традиційна	3	0,5	0	0,5
Двоступеневий дегідратор із ТН	1,5	0,4	0,2	0,6

Відведення пари, підвищення в'язкості розчину здійснюється без перегріву продукту й без зниження інтенсивності енергопідведення. Отримується висококонцентрований продукт без зниження продуктивності апарата та зниження якості концентрату.

Найбільш розповсюдженими є 3 принципи розділення розчинів: переведенням води в пару, в тверду фазу (до льоду) та механічне розділення (наприклад, у центрифугі). Відповідні витрати енергії наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Питомі витрати енергії

№	ПРОЦЕСИ	Витрати енергії на вилучення 1 кг води (МДж/кг)	
		теоретичні	досягнуті
1	переведенням в пару (випарка)	2,5	1,5...2,8
2	переведенням до льоду (кріо)	0,33	1,15
3	Механічною дією (центрифуга)	0,05	0,2

Переведення розчину до більш організованої структури (до льоду) потребує в 7 разів менших витрат енергії, ніж випаровування. Процеси механічного відділення води, без фазових переходів, витрачають ще в 7 разів менших витрат енергії (табл.5). На базі зробленого висновку сформульовано гіпотезу: «Послідовна комбінована дія мікрохвильового поля спроможна вирішити проблему зневоднення й сформувати бародифузійний потік води із об'єму сировини до поверхні із подальшою вилученню поверхневої води механічними засобами». Таким чином, можна використати переваги гібридних процесів бародифузії та механічних принципів зневоднення.

Другий висновок стосується технологій соків. Пропонується гіпотеза: «Обробка рослинної сировини мікрохвильовим полем приводить до руйнування оболонок клітин та виходу парової фази та соку».

Для перевірки гіпотези розроблено експериментальний стенд (рис. 4).

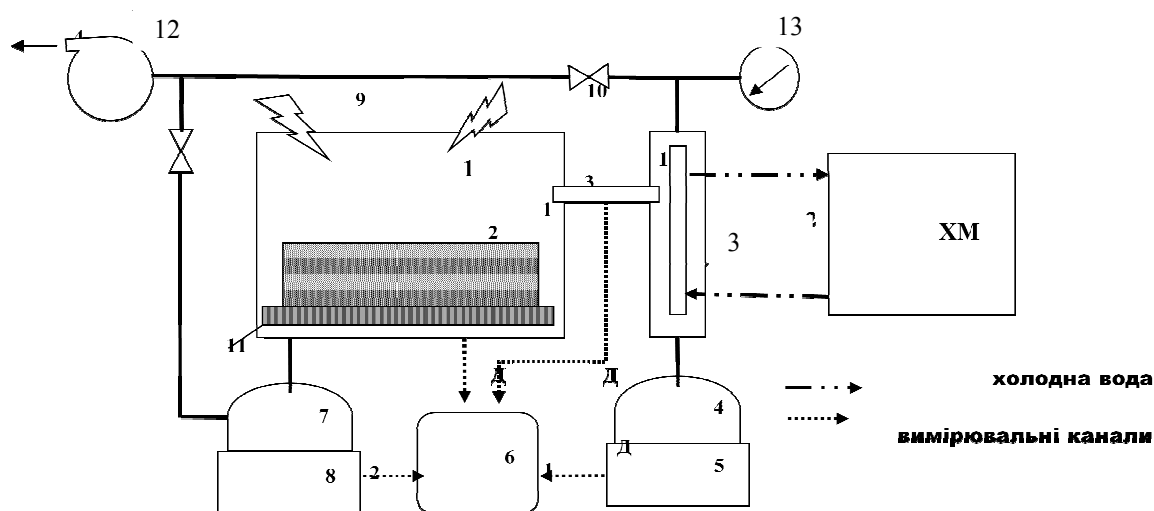


Рис. 4 – Схема стенду для дослідження паро динамічного ефекту

В резонаторній камері (1) на сітчастій перегородці (11) розміщувався продукт (2). Розхід гідролату та соку визначався електронними вагами (5 і 8), (тип ТВЕ-0,21-0,01), температури датчиками Д₃ і Д₄ (тип Dallas DS18B20). Вакуум забезпечувався насосом (12), та контролювався вакуумметром (13). Інформація поступала на планшет CHUWI CW1506 (6). На екрані дисплея відображались термограми, маса вилученого соку й гідролату із камери та поточні значення швидкості цих потоків. Паровий потік із камери (1) конденсувався в холодильнику (3). Об'єктами досліджень визначено кавун та банан (рис. 5).

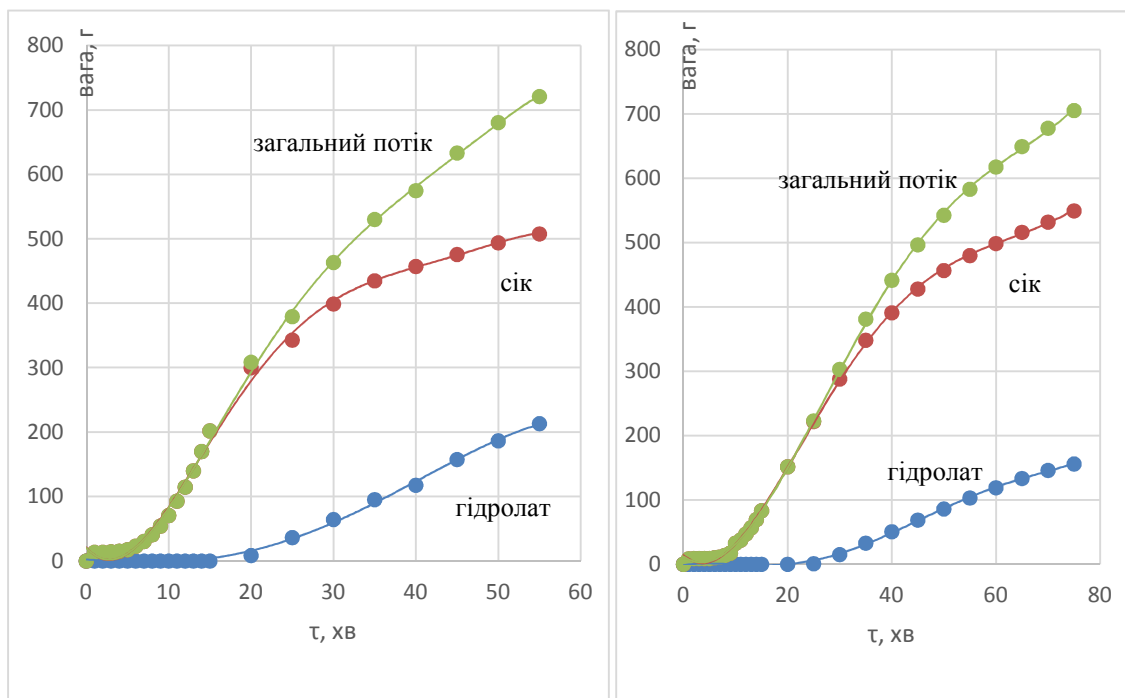


Рис. 5 – Кінетика виходу соку із кавуна та банану

Експерименти свідчать, що соку виходить у 4 рази більше, ніж пари.

Розглянемо можливості гібридних процесів в задачах екстрагування. Об'єктом дослідження вибрано технологію розчинної кави. В традиційних виробництвах шлам після екстрагування не утилізується і викидається. А це створює 2 проблеми. По перше, це суттєве навантаження на довкілля. По друге, він вміщає багато корисних компонентів, які традиційні технології екстрагування не здатні вилучити. При цьому, їх собівартість перевищує саму розчинну каву.

Використання МХ генераторів енергії вирішує ці проблеми. Пропонується після традиційного 1 екстрагування (рис.5) встановити МХ екстрактор 2, який підвищить концентрацію розчину в 2 рази. Отриманий продукт – рідка кава (РІКА) – має суттєві переваги зрівняно із розчинною кавою. Він зберіг ароматичні компоненти, які розчинна кава втратила у розпилювальній сушарці. Отриманий шлам 1 в МХ екстракторі 3 дозволяє вилучити кофеїн, а шлам 2 в МХ екстракторі 4 – кофеоль. Це найбільш коштовний компонент. Після обробки шламу 3 в традиційному екструдері отримуються паливні пелети, теплота згорання яких на рівні деревини.

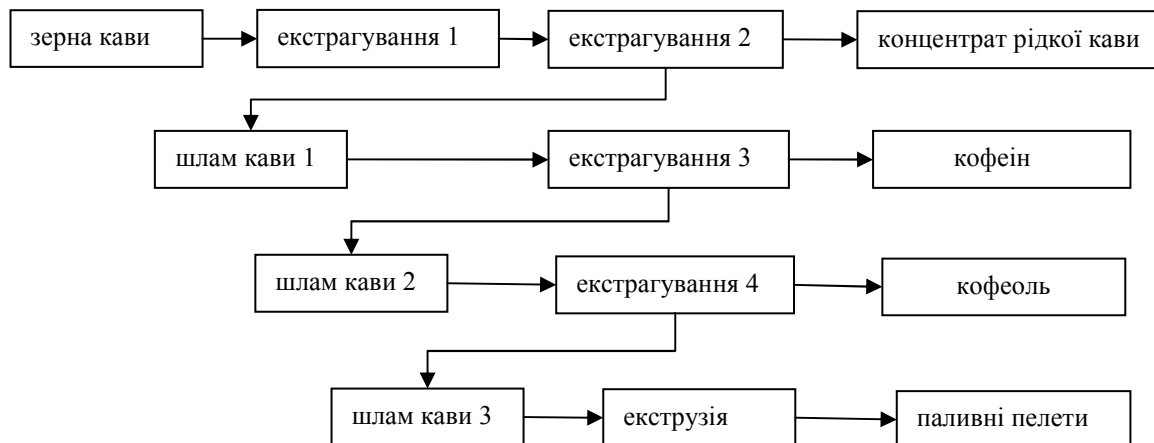


Рис. 5 – Інноваційна схема безвідходної технології переробки зерен кави

Екстрагування 3 та 4 можна проводити у одному апараті при зміні технологічного регламенту.

Таким чином, використання електродинамічних систем може повернути рентабельність традиційним застарілим українським підприємствам переробки зерен кави.

Комплекс проведених робіт по використанню електродинамічних апаратів та систем визначив структури неявних математичних моделей у критеріальному виді:

Активізація та інактивізація мікроорганізмів ($Bu \leq 1$):

$$Bu = N(\zeta V C p \Delta t p)^{-1} \quad (6)$$

при екстрагуванні $1 \leq Bu \leq 1$

$$Bu = N(rwd^2 p)^{-1} \quad (8)$$

при сушінні ($Bu \leq 1$)

$$Bu = N(rV p)^{-1} \quad (10)$$

$$Fo = A Re^n Pr^m Bu^k \quad (7)$$

$$Sh = A Re^n Sc^m Bu^k \quad (9)$$

$$Sh = A Re^n Sc^m Pe^p Bu^k \quad (11)$$

Константи в рівняннях 6 – 11 для чисел Шервуда (Sh), Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr), Пекле (Pe), Шмідта (Sc), числа енергетичної дії (Bu) залежать від конкретних завдань та технологій.

Потужність електродинамічних джерел енергії розраховується відповідно числу енергетичної дії (Ви).

Висновки

1. Згідно із глобальною прогнозою моделлю «Римського клубу» до кінця цього століття людство буде турбувати проблеми енергії, екології та їжі. А ці проблеми найбільш концентровані саме у харчових виробництвах.

2. Впровадження інноваційних розробок дозволить перейти до безвідходних технологій переробки харчової сировини й вирішити екологічні проблеми та отримати нові резерви їжі. А біомаса стане основою для паливних елементів.

3. Відома модель розвитку людства «Хвилі Кондрат'єва» визначає, що нові, революційні технології ефективно впроваджуються саме після війн, катаклізмів, пандемій. Що майбутнє за розвитком нано- та біотехнологій. Все це захищає перспективи інноваційного розвитку харчової індустрії у повоєнний час.

4. Мікрохвильовими технологіями в світі широко та успішно займаються і вони мають вагомий перспективи в технологіях переробки рослинної сировини в харчовій й фармацевтичній галузях.

5. Розроблений мікрохвильовий дегідратор забезпечує отримання концентратів при температурах 40 ... 50 ° C та концентрації цільових компонентів в готовому продукті до 90%. В установці реалізована технічна ідея адресної доставки енергії до молекул розчинника. Концентрати відрізняються низькою енергоємністю; високою якістю; низькою собівартістю.

References

1. Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth: A report to the Club of Rome*. Universe Books.
2. Руднева, О. (2012). *Хвилі Кондрат'єва*. Retrieved from https://www.banki.ru/wikibank/volnyi_kondrateva/
3. Burdo, O. G., Levitsky, A. P., et al. (2023). Electrodynamics technologies in the ecoindustry of food and pharmaceutical production. *Problemele Energeticii Regionale*, 58(2), 58–71.
4. Zenodo. (n.d.). DOI: 10.5281/zenodo.1217259
5. Nanofood. (n.d.). Retrieved from <https://www.nanofood.com.ua>
6. IKEMachinery. (n.d.). Retrieved from <https://www.ikemachinery.com/contact.html>
7. Genyond Machine. (n.d.). Retrieved from <https://www.genyondmachine.com>
8. Enderdry. (n.d.). The steam dryer technology. Retrieved from <https://enderdry.eu/the-steam-dryer-technology/>
9. Ibis, O. I., Bugday, Y. B., Aljurf, B. N., Goksu, A. O., Solmaz, H., Oztop, M. H., & Sumnu, G. (2024). Crystallization of sucrose by using microwave vacuum evaporation. *Journal of Food Engineering*, 365, 111847. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111847>
10. Carvalho, G. R., Monteiro, R. L., Laurindo, J. B., & Augusto, P. E. D. (2021). Microwave and microwave-vacuum drying as alternatives to convective drying in barley malt processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 73, 102770. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102770>
11. Dimpler, J., & Moraru, C. I. (2024). Microwave vacuum drying of dairy cream: Processing, reconstitution, and whipping properties of a novel dairy product. *Journal of Dairy Science*, 107(2), 774–789. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23657>
12. Kalinke, I., Roder, J., Unterbuchberger, G., & Kulozik, U. (2025). Microwave-assisted freeze drying: The role of power input and temperature control on energy efficiency and uniformity. *Journal of Food Engineering*, 390, 112410. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112410>

13. Sujinda, N., Varith, J., Shamsudin, R., Jaturonglumert, S., & Chamnan, S. (2021). Development of a closed-loop control system for microwave freeze-drying of carrot slices using a dynamic microwave logic control. *Journal of Food Engineering*, 302, 110559. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110559>
14. Zeng, S. Y., Li, M. G., Li, G. H., Lv, W. Q., Liao, X. J., & Wang, L. J. (2022). Innovative applications, limitations and prospects of energy-carrying infrared radiation, microwave and radio frequency in agricultural products processing. *Trends in Food Science & Technology*, 121, 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.032>
15. Wu, Y. R., Mu, R. Y., Li, G. H., Li, M. G., & Lv, W. Q. (2022). Research progress in fluid and semifluid microwave heating technology in food processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(4), 3436–3454. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12978>
16. Li, M. G., Zhou, C. S., Wang, B., Zeng, S. Y., Mu, R. Y., Li, G. H., Li, B. Z., & Lv, W. Q. (2023). Research progress and application of ultrasonic- and microwave-assisted food processing technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(5), 3707–3731. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13198>
17. Zhou, S. C., Chen, W. J., & Fan, K. (2024). Recent advances in combined ultrasound and microwave treatment for improving food processing efficiency and quality: A review. *Food Bioscience*, 58, 103683. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103683>
18. Hameed, A., Maan, A. A., Khan, M. K. I., Mahmood Khan, I., Niazi, S., Waheed Iqbal, M., Riaz, T., Manzoor, M. F., & Abdalla, M. (2023). Evaporation kinetics and quality attributes of grape juice concentrate as affected by microwave and vacuum processing. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1596–1611. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2218062>

INNOVATIVE ENERGY TECHNOLOGIES FOR THE REVIVAL OF UKRAINE'S AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Burdo O. G., SciD, Prof., Burdo A.K., c.t.s., associate professor
Odesa National University of Technology

Abstract. An analysis of predictive models of human development has been carried out, including the concepts of “Club of Rome” and “Kondratiev’s Wave.” The priority of Ukraine’s agro-industrial complex in the post-war recovery of the national economy has been substantiated. Innovative energy technologies are proposed as the key instrument of recovery. Innovative hypotheses have been formulated for the processes of energy-efficient dehydration, extraction, and inactivation of microorganisms. To implement these hypotheses, the principles of hybrid process organization are applied. Mathematical models of these processes have been proposed to describe heat and mass transfer phenomena and to optimize process parameters. The aim of the study is to develop innovative technologies and electrodynamic-type equipment for the processing of plant raw materials, such as electrodynamic extractors, dehydrators, and pasteurizers. The scientific novelty of the work lies in the development of advanced innovative technologies that can replace outdated ones, ensuring the production of higher-quality products with lower energy consumption and reduced environmental impact. The experiments that confirm such possibilities through the implementation of the effects of “mechanodiffusion” and “vapor dynamics” are discussed. It is shown that the organization of hybrid processes is capable of performing the work of transporting liquid through the capillaries of raw materials, which can intensify mass transfer by orders of magnitude and enable the transition to waste-free technologies.

Keywords: predictive models, energy efficiency, food technologies, dehydration, extraction

Список використаної літератури

1. 1. Meadowsetal. Thelimitstogrowth: a report to the club of rome. – 1972.
2. Електронний ресурс: https://www.banki.ru/wiki/bank/volnyi_kondrateva/
3. Burdo O.G., Levitsky A.P. and other.- Electrodynamic Technologies in the Ecoindustry of Food and Pharmaceutical Production. *Problemele Energeticii Regionale*, 2023, vol. 58, no. 2, pp. 58-71.
4. d Zenodo. (n.d.). doi: 10.5281/zenodo.1217259
5. Електронний ресурс: <https://www.nanofood.com.ua>
6. Електронний ресурс: <https://www.ikemachinery.com/contact.html>
7. Електронний ресурс: <https://www.genyondmachine.com>
8. Електронний ресурс: <https://enerdry.eu/the-steam-dryer-technology/>
9. Ibis O.I., Bugday Y.B., Aljurf B.N., Goksu A.O., Solmaz H., Oztop M.H., Sumnu G. Crystallization of Sucrose by Using Microwave Vacuum Evaporation. *Journal of Food Engineering*, 2024, 365, 111847.
10. Carvalho G.R., Monteiro R.L., Laurindo J.B., Augusto P.E.D. Microwave and Microwave-Vacuum Drying as Alternatives to Convective Drying in Barley Malt Processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 73, 102770.

11. Dimpler J., Moraru C.I. Microwave vacuum Drying of Dairy Cream: Processing, Reconstitution, and Whipping Properties of a Novel Dairy Product. *Journal of Dairy Science*, 2024, 107(2), 774—789.
12. Kalinke I., Roder J., Unterbuchberger G., Kulozik U. Microwave-Assisted Freeze Drying: The Role of Power Input and Temperature Control on Energy Efficiency and Uniformity. *Journal of Food Engineering*, 2025, 390, 112410. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112410>
13. Sujinda N., Varith J., Shamsudin R., Jaturonglumlert S., Chamnan S. Development of a Closed—Loop Control System for Microwave Freeze—Drying of Carrot Slices Using a Dynamic Microwave Logic Control. *Journal of Food Engineering*, 2021, 302, 110559. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110559>
14. Zeng S.Y., Li M.G., Li G.H., Lv W.Q., Liao X.J., Wang L.J. Innovative Applications, Limitations and Prospects of Energy-Carrying Infrared Radiation, Microwave and Radio Frequency in Agricultural Products Processing. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 121, 76—92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.032>
15. Wu Y.R., Mu R.Y., Li G.H., Li M.G., Lv W.Q. Research Progress in Fluid and Semifluid Microwave Heating Technology in Food Processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(4), 3436—3454. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12978>
16. Li M.G., Zhou C.S., Wang B., Zeng S.Y., Mu R.Y., Li G.H., Li B.Z., Lv W.Q. Research Progress and Application of Ultrasonic— and Microwave—Assisted Food Processing Technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, 22(5), 3707—3731. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13198>
17. Zhou S.C., Chen W.J., Fan K. Recent Advances in Combined Ultrasound and Microwave Treatment for Improving Food Processing Efficiency and Quality: A Review. *Food Bioscience*, 2024, 58, 103683. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103683>
18. Hameed A., Maan A.A., Khan M.K.I., Mahmood Khan I., Niazi S., Waheed Iqbal M., Riaz T., Manzoor M.F., Abdalla M. Evaporation Kinetics and Quality Attributes of Grape Juice Concentrate as Affected by Microwave and Vacuum Processing. *International Journal of Food Properties*, 2023, 26(1), 1596—1611.

Отримано в редакцію 09.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 09.06.2025

Approved 02.09.2025

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ КІНЕТИКИ ЕКСТРАКЦІЇ ЗРІДЖЕНИМИ ГАЗАМИ

Потапов В.О., професор, д.т.н., Цуркан М.М., доцент, к.т.н.,
Білий Д.В., аспірант
Державний біотехнологічний університет, м. Харків

Анотація. Запропонована модель кінетики екстрагування у вигляді системи двох звичайних, диференціальних рівнянь, яка враховує змінну концентрацію на міжфазній поверхні системи та в об'ємі розчинника, що є особливістю процесу екстрагування зрідженими газами за кінцевого відношення об'ємів екстрагент – сировина.

Отримано аналітичний розв'язок у вигляді рівняння кінетики для середньооб'ємної частки цільового компоненту в твердій та рідинній фазі, яке містить визначальні масообмінні числа подібності Фур'є, Біо, для частинки сировини довільної геометричної форми, співвідношення об'ємів екстрагент – сировина та константу розподілу фазової рівноваги.

Показано, що шляхом регресійного аналізу експериментальних даних кінетики екстрагування, на підставі отриманого кінетичного рівняння можна отримати всі визначальні фізичні характеристики процесу екстракції, що дозволяє в подальшому проводити пошук оптимальних режимів процесу екстракції зрідженими газами.

Ключові слова: екстракція, зріджені гази, моделювання, кінетика процесу, регресійний аналіз.

Вступ. Зростаючий попит на природні та функціональні інгредієнти та необхідність покращення методів переробки рослинної сировини стимулюють дослідження процесу екстракції, як унікального процесу вилучення фітохімічних речовин, які мають високий попит на світовому ринку у харчовій, фармацевтичній та косметологічній галузях. Одним з сучасних методів екстракції є екстракція зрідженими газами, зокрема фреонами (хлорфторвуглеці (ХФВ/CFCs), гідрохлорфторвуглеці (ГХФВ/HFCs) та гідрофторвуглеці (ГФВ/HFCs). Фреони є ефективними розчинниками для широкого спектру органічних сполук, включаючи олії, жири, ароматичні речовини та фармацевтично активні інгредієнти. Наприклад R-134a відзначається високою селективністю до "ароматичних природних сполук (тобто терпенів та їх похідних) [1]. Ця властивість дозволяє отримувати високоякісні екстракти з бажаними смаковими та ароматичними профілями, зберігаючи повний терпеновий профіль [2]. Крім того, існує можливість підбору розчинника шляхом використання модифікованих фреонів для селективної екстракції певних класів фітохімічних речовин, що підвищує гнучкість процесу [3]. Зріджені гази мають високий потенціал для заміни традиційних розчинників в екстракції фармацевтично активних сполук з рослин, наприклад, артемізиніну, [3] та використовувались у деяких методах очищення вірусів [4].

В'язкість зріджених хладонів значно менша за в'язкість звичайних органічних розчинників, що характеризує їх як екстрагенти з найліпшими дифузними властивостями. Низькі значення теплоти випаровування і температури кипіння дозволяють швидко видаляти газ із екстрактів при малих енерговитратах, що забезпечує збереження термолабільних молекулярних комплексів у кінцевому продукті [5].

Переваги фреонів як екстракційних розчинників – висока селективність, низькі температури екстракції, легкість розділення, мінімальний залишок в екстракті, хімічна інертність, негорючість та низька токсичність, зробили їх надзвичайно привабливими та ефективними. Можливість регулювання властивостей зріджених газів, шляхом регулювання тиску та температури, є фундаментальним принципом проектування процесу екстракції. Ця гнучкість дозволяє розробляти високоточні методи вилучення цільових речовин із сировини. Наприклад можна здійснювати багатостадійну екстракцію, де різні фітохімічні сполуки можуть бути послідовно виділені шляхом зміни режимів та параметрів процесу.

Незважаючи на значні переваги фреонів, як екстракційних розчинників, використання їх супроводжується низкою серйозних недоліків та викликів, особливо у сфері впливу на довкілля. Всі класи фреонів (ХФВ, ГХФВ, ГФВ) є потужними парниковими газами, що мають високий потенціал глобального потепління, тому необхідно використовувати альтернативні холодоагенти дозволени до промислового використання. Всі холодильні агенти є дорогими, їх відновлення після екстрагування є енергоємним процесом і вимагають додаткового обладнання.

Типовий процес екстрагування зрідженими газами полягає в наступному. Попередньо висушену і подрібнену сировину поміщають в екстрактор і вакуумують. В екстрактор під тиском 0.1...2 МПа подають рідкий хладон. Процес екстракції здійснюється методом настоювання при температурі від -20 °C до +40 °C і тиску 1.2...1.5 МПа. Після заданого часу екстракції хладон разом із розчиненими в ньому речовинами, через фільтр зливають у випарник. Випарник підігрівається за допомогою електронагрівачів, що призводить до

випаровування хладону в ньому. Після повного випаровування хладону з розчину, екстрагована фракція зливається в приймальну ємність. Пари хладону надходять у конденсатор, який охолоджується холодильним агрегатом, хладон зріджується і знову надходить у напірну ємність екстрактора [6].

Зважаючи на описану технологію екстракції зрідженими газами, оптимізація цього процесу та його промислове масштабування неможливо без досконалих теоретичних та експериментальних досліджень цього процесу. Одним з таких важливих напрямків є аналітичне моделювання та експериментальне дослідження кінетики екстрагування.

Існуючі фізико-хімічні моделі, які базуються на законах термодинаміки масоперенесення та хімічної кінетики занадто складні для аналітичного аналізу та оптимізації процесу екстракції. Вони використовують пряме моделювання процесу екстракції в системі тверда фаза - розчинник шляхом розв'язання рівнянь нестационарної дифузії з відповідними граничними та початковими умовами та урахуванням можливих хімічних реакцій цільової речовини з розчинником [7-8]. Однак експериментальна перевірка отриманих даних про поля концентрацій у твердій фазі та розчиннику практична неможлива. Тому, як правило, отримані значення нестационарних полів осереднюються за об'ємом твердої фази та розчинника і після цього ці дані порівнюються з експериментальною кінетикою екстракції [9-10].

Крім моделей, які ґрунтуються на диференціальних рівняннях тепло - масообміну, використовуються більш простіші емпіричні моделі, які складені із залученням експериментальних даних кінетики екстракції. Більш точні феноменологічні моделі вимагають більше даних та обчислювальних ресурсів, тоді як простіші емпіричні моделі можуть бути достатніми для прогнозування та оптимізації в певних діапазонах [11-13].

Більш перспективним є метод моделювання, який базується на основних законах тепло-масоперенесення, хімічної кінетики, балансових співвідношеннях для відповідних потоків, застосованих для середньооб'ємних значень відповідних фізичних величин. Для спрощення моделювання та отримання аналітичних рішень в цьому разі найчастіше роблять наступні припущення: концентрація цільової речовини вважається постійною за координатою і залежить лише від часу; концентрація цільової речовини в екстрагенті вважається досить малою порівняно з концентрацією її в межах твердої фази; частинка твердої фази має форму кулі; коефіцієнт дифузії в твердій і рідинній фазі є постійним; основний опір процесу масопередачі зосереджений всередині твердої фази.

Саме такі припущення використані в класичній кінетичній моделі професора Аксельруда Г.А., яка багаторазово була перевірена експериментально і використовувалась у низці робіт присвячених процесам екстрагування [15-16]. За експериментальними даними кінетики екстракції описана модель дозволяє визначити коефіцієнт ефективної дифузії цільового компонента у сировині, кінетичний коефіцієнт хімічної реакції (за її наявності)

Подібний підхід до моделювання кінетики наведений в роботі [17]. Модель кінетики екстракції побудована на наближеному розв'язанні рівняння дифузії у плоскому шарі сировини та балансових співвідношеннях для змінювання концентрацій цільової компоненти у сировині та екстрагенті.

Перевагою описаних останніх двох методів моделювання полягає в тому, що за даними регресійного аналізу експериментальних даних кінетики екстрагування можливо отримати всі тепло-масообмінні коефіцієнти і, таким чином, подальше оптимізувати процес екстракції за режимами його проведення.

В той же час при застосуванні зазначених моделей для опису кінетики екстрагування рослинної сировини в зрідженому газі виявилася одна особливість не врахована в цих рівняннях. Як зазначалось вище, екстракція зрідженими газами відбувається в режимі настоювання, використання великого об'єму фреону не доцільно з економічної та екологічної точки зору, тому при невеликих відношеннях екстрагент - тверда фаза концентрація цільової речовини на міжфазній поверхні та в об'ємі екстрагенту не залишається постійною в часі а поступово збільшується. Сама ця особливість не врахована у рівняннях (1) та (2).

В зв'язку з цим метою даної роботи є розробка аналітичної моделі кінетики екстракції, яка враховує рівняння фазової рівноваги в системі цільова компонента – екстрагент за умов нерівноважної концентрації на міжфазній поверхні системи.

Матеріали та методи досліджень. Для отримання аналітичної моделі екстракції з урахуванням відмічених особливостей процесу екстрагування зрідженими газами скористуємось викладеними вище припущеннями, але будемо враховувати зміну концентрації цільового компонента на міжфазній границі та у розчині з часом, а також будемо вважати, що частинки твердої фази мають довільну форму. Для цього запишемо рівняння масоперенесення у твердій фазі в інтегральній формі

$$\int \frac{d}{dt} c_S dV_S = \int D_{efS} \cdot grad(c_{SF}) dF_S \quad (1)$$

де c_S - концентрація цільового компонента у твердій фазі; D_{efS} - ефективний коефіцієнт дифузії у твердій фазі; V_S - об'єм твердої фази; τ - біжучий час; $grad(c_{SF})$ – градієнт концентрації цільового компонента на міжфазній поверхні.

Для окремої частинки після інтегрування для середніх за об'ємом концентрацій і середніх градієнтів на поверхні маємо

$$V \cdot \frac{d}{d\tau} \overline{c_S} = F \cdot D_{efS} \cdot \overline{grad(c_{SF})} \quad (2)$$

або

$$\frac{d}{d\tau} \overline{c_S} = \frac{D_{efS}}{R_V} \cdot \overline{grad(c_{SF})}, \quad (3)$$

де $\overline{c_S}$ – середньоб'ємна концентрація цільового компоненту у твердій фазі, $\overline{grad(c_{SF})}$ – середнє значення градієнту концентрації на поверхні частинки, R_V – відношення об'єму твердої частинки до її поверхні.

Будемо вважати, що основний опір процесу масопередачі зосереджений всередині твердої фази, то коефіцієнт масопередачі може бути прийнятий рівним коефіцієнту масовіддачі в рідинній фазі. З урахуванням цього для масоперенесення у рідинній фазі та середніх концентрацій цільового компоненту маємо наступне рівняння

$$V_L \cdot \left(\frac{d}{d\tau} c_L \right) = -\beta \cdot F_S \cdot (c_{LF} - c_{Lequ}), \quad (4)$$

де c_L – середня концентрація цільового компоненту у розчинник; β – коефіцієнт масовіддачі у рідкій фазі; V_L – об'єм розчинника; c_{LF} – концентрація цільового компоненту на міжфазній поверхні, c_{Lequ} – рівноважна концентрація цільового компоненту у розчиннику.

Перейдемо до безрозмірних концентрацій у записаних рівняннях. Для цього поділимо рівняння (2), (3) на густину суміші тверда фаза – розчинник, яка є величина сталою протягом усього процесу.

$$\rho_{SL} = \frac{m_S + m_L}{V_S + V_L} = \frac{m_0}{(V_S + V_L)} = const, \quad (5)$$

де ρ_{SL} – густина системи тверда фаза – розчинник; m_S – маса цільової речовини в сировині; m_L – маса цільової речовини в розчиннику; m_0 – початкова маса цільової речовини (в процесі екстрагування m_S зменшується, а m_L збільшується але $m_S + m_L = m_0 = const$, як і $V_S + V_L = const$);

Тоді концентрації цільового компоненту будуть пов'язані з відносною часткою цільової речовини наступними формулами

$$c_S = \rho_{SL} \cdot X_S \cdot (1 + \varphi), \quad (6)$$

$$c_L = \rho_{SL} \cdot (1 - X_S) \cdot \left(1 + \frac{1}{\varphi} \right), \quad (7)$$

де $\varphi = V_L/V_S$ – відношення об'ємів розчинник – тверда фаза (обернене відношення V_S/V_L називають гідромодулем); $X_S = m_S/m_0$ – частка цільової речовини в твердій фазі; $X_L = m_L/m_0$; – частка цільової речовини в розчиннику при цьому $X_L = 1 - X_S$.

З урахуванням співвідношень між концентраціями та безрозмірними частками отримуємо наступні диференціальні рівняння у безрозмірних концентраціях. Для твердої фази:

$$\frac{d}{d\tau} \overline{X_S} = \frac{D_{efS}}{R_V} \cdot \overline{grad(X_{SF})}. \quad (8)$$

Для рідинної фази, з урахуванням (8), (9):

$$-\frac{d}{d\tau} X_L = \frac{d}{d\tau} X_S = -\frac{1}{R_V \varphi} \cdot \beta \cdot (X_{SF} - X_{Sequ}), \quad (9)$$

де X_{SF} – частка цільової речовини на міжфазній поверхні; X_{Sequ} – рівноважна частка цільової речовини у твердій фазі.

Середні за об'ємом значення концентрацій залежать від функції розподілу концентрацій за координатами. Будемо розглядати одновимірну задачу із заданим довільним профілем безрозмірних концентрацій $X(r)$ такого вигляду:

$$X_S(r) = \left[1 - \left(\frac{r}{R_V} \right)^n \right] \cdot (X_{Sc} - X_{SF}) + X_{SF}, \quad (10)$$

де X_{Sc} – частка цільової речовини в центрі твердої частинки; X_{SF} – частка цільової речовини на міжфазній поверхні; r – поточна координата, n – показник профілю концентрацій, який залежить від форми твердої частинки.

Виконуючи осереднення профілю концентрацій за координатою r , отримуємо значення градієнту безрозмірної концентрації на міжфазній поверхні

$$\overline{grad(X_{SF})} = \frac{(X_S - X_{SF}) \cdot (n+1)}{R_V} \quad (11)$$

З урахуванням (11) перепишемо рівняння масоперенесення (8), (9) в системі тверда фаза – розчинник для середньоб'ємних значень концентрацій (позначення осереднення над X надалі не будемо вказувати):

$$\frac{d}{d\tau} X_S = \frac{\Gamma \cdot D_{efS} \cdot (X_S - X_{SF})}{R_V^2}, \quad (12a)$$

$$-\frac{d}{d\tau}X_L = \frac{d}{d\tau}X_S = -\frac{1}{R_V\varphi} \cdot \beta \cdot (X_{SF} - X_{Sequ}). \quad (12b)$$

де введено позначення для коефіцієнта форми частинки: $\Gamma = n+1$. Порівнюючи праві частини системи рівнянь, знаходимо значення частки цільової речовини на міжфазній поверхні X_{SF} ,

$$X_{SF} = \frac{R_V X_{Sequ} \cdot \beta + D_{efS} \cdot X_S \cdot \varphi \Gamma}{R_V \beta + D_{efS} \cdot \varphi \Gamma} \quad (13)$$

Підставляючи (13) в (12a) отримуємо диференціальне рівняння кінетики екстракції у наступному вигляді:

$$\frac{d}{d\tau}X_S = -k_X \cdot (X_S - X_{Sequ}), \quad (14)$$

$$\text{де } k_X = \frac{D_{efS} \cdot \Gamma \cdot Bi_m}{R_V^2 \cdot (Bi_m + \Gamma \cdot \varphi)}. \quad (15)$$

Тут k_X – кінетичний коефіцієнт екстракції, 1/с; $Bi_m = \beta R_V / D_{efS}$ – масобмінне число Біо

Рішення диференціального рівняння (14) за початкової умови $X_S(0)=1$ має наступний вигляд

$$X_S = (1 - X_{Sequ}) \cdot e^{-Fo_m \frac{\Gamma \cdot Bi_m}{(Bi_m + \Gamma \cdot \varphi)}} + X_{Sequ}, \quad (16)$$

де $Fo_m = D_{efS} \tau / R_V^2$ – масообмінне число Фур'є.

Рівняння (16) описує кінетику екстрагування в твердій фазі. Відповідно кінетика цільового компоненту в розчиннику описується наступним рівнянням

$$X_L = \chi \cdot \left[1 - e^{-Fo_m \frac{\Gamma \cdot Bi_m}{(Bi_m + \Gamma \cdot \varphi)}} \right], \quad (17)$$

де $\chi = (1 - X_{Sequ})$ – рівноважна частка цільової речовини у розчиннику або коефіцієнт вилучення.

Врахуємо залежність рівноважної концентрації цільової речовини у розчиннику від співвідношення об'ємів рідинної та твердої фази. Для цього скористаємося законом розподілу Нерста [14], відповідно до якого, у рівноважному стані цільова речовина розподіляється між твердою і рідинною фазами в постійному відношенні. Це відношення для ідеальних систем залежить тільки від температури і природи речовини.

$$\psi = \frac{c_{Lequ}}{c_{Sequ}} = const. \quad (18)$$

де ψ – константа розподілу.

Розрахуємо зв'язок коефіцієнта вилучення з об'ємним співвідношенням рідинної та твердої фаз, якщо система тверда фаза – розчинник ідеальна. З урахуванням (18) маємо

$$\chi = \frac{m_{Lequ}}{m_0} = \frac{(V_L \cdot c_{Lequ})}{(V_L \cdot c_{Lequ} + V_S \cdot c_{Sequ})} = \frac{(V_L \cdot \psi \cdot c_{Sequ})}{[V_L \cdot (\psi \cdot c_{Sequ}) + V_S \cdot c_{Sequ}]}. \quad (19)$$

Звідки остаточно отримуємо для коефіцієнта вилучення наступну формулу

$$\chi = \frac{\psi \cdot \varphi}{1 + \psi \cdot \varphi}. \quad (20)$$

Врахуємо, що в експерименті вимірюється не коефіцієнт вилучення, а вихід цільового компоненту, тобто відношення маси цільової речовини до маси сировини. Тоді з урахуванням (20) рівняння кінетики екстрагування в розчиннику (17) прийме наступний вигляд

$$\chi_m = \varepsilon_S \cdot \frac{\psi \cdot \varphi}{1 + \psi \cdot \varphi} \cdot \left[1 - e^{-Fo_m \frac{\Gamma \cdot Bi_m}{(Bi_m + \Gamma \cdot \varphi)}} \right], \quad (21)$$

де χ_m – вихід цільового компоненту відносно маси сировини, ε_S – початкова частка цільової речовини у сировині ($\varepsilon_S = m_0/m$, де m – маса сировини).

Результати досліджень.

Проаналізуємо умови досягнення рівноважного стану в процесі екстракції. Для цього рівняння кінетики екстракції (21) запишемо у скороченому вигляді

$$x_m = x(1 - e^{-k_X \tau})_{max} \quad (22)$$

$$\text{де введено позначення: } x_{max} = \varepsilon_S \cdot \frac{\psi \cdot \varphi}{1 + \psi \cdot \varphi} \quad (22a)$$

Як випливає з (22), рівноважний стан в процесі екстракції настає коли $\tau \rightarrow \infty$, але практично при $k_X \cdot \tau = 3$, оскільки величина $(1 - e^{-3} = 0.95)$, тобто вихід цільового компоненту складає 95% від максимально можливого. Відповідну тривалість екстракції слід вважати раціональною, оскільки, наприклад для досягнення виходу у 99% значення $k_X \cdot \tau = 4.6$, а це означає збільшення тривалості екстрагування в 1.5 рази.

Відповідно до цього визначимо раціональну тривалість екстрагування з умови $k_X \cdot \tau_{max} = 3$

$$\tau_{max} = 3 \cdot \frac{R_V^2}{D_{efS}} \cdot \frac{(Bi_m + \Gamma \cdot \varphi)}{\Gamma \cdot Bi_m}. \quad (23)$$

Отримане аналітичне рівняння дозволяє за експериментальними даними кінетики екстрагування знайти всі фізичні величини, які входять у кінетичне рівняння (21).

Представимо рівняння (22) у лінійаризованому вигляді, логарифм

$$-\ln \left(1 - \frac{\chi_m(\tau)}{\chi_{max}} \right) = k_X \tau \quad (24)$$

Відношення поточного виходу цільової речовини $\chi_m(\tau)$ до її максимального виходу χ_{max} відомо з експериментальних даних. Таким чином кут нахилу прямої (24) є кінетичним коефіцієнтом k_X .

Наступним етапом регресійного аналізу є визначення коефіцієнтів масоперенесення та фазової рівноваги. Запишемо рівняння (15) для кінетичного коефіцієнту у вигляді такого регресійного рівняння

$$\frac{1}{k_X} = \frac{R_V^2}{D_{efS} \cdot \Gamma} + \frac{R_V^2}{D_{efS}} \cdot \frac{\varphi}{Bi_m} \quad (25)$$

За сталих коефіцієнтів масоперенесення і геометрії частинки ця залежність є лінійною відносно відношення об'ємів розчинника та сировини φ .

$$\frac{1}{k_X} = a_1 + a_2 \cdot \varphi, \quad (26)$$

де a_1 та a_2 – регресійні коефіцієнти.

Якщо апроксимувати експериментальну залежність кінетичного коефіцієнта екстракції рівнянням (26) за різного гідромодуля, то можна визначити коефіцієнти масоперенесення за відомої геометрії частинок (R_V , Γ)

$$D_{efS} = \frac{R_V^2}{\Gamma \cdot a_1}, \quad (27)$$

$$Bi_m = \frac{\Gamma \cdot a_1}{a_2}. \quad (28)$$

Крім того якщо отримати експериментальну залежність виходу цільової речовини χ_m від відношення об'ємів розчинника та сировини φ , то, як слідкує з (22а), можна знайти константу розподілу фазової рівноваги ψ та вміст цільової речовини у сировині з наступного регресійного рівняння

$$\frac{1}{x_{max}} = \frac{1}{\varepsilon_S} + \frac{1}{\psi \cdot \varepsilon_S} \cdot \frac{1}{\varphi}, \quad (29)$$

$$\frac{1}{x_{max}} = a_3 + a_4 \cdot \frac{1}{\varphi}. \quad (30a)$$

Звідки отримуємо

$$\varepsilon_S = \frac{1}{a_3}, \quad (31)$$

$$\psi = \frac{a_3}{a_4}. \quad (32)$$

Висновки. Переваги екстракції зрідженими газами – висока селективність, низькі температури екстракції, легкість розділення, мінімальний залишок у екстракті, хімічна інертність, негорючість та низька токсичність робить їх надзвичайно привабливими та ефективними.

Оптимізація цього методу екстрагування та його промислове масштабування неможливо без доскона-

льних теоретичних та експериментальних досліджень, зокрема аналітичного моделювання та експериментального дослідження кінетики екстрагування.

Проаналізовано існуючі методи фізико-математичного моделювання кінетики процесу екстракції. Моделювання процесу екстракції шляхом розв'язання рівнянь нестационарної дифузії з відповідними граничними та початковими умовами зазвичай стикається з проблемою експериментальної перевірки отриманих даних про поля концентрацій у твердій фазі та розчиннику, яка практична неможлива. Тому, як правило, отримані значення нестационарних полів осереднюються за об'ємом твердої фази та розчинника і після цього ці дані порівнюються з експериментальною кінетикою екстракції.

Інший підхід до моделювання ґрунтується на застосуванні різних емпіричних рівнянь, які дозволяють із застосуванням регресійного аналізу експериментальної кінетики екстракції визначити певні кінетичні коефіцієнти, які не містять певного фізичного сенсу, а являють собою тільки параметри ідентифікації “чорної скрині”, яка моделює систему тверда фаза - розчинник.

Більш перспективним є метод моделювання, який базується на основних законах тепло-масоперенесення, застосованих для середньооб'ємних значень відповідних фізичних величин за певних припущень, який дозволяє отримати аналітичні розв'язки, що містять основні фізичні параметри процесу екстрагування. Однак існуючі моделі, побудовані за такого підходу, не враховують рівняння фазової рівноваги в системі цільова компонента – сировина за змінної концентрації цільового компоненту у розчиннику.

Нами запропонована модель кінетики екстрагування у вигляді системи двох звичайних, диференціальних рівнянь, яка враховує змінну концентрацію на міжфазній поверхні системи та в об'ємі розчинника, що є особливістю процесу екстрагування зрідженими газами за кінцевого відношення об'ємів екстрагент – сировина.

Отримано аналітичний розв'язок у вигляді рівняння кінетики для середньооб'ємної частки цільового компоненту в твердій та рідинній фазі, яка містить визначальні масообмінні числа подібності Фур'є, Біо, для частинки сировини довільної геометричної форми, співвідношення об'ємів екстрагент – сировина та константу розподілу фазової рівноваги.

Показано, що шляхом регресійного аналізу експериментальних даних кінетики екстрагування, на підставі отриманого кінетичного рівняння можна отримати всі визначальні фізичні характеристики процесу екстракції, що дозволяє в подальшому проводити пошук оптимальних режимів процесу екстракції зрідженими газами.

References

1. Cequier-Sánchez, E., Rodríguez, C., & Ravelo, Á. (2008). Dichloromethane as a solvent for lipid extraction and assessment of lipid classes and fatty acids from samples of different natures. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(12), 4297–4303. <https://doi.org/10.1021/jf073471e>
2. *Plant extraction with HFC-134a*. (2025, July 18). Retrieved from <https://pure5extraction.com/plant-extraction-with-hfc-134a/>
3. Lelono, A., Simanungkalit, S., Umarudin, I., & Herdiawan, H. (2018). Screening of active compounds from *Artemisia annua* using HFC-134a subcritical extraction system. *Journal of Tropical Pharmacy and Chemistry*, 4(3), 114–121. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/125e/5f018de9dc62f50266398451e9dcfe0f0d5a.pdf>
4. Mendez, I. I., Hermann, L. L., Hazelton, P. R., & Coombs, K. M. (2000). A comparative analysis of Freon substitutes in the purification of reovirus and calcivirus. *Journal of Virological Methods*, 90(1), 59–67.
5. Molchanov, G. I. (1981). *Intensive processing of medicinal raw materials* [Интенсивная обработка лекарственного сырья]. Moscow: Meditsina.
6. Osetskiy, O., Sevastianov, S., Yevlash, V., & Potapov, V. O. (2023). Low-temperature extraction of lipid fractions from vegetable raw materials using liquefied freons. *Problems of Cryobiology and Cryomedicine*, 33(1), 38–49. <https://doi.org/10.15407/cryo33.01.038>
7. Alara, O. R., & Abdurahman, N. H. (2019). Kinetics studies on effects of extraction techniques on bioactive compounds from *Vernonia cinerea* leaf. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 580–588. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3512-4>
8. de Oliveira, L. P., Hudebine, D., Guillaume, D., & Verstraete, J. J. (2016). A review of kinetic modeling methodologies for complex processes. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies Nouvelles*, 71(3), 45. <https://doi.org/10.2516/ogst/2016011>
9. Bbumba, S., Kigozi, M., Karume, I., Arum, C. T., Murungi, M., Babirye, P. M., & Kirabo, S. (2025). Prediction and optimization of process parameters using artificial intelligence and machine learning models. *Asian Journal of Applied Chemistry Research*, 16(1), 11–33. <https://doi.org/10.9734/ajacr/2025/v16i1317>
10. Gallo, M., Formato, A., Ciaravolo, M., Formato, G., & Naviglio, D. (2020). Study of the kinetics of extraction process for the production of hemp inflorescence extracts by means of conventional maceration (CM) and rapid solid-liquid dynamic extraction (RSLDE). *Separations*, 7(2), 20. <https://doi.org/10.3390/separations7020020>
11. Reche, C., Rosselló, C., Umaña, M. M., Eim, V., & Simal, S. (2021). Mathematical modelling of ultrasound-

- assisted extraction kinetics of bioactive compounds from artichoke by-products. *Foods*, 10(5), 931. <https://doi.org/10.3390/foods10050931>
12. Pamungkas, K. D., Karyadi, J. N. W., Setyaningsih, W., & Susanti, D. Y. (2025). Microwave-assisted extraction kinetics of phycobiliprotein from *Spirulina platensis*: Influence of citric acid concentration. *Trends in Sciences*, 22(7), 10042. <https://doi.org/10.48048/tis.2025.10042>
 13. Dyachok, V., Dyachok, R., Gaiduchok, O., & Ilkiv, N. (2015). Mathematical model of mass transfer from lamina of the leaf into extractant. *Chemistry and Chemical Technology*, 9(1), 107–110. <https://doi.org/10.23939/CHCHT09.01.107>
 14. Galgano, F., Tolve, R., Scarpa, T., Caruso, M. C., Lucini, L., Senizza, B., & Condelli, N. (2021). Extraction kinetics of total polyphenols, flavonoids, and condensed tannins of lentil seed coat: Comparison of solvent and extraction methods. *Foods*, 10(8), 1810. <https://doi.org/10.3390/foods10081810>
 15. Semenyshyn, Y., Tsiura, N., Rymar, T., & Krvavych, A. (2017). Equilibrium, mechanism and kinetics of extraction and drying processes [Рівновага, механізм і кінетика процесів екстрагування та сушіння]. *Scientific Works*, 80(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.198>
 16. Krvavych, A. S., Konechna, R. T., Mylyanych, A. O., Petrina, R. O., Fedoryshyn, O. M., Mykytiuk, O. M., Semenyshyn, Y. M., Atamanyuk, V. M., & Novikov, V. P. (2018). Kinetics and mechanism of extraction of biologically active substances from the wild species *G. imbricatus* [Кінетика та механізм екстракції біологічно активних речовин з дикорослого виду *G. imbricatus*]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (5), 111–115. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchem_2018_5_17
 17. Kotov, B., & Bandura, V. (2018). Construction of a mathematical model of extraction process in the system solid body–liquid in a microwave field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(6–95), 33–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.145232>
 18. Mank, V. V. (2007). *Physical chemistry* [Фізична хімія]. Kyiv: Center of Educational Literature.

ANALYTICAL MODEL OF KINETICS OF EXTRACTION WITH LIQUEFIED GASES

**Potapov V.O., professor, Doctor of Science, Professor, Tsurkan M.M. Associated professor, PhD,
Belyi D.V., PhD student
State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine**

Abstract. The advantages of extraction with liquefied gases are noted - high selectivity, low temperatures, ease of separation, chemical inertness, non-flammability and low toxicity, which made this method extremely attractive and effective.

Existing methods of mathematical modeling of the kinetics of the extraction process are analyzed. It is shown that modeling the extraction process by solving the equations of non-stationary diffusion with appropriate boundary and initial conditions usually faces the problem of experimental verification of the obtained data on the concentration fields. Therefore, as a rule, the obtained values of non-stationary fields are averaged over the volume of the solid phase and solvent and then these data are compared with the experimental extraction kinetics.

Another method, which is based on the use of various empirical equations to describe the kinetics of extraction, allows you to determine certain kinetic coefficients that do not contain a certain physical meaning.

A model of extraction kinetics is proposed in the form of a system of two ordinary, differential equations, which takes into account the variable concentration on the interfacial surface of the system and in the solvent volume, which is a feature of the extraction process with liquefied gases at a finite volume ratio of the extractant - raw material.

An analytical solution is obtained in the form of a kinetic equation for the average volume fraction of the target component in the solid and liquid phases, which contains the determining mass transfer numbers of Fourier, Biot, for a raw material particle of arbitrary geometric shape, the volume ratio of the extractant - raw material and the phase equilibrium distribution constant.

It is shown that by regression analysis of experimental data on extraction kinetics, based on the obtained kinetic equation, it is possible to obtain all the determining physical characteristics of the extraction process, which allows for the further search for optimal modes of the extraction process with liquefied gases.

Keywords: extraction, liquefied gases, modeling, process kinetics, regression analysis.

Список використаної літератури

1. Cequier-Sánchez E., Rodríguez C., Ravelo Á. Dichloromethane as a Solvent for Lipid Extraction and Assessment of Lipid Classes and Fatty Acids from Samples of Different Natures. June 2008. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(12):4297-303 DOI: 10.1021/jf073471e.
2. Plant Extraction with HFC-134a, доступ отримано липня 18, 2025, <https://pure5extraction.com/plant-extraction-with-hfc-134a/>

3. Lelono, A., Simanungkalit, S., Umarudin, I., Herdiawan, H., 2018. Screening of Active Compounds from *Artemisia annua* using HFC-134a Subcritic Extraction System, *J. Trop.Pharm. Chem.* 4(3); 114-121. <https://pdfs.semanticscholar.org/125e/5f018de9dc62f50266398451e9dcfe0f0d5a.pdf>
4. Mendez II, Hermann LL, Hazelton PR, Coombs KM (2000). A comparative analysis of Freon substitutes in the purification of reovirus and calcivirus. *J Virol Methods* 90(1):59- 67.
5. Молчанов Г.И. Интенсивная обработка лекарственного сырья // М.: Медицина. – 1981. – 206 с.
6. Osetskiy O., Sevastianov S, Yevlash V., V.O. Potapov V. Low-Temperature Extraction of Lipid Fractions from Vegetable Raw Materials Using Liquefied Freons. *Probl Cryobiol Cryomed* 2023; 33(1): 038–049. [Doi.org/10.15407/cryo33.01.038](https://doi.org/10.15407/cryo33.01.038).
7. Alara, O.R., Abdurahman, N.H. Kinetics studies on effects of extraction techniques on bioactive compounds from *Vernonia cinerea* leaf. *J Food Sci Technol* 56, 580–588 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3512-4>.
8. de Oliveira, L. P., Hudebine, D., Guillaume, D., & Verstraete, J. J. (2016). A review of kinetic modeling methodologies for complex processes. *Oil & Gas Science and Technology–Revue d’IFP Energies nouvelles*, 71(3), 45. <https://doi.org/10.2516/ogst/2016011>.
9. Bbumba, Simon, Moses Kigozi, Ibrahim Karume, Chinaecherem Tochukwu Arum, Moses Murungi, Prudence Mary Babirye, and Solome Kirabo. 2025. “Prediction and Optimization of Process Parameters Using Artificial Intelligence and Machine Learning Models”. *Asian Journal of Applied Chemistry Research* 16 (1):11-33. <https://doi.org/10.9734/ajacr/2025/v16i1317>.
10. Gallo, M., Formato, A., Ciaravolo, M., Formato, G., & Naviglio, D. (2020). Study of the Kinetics of Extraction Process for The Production of Hemp Inflorescences Extracts by Means of Conventional Maceration (CM) and Rapid Solid-Liquid Dynamic Extraction (RSLDE). *Separations*, 7(2), 20. <https://doi.org/10.3390/separations7020020>.
11. Reche C, Rosselló C, Umaña MM, Eim V, Simal S. Mathematical Modelling of Ultrasound-Assisted Extraction Kinetics of Bioactive Compounds from Artichoke By-Products. *Foods*. 2021; 10(5):931. <https://doi.org/10.3390/foods10050931>.
12. Pamungkas, K. D. ., Karyadi, J. N. W., Setyaningsih, W. ., & Susanti, D. Y. (2025). Microwave-Assisted Extraction's Kinetics of Phycobiliprotein from *Spirulina Platensis*: Influence of Citric Acid Concentration. *Trends in Sciences*, 22(7), 10042. <https://doi.org/10.48048/tis.2025.10042>.
13. Dyachok, V., Dyachok, R., Gaiduchok, O., & Ilkiv, N. (2015). Mathematical model of mass transfer from lamina of the leaf into extractant. *Chemistry and Chemical Technology*, 9(1), 107–110. <https://doi.org/10.23939/CHCHT09.01.107>.
14. Galgano F, Tolve R, Scarpa T, Caruso MC, Lucini L, Senizza B, Condelli N. Extraction Kinetics of Total Polyphenols, Flavonoids, and Condensed Tannins of Lentil Seed Coat: Comparison of Solvent and Extraction Methods. *Foods*. 2021 Aug 5;10(8):1810. doi: 10.3390/foods10081810. PMID: 34441587; PMCID: PMC8393944.
15. Семенишин, Є., Цюра, Н., Римар, Т., & Крвавич, А. (2017). Рівновага, механізм і кінетика процесів екстрагування та сушіння. *Scientific Works*, 80(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.198>.
16. Крвавич А. С. Кінетика та механізм екстракції біологічно активних речовин з дикорослого виду *G. Imbricatus* / А. С. Крвавич, Р. Т. Конечна, А. О. Милянйч, Р. О. Петріна, О. М. Федоришин, О. М. Микитюк, Є. М. Семенишин, В. М. Атаманюк, В. П. Новіков // Вопросы химии и химической технологии. - 2018. - № 5. - С. 111-115. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchem_2018_5_17.
17. Kotov, B., & Bandura, V. (2018). Construction of a mathematical model of extraction process in the system solid body liquid in a microwave field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(6-95), 33-43. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.145232>.
18. Манк В.В. Фізична хімія. – Київ: Центр навчальної літератури, 2007. – 170 с.

Отримано в редакцію 11.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 11.06.2025

Approved 02.09.2025

ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНОГО КОМПОЗИТНОГО ПАЛИВА

Корінчевська Т.В., к.т.н., ст. досл., Михайлик В.А., к.т.н., с.н.с., Снежкін Ю.Ф., д.т.н., професор
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація. Утилізація твердих побутових відходів є актуальною задачею сьогодення. Використання відходів як сировини для створення альтернативного палива є перспективним напрямом переробки, що дозволить частково замінити тверде традиційне паливо. Для зменшення небезпечних викидів під час спалювання палива з побутових відходів пропонується додавати біомасу. В той же час підбір складу композитного палива на основі твердих побутових відходів та біомаси, що задовольнятиме потреби споживача, потребує вивчення його термічних властивостей та кінетики процесу деструкції. Як сировину для створення експериментального палива використовували основні горючі компоненти твердих побутових відходів (картон, поліетилен, тканину) та відходи сільськогосподарської діяльності (пожнивні рештки кукурудзи). Дослідження термічних характеристик палив виконані методами термогравіметрії та диференційного термічного аналізу. Визначено характерні температури етапів деструкції: дегідратації, розкладання органічних та мінеральних речовин. Отримано дані про вміст води, органічних та мінеральних речовин та золи, обчислено швидкості термічної деструкції органічних речовин на різних фазах нагрівання, визначено теплоту згорання. Виконано порівняння кінетики розкладання та теплової генерації на різних стадіях термічної деструкції органічних речовин. Аналіз одержаних результатів показав, що досліджені зразки композитного палива мають подібний характер термічної деструкції, оскільки склад палива обмежується поліетиленом та лігноцелюлозною сировиною. Встановлено, що присутність поліетилену в паливі зумовлює високу теплотворну здатність. Отримані результати досліджень дозволили рекомендувати експериментальні склади палива до виробництва та використання з забезпеченням контролю технології спалювання, що гарантує нейтралізацію небезпечних продуктів згорання. Була запропонована технологія виготовлення альтернативного композитного палива на основі твердих побутових та сільськогосподарських відходів.

Ключові слова: термогравіметрія, диференційний термічний аналіз, альтернативне паливо, тверді побутові відходи, рештки кукурудзи, розкладання, теплота згорання.

Вступ. Внаслідок загального збільшення населення планети, покращення якості життя та широкого розвитку промисловості кількість твердих побутових відходів (ТПВ) постійно зростає. Неправильно утилізовані відходи є екологічно небезпечними, а також займають занадто багато земельних площ. Тому Європейська Комісія вимагає скорочення захоронення відходів для зменшення забруднення поверхневих і ґрунтових вод, ґрунту та повітря, а також зменшення парникового ефекту.

Традиційні методи утилізації та переробки ТПВ включають захоронення, спалювання та біологічну очистку. Проте ці методи мають певні недоліки [1]. Зокрема, існує багато проблем, пов'язаних зі зменшенням площ для звалищ, з суворими екологічними нормами та зростанням витрат на утилізацію [2]. Контроль над твердими відходами та пошук конструктивних способів поводження з ними може обмежити їх негативний екологічний вплив. Тому створення RDF (refuse derived fuel) стає одним з дієвих способів переробки відходів [3]. Його використовують як альтернативу викопному паливу переважно на цементних заводах та електростанціях, що працюють на вугіллі. RDF спалюють шляхом змішування з вугіллем або біомасою [4, 5]. При заміщенні вугілля на RDF, вологість якого менша 15%, скорочення викидів становить 0,4 тони CO₂/тону вугілля [6]. А спалювання разом з біомасою дозволяє зменшити загальну кількість зареєстрованих викидів CO₂ [7]. В той же час, біомаса має великий потенціал для збільшення виробництва електричної та теплової енергії [8, 9]. Біомасу можна віднести до вуглецевонейтральних джерел енергії, оскільки під час її спалювання в атмосферу надходить вуглекислий газ в кількості, приблизно рівній поглинутому рослинами на протязі їхнього циклу відтворення [10]. Внаслідок цього застосування біомаси в складі альтернативного палива дозволить покращити екологічний стан довкілля за рахунок збільшення частки CO₂, що утворюється при спалюванні вуглецевонейтральних компонентів палива.

Оскільки Україна — аграрна країна, то перспективним джерелом біомаси є пожнивні рештки сільськогосподарських культур, що залишаються після збору урожаю. Хоча важливо залишити певну кількість рослинних решток на полі, часто існує значна кількість цих залишків, які потрібно видалити, щоб зменшити проблеми зі шкідниками, хворобами тощо [11]. Розглядаючи відходи сільського господарства, ми зосередились на кукурудзі, одній з найпоширеніших сільськогосподарських культур. Пожнивні рештки кукурудзи є перспективним видом біомаси, що має значний ресурс в Україні, проте мають складні паливні властивості, які, однак, кращі, ніж у соломи зернових колосових [12].

Переробка ТПВ на паливо передбачає сортування відходів і відокремлення горючих складових. В складі горючих компонентів ТПВ найбільшу частку займають папір, картон, пластик та текстиль [13]. Пластик є одним з основних складових ТПВ, який потребує належного поводження з ним в якості палива, щоб зменшити вплив на навколишнє середовище. Загалом, попередні дослідження показали [14], що спалювання ТПВ з вмістом 20% пластикових відходів не показало значного збільшення викидів забруднюючих речовин порівняно зі спалюванням вугілля.

Для визначення раціонального складу альтернативного твердого композитного палива та вивчення кінетики термічного розкладання при спалюванні необхідно виконати термічний аналіз експериментальних зразків палива на основі горючих компонентів ТПВ та решток кукурудзи.

Матеріали та методи. Дослідження проведено в модернізованому дериватографі «Q-1000», в якому реалізуються методи термогравіметрії та диференційного термічного аналізу. Дані методи сприяють поглибленню знань з кінетики термічної деструкції та генерації теплоти. Термічну деструкцію палив досліджували в конічному платиновому тиглі без кришки при нагріванні від температури навколишнього середовища до 1000 °C зі швидкістю 7,4 К/хв. і роздільній здатності ваг 0,5 мг.

Таблиця 1

Склад композитного палива

Аналіз горючих компонентів ТПВ [15] та легкодоступної біомаси дав підставу сформувати склад експериментального палива (табл. 1) з поліетилену, картону, тканини з 83% віскози та поживних решток кукурудзи.

Зразок	картон	поліетилен	тканина	поживні рештки кукурудзи
КП 1	20	40	10	30
КП 2	25	40	15	20
КП 3	30	40	10	20
КП 4	25	35	15	25
КП 5	35	30	10	25
КП 6	30	25	15	30

Можна відзначити, що всі компоненти, окрім поліетилену, відносять до лігноцелюлозної біомаси. За елементним складом вони мають схожість та містять достатньо високу кількість вуглецю. Це означає, що дані матеріали мають подібну теплотворну здатність. Поліетилен має найвищий вміст вуглецю і відповідно найвище значення теплоти згорання. В результаті досліджень методами термічного аналізу складових палива, запропоновано та виготовлено 6 варіантів складу експериментального композитного палива (КП) (табл. 1).

Результати досліджень. Отримані дериватограми термічного розкладання композитного палива представлені профілями зміни температури T і маси TG , швидкості зміни маси DTG та генерування теплоти DTA під час нагрівання зразка. Для всіх зразків (рис. 1–3) процес розкладання можна умовно поділити на 3 етапи, які супроводжуються виділенням або поглинанням теплоти. На першому етапі відбувається видалення води з матеріалу. Другий етап характеризується розкладанням органічних речовин, що входять в склад, а третій — мінеральних, що піддаються деструкції (табл. 2).

Таблиця 2

Термічні характеристики композитного палива

Зразок	Видалення води		Термічне розкладання				Зола, % СМ
			органічних речовин		мінеральних речовин		
	інтервал, °С	вологість, %	інтервал, °С	вміст, % СМ	інтервал, °С	вміст, % СМ	
КП 1	22–162	3,67	162–522	95,68	522–1000	1,21	3,11
КП 2	22–151	4,07	151–522	95,05	522–1000	2,30	2,65
КП 3	21–152	3,17	152–539	94,66	539–1000	2,24	3,10
КП 4	22–156	4,50	156–527	94,94	527–1000	1,74	3,32
КП 5	21–151	4,50	151–531	93,72	531–1000	2,09	4,19
КП 6	24–157	5,83	157–527	92,39	527–1000	3,72	3,89
СМ – сухий матеріал							

Оскільки у зразках композитного палива одною з основних складових є поліетилен (табл. 1), то на кривих DTA (рис. 1–3) реєструється склоперехід в межах 119–124 °C. Цей фазовий перехід відповідає перетворенню в процесі нагрівання поліетилену спочатку в еластичний, а згодом і в рідкий стан.

Зневоднення палива КП 1 (табл. 1) відбувається в інтервалі 22–162 °C (рис. 1 а). Визначена вологість зразка становить 3,67% (табл. 2). За рахунок багатокомпонентності термічне розкладання органічних речовин проходить у три стадії, які характеризуються різними швидкостями розкладання та тепловими ефектами (табл. 3). В інтервалі 162–363 °C відбувається розкладання 46,66% органічних речовин з середньою швидкістю 1,72% СМ/хв. і постійне наростання тепловиділення. Оскільки інтенсивність розкладання поліетилену в 5,2 рази більша на другій стадії [15], це накладає значний вплив на загальну кінетику розкладання палива.

На другій стадії (363–470 °С) швидкість розкладання за рахунок високого вмісту поліетилену зростає до 3,13% СМ/хв. При цьому реєструється максимум швидкості розкладання — 450 °С. За температур 273 та 458 °С на кривій DTA фіксуються максимуми ендотермічних піків, що відповідають процесу втрати теплоти під час викиду газоподібних продуктів розкладання за межі тигля. Розкладання органічних речовин закінчується третьою стадією в інтервалі 470–522 °С.

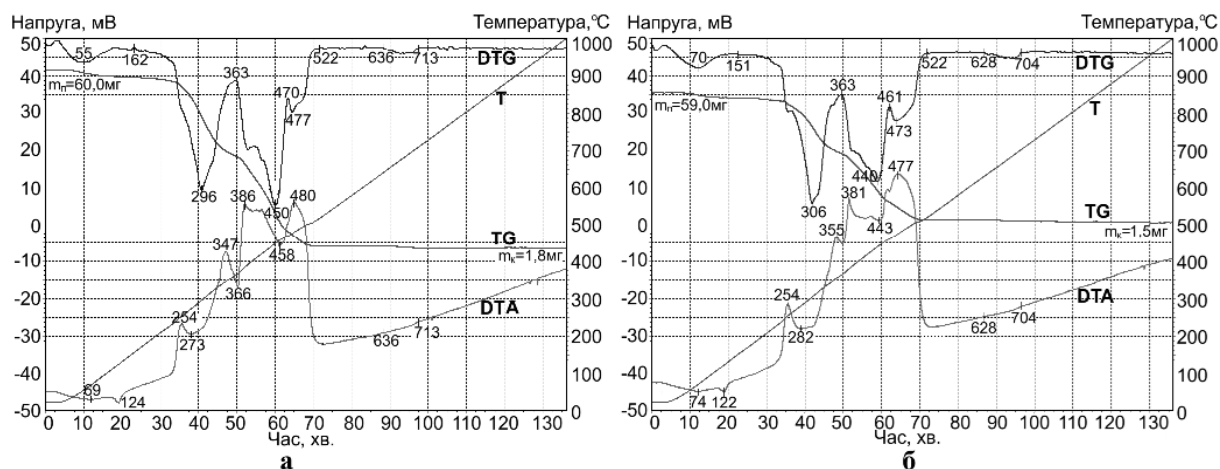


Рис. 1 – Дериwатограма КП 1 (а) та КП 2 (б)

Подальше нагрівання палива супроводжується деструкцією мінеральних речовин. В межах 636–713 °С має місце зменшення маси зразка та поглинання теплоти, що є наслідком термічного розкладання карбонату кальцію в картоні. Зольність КП 1 становить 3,11% СМ, а визначена нижча теплота згорання — 26,92 МДж/кг.

Таблиця 3

Показники, що характеризують кінетику розкладання органічних речовин

Зразок	1 стадія			2 стадія			3 стадія			Загальна середня швидкість розкладання, % СМ/хв.
	інтервал, °С	частка, ОР %	швидкість розкладання, % СМ/хв.	інтервал, °С	частка, ОР %	швидкість розкладання, % СМ/хв.	інтервал, °С	частка, ОР %	швидкість розкладання, % СМ/хв.	
КП 1	162–363	46,66	1,72	363–470	44,85	3,13	470–522	8,49	0,94	1,98
КП 2	151–363	45,17	1,59	363–461	40,53	3,01	461–522	14,30	1,37	1,92
КП 3	152–364	46,73	1,63	364–467	42,91	3,10	467–539	10,36	0,85	1,83
КП 4	156–367	49,45	1,73	367–453	36,95	3,29	453–527	13,60	1,09	1,91
КП 5	151–351	48,42	1,79	351–470	41,89	2,53	470–531	9,69	0,93	1,85
КП 6	157–351	49,81	1,88	351–527	50,19	1,85	—	—	—	1,86
СМ – сухий матеріал										
ОР – органічні речовини										

За рахунок того, що кількість лігноцелюлозних компонентів палива не змінилася (табл. 1), характер розкладання палива КП 2 (рис. 1 б, табл. 2) подібний до зразка КП 1. Зневоднення КП 2 завершується за температури 151 °С, і зразу ж розпочинається етап розкладання органічних речовин. На першій стадії розкладання (151–363 °С) видаляється 45,47% СМ зі швидкістю 1,59% СМ/хв (табл. 3). На другій стадії швидкість розкладання зростає в 1,9 рази внаслідок підвищеного вмісту поліетилену в паливі. На третій стадії (461–522 °С) інтенсивність розкладання органічних речовин знижується. Теплота згорання КП 2 становить 26,89 МДж/кг.

Паливо КП 3 має таке ж співвідношення лігноцелюлозних компонентів з поліетиленом, тому характер кривих TG, DTG та DTA (рис. 2 а) аналогічний попереднім двом зразкам палива. Видалення води відбувається в інтервалі 21 – 152 °С (табл. 2). На першій стадії розкладання органічних речовин (152–364 °С) спостерігається приріст тепловиділення (крива DTA). На цій стадії реєструється максимум швидкості розкладання за 316 °С. На другій стадії спостерігається інтенсивна деструкція – швидкість розкладання збільшується у 1,2 рази (табл. 3). В інтервалі 467–539 °С (третя стадія) швидкість розкладання зменшується і повністю припиняється при досягненні 539 °С (криві DTG та DTA). Деструкція органічних речовин супроводжується газоутворенням, яке призводить до втрати теплоти тиглем. На кривій DTA це відображається ендотермічними піками з максимумами 268 та 446 °С. В інтервалі 635–716 °С реєструється термічна дисоціація кар-

бонату кальцію в картоні (криві DTG та DTA). Величина теплоти згорання палива знаходиться на рівні двох попередніх зразків і становить 26,76 МДж/кг.

В КП 4 дещо зменшено вміст поліетилену до 35% (табл. 1). Проте це не вплинуло на характер кривих, що відображають процес деструкції палива (рис. 2 б).

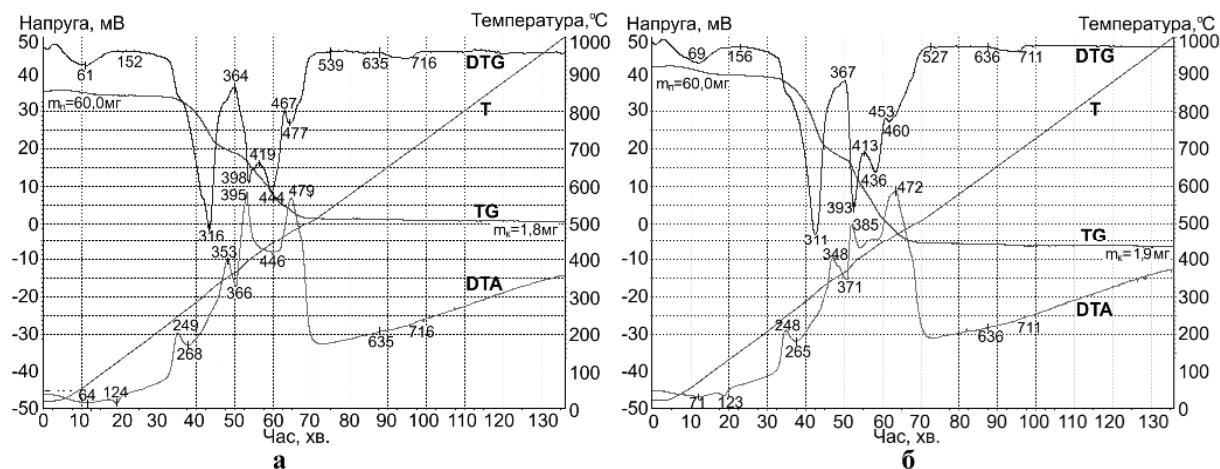


Рис. 2 – Дериватограма КП 3 (а) та КП 4 (б)

Видалення води (4,50%) відбувається в інтервалі 22–156 °С (табл. 2). Хоча на першій стадії розкладання органічних речовин зафіксовано максимум швидкості розкладання (311 °С), друга стадія за рахунок вмісту поліетилену є більш інтенсивною, як і у попередніх зразках (табл. 3). Розкладання органічних речовин супроводжується поступовим наростанням тепловиділення. Деструкція органічних речовин закінчується при 527 °С. Теплота згорання такого палива становить 25,61 МДж/кг.

Волога в КП 5 (табл. 1) повністю видаляється при досягненні 151 °С (рис. 3 а). Для даного палива також характерним є розкладання органічних речовин у три стадії. На першій стадії в інтервалі 151–351 °С реєструється максимум швидкості розкладання органічних речовин при 317 °С. Зменшення вмісту поліетилену призводить до збільшення інтенсивності розкладання органічних речовин у першій стадії та зменшення у другій стадії, а також зниження загальної швидкості розкладання (табл. 3). Під час розкладання органічних речовин тепловиділення наростає, досягаючи максимуму на третій стадії за 484 °С, після чого починає різко спадати, що свідчить про закінчення розкладання органічних речовин. В той же час через зменшення вмісту поліетилену на кривій DTA ярко виражених піків, що відображають активне газовиділення, не спостерігається. Через високий вміст картону (35 %) паливо КП 5 має значну зольність 4,19% СМ. За рахунок зменшення вмісту поліетилену нижча теплота згорання становить 24,11 МДж/кг.

КП 6 відрізняється низьким вмістом поліетилену — 25% (табл. 1). Відповідно до цього вологість такого палива найбільша і становить 5,83% (табл. 2). На відміну від зразків КП 1 – КП 5, розкладання органічних речовин в КП 6 відбувається у дві стадії (рис. 3 б). Причому інтенсивність розкладання на обох стадіях майже однакова (табл. 3). Проте на першій стадії за температури 303 °С фіксується максимум швидкості розкладання. Виділення теплоти поступово збільшується у другій стадії до досягнення 478 °С (крива DTA). Процес розкладання карбонату кальцію зареєстрований в інтервалі 645–716 °С. Вміст золи в паливі складає 3,89% СМ, теплота згорання визначена на рівні 22,96 МДж/кг.

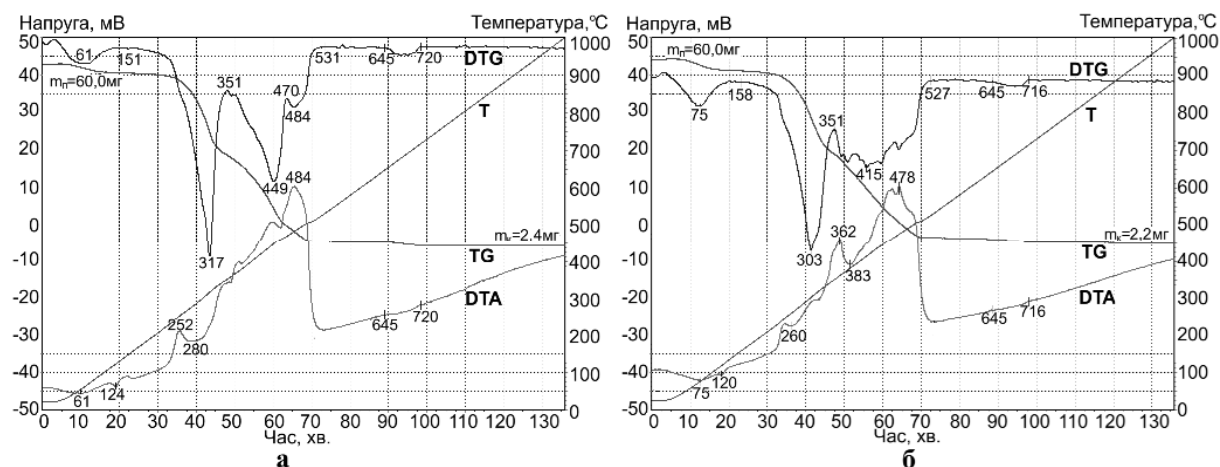


Рис. 3 – Дериватограма КП 5 (а) та КП 6 (б)

Аналіз отриманих даних дає можливість порівняти деструкційні процеси, що відбуваються в паливі при його нагріванні до 1000 °С. Усі зразки палива мають подібний характер термічної деструкції, оскільки, основними компонентами є поліетилен та лігноцелюлозна сировина. Варіювання вмістом компонентів (від 10 до 40 %) не дає суттєвих змін в характері процесів, що відбуваються в композитному паливі при термічному розкладанні.

Загалом у досліджених експериментальних зразках палив видалення води завершується за температур 151–162 °С. Вологість змінюється в межах 3,17–5,83% і залежить від вмісту картону та решток кукурудзи, які мають майже однакову вологість (~6 %). Розкладання органічних речовин завершується в межах 522–539 °С, причому найвужчий інтервал розкладання (360 К) має КП 1, а найширший (387 К) — КП 3. Кількість органічних речовин в паливі переважно залежить від вмісту поліетилену. При його зменшенні з 40 до 25% кількість розкладених органічних речовин зменшується на 3,29 % СМ. Середня швидкість розкладання знаходиться на рівні 1,83–1,98 % СМ/хв. Зольність усіх зразків палива невисока і становить 2,65–4,19 % СМ. Наявність у складі картону природних утворень з CaCO_3 та MgCO_3 призводить до їх термічної дисоціації за температур 628 – 727 °С, на що витрачається теплота термічної деструкції органічних речовин палива.

Визначення теплоти згорання показало, що найбільшу теплотворну здатність мають палива, що мають в своєму складі високий вміст поліетилену. Це є очевидним, оскільки його теплота згорання у 2,4–2,9 рази перевищує теплотворну здатність інших компонентів палива.

На основі аналізу отриманих результатів досліджень розроблена технологія виробництва композитного палива на основі горючих компонентів твердих побутових та сільськогосподарських відходів. За основу прийнято технологію виробництва RDF. Технологія включає послідовність основних етапів: приймання та сортування ТПВ та біомаси, де відбувається видалення негорючих складових; первинне подрібнення для покращення умов подальшої переробки; сушіння, яке сприяє підвищенню калорійності палива та здатності до тривалого зберігання; вторинне подрібнення для зменшення загального об'єму палива. Після цього суху суміш подають в накопичувач твердого палива, звідки спрямовують в топку когенераційної або котельної установки для спалювання [16].

Висновки. Аналіз проведених досліджень дозволив встановити температури, що визначають етапи термічного розкладання, вологість, зольність, теплоту згорання та швидкість термічного розкладання органічних речовин композитного палива. Виявлено, що деструкція органічних речовин в досліджених зразках палива характеризується багатостадійністю. Наявність 30–40 % поліетилену в складі композитного палива забезпечує більшу інтенсивність розкладання в високотемпературній стадії. При збільшенні вмісту лігноцелюлозних компонентів інтенсивність розкладання на першій стадії зростає, а на другій — зменшується.

Визначено, що досліджене паливо з підвищеним вмістом поліетилену має високу теплотворну здатність та відзначається інтенсивним утворенням летких продуктів термічного розкладання, що покращує кінетику згорання.

Варіювання вмістом біомаси у паливі в кількості від 20 до 30 % не викликає значних відмінностей у характері термічного розкладання.

На основі аналізу термічних характеристик представлені склади композитного палива можна рекомендувати для виробництва та спалювання. Проте в виробництві необхідно регулювати вміст поліетилену, щоб забезпечити мінімальні викиди шкідливих речовин в атмосферу.

Розроблена технологія виробництва альтернативного композитного палива на основі горючих компонентів твердих побутових та сільськогосподарських відходів забезпечує ефективну їх утилізацію, часткове заміщення викопних палив та поліпшує стан навколишнього середовища.

References

1. Daskalopoulos, E., Badr, O., & Probert, S. D. (1997). Economic and environmental evaluations of waste treatment and disposal technologies for municipal solid waste. *Applied Energy*, 58(4), 209–255. [https://doi.org/10.1016/s0306-2619\(97\)00053-6](https://doi.org/10.1016/s0306-2619(97)00053-6).
2. Reza, B., Soltani, A., Ruparathna, R., Sadiq, R., & Hewage, K. (2013). Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. *Resources, Conservation and Recycling*, 81, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.009>.
3. Bhatt, A. K., Bhatia, R. K., Thakur, S., Rana, N., Sharma, V., & Rathour, R. K. (2017). Fuel from waste: A review on scientific solution for waste management and environment conservation. In *Prospects of alternative transportation fuels* (P. 205–233). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7518-6_10.
4. Kara, M. (2012). Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.011>.
5. Mokrzycki, E., & Uliasz-Bocheńczyk, A. (2003). Alternative fuels for the cement industry. *Applied Energy*, 74(1-2), 95–100. [https://doi.org/10.1016/s0306-2619\(02\)00135-6](https://doi.org/10.1016/s0306-2619(02)00135-6).
6. Nakajima, Y., & Matsuyuki, M. (1981). Utilization of waste tires as fuel for cement production. *Conservation & Recycling*, 4(3), 145–152. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(81\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0361-3658(81)90018-7).

7. Zajemska, M., Magdziarz, A., Iwaszko, J., Skrzyniarz, M., & Poskart, A. (2022). Numerical and experimental analysis of pyrolysis process of RDF containing a high percentage of plastic waste. *Fuel*, 320, 123981. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123981>.
8. Malik, B., Pirzadah, T. B., Islam, S. T., Tahir, I., Kumar, M., & Rehman, R. U. (2015). Biomass pellet technology: A green approach for sustainable development. In *Agricultural biomass based potential materials* (c. 403–433). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13847-3_19.
9. Parikka, M. (2004). Global biomass fuel resources. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 613–620. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.005>.
10. Ungureanu, N., Vladut, V., Voicu, G., Dinca, M.-N., & Zabava, B.-S. (2018). Influence of biomass moisture content on pellet properties - Review. In *17th international scientific conference engineering for rural development*. Latvia University of Agriculture. <https://doi.org/10.22616/erdev2018.17.n449>.
11. Easterly, J. L., & Burnham, M. (1996). Overview of biomass and waste fuel resources for power production. *Biomass and Bioenergy*, 10(2-3), 79–92. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00063-1](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00063-1).
12. Heletukha, H., Drahniiev, S., Zheliezna, T., & Karampinis, M., (2022). *AgroBioHeat. Enerhiia z reshtok kukurudzy*. https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/04/Maize-residues-to-Energy_ukr-web.pdf
13. Haponych, L., Topal, O., Golenko, I., Kobzar, S. (2022). Estimation of potential of RDF production based on found technological and morfological properties of munisipal solid wastes of Ukraine. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 28(3), 44–59. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-3-6>.
14. Frankenhaeuser, M., Hiltunen, M., Manninen, H., Palonen, J., Ruuskanen, J., & Vartiainen, T. (1994). Emissions from co-combustion of used packaging with peat and coal. *Chemosphere*, 29(9-11), 2057–2066. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(94\)90373-5](https://doi.org/10.1016/0045-6535(94)90373-5)
15. Snezhkin, Y., Mykhailik, V., & Korinchevska, T. (2024). Thermal analysis of combustible components of municipal solid waste. *Problems of the Regional Energetics*, (2(62)), 86–96. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.08>
16. Sniezkin, Yu., Mykhailik, V., Korinchevska, T. (2025). *Sposib vyhotovlennia tverdoho kompozytnoho palyva z pobutovykh vidkhodiv ta pozhnyvnykh reshtok kukurudzy* (Patent of Ukraine № U 158966).

THERMAL ANALYSIS OF ALTERNATIVE COMPOSITE FUEL

T. Korinchevska, Ph.D., V. Mykhailik, Ph.D., Senior Research Scientist,

Yu. Snezhkin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. Disposal of solid municipal waste is a pressing issue of our time. Using waste as raw material to alternative fuels production is a promising area of recycling. This will allow partial replacement of traditional solid fuel. Biomass is proposed to be added during combustion of refuse derived fuels to reduce hazardous emissions. At the same time, the selection of a fuel composition based on solid municipal waste and biomass requires studying its thermal properties and the kinetics of the destruction process. The main combustible components of solid municipal waste (cardboard, polyethylene, fabric) and agricultural waste (corn harvest residues) were used as raw materials for creating experimental fuel. Studies of thermal characteristics of the fuel were carried out using thermogravimetry and differential thermal analysis methods. The characteristic temperatures of the stages of destruction (dehydration, decomposition of organic and mineral substances) were determined. Data on the content of water, organic and mineral substances and ash were obtained. The rates of thermal destruction of organic substances were calculated at different heating phases, as well as the heat of combustion was determined. The destruction kinetics and heat generation were compared at different stages of thermal decomposition of organic substances. Analysis of the obtained results showed that the studied samples of composite fuel have a similar nature of thermal destruction, since the composition of the fuel is limited to polyethylene and lignocellulosic raw materials. It has been established that the presence of polyethylene in fuel determines its high calorific value. The obtained research results made it possible to recommend experimental fuel compositions for production and use with control over combustion technology, which guarantees the neutralization of hazardous combustion products. A technology for producing alternative composite fuel based on solid municipal and agricultural waste was proposed.

Key words: thermogravimetry, differential thermal analysis, alternative fuels, municipal solid waste, corn residue, decomposition, heat of combustion.

Список використаної літератури

1. Daskalopoulos E., Badr O., Probert S. D. Economic and environmental evaluations of waste treatment and disposal technologies for municipal solid waste. *Applied energy*. 1997. Vol. 58, no. 4. P. 209–255. DOI: 10.1016/s0306-2619(97)00053-6.
2. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management / B. Reza et al. *Resources, conservation and recycling*.

2013. Vol. 81. P. 105–114. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.10.009.
3. Fuel from waste: A review on scientific solution for waste management and environment conservation / A. K. Bhatt et al. *Prospects of alternative transportation fuels*. Singapore, 2017. P. 205–233. DOI: 10.1007/978-981-10-7518-6_10.
 4. Kara M. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources, conservation and recycling*. 2012. Vol. 68. P. 21–28. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.06.011.
 5. Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A. Alternative fuels for the cement industry. *Applied energy*. 2003. Vol. 74, no. 1-2. P. 95–100. DOI: 10.1016/s0306-2619(02)00135-6.
 6. Nakajima Y., Matsuyuki M. Utilization of waste tires as fuel for cement production. *Conservation & recycling*. 1981. Vol. 4, no. 3. P. 145–152. DOI: 10.1016/0361-3658(81)90018-7.
 7. Numerical and experimental analysis of pyrolysis process of RDF containing a high percentage of plastic waste / M. Zajemska et al. *Fuel*. 2022. Vol. 320. P. 123981. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123981.
 8. Biomass pellet technology: a green approach for sustainable development / B. Malik et al. *Agricultural biomass based potential materials*. Cham, 2015. P. 403–433. DOI: 10.1007/978-3-319-13847-3_19.
 9. Parikka M. Global biomass fuel resources. *Biomass and bioenergy*. 2004. Vol. 27, no. 6. P. 613–620. DOI: 10.1016/j.biombioe.2003.07.005.
 10. Influence of biomass moisture content on pellet properties - review / N. Ungureanu et al. *17th international scientific conference engineering for rural development*. 2018. DOI: 10.22616/erdev2018.17.n449.
 11. Easterly J. L., Burnham M. Overview of biomass and waste fuel resources for power production. *Biomass and bioenergy*. 1996. Vol. 10, no. 2-3. P. 79–92. DOI: 10.1016/0961-9534(95)00063-1.
 12. AgroBioHeat. Енергія з решток кукурудзи : посібник / Г. Гелетуха та ін. 2022. 48 с. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/04/Maize-residues-to-Energy_ukr-web.pdf (дата звернення: 17.06.2025).
 13. Оцінка потенціалу виробництва RDF на основі визначених технологічних і морфологічних властивостей твердих побутових відходів України / Л. С. Гапонич та ін. *Наукові праці НУХТ*. 2022. Vol. 28, no. 3. P. 44–59. DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-3-6.
 14. Emissions from co-combustion of used packaging with peat and coal / M. Frankenhaeuser et al. *Chemosphere*. 1994. Vol. 29, no. 9-11. P. 2057–2066. DOI: 10.1016/0045-6535(94)90373-5.
 15. Snezhkin Y., Mykhailik V., Korinchevska T. Thermal analysis of combustible components of municipal solid waste. *Problems of the regional energetics*. 2024. No. 2(62). P. 86–96. DOI: 10.52254/1857-0070.2024.2-62.08.
 16. Спосіб виготовлення твердого композитного палива з побутових відходів та пожнивних решток кукурудзи : пат. U 158966 Україна : C10L5/40. № u202401596 ; заявл. 01.04.2024 ; опубл. 16.04.2025, Бюл. № 16/2025. 5 с.

Отримано в редакцію 12.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 12.06.2025
Approved 02.09.2025

ЗАСТОСУВАННЯ МЕМБРАННИХ ПРОЦЕСІВ У БІОТЕХНОЛОГІЯХ ПОГЛИНАННЯ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Дячок В.В. д. т. н. професор
Національний університет «Львівська Політехніка»

Анотація. Зміна клімату на сьогоднішній день є глобальною проблемою, яка охоплює всі сфери життя людства - від екосистем до економіки та соціальної стабільності. Основними причинами змін клімату є порушення балансу природніх циклів гетероатомів і в першу чергу вуглецевого циклу. У цьому контексті постає термінова потреба у застосуванні сучасних підходів до зменшення негативних наслідків змін клімату та пристосування до них. В сучасних умовах світова спільнота приділяє велику увагу проблемі зменшенню викидів парникових газів. Емісія вуглекислого газу викликає неконтрольовані наслідки в цілому для всього довкілля. Основними напрямками скорочення викидів вважаються перехід на відновлювані джерела енергоносіїв та депонування вуглекислого газу у високомолекулярні сполуки та формувати їх у біомасу. Найперспективнішим напрямком для реалізації цієї ідеї є застосування біотехнологічних процесів, які відкривають нові можливості у сферах очищення промислових газових викидів перед їх скиданням у атмосферу. В цьому контексті особливої уваги застосовують мікрободорості. Якщо врахувати те, що мікрободорості дедалі більше постають як одне з найбільш перспективних, стійких і довгострокових джерел біомаси для виробництва палива, та інших продуктів то це спонукає до розробки нових підходів, що сприятимуть підвищенню екологічної безпеки виробництва які продукують вуглекислий газ та інші забрудники, щої спричиняються до глобального потепління

У роботі досліджується потенціал біотехнологічних процесів, зокрема мікрободоростей у боротьбі з глобальним потеплінням. Показано, що барботуванням кімнатного повітря, з вмістом вуглекислого газу (CO_2) 0,04% у фотобіореакторі з мембранним модулем, можна зменшити CO_2 до граничного значення 0,013%, що свідчить про те, що мембранний фотобіореактор за рахунок інтенсифікації процесу перетворення та фіксації вуглекислого газу під час фотосинтезу мікрободоростей, є перспективним рішенням для видалення CO_2 газового середовища у закритому просторі або приміщенні, а також із промислових газових викидів. В роботі також розроблено комплексний метод математичного опису переходу CO_2 із газової фази у рідку, приросту клітин мікрободоростей у культуральному середовищі в залежності від концентрації CO_2 у вихідному газі, а також інтенсивності УФ-опромінення.

Keywords: мікрободорості, поглинання парникових газів, біотехнології, математичний опис, фотобіореактор, мембранний модуль, динаміка приросту.

Формулювання проблеми. Глобальне потепління є одним із найгостріших викликів сучасності, що загрожує екосистемам, продовольчій безпеці, здоров'ю людей і стабільності розвитку суспільств в цілому. Підвищення температури, рівня світового океану, часті екстремальні погодні явища та зниження біорізноманіття - це лише частина наслідків, які вже фіксуються в різних регіонах планети. В подальшому непередбачувані наслідки для розвитку світової економіки, та інші супутні застереження обговорюється на щорічних світових економічних форумах [1].

В сучасних умовах світова спільнота приділяє велику увагу проблемі зменшення викидів парникових газів. Емісія вуглекислого газу обумовлює неконтрольовані наслідки для зміни клімату та в цілому для всього довкілля. Зміна клімату на сьогоднішній день є глобальною проблемою, яка охоплює всі сфери життя людства - від екосистем до економіки та соціальної стабільності. У цьому контексті постає термінова потреба у застосування сучасних підходів до зменшення негативних наслідків змін клімату та пристосування до них. Основними напрямками скорочення викидів вважаються перехід на відновлювані джерела енергоносіїв та депонування вуглекислого газу в органічні високомолекулярні сполуки, які в подальшому мають сприяти відновленню ресурсів та поверненню в кругообіг речовин вуглецю, азоту, фосфору, сірки та іншим біогенним елементам [2,3]. Досягнення цього результату є можливим при умові застосування біотехнологічних процесів, які відкривають нові можливості у таких сферах, як промислове виробництво, енергетика, сільське господарство в ракурсі очищення газових викидів перед їх скиданням у атмосферу. Від так стає можливим вирішення важливого завдання – управління надходженнями парникових газів у довкілля. Основна увага зосереджується на балансі вуглецевого циклу.

Одним із способів вирішення цих питань полягає у залученні все більшої уваги фахівців з біоінженерії. Біотехнологічні методи поглинання парникових газів із залученням мікрободоростей передбачають дослідження складних біотехнологічних процесів. Мікрободорості поглинають вуглекислий газ CO_2 із повітря чи газу і перетворюють його на органічну молекулу з якої є можливість отримувати від джерел енергії до продуктів харчування, лікарських засобів тощо [4,5,6].

Проведені дослідження дозволяють стверджувати той факт, що ці рослини еволюціонували протягом мільярдів років, щоб виробляти та зберігати енергію у формі високомолекулярних органічних сполук, і вони роблять це ефективніше, ніж будь-який інший відомий інженерний процес. Результати показують, що інвестиції в проект біомаси мікроводоростей можуть бути пов'язані з різними біотехнологічними процесами, які включають: їх ріст, збір біомаси, її переробку. Аналізуючи ефективність таких підходів, слід констатувати їхній суттєвий внесок у скорочення антропогенних викидів парникових газів із яких CO₂ є найнебезпечнішим, а також сприяння у відновленні екосистем та підвищення стійкості навколишнього середовища [7,8,9].

Мета роботи полягає у вдосконаленні біотехнологічних процесів для залучення мікроводоростей до поглинання парникових газів та розробці нових способів поєднання обладнання, що сприятиме підвищенню екологічної безпеки виробництва.

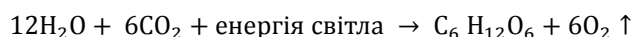
Теоретична частина.

Дослідження з видалення CO₂ за допомогою мікроводоростей зосереджені головним чином у двох сферах: димові гази (зазвичай з вмістом 10-20% CO₂) та повітря в закритому просторі в якому, як правило, CO₂ не більше 1,0%. Своєчасне та ефективне видалення CO₂ із газового середовища, за допомогою мікроводоростей, які культивуються у фотобіореакторі, є одним із важливих біореєнеративних методів забезпечення безпечного та надійного життєвого середовища.

Існують деякі опубліковані роботи про видалення CO₂ і відновлення O₂ в закритих приміщеннях за допомогою фотосинтетичного виробництва мікроводоростей [9,10]. Однак біотехнологічним процесам, які супроводжуються поглинанням CO₂ та виділенням O₂ необхідно більше приділяти уваги із-за двох важливих наступних факторів, які стосуються максималізації та ефективності видалення CO₂ в системах, що одержали назву – біореєнеративні.

Отож ефективне та результативне залучення мікроводоростей для поглинання парникових газів залежить від ряду фундаментальних речей, які включають :

- рівномірний розподіл клітин мікроводоростей за всім об'ємом фотобіореактора, що забезпечуватиме достатню дозу ультрафіолетового опромінення, оскільки фотосинтез без світлової енергії є дещо обтяжливим, якщо не сказати більше – неможливим;



- ефективне перенесення CO₂ із газової фази в рідку фазу;
- посилене засвоєння аніонів, зокрема вуглекислоти (HCO₃⁻) клітинами мікроводоростей;
- ефективне видалення кисню (O₂), що утворюється під час фотосинтетичного процесу, оскільки він виступає інгібітором приросту біомаси мікроводоростей [8,10].

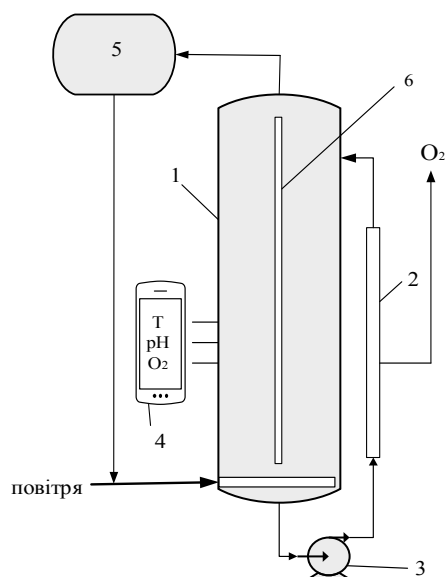
Таким чином, інтенсифікувати процеси поглинання парникових газів можна за рахунок низки приведених чинників, серед яких останній є найменш вивченим. Оскільки кисень виступає інгібітором приросту біомаси мікроводоростей, від так інгібітором поглинання вуглекислого газу. Вуглекислий газ функціонує як джерело вуглецю для більшості водоростей, а асимільований вуглець становить близько 50% біомаси водоростей.

Метою роботи в найбільш загальному викладі є аналіз існуючих біотехнологічних методів залучення мікроводоростей для поглинання парникових газів та розробка нових підходів, що сприятимуть підвищенню екологічної безпеки виробництва, які їх продукують.

Експериментальна частина.

Дослідна установка містила фотобіореактор-1, обладнаний мембранним модулем-2 з порожнистими волокнами для видалення розчиненого кисню (O₂) із середовища поглинання парникових газів середовища мікроводорості *Chlorella vulgaris*. Насоса - 3, який забезпечував транспотування культиватійного середовища з основного об'єму фотобіореактора через мембранний модуль та повернення його у фотобіореактор. Введення мембранного модуля забезпечувало видалення розчиненого кисню, як інгібітора фотосинтезу та покращення фіксації вуглекислого газу мікроводоростями. Крім цього установка обладнана трьома датчиками, що вимірюють температуру, pH і розчинений кисень (O₂), які були розміщені на дні фотобіореактора, і визначали параметри культурального середовища мікроводоростей, в режимі онлайн і реєструвалися гаджетом. В такий спосіб фіксували під час виконання експериментальної частини температуру, pH і розчинений кисень (O₂). Люмінісцентна лампа - 6 забезпечувала УФ освітлення без якого фотосинтез є неможливим.

Вміст клітин мікроводоростей (концентрацію біомаси) визначали фотоколориметричним методом при синьому світлі, за калібрувальним графіком залежності оптичної густини культурального середовища від концентрації біомаси.



1 – фотобіореактор, 2 – мембранний модуль, 3 – насос, 4 – датчики для вимірювання температури, рН, розчиненого кисню O_2 , 5 – проміжна ємність, 6 – люмінесцентна лампа.

Рис.1 – Схема експериментальної установки

Відомо, що такі фактори, як температура, навантаження поживними речовинами та УФ-опромінення, мають прямий вплив на продуктивність поглинання парникових газів серед яких CO_2 є найнебезпечніший. В той же час локальна концентрація вуглекислого газу в будь якій точці барботажної колони (фотобіореактора) повинна бути вище мінімального порогу для підтримки фотосинтезу, щоб уникнути обмеження вуглецю.

Експеримент у фотобіореакторі без роботи мембранного модуля. На рисунку 1 представлений графік часових змін рН та розчиненого O_2 в умовах 9 годин світлової культивування мікробіодоростей *Chlorella vulgaris* у фотобіореакторі, без роботи мембранного модуля і 9 годин без освітлення (темряви).

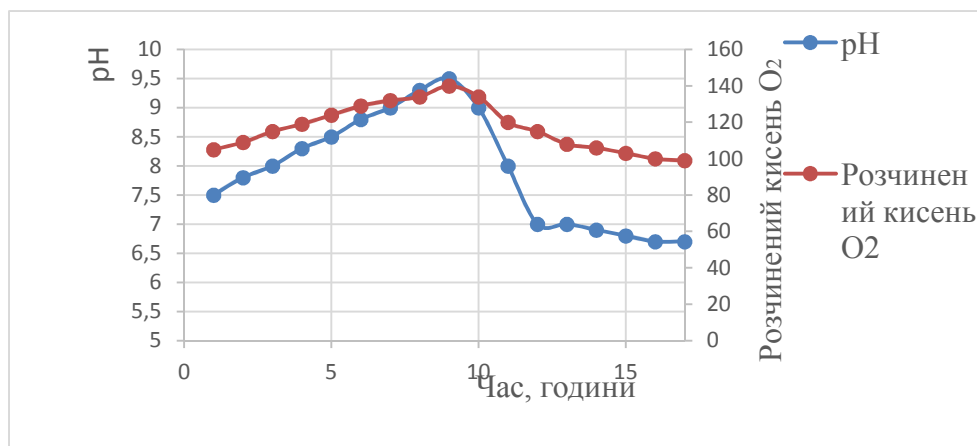


Рис. 2 – Часовий хід зміни рН та розчиненого O_2 у фотобіореакторі без роботи мембранного модуля - 9 годин світло, 9 годин темряви

Як видно з рисунку 1 у перші 9 годин експерименту зростає кількість розчиненого кисню, що є негативним явищем оскільки інгібує поглинання вуглекислого газу, зростає рН оскільки зменшується вміст вуглекислоти в середовищі культивування. Температура незначно але змінюється із проходження процесу поглинання вуглекислого газу за умови світлового опромінення. Зростає температура пояснюється транспортуванням культурального середовища в установці внаслідок чого виникає внутрішнього тертя умовних шарів рідини і має місце нагрів. Приріст клітин мікробіодоростей незначний за постійного вмісту вуглекислого газу - рисунок 3.

Експеримент у фотобіореакторі а умови роботи мембранним модулем. Як засвідчують результати експериментальних досліджень ефективно та результативно поглинання вуглекислого газу мікробіодоростями спостерігається за умов роботи мембранного модуля. Ефективного видалення розчиненого O_2 , що утворюється під час фотосинтетичного процесу, сприяє ефективному приросту клітин мікробіодоростей оскільки

усувається інгібітор.

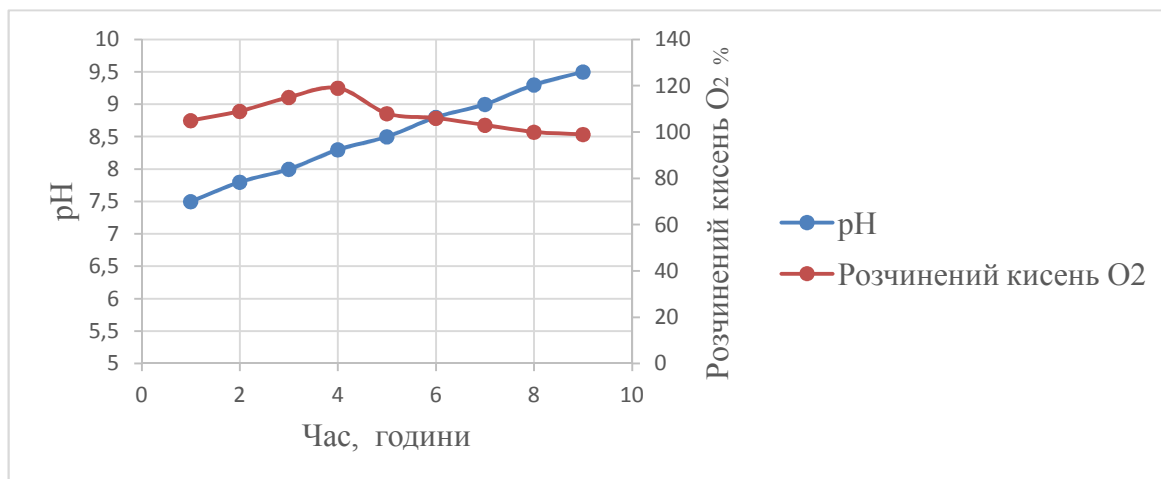


Рис. 3 – Часовий хід зміни pH та розчиненого O₂ у фотобіореакторі за роботи мембранного модуля - 9 год світло.

Часовий хід T і pH є подібним до того, що показано на рисунку 1 вище, проте розчинений кисень різко впав після короткого періоду роботи мембранного модуля. Мембранний модуль сприяв видаленню розчиненого кисню із середовища поглинання вуглекислого газу. Таким чином, pH і температура ведуть себе аналогічно представленому вище а розчинений кисень O₂ знижувався проте не досягає нульового значення в мембранному фотобіореакторі. Приріст клітин мікрободоростей за цього ж вмісту вуглекислого газу у вихідному газі є значно більшим, що засвідчує більше поглинання вуглекислого газу.

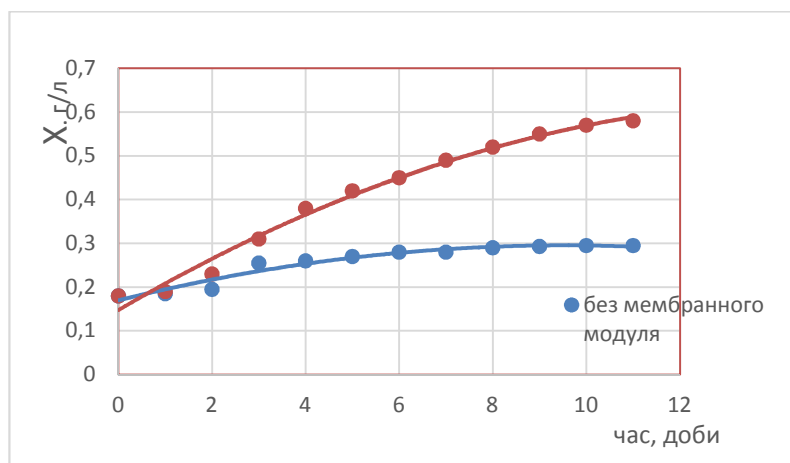


Рис. 3 – Приріст клітин мікрободоростей у фотобіореакторі за умови роботи і не роботи мембранного модуля

Отож, використовуючи звичайне кімнатне повітря з концентрацію CO₂ (0,04%), що подається у фотобіореактор, можна знизити його до граничного значення 0,013%, що свідчить про те, що мембранний фотобіореактор за рахунок процесу видалення розчиненого кисню дозволяє інтенсифікувати перетворення та фіксації CO₂ під час фотосинтезу мікрободоростей, що може бути перспективним рішенням для видалення CO₂ у закритому просторі або приміщенні.

Процеси у фотобіореакторі мікрободоростей викликають ряд проблем для проведення контролю та їх оптимізації. Тому потрібні математичні моделі, здатні кількісно визначити вплив критичних параметрів системи, таких як конфігурація фотобіореактора, масоперенесення CO₂ із газової фази у рідину, поглинання вуглекислого газу та інших поживних речовин клітинами мікрободоростей, вплив pH, температури на їх приріст.

На основі аналізу значної кількості різних досліджень запропоновано математичний опис для успішного прогнозування росту клітин мікрободоростей у фотобіореакторі. Найпростіша модель для прогнозування наростання значень величини клітин мікрободоростей, використовуючи кінетичні параметри росту, як функцію для максимізації продуктивності фотобіореактора включають наступні параметри;

швидкість переходу вуглекислого газу CO₂ із газової фази в рідку фазу представлена теорією подвійної плівки і має такий вигляд:

$$\frac{dC_{CO_2}}{dt} = R_c = k_c (C_s - C)V(1 - \varepsilon) :$$

де k_c – коефіцієнт масопередачі перенесення CO_2 з газової фази у водну середовищі культивування, C_s – концентрація насичена CO_2 в середовищі культивування, C – концентрація CO_2 в середовищі культивування, V – об'єм фотобіореактора, ε – об'єм утримуваного газу.

Величину C визначають за рівнянням відповідно закону Генрі:

$$C = \frac{PyMm1000}{RT} :$$

де P – тиск, y – частка газової фази CO_2 , R – газова стала, T – температура, h – стала закону Генрі,

$M_m(HCO_3^-)$ – молярна маса йону гідрокарбонату.

Швидкість поглинання вуглекислого газу клітинами мікроводоростей можна виразити як функція загального спожитого вуглекислого газу $Y_{(CO_2, zar)}$, питомою швидкістю росту клітин міководоростей – μ_x та концентрації біомаси – X :

$$\frac{dC_{CO_2}}{dt} = Y_{(CO_2, zar)} \mu_x X :$$

швидкістю росту клітин міководоростей $\frac{dX}{dt}$, може бути записана як різниця;

$$\frac{dX}{dt} = \mu_x X - k_d X$$

де k_d – швидкість втрати чи загибелі клітин мікроводоростей.

Відповідно до моделі Моно швидкість приросту клітин мікроводоростей, обмежена вмістом вуглекислого газу та може бути виражена як

$$\mu_x = \mu_o \left[\frac{S_i}{K_i + S_i} \right]$$

де S_i – концентрація вуглекислого газу та інших поживних речовин (азоту N, фосфору P, тощо),

K_i – константа напівнасичення вуглекислим газом та іншими поживними речовинами (азот N, фосфор P, тощо), які можуть обмежувати приріст мікроводоростей.

μ_o – питома швидкість росту визначається експериментально за умови нелімітованої кількості поживних речовин.

Висновок. Мембранний фотобіореактор за рахунок процесу видалення розчиненого кисню дозволяє інтенсифікувати перетворення та фіксації вуглекислого газу під час фотосинтезу мікроводоростей, що стає перспективним рішенням для поглинання CO_2 із промислових газових викидів та у закритих приміщеннях.

Розроблено комплексний метод математичного опису швидкості переходу вуглекислого газу CO_2 із газової фази в рідку, швидкість поглинання вуглекислого газу, приросту клітин мікроводоростей, а також інтенсивності УФ-опромінення за певних значень концентрацій CO_2 у вихідному газі.

References

1. TSN.ua. (2017, March 25). *Hlobalne poteplinnia. Yak Zemlia zminiue svoje oblychchia* [Global warming. How the Earth changes its face]. <https://tsn.ua/special-projects/warming/>
2. Martínez-Huitle, C. A., Rodrigo, M. A., Sirés, I., & Scialdone, O. (2023). A critical review on latest innovations and future challenges of electrochemical technology for the abatement of organics in water. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 328(13-14), 122430.
3. Dyachok, V., Kochubei, V., & Huhlych, S. (2025). Production of biofuel based on the transformations of greenhouse gases. *Journal Environmental Problems*, 10(2), 97–103. <https://doi.org/10.23939/ep2025.02.097>
4. Bodnar, O. I. (2017). Biotekhnologichni perspektyvy vykorystannia mikrovodorostei: osnovni napriamy (ohliad) [Biotechnological prospects for the use of microalgae: Main directions (review)]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Ser. Biologiya*, (1/68), 138–146.
5. Tsarenko, P., Borysova, O., & Blum, Ya. (2011). Mikrovodorosti yak ob'ekt bioenerhetyky: vydy kolektsii IBASU-A-perspektyvni produtsenty biomasy yak dzherela syrovyny dlia biopalyva [Microalgae as an object of bioenergy: Species of the IBASU-A collection as prospective producers of biomass as a source of raw material for biofuel]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, (5), 49–54.
6. Scott, S. A., Davey, M. P., Dennis, J. S., Horst, I., Howe, C. J., Lea-Smith, D. J., Purton, S. (2010). Algae biodiesel: Challenges and prospects. *Current Opinion in Biotechnology*, 21(3), 277–286.
7. Cheng, L. H., Zhang, L., Chen, H. L., & Gao, C. J. (2005). Advances on CO_2 fixation by microalgae. *Journal of Biotechnology*, 21, 178–181.
8. Dyachok, V. V., Mandryk, S., Katysheva, V., & Huhlych, S. (2019). Effect of fuel combustion products on carbon dioxide uptake dynamics of chlorophyll synthesizing microalgae. *Journal of Ecological Engineering*, 20(6). <https://doi.org/10.12911/22998993/108695>
9. Dyachok, V. V., Mandryk, S. T., Huhlych, S. I., & Slyvka, M. M. (2020). Study on the impact of activators in the presence of an inhibitor on the dynamics of carbon dioxide absorption by chlorophyll-synthesizing microalgae. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5). <https://doi.org/10.12911/22998993/122674>

APPLICATION OF MEMBRANE PROCESSES IN GREENHOUSE GAS ABSORPTION BIOTECHNOLOGIES

Vasil Dyachok, Doctor of Engineering Science, Professor
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Abstract. Climate change is today a global problem that covers all spheres of human life - from ecosystems to economy and social stability. The main causes of climate change are impaired balance of natural cycles of heterotoma and primarily the carbon cycle. In this context, there is an urgent need to apply modern approaches to reducing the negative effects of climate change and adaptation. In today's context, the world community pays great attention to the problem of reducing greenhouse gas emissions. Carbon dioxide emission causes uncontrolled effects as a whole for the whole environment. The main directions of emissions reduction are the transition to renewable energy sources and carbon dioxide deposition into high molecular weight compounds and to form them in biomass. The most promising area for the implementation of this idea is the use of biotechnological processes that open up new opportunities in the fields of purification of industrial gas emissions before being discharge into the atmosphere. In this context, special attention is used to use microvodes. Considering that microvodes are increasingly emerging as one of the most promising, sustainable and long-term biomass sources for fuel production, and other products, it encourages the development of new approaches that will increase the environmental safety.

The work examines the potential of biotechnological processes, in particular the microvodes in the fight against global warming. It is shown that the bubbling of carbon dioxide (CO₂) 0.04% in a photobioreactor with a membrane module can be reduced to a maximum value of 0.015%, indicating that the membrane photobioreactor is available by the intensification of the carbon and locking of the carbon -and -lock of the carbon -lactation of the carbon. A promising solution for removing the CO₂ gas environment in a closed space or room, as well as from industrial gas emissions. The work also developed a comprehensive method of mathematical description of the transition of CO₂ from the gas phase to the liquid, the growth of microelectric cells in the cultural environment, depending on the concentration of CO₂ in the source gas, as well as the intensity of UV radiation.

Keywords: microalgae, greenhouse gas absorption, biotechnology, mathematical model, photobioreactor, membrane module growth dynamics

Список використаної літератури

1. Глобальне потепління. Як Земля змінює своє обличчя. Спецпроект ТСН.ua. <https://tsn.ua/special-projects/warming/>. – від 25 березня 2017.
2. Carlos A. Martinez-Huitle, Manuel A. Rodrigo, Ignasi Sirés, Onofrio Scialdone. (2023). A critical review on latest innovations and future challenges of electrochemical technology for the abatement of organics in water Applied Catalysis B: Environment and Energy, 328(13-14):122430
3. Vasyly Dyachok, Viktoria Kochubei, Serhiy Huhlych. [Production of biofuel based on the transformations of greenhouse gases](https://doi.org/10.23939/ep2025.02.097), Journal Environmental Problems Volume 10, Number 2, 2025 pp. 97-103. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2025.02.097>
4. Боднар О. І. Біотехнологічні перспективи використання мікроводоростей: основні напрями (огляд) / О. І. Боднар // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Біологія. – 2017. – Вип. 1(68) : Тернопільські біологічні читання - Ternopil Bioscience - 2017. – С. 138–146.
5. Царенко, П., Борисова, О., & Блюм, Я. (2011). Мікроводорості як об'єкт біоенергетики: види колекції IBASU-A-перспективні продуценти біомаси як джерела сировини для біопалива. Вісник Національної академії наук України, (5), 49-54.
6. SA Scott, MP Davey, JS Dennis, I. Horst, CJ Howe, DJ Lea-Smith et al. "Algae biodiesel: challenges and prospects", Current opinion in biotechnology, Vol. 21, p. 277-286, 2010
7. Lh. Cheng, L. Zhang, Hl Chen, CJ Gao, Advances on CO₂ Fixation by microallands, ranking. J. Biotechnol. 21 (2005) 178-181.
8. SA Scott, MP Davey, JS Dennis, I. Horst, CJ Howe, DJ Lea-Smith et al. "Algae biodiesel: challenges and prospects", Current opinion in biotechnology, Vol. 21, p. 277-286, 2010
9. Dyachok, V. V., Mandryk, S., Katysheva, V., & Huhlych, S. (2019). Effect of fuel combustion products on carbon dioxide uptake dynamics of chlorophyll synthesizing microalgae. Journal of Ecological Engineering, 20(6). <https://doi.org/10.12911/22998993/108695>
10. Dyachok, V. V., Mandryk, S. T., Huhlych, S. I., & Slyvka, M. M. (2020). Study on the impact of activators in the presence of an inhibitor on the dynamics of carbon dioxide absorption by chlorophyll-synthesizing microalgae. Journal of Ecological Engineering, 21(5). <https://doi.org/10.12911/22998993/122674>

Отримано в редакцію 10.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 10.06.2025

Approved 02.09.2025

МІКРОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ГАРБУЗОВОГО ПЮРЕ ЯК СКЛАДОВОГО КОМПОНЕНТУ КОМПОЗИЦІЙНОГО ОБ'ЄКТУ РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО СУШІННЯ

Турчина Т.Я. канд. техн. наук, ст. наук. співр., Авдєєва Л.Ю., докт. техн. наук, ст. наук. співр.,
Макаренко А.А., канд. техн. наук, ст. досл., Декуша Г.В. канд. техн. наук, ст. досл.
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація. *Плоди гарбузів є джерелом речовин із високою харчовою і біологічною цінністю природного походження, але мають короткий термін зберігання. Багатий на біологічно активні речовини хімічний склад гарбузового пюре дозволяє його використання у раціональному, профілактичному та лікувальному харчуванні для збагачення раціону харчування. Значний вміст моно- і полісахаридів робить доцільним його використання для регулювання органолептичних, функціонально-технологічних, структурно-механічних і мікробіологічних властивостей основної сировини у нових видах багатокомпонентних виробів. Застосування розпилювального сушіння гарбузового пюре суттєво збільшує терміни зберігання порошкової продукції. При оцадних термічних умовах проведення процесу виникають умови мікрокапсуляції біологічно активних, в т.ч. термолабільних речовин. В технологіях розпилювального сушіння значна увага приділяється стадії підготовки сировини з отриманням стійких однорідних водних суспензій з розміром частинок твердої фази до 200 мкм. Обладнання для диспергування має забезпечити отримання заданих дисперсійних і реологічних властивостей дисперсних систем та раціональні режими обробки при мінімальному рівні енерговитрат. В статті представлено результати експериментальних досліджень впливу механізмів дискретно-імпульсного введення енергії при гідромеханічній обробці гарбузового пюре в роторно-пульсаційному апараті на зміну його мікроструктури. Експериментально встановлено раціональна кількість циклів гідромеханічної обробки гарбузового пюре, за яких максимальні розміри окремих частинок нерозчинних фракцій не перевищують 150-200 мкм, що за станом гомогенності цілком відповідає вимогам до рослинних гетерогенних систем при подачі їх в сушарку дисковим розпилювачем. Результати будуть використані при розробленні технології нових видів багатокомпонентних виробів на стадії підготовки до розпилювального сушіння.*

Ключові слова: рослинні харчові добавки природного походження, гарбузове пюре, мікроструктура, дисперсність, розпилювальне сушіння

Постановка проблеми. Фруктово-овочева сировина є джерелом широкого кола природних речовин із високою харчовою і особливо біологічною цінністю, які збагачують раціон харчування та надають захисний ефект від шкідливого впливу зовнішніх хімічних і фізичних факторів. Завдяки цьому така сировина може використовуватись як у раціональному, так і профілактичному та лікувальному харчуванні. Крім того, рослинну сировину можна використовувати для регулювання органолептичних, функціонально-технологічних, структурно-механічних і мікробіологічних властивостей основної сировини кисломолочних, м'ясних, борошняно-кондитерських та інших видів виробів. Доведено, що надмірне та неналежне використання певних синтетичних добавок становить потенційні ризики для здоров'я людини. Перспективною альтернативою синтетичним добавкам є харчові добавки на рослинній основі, а також технології мікро-і наноінкапсулювання [1-3].

Для зменшення кількості синтетичних харчових добавок все більш широко використовуються такі інноваційні методи, як інкапсуляція та інтеграція в їстівні плівки для різних видів харчових продуктів. Позитивні результати мікрокапсуляції біологічно активних речовин були отримані при перетворенні рідких харчових гетерогенних систем на порошкоподібні при застосуванні розпилювального сушіння. Цей метод сушіння рекомендується для термолабільних матеріалів і є придатним для інкапсуляції нутрицевтиків, пробіотиків, ароматизаторів та ферментів завдяки короткому часу контакту з гарячим сушильним середовищем [4, 5].

В технологіях виробництва сухих продуктів у порошковій формі методом розпилювального сушіння значна увага приділяється стадії підготовки сировини з отриманням рідких водних суспензій або емульсій. Стадія підготовки включає процеси подрібнення, диспергування та гомогенізації. Їх ефективність визначається різними показниками, таких як: реологічні властивості і дисперсність частинок нерозчинних фракцій обробленої гетерогенної системи. Ці характеристики визначають той стан текучості, при якому забезпечується стабільна і ритмічна подача дисперсії в камеру розпилювальної сушарки і утворення однорідних за розміром та сферичних за формою крапель в момент відриву їх від кромки дискового розпилювача. Раціонально організований процес підготовки водної суспензії рослинної сировини обумовлює рівномірність висушування, знижує ризик виникнення адгезійних властивостей в камері сушарки і визначає якісні характерис-

тики порошку. [6, 7]. При використанні дискового розпилювання ступінь дисперсності частинок нерозчинних фракцій в гетерогенній системі має не перевищувати $\delta_{\max} \leq 150\text{--}200\text{ мкм}$. Обладнання для диспергування на стадії підготовки має забезпечити раціональні режими обробки при мінімальному рівні енерговитрат, враховувати особливості фізико-хімічного складу і властивості рослинної сировини, а також передбачати збереження біологічно активних речовин [8, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До перспективної сировини для збагачення нових видів харчових продуктів природними добавками з метою покращення біологічної цінності і корегування органолептичних, функціонально-технологічних і структурно-механічних властивостей відноситься плодово-овочева сировина, в т.ч. плоди гарбуза. Гарбузи є універсальним овочем і одним з найбільших джерел біологічно активних сполук, але їх використання дуже обмежено через короткий термін зберігання. Про оздоровчі властивості гарбуза свідчать результати численних наукових робіт, що підтверджують його протидіабетичну, антиоксидантну, антиканцерогенну та протизапальну дію на організм людини [10-12]. Нажаль, через відсутність умов зберігання і промислових технологій перероблення плодів у харчуванні людини використовується лише незначна частина врожаїв [7, 10, 13].

Продуктами переробки гарбуза є насіння, шкірка та м'якоть з різним біоактивним складом та багатьма потенційними перевагами, які ще недостатньо вивчені. Їстівна частина гарбуза відноситься до низькокалорійних продуктів. Висока харчова і біологічна цінність гарбузового пюре визначається великою кількістю вітамінів, в т.ч. бета-каротину, вітамінів групи В, К, Е, РР, а також пектинових речовин і клітковини. Завдяки високій біологічній цінності гарбузове пюре розглядається як цінний збагачувальний компонент рецептури нових видів виробів як для раціонального, так і функціонального харчування. Найбільшу частку поживних речовин становлять вуглеводи. Більша частина вуглеводів м'якоті гарбуза – це моно- і дисахариди (глюкоза, фруктоза, сахароза), але до складу в достатньо високій кількості входять також полісахариди: крохмаль, пектинові речовини, представлені протопектином, а також клітковина. Харчові волокна становлять від 20% до 50% від кількості вуглеводів [10, 14]. Прості сахариди надають гарбузовому пюре солодкого присмаку і легко перетворюються на додаткове джерело енергії, а пектинові речовини і клітковина – густини і стабільності консистенції. Це створює позитивні передумови для використання пюре в якості харчової добавки для регулювання властивостей комбінованого продукту. При диспергуванні м'якоті гарбуза в апаратах різних типів і конструкцій відбувається деструкція клітинних компонентів, пюре набуває стану гомогенності з вивільненням великої кількості речовин і переходом їх у розчинний більш біодоступний стан. Використання такого пюре у складі нових композиційних продуктів не тільки збагачує їх своїми біологічно активними та поживними речовинами, а і надає їм більш привабливого помаранчевого відтінку без застосування штучних барвників. [11, 15].

За традиційними технологіями для подрібнення і одержання гарбузового пюре використовують здвоєні протиральні машини, колоїдні млини, гомогенізатори різних типів та ін. На підставі аналізу існуючого обладнання для проведення гомогенізації і одержання високодисперсних суспензій при переробці сировини рослинного походження з високим вмістом харчових волокон було запропоновано використання роторно-пульсаційного апарату (РПА) циліндричного типу, розробленого Інститутом технічної теплофізики НАН України. Висока ефективність процесів, що протікають в апаратах де реалізуються принципи дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), визначається майже одночасним впливом різних явищ (механічних, гідродинамічних, гідроакустичних) та ефектів (гідравлічного удару, пульсацій швидкості і тиску, зусиль зрізу і зсуву, локальної турбулентності), а також гідродинамічної кавітації. Такі апарати дозволяють інтенсифікувати масообмінні процеси направлені на руйнування дисперсної фази при суттєво менших (на 2-3 порядки) значеннях дисипації енергії в активній зоні порівняно до традиційних апаратів різних класів для диспергування [16].

РПА в яких реалізовані ефекти ДІВЕ відрізняються порівняно невисокою енергоємністю і високою інтенсивністю обробки високов'язких та неоднорідних дисперсних середовищ. Завдяки високій дисперсності досягається однорідність і стабільність, покращення реологічних властивостей одержаних гомогенізованих багатокомпонентних композиційних продуктів [17, 18].

Виходячи з цього, раціональні режими ДІВЕ-обробки гарбузового пюре, що підлягає подальшому розпилювальному висушуванню у складі багатокомпонентної суспензії мають бути досліджені і науково обґрунтовані, виходячи з отриманих експериментальних результатів.

Мета роботи полягала у визначенні змін у мікроструктурі зразків гарбузового пюре після гомогенізації в результаті поступового посилення впливу механізмів ДІВЕ на складну дисперсну систему з високим вмістом харчових волокон.

Матеріали та методи досліджень. В дослідженнях використовувалось гарбузове пюре бланшоване, виготовлене з м'якоті гарбуза продовольчого свіжого згідно з ДСТУ 3190-95.

ДІВЕ-обробка гарбузове пюре здійснювалась з використанням дослідно-промислового зразка проточно-го РПА циліндричного типу з 2 статорами та 1 ротором. Число обертів ротора 50 с^{-1} , продуктивність 800 кг/год .

Мікроструктура зразків гарбузового пюре, визначалась мікроскопічним методом за допомогою оптичного мікроскопа «МБІ 3У 4.2» з використанням цифрового фотоапарату. Підготовка і фіксування зразків

відбувались за стандартною методикою. За допомогою масштабної лінійки, встановленої в окулярі, визначалась кількість і розміри частинок твердої фази в межах кожного оптичного поля до отримання статистичних даних заданої кількості (до 1000) частинок. За коефіцієнтом збільшення окуляра, визначались дійсні розміри частинок. За отриманими даними будувались диференційні криві розподілення частинок за розмірами. Представлені в графічній формі результати експериментальних досліджень дисперсності гетерогенної системи оброблені за допомогою комп'ютерної програми MS Excel 2007.

Викладення основних результатів досліджень. Попередньо бланшоване гарбузове пюре піддавалось гідромеханічній обробці в РПА у циклічному режимі. Після кожного циклу ДІВЕ-обробки відбирались зразки гарбузового пюре для проведення мікроструктурного аналізу частинок його нерозчинних фракцій. Для даного аналізу представлені результати досліджень зразків після 1-го, 3-го, 5-го та 7-го циклів ДІВЕ-обробки гарбузового пюре.

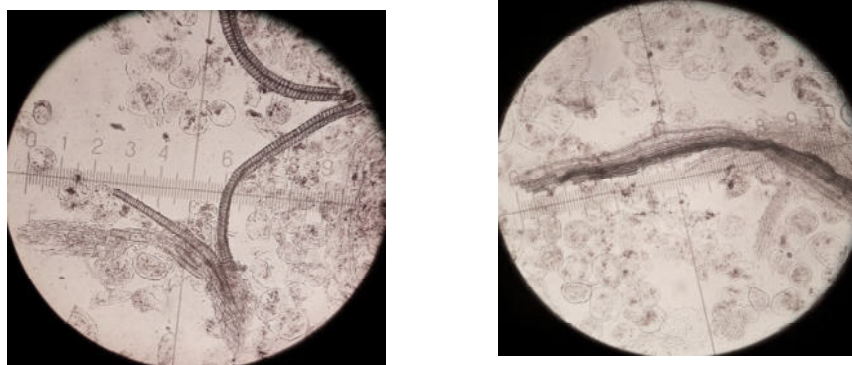


Рис. 1 – Мікроструктура гарбузового пюре після 1 циклу ДІВЕ-обробки в РПА.

Збільшення 7x10. Масштаб: 1 поділка = 16мкм.

Вивчення характеристик дослідних зразків, отриманих на перших трьох циклах гідродинамічної обробки, показав досить високі значення динамічної в'язкості в зоні гранично зруйнованої структури. Це пояснюється наявністю значної кількості різноманітних за своєю структурою, міцністю та щільністю пакування волокон різної довжини і товщини, як видно з фотографій мікроструктури гарбузового пюре на рис. 1, які в оточенні значно менших за розміром часток подрібненої м'якоті утворюють у дисперсійному середовищі розгалужений просторовий каркас з характерними амортизаційними властивостями.

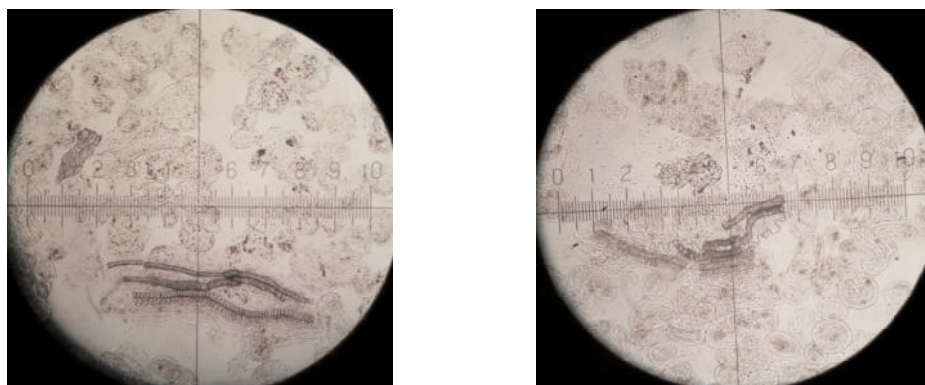


Рис. 2 – Мікроструктура гарбузового пюре після 3 циклу ДІВЕ-обробки в РПА.

Збільшення 7x10. Масштаб: 1 поділка = 16мкм.

Мікроструктурний аналіз показав (рис.1), що більшість напівпрозорих частинок подрібненої м'якоті гарбуза (до 80–85%) мають округлу або подовжену форму, а їх розміри перебувають в широкому діапазоні - в межах 100–1800мкм. Деякі частинки представляють собою фрагменти ланцюгів волокнистих структур гарбуза або їх зрізи, максимальна довжина яких досягає 3000–4500мкм.

В процесі гідродинамічної обробки гарбузового пюре під інтенсивною дією механізмів ДІВЕ з'єднувальні волокнисті та клітинні структури гарбуза подрібнюються з утворенням дисперсних частинок усе меншого (до мікронного) розміру, за рахунок чого відбувається збільшення площі поверхні розподілу фаз («тверде тіло - вода») з одночасною закономірною зміною фізико-хімічних і фізико-механічних форм зв'язку вологи з матеріалом (за класифікацією П.А. Ребіндера для колоїдних капілярно-пористих тіл) [8, 19], що визначає кінетику його сушіння у диспергованому стані.

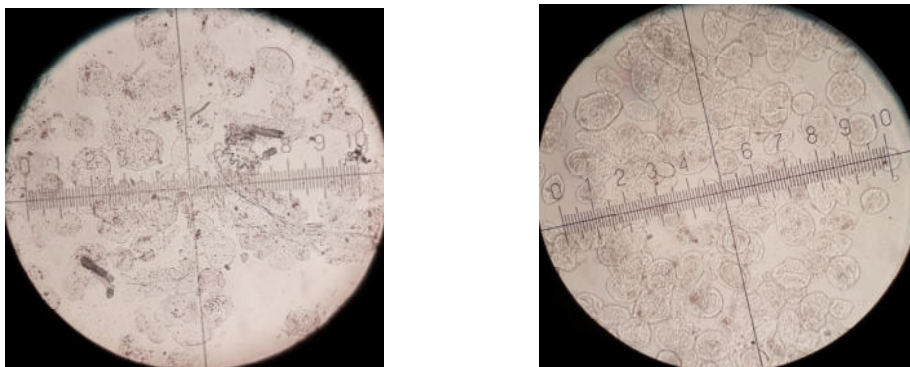


Рис. 3 – Мікроструктура гарбузового пюре з 5 циклу ДІВЕ-обробки в РПА. Збільшення 7х10. Масштаб: 1 поділка = 16мкм.

Поступове збільшення ступеня дисперсності частинок нерозчинних фракцій призводить до їх більш рівномірного розподілення в об'ємі дисперсійного середовища з утворенням нових міжмолекулярних взаємодій через тонкий рідинний прошарок. В результаті дослідні зразки набувають більшої однорідності консистенції, що впливає на значення їх ефективної в'язкості. Після 3-го циклу диспергування гарбузового пюре, як видно з фотографій, наведених на рис. 2, діапазон розмірів частинок м'якоти гарбуза такої самої округлої або подовженої форми дещо скоротився - до 70–800мкм, що відрізняє їх від волокнистих структур більшої міцності. Максимальні розміри фрагментів волокон різного пакування (пучків, пластин), кількість яких складала до 10% від загальної маси частинок нерозчинних фракцій у складі гетерогенної системи даного зразку гарбузового пюре, зменшились у 2-3 рази – в середньому до 1600 мкм.

По мірі збільшення інтенсивного впливу механізмів ДІВЕ за рахунок подовження тривалості гідромеханічної обробки до 5-7 циклів рідинна система переходить з макрөгетерогенного в мікрөгетерогенний колоїдний стан. Діапазон розмірів частинок нерозчинних фракцій гарбузового пюре, як видно з фотографій на рис. 3, скоротився вже до меж 40–180 мкм, а максимальні розміри фрагментів волокон, кількість яких зменшилась до 5% від загальної маси дисперсних частинок у складі гетерогенної системи, зменшились до 150–180 мкм (окремі до 200мкм).

Після 7 циклів ДІВЕ-обробки в РПА максимальний розмір частинок нерозчинних фракцій гарбузового пюре, як видно з фотографій на рис. 4, складало $\delta_{\max} \leq 150\text{мкм}$, що цілком відповідає вимогам до гетерогенних рідинних систем як об'єктів розпилювального сушіння, подача яких в сушарку відбувається за допомогою дискового розпилювача РЦ-18. За таким дисперсним складом частинок нерозчинних фракцій будь-якої рідинної системи з плодової сировини забезпечується більша однорідність факелу розпилю і рівномірність висушування крапель, що сприяє уникненню адгезійних відкладень на стінках камери розпилювальної сушарки і високому виходу порошкового продукту.

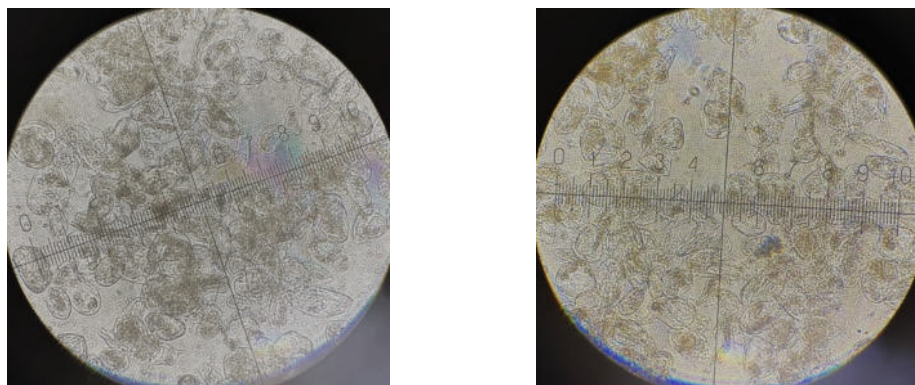
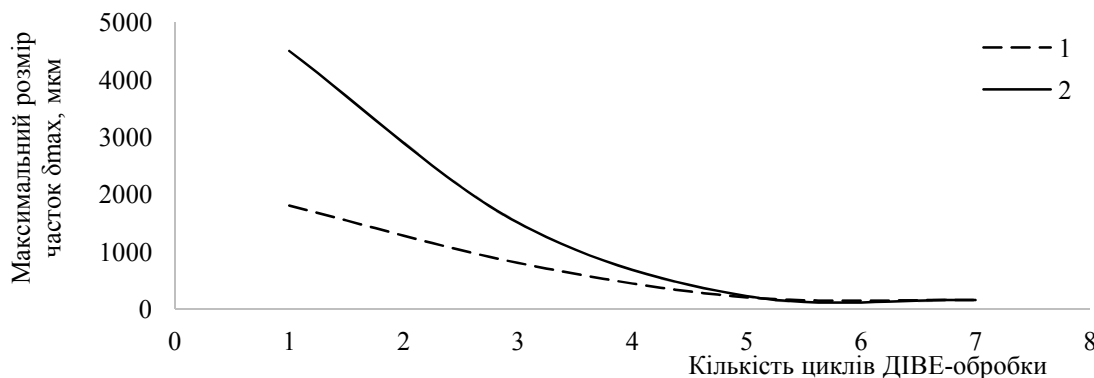


Рис. 4 – Мікроструктура гарбузового пюре з 7 циклу ДІВЕ-обробки в РПА. Збільшення 7х10. Масштаб: 1 поділка = 16мкм.

На рис. 5 наведена графічна залежність зміни максимальних розмірів частинок нерозчинних фракцій різних структурних систем: м'якоти (крива 1) та волокон (крива 2), одержана за результатами проведеного мікроструктурного аналізу зразків гарбузового пюре, відбір яких проводився після кожного циклу його ДІВЕ-обробки у РПА. Аналіз одержаних кривих $\delta_{\max} = f(n)$ (рис. 5) показує, що якщо після 3-го циклу проходу гарбузового пюре крізь робочий орган РПА максимальні розміри частинок м'якоти (крива 1) бланшованого гарбуза зменшувались у 2,3 рази (з 1800мкм до 800мкм), після 5-го проходу – у 4 рази (з 800 мкм до 200 мкм), то після 7-го проходу лише на 25–30%, тобто ефективність подрібнення суттєво знизилась.

Для більш міцних волокнистих структур динаміка зміни максимальних розмірів дисперсних частинок дещо інакша. Максимальні розміри фрагментів волокнистих структур гарбуза після 3-го циклу проходу крізь РПА зменшувались у 3 рази (з 4500мкм до 1500мкм), після 5-го проходу – у 7,5 разів (з 1500мкм до 200мкм), а після 7-го проходу – так само на 25–30%. Таке значне зниження розмірів дисперсних часток волокнистих структур (крива 2, рис. 5) після перших трьох циклів, у порівнянні з динамікою зміни дисперсного складу частинок м'якоті гарбуза (крива 1), можна пояснити підвищенням ефективності роботи РПА при ДІВЕ-обробці плодкових структур більшої міцності.



1 – м'якоті; 2 – волокнистих структур гарбуза.

Рис. 5 – Динаміка зміни максимальних розмірів частинок нерозчинних фракцій гарбузового пюре від кількості циклів його ДІВЕ-обробки у РПА

Виходячи з аналізу фотоматеріалів (рис. 1-4) та графічної залежності $\delta_{\max}=f(n)$ (рис. 5), можна зробити висновок, що 5-ти циклів ДІВЕ-обробки гарбузового пюре в РПА циліндричного типу цілком достатньо для отримання необхідних характеристик суспензії для подачі на дисковий розпилювач камери сушарки, що важливо для умов розпилювального сушіння. Отже, процес підготовки гарбузового пюре для використання його в складі багатокомпонентних композицій як об'єктів розпилювального сушіння доцільно обмежити 5 циклами ДІВЕ-обробки в РПА.

Висновки. Проведений мікроструктурний аналіз зразків гарбузового пюре, одержаних в процесі його гідродинамічної обробки, дозволив визначити раціональні режими його ДІВЕ-обробки в РПА на стадії підготовки до розпилювального сушіння з одержанням стійкої до розшарування колоїдної гетерогенної системи із заданим ступенем дисперсності частинок нерозчинних фракцій.

References

- Chen, J., & Xia, P. (2024). Health effects of synthetic additives and the substitution potential of plant-based additives. *Food Research International*, 197(Part 1), 115177. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115177>
- Chauhan, K., & Rao, A. (2024). Clean-label alternatives for food preservation: An emerging trend. *Heliyon*, 10(16), e35815. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35815>
- de Oliveira, I., Santos-Buelga, C., Aquino, Y., Barros, L., & Heleno, S. A. (2025). New frontiers in the exploration of phenolic compounds and other bioactives as natural preservatives. *Food Bioscience*, 68, 106571. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106571>
- Dantas, A., Piella-Rifà, M., Costa, D. P., Felipe, X., & Gou, P. (2024). Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application. *Applied Food Research*, 4(1), 100382. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>
- Mahalakshmi, M., & Meghwal, M. (2022). Microencapsulation of fruit juices: Techniques, properties, application of fruit powder. *Journal of Food Process Engineering*, 46, e14226. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14226>
- Salehi, F. (2020). Physico-chemical and rheological properties of fruit and vegetable juices as affected by high pressure homogenization: A review. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1136–1149. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1781167>
- Sniezhkin, Y. F., Shapar, R. O., Sorokova, N. M., & Husarova, O. V. (2015). Rozrobka tekhnolohii vyrobnytstva novykh form sushenykh produktiv [Development of production technology for new forms of dried products]. *Promyshlennaya Teplotekhnika*, 37(6), 29–37.
- Miller, D. A., Ellenberger, D., & Gil, M. (2016). Spray-drying technology. In R. Williams III, A. Watts, & D. Miller (Eds.), *Formulating poorly water soluble drugs* (Vol. 22, AAPS Advances in the Pharmaceutical Sciences Series). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42609-9_10

9. Petersen, L. N., Poulsen, N. K., Niemann, H. H., Utzen, C., & Jørgensen, J. B. (2013). A grey-box model for spray drying plants. In *Proceedings of the 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems* (pp. 559–564). Elsevier. <https://doi.org/10.3182/20131218-3-in-2045.00118>
10. Dar, H. A., Sofi, S. A., & Rafiq, S. (2017). Pumpkin, the functional and therapeutic ingredient: a review. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 10(10), 165–170.
11. Gavril, R. N., Stoica, F., Lipşa, F. D., Constantin, O. E., Stănciuc, N., Aprodu, I., & Răpeanu, G. (2024). Pumpkin and pumpkin by-products: A comprehensive overview of phytochemicals, extraction, health benefits, and food applications. *Foods*, 13(17), 2694. <https://doi.org/10.3390/foods13172694>
12. Yadav, M., Jain, S., Tomar, R., Prasad, G. B. K. S., & Yadav, H. (2010). Medicinal and biological potential of pumpkin: An updated review. *Nutrition Research Reviews*, 23(2), 184–190.
13. UCAB. (2023). Інфографіка: ринок гарбузів в Україні. https://ucab.ua/ua/pres_sluzhba/novosti/infografika_rinok_garbuziv_v_ukraini
14. Kim, M. Y., Kim, E. J., Kim, Y.-N., Choi, C., & Lee, H.-Y. (2012). Comparison of the chemical compositions and nutritive values of various pumpkin (Cucurbitaceae) species and parts. *Nutrition Research and Practice*, 6(1), 21–27. <http://dx.doi.org/10.4162/nrp.2012.6.1.21>
15. Villamil, R.-A., Escobar, N., Romero, L. N., Huesa, R., Plazas, A. V., Gutierrez, C., & Robelto, G. E. (2022). Perspectives of pumpkin pulp and pumpkin shell and seeds uses as ingredients in food formulation. *Nutrition & Food Science*, 53(4). <https://doi.org/10.1108/NFS-04-2022-0126>
16. Dolinskyi, A. A., Avdieieva, L. Yu., & Makarenko, A. A. (2020). Kavitatsiini tekhnologii dlia vyrobnytstva nanopreparativ: Monohrafiia [Cavitation technologies for the production of nanodrugs: Monograph]. Kyiv: Naukova dumka.
17. Avdieieva, L. Yu., Makarenko, A. A., Turchyna, T. I., & Dekusha, H. Yu. (2024). Osoblyvosti vplyvu homohenizatsii na reolohichni vlastyvyosti piure iz harbuza [Peculiarities of the effect of homogenization on the rheological properties of pumpkin puree]. *Scientific Works*, 88(1), 50–56. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2960>
18. Avdieieva, L. Yu., & Makarenko, A. A. (2024). Doslidzhennia dynamichnoi viazkosti harbuzovoho piure, zvažaiuchy na vplyv hidromechanichnykh i temperaturnykh faktoriv [Study of the dynamic viscosity of pumpkin puree considering the influence of hydromechanical and thermal factors]. *Scientific Works of NUFT*, 30(3), 189–198. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-3-17>
19. Dolinskyi, A. A., & Maletska, K. D. (2011). *Rozpyliuvalne sushinnia. Teplofizychni osnovy. Metody intensyfikatsii i enerhoberezhennia* [Spray drying. Thermophysical fundamentals. Methods of intensification and energy saving]. Kyiv: Akademperiodyka.

MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF PUMPKIN PUREE AS A COMPONENT OF A COMPOSITE SYSTEM FOR SPRAY DRYING

Turchyna T.Ya., PhD (Engin.), s.r.s., Avdieieva L.Yu., Dr. Sci. (Engin.), s.r.s.,

Makarenko A.A., PhD (Engin.) s.r., Dekusha H.V., PhD (Engin.), s.r.

Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Sciences, Kyiv

Список використаної літератури

1. Chen J., Xia P. Health effects of synthetic additives and the substitution potential of plant-based additives // *Food Research International*. 2024. Vol. 197, Part 1. Article 115177. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115177>.
2. Chauhan K., Rao A. Clean-label alternatives for food preservation: An emerging trend // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 10. Article e35815. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35815>
3. de Oliveira I., Santos-Buelga C., Aquino Y., Barros L., Heleno S. A. New frontiers in the exploration of phenolic compounds and other bioactives as natural preservatives // *Food Bioscience*. 2025. Vol. 68. Article 106571. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106571>
4. Dantas A., Piella-Rifà M., Costa D. P., Felipe X., Gou P. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application // *Applied Food Research*. 2024. Vol. 4, №1. Article 100382. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>
5. Mahalakshmi M., Meghwal M. Microencapsulation of fruit juices: Techniques, properties, application of fruit powder // *Journal of Food Process Engineering*. 2022. Vol. 46. Article e14226. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14226>.
6. Salehi F. Physico-chemical and rheological properties of fruit and vegetable juices as affected by high pressure homogenization: A review // *International Journal of Food Properties*. 2020. Vol. 23, No. 1. P. 1136–1149. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1781167>
7. Снежкін Ю. Ф., Шапар Р. О., Сорокова Н. М., Гусарова О. В. Розробка технології виробництва нових форм сушених продуктів // *Промышленная теплотехника*. 2015. Т. 37, № 6. С. 29–37.

8. Miller D. A., Ellenberger D., Gil M. Spray-Drying Technology // Formulating Poorly Water Soluble Drugs / eds. R. Williams III, A. Watts, D. Miller. Cham: Springer, 2016. (AAPS Advances in the Pharmaceutical Sciences Series; Vol. 22). https://doi.org/10.1007/978-3-319-42609-9_10
9. Petersen L. N., Poulsen N. K., Niemann H. H., Utzen C., Jørgensen J. B. A Grey-Box Model for Spray Drying Plants // Proceedings of the 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems. 2013. P. 559-564. Article FrM2T2.3. Elsevier. <https://doi.org/10.3182/20131218-3-in-2045.00118>
10. Dar H. A., Sofi S. A., Rafiq S. Pumpkin, the functional and therapeutic ingredient: a review // International Journal of Food Science and Nutrition. 2017. Vol. 10, Iss. 10. P. 165–170.
11. Gavril, R. N., Stoica, F., Lipşa, F. D., Constantin, O. E., Stănciuc, N., Aprodu, I. & Râpeanu, G. Pumpkin and Pumpkin By-Products: A Comprehensive Overview of Phytochemicals, Extraction, Health Benefits, and Food Applications // Foods. 2024. Vol. 13, Iss. 17, 2694. <https://doi.org/10.3390/foods13172694>
12. Yadav, M., Jain, S., Tomar, R., Prasad, G.B.K.S., & Yadav, H. Medicinal and biological potential of pumpkin: an updated review // Nutrition Research Reviews. 2010. Vol. 23, Iss. 2. P. 184–190.
13. Інфографіка: ринок гарбузів в Україні [Електронний ресурс] // UCAB. 2023. URL: https://ucab.ua/ua/pres_sluzhba/novosti/infografika_rinok_garbuziv_v_ukraini (дата звернення: 7 липня 2025).
14. Kim M. Y., Kim E. J., Kim Y.-N., Choi C., Lee H.-Y. Comparison of the chemical compositions and nutritive values of various pumpkin (Cucurbitaceae) species and parts // Nutrition Research and Practice. 2012. Vol. 6, Iss. 1. P. 21–27. URL: <http://dx.doi.org/10.4162/nrp.2012.6.1.21>.
15. Villamil R.-A., Escobar N., Romero L. N., Huesa R., Plazas A. V., Gutierrez C., Robelto G. E. Perspectives of pumpkin pulp and pumpkin shell and seeds uses as ingredients in food formulation // Nutrition & Food Science. 2022. Vol. 53, No. 4. DOI: 10.1108/NFS-04-2022-0126
16. Долінський А. А., Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А. Кавітаційні технології для виробництва нанопрепаратів: монографія. Київ: Наукова думка, 2020. 110 с.
17. Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А., Турчина Т. І., Декуша Г. Ю. Особливості впливу гомогенізації на реологічні властивості пюре із гарбуза // Scientific Works. 2024. Т. 88, № 1. С. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2960>.
18. Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А. Дослідження динамічної в'язкості гарбузового пюре, зважаючи на вплив гідромеханічних і температурних факторів // Наукові праці НУХТ. 2024. Т. 30, № 3. С. 189–198. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-3-17>.
19. Долінський А. А., Малецька К. Д. Розпилювальне сушіння. Теплофізичні основи. Методи інтенсифікації і енергозбереження. Київ: Академперіодика, 2011. 376 с.

Отримано в редакцію 12.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 12.06.2025
Approved 02.09.2025

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ФОРМИ МАТЕРІАЛУ ПРИ СУШІННІ ГАРБУЗА МУСКАТНОГО (*CUCURBITA MOSCHATA*)

Петрова Ж.О., член-кореспондент НАН України, д.т.н., професор,
Новікова Ю.П., доктор філософії
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Анотація. Родина гарбузових (*Cucurbitaceae*) найпоширеніший у світі, який включає в себе близько 956 видів, включаючи гарбузи, огірки, дині, кавуни, кабачки та багато інших. Гарбуз (*Cucurbita*) поділяють на їстівні та кормові. Найбільш популярнішими у світі, які вирощують, є 5 видів. Серед цих видів Гарбуз мускатний, або гарбуз мускусний (*Cucurbita moschata*) широко культивується у світі з давніх часів. Попит на гарбуз з кожним роком зростає, через його функціональні властивості. Він багатий на каротиноїди, вітаміни групи В, мінерали та мікроелементи, пектини, харчові волокна, полісахариди, при цьому маючи низьку калорійність. Каротиноїди, які містяться в гарбузі, це природні пігменти, які в організмі людини перетворюються в вітамін А, який необхідний для зору, імунних функцій і здоров'я шкіри. Гарбуз це сезонний продукт, який можливо зберігати за допомогою відомих методів консервування. Сушіння, найбільш поширеним та найстарішим із методів консервування. Сушіння гарбуза проводили за різними методами, такими як сушіння на сонці, конвективне, мікрохвильове, вакуумно-мікрохвильове, сублімаційне, інфрачервоне та різні комбіновані методи. Конвективне сушіння є найбільш поширеним, але при цьому попит на комбіновані методи постійно зростає. Тому метою роботи є дослідження ступеневого та комбінованого режимів сушіння, а також вплив форми матеріалу, для зменшення тривалості процесу. Дослідження виконували на експериментальному конвективному стенді, обладнаного додатково інфрачервоними лампами. Перед дослідженнями гарбуз мили, очищали та подрібнювали на скибочки та стружку. Визначено, що застосування цих запропонованих режимів дозволяє зменшити тривалість сушіння порівняно з 65 °С. Досліджено вплив форми матеріалу при сушінні. Порівнюючи форму матеріалу, можна зробити висновок, режими впливають по-різному. Так при сушінні стружки гарбуза тривалість у ступеневого на 1,1 рази менше за комбінований. А при сушінні скибочок тривалість сушіння за комбінованим режимом у 1,3 рази менша за ступеневий. При сушінні гарбуза скибочками тривалість зневоднення у 1,7 – 2,3 рази менше за третій гарбуз не залежно від режиму. При цьому сушіння скибочками добре підходить для виробництва чипсів, а стружку можна використовувати при виробництві функціональних порошків.

Ключові слова: сушіння, гарбуз, конвекція, комбіноване сушіння, інтенсифікація.

Постановка проблеми. З кожним роком попит на функціональні продукти та напої значно зростає через соціально економічні зміни особливо в усвідомленні потреб у здоров'ї [1]. Функціональні продукти харчування - це міст між поживними речовинами, які ми отримуємо з їжею, і терапевтичним потенціалом, закладеним у продуктах, які ми споживаємо [2]. Простіше кажучи, це продукти, спеціально розроблені або модифіковані, щоб запропонувати додаткові переваги для здоров'я, окрім основного харчування [2, 3]. Вони збагачені біоактивними сполуками, такими як вітаміни, мінерали, антиоксиданти, пробіотики, жирні кислоти та фітохімічні речовини, які відіграють ключову роль у зміцненні здоров'я та благополуччя [2].

Каротиноїди продемонстрували великий потенціал, як антиоксидант, у харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості завдяки своїй багатій харчовій цінності та функціональним властивостям [4, 5]. Каротиноїди складають групу жиророзчинних органічних пігментів, що синтезуються фототрофами (водоростями, ціанобактеріями та рослинами), нефотосинтезуючими бактеріями та грибами, з більш ніж 1117 структурами, ідентифікованими з 683 різних джерел у класі вуглеводнів [6, 7]. Структура цих різних фітохімічних речовин проявляється у вигляді тетратерпенів з вісьмома п'ятиуглецевими ізопреноїдними одиницями (головним чином C₄₀), що містять до 15 спряжених подвійних зв'язків та демонструють симетричне розташування, типове для β-каротину, що призводить до червоного, жовтого та помаранчевого кольорів [6, 8]. Найбільш поширеними в Україні каротиновмісними продуктами є морква, гарбуз, томат, солодкий перець, шпинат, абрикос, диня, персик, смородина, чорниця.

Гарбуз (*Cucurbita*) – це їстівна культура, що належить до родини Гарбузові (*Cucurbitaceae*) [9]. Родина гарбузових (*Cucurbitaceae*) відома як родина щиткових та лозистих і включає близько тисячі видів приблизно зі ста родів рослин. У концепції харчування людини ця родина займає найвище місце серед родин рослин, а основними видами сільськогосподарських культур цієї родини є огірок (*Cucumis sativus*), гарбуз (*Cucurbita*), кавун (*Citrullus lanatus*) та диня (*Cucumis melo*) [9, 10]. Рослини, що належать до цієї родини, мають давню історію в етнофармакології та традиційній медицині, про що свідчить їх великий опис у літературі. Продемонстрований фітохімічний та фармакологічний потенціал свідчить про те, що ці рослини є

перспективним джерелом для розробки нових терапевтичних сполук та функціональних харчових продуктів [10, 11]. Гарбуз (*Cucurbita*) поділяють на дві групи їстівні та кормові. Кількість визнаних видів гарбуза (*Cucurbita*) коливається від 13 до 30. Найпопулярнішими у світі, які вирощують, є *Cucurbita moschata*, *Cucurbita ficifolia*, *Cucurbita maxima*, *Cucurbita pepo* та *Cucurbita mixta* Pangalo [12].

Гарбуз мускатний, або гарбуз мускусний (*Cucurbita moschata*) широко культивується в багатьох країнах з давніх часів. Він багатий на вітамін А, вітамін В, вітамін С, різні мінерали, каротин, вісім видів амінокислот, необхідних для організму людини, а також містить мікроелементи, такі як фосфор, калій, кальцій, магній, цинк та кремній [13 – 16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гарбуз відноситься до сезонних продуктів, а саме сезон гарбуза триває з осені до початку зими. Для зберігання гарбуза можна застосовувати методи консервування: заморожування, сушіння та інші [17]. Сушіння є одним із найстаріших методів консервування, який широко використовується в харчовій промисловості [18].

У роботі [19] представлено сушіння гарбузового порошку розпилюваний сушінням, з побічними продуктами, насінням та шкіркою. Досліджували гарбузи промиті та дезінфіковані гіпохлоритом натрію. М'якоть очищена від шкірки та нарізана на шматочки, зберігаючи 25% шкірки плоду та включаючи все його насіння. Спочатку зважували насіння та шкірки зі 100 г води та гідролізували ферментом Novozymes. Cellic C-Tec2 (Багсверд, Данія) 4,68 год. Цей гідролізований субстрат змішували бланшованою м'якоттю, яка попередньо була оброблена в колоїдному млині. Суспензію готували шляхом гомогенізації протягом 8,5 хв. Додатково, інкапсулюючий матеріал додавали у встановлених пропорціях згідно з експериментальною схемою. Для сушіння використано напівпромислове обладнання для прямоточного потоку (Vibrasac, модель PASLAB 1.5, Медельїн, Колумбія), яке працювало в умовах вакуумного тиску (0,38 кПа). Отримана суміш гарбузового порошку має хороші фізико-хімічну та технофункціональну стабільність; крім того, вона мала характеристики кольору, типового для гарбуза. Інтеграція побічних продуктів (насіння та шкірки) зрештою сприяла функціональним властивостям готового продукту.

Авторами у роботі [20] представлено комбіноване сушіння гарбуза у гібридній мікрохвильово-конвективній сушарці. Зразки попередньо промивали та нарізали на скибочки товщиною 3 мм за допомогою різак. Шматочки гарбуза сушили гібридній мікрохвильово-конвективній сушарці за 3 температур: 50, 60 та 70 °С, 3 потужностей мікрохвиль: 180, 360 та 540 Вт, а також за швидкості повітряного потоку 1 м/с. В результаті досліджень були визначені оптимальні умови для сушіння скибочок гарбуза за допомогою мікрохвильово-конвективної сушарки включали температуру 60 °С та потужність мікрохвиль 360 Вт, що призвело до таких показників: час сушіння, електрична термічна потужність, усадка, варіація кольору, чутливість, загальна концентрація залишків, антиоксидантна здатність та вміст вітаміну С становили 47,38 хв, 30,87%, 25,44%, 12,74%, 5,21%, 658,24 г/г сухої маси, 82,11% та 4,78 мг/г сухої маси відповідно, з рівнем достовірності ~0,901.

Одним з найстаріший метод сушіння гарбуза є сушіння на сонці. Його можна вважати «екологічно чистим методом», оскільки потрібна лише спеціальна сушарка. Однак, коливання вологості та температури під час процесу сушіння можуть впливати на кінцеву якість продукції [21]. Як правило, сонячні сушарки, що використовуються для сушіння м'якоти та насіння гарбуза, мають тунельну або трубчасту форму [22 – 24].

У роботі [25] представлено вплив сушіння конвективним, вакуумним та кондуктивним методами. Свіжий гарбуз промитий, відділено насіння, волокнистих ниток та шкірки. Потім м'якоть нарізали скибочками товщиною від 3,5 до 0,5 мм за допомогою. Сушіння конвективним проводили за трьох різних температур: 50, 60 та 70 °С та швидкостей потоку повітря 1,5, 1,0 та 0,5 м/с за допомогою сушарки ARMFIELD UOP8-MKII (Armfield Limited, Рінгвуд, Велика Британія). Вакуумне сушіння проводили за трьох різних температур 50, 60 та 70 °С та вакуумного тиску 100 мбар з використанням вакуумної сушильної печі Memmert VO 200 з насосним модулем Memmert PM200 (MEMMERT GmbH + Co. KG, Швабах, Німеччина). Кондуктивне сушіння при атмосферному тиску 1000 мбар проводили за трьох різних температур: 50, 60 та 70 °С з використанням сушильної печі Memmert VO 200 без насосного модуля Memmert PM200 (MEMMERT GmbH+Co.KG, Швабах, Німеччина). Сушіння вакуумним методом є найшвидшим з наявних за тієї ж температури 60 °С [25].

Сублимаційне сушіння – це метод сушіння, який передбачає заморожування сировини, а потім її витримання під низьким тиском і температурою. За допомогою цього сушіння не змінюється форма та розмір, але має великий недолік це тривалий час процесу та висока вартість [26]. Сублимаційне сушіння гарбуза при температурі -50 °С протягом 96 годин і тиску 0,7 Па забезпечує отриманий сушений матеріал з вмістом води 10,9 г/100 г сирої маси та вмістом клітковини 1,15 г/100 г сухої маси, але вміст аскорбінової кислоти значно зменшується (зі 127 мг/100 г сухої маси до 13,7 мг/100 г сухої маси) [25].

Конвективне сушіння – це традиційний та недорогий метод, який можна використовувати для консервування швидкопсувних продуктів, таких як гарбузи [27]. У роботі [27] розглянуто конвективне сушіння гарбуза. Свіжі зразки були очищені та нарізані на зрізи товщиною 5,0±0,1 мм для полегшення та стандартизації видалення води під час процесу сушіння. Зразки зневоднювалися у конвективній сушарці (CE-220/630 Cienlab, Бразилія) зі швидкістю повітря 1 м/с та температурою 50, 60, 70 та 80±2 °С. Найменша тривалість сушіння при 80 °С та становила 105 хв, а найбільша – 50 та становить 360 хв. При цьому найвище утриман-

ня каротиноїдів (46,22%) у зневоднених зразках спостерігалось при 60 °С, що визначає цей режим як найбільш оптимальним для отримання зневоднених зразків, багатих на вітамін А.

В Інституті технічної теплофізики НАН України Петровою Ж.О. розроблені способи отримання каротиновмісних порошків, з моркви та гарбуза [28]. Сушіння гарбуза полягає у створенні ступеневих режимів, а саме конвективного 120/80 °С та конвективно-вакуумного сушіння 120/80 °С (тиск повітря в камері 0,01...0,015 МПа для досушування матеріалу) [28].

Постановка завдання. Сушений гарбуз має тривалий термін зберігання, тому його можна використувати для приготування різних страв, випічки, напоїв, десертів, а також як окрему закуску [29 –32]. Як зазначалось раніше конвективний метод традиційний і менш дорогий, але при застосуванні низьких температурних режимів, збільшується тривалість сушіння. Тому *метою роботи* є дослідження ступеневого та комбінованого режимів сушіння, а також форми матеріалу, для зменшення тривалості процесу.

Матеріалом для досліджень вибрано гарбуз мускатний (*Cucurbita moschata*), який спочатку мили, очищали від шкірки, волокнистих ниток та насіння. Далі розрізали на декілька частин, після чого їх або натирали за допомогою тертки на стружку (рис. 1 а) або нарізали за допомогою шатківниці для овочів на скибочки (рис. 1 б) товщиною 2 мм.

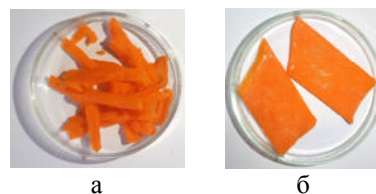


Рис. 1 – Зовнішній вигляд гарбуза за стружки (а) та скибочки (б)

Дослідження кінетики сушіння матеріалу проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації [5]. На конвективному сушильному стенді допускається здійснювати термічну обробку композитної сировини теплоносієм температурою 40 – 150 °С і швидкістю 0,5 – 5 м/с. Встановлені високоточні ваги реєструють зміну маси зразка до 0,001 г. Температура в сушильній камері підтримується з точністю до 0,02°С. Зчитування даних експерименту в сушильній камері, а саме маси та температури зразку, а також температури теплоносія, відбувається 7 раз за хвилину і записується на комп'ютері. Похибки запису даних на експериментальному конвективному сушильному системою автоматизованого збору інформації становить для температур не перевищує $\pm 1^\circ\text{C}$ та маси $\pm 5\text{мг}$.

Виклад основного матеріалу дослідження. У попередній роботі представлені дослідження по сушінню гарбуза за режимними параметрами 65 та 100°С [33]. Перед початком досліджень гарбуз нарізали розміром 5х5х5 мм та піддавали гігротермічній обробці парою при 100 °С протягом 5 хв.

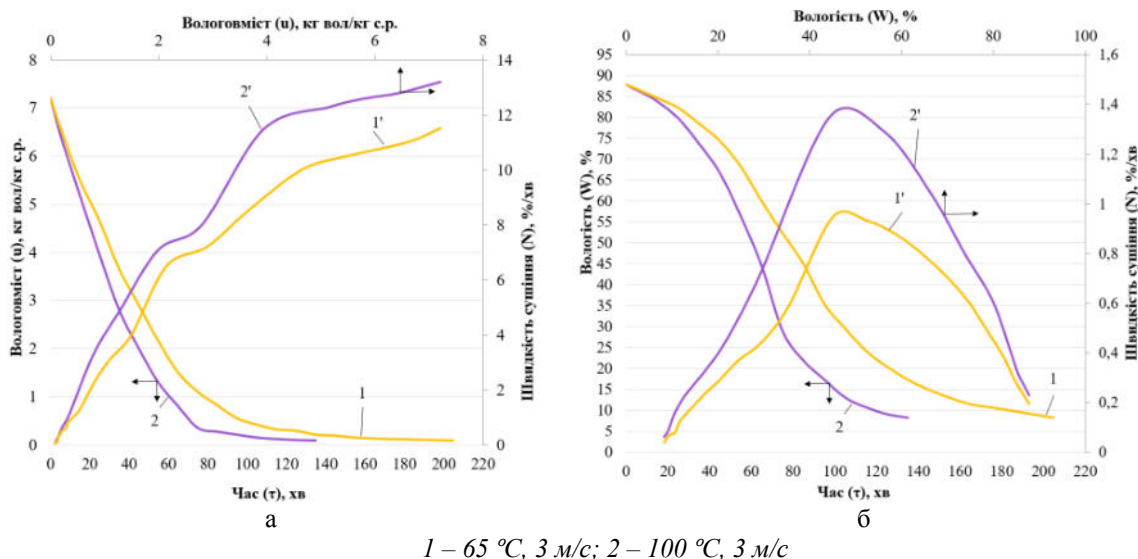
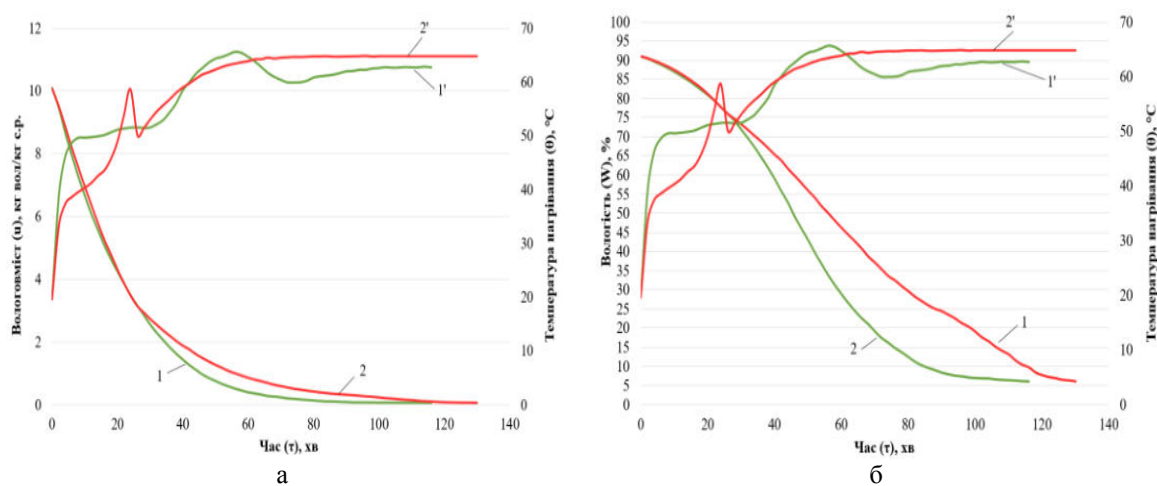


Рис. 1 – Зміна вологовмісту (а), вологості (б) (1, 2) та швидкості сушіння (1', 2') гарбуза в шарі $\delta \approx 5$ мм
1 – 65 °С, 3 м/с; 2 – 100 °С, 3 м/с

На рисунку 1 представлені експериментальні криві кінетичні та швидкості сушіння гарбуза. З рисунку 1 видно, що збільшення температури теплоносія з 65 °С до 100 °С зменшує час сушіння гарбуза на 35%, а швидкість зростає в 1,5 рази. При цьому збільшення температури теплоносія до 100 °С призводить до погіршення якості сушеного гарбуза, а саме потемніння матеріалу та підгорілий присмаку [46].

Для покращення якості матеріалу доцільно на другому етапі знизити температуру теплоносія або проводити процес сушіння при більш низькій температурі. Використання ступеневих режимів або комбінованих режимів дозволить зберегти якість матеріалу.

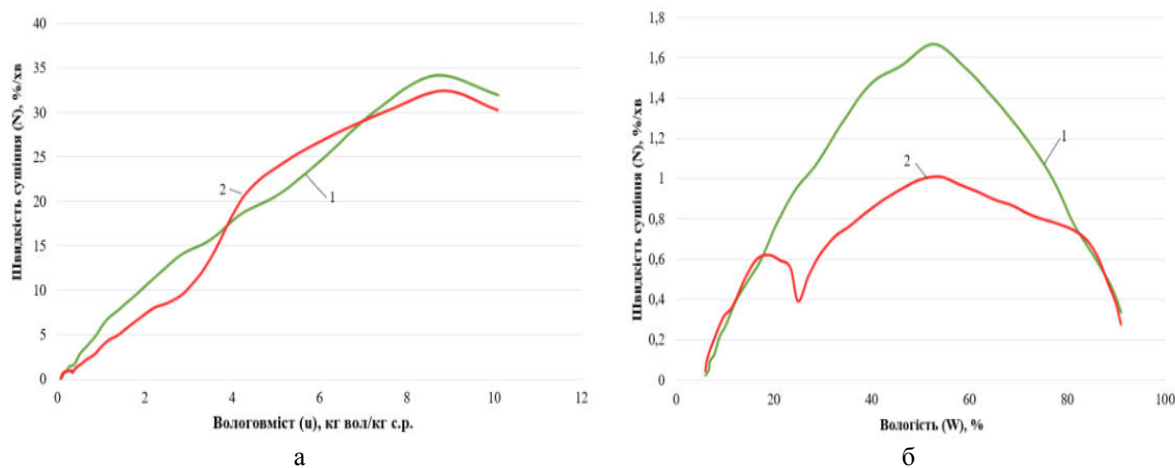


1 – 100/65 °C, 3 м/с; 2 – 3800Вт/м² +65 °C, 3 м/с

Рис. 2 – Зміна вологовмісту (а), вологості (б) (1, 2) та температури всередині шару (1', 2') стружки гарбуза в шарі $\delta \approx 5$ мм від часу

Наступним кроком було проведено дослідження на гарбузі стружці та скибочках за ступеневим та комбінованим режимами, до вологості матеріалу $6 \pm 0,3\%$. При застосуванні режимів сушіння, а саме ступеневого 100/65 °C та комбінованого 3800Вт/м² +65 °C на початку процесу температуру матеріалу підіймали до 58 °C, після чого процес сушіння відбувався за температури теплоносія 65 °C. На рис. 2. представлені експериментальні криві кінетичні та швидкості сушіння стружки гарбуза при застосуванні комбінованого та ступеневого режимів. Як видно з рис. 2., застосування заданих режимів дає можливість зменшити тривалість порівняно з попередніми дослідженнями сушіння для ступеневого до 116 хв, а для комбінованого до 130 хв.

На початку дослідження за комбінованим режимом 3800Вт/м² +65 °C (крива 2' рис. 2) температуру матеріалу піднімали до 58 °C протягом 24 хв, після чого було вимкнено інфрачервоні лампи, при цьому температура зменшилася до 50 °C. Далі температур матеріалу почала поступово збільшуватися до 64,8 °C. За ступеневим режимом 100/65 °C (крива 1' рис. 2) на початку процесу можна спостерігати від 8 до 30 хв, що процес нагрівання сповільнюється, але це не впливає на зменшення вологості матеріалу. При досягненні температури 58 °C на 38 хв, процес нагрівання матеріалу продовжується до 65 °C, після чого падає до 59 °C. Далі матеріал поступово набирає температуру до 62,6 °C.



1 – 100/65 °C, 3 м/с; 2 – 3800Вт/м² +65 °C, 3 м/с

Рис. 3 – Зміна швидкості сушіння (1, 2) від вологовмісту (а) та вологості (б) гарбуза стружки в шарі $\delta \approx 5$ мм

На рис. 3 представлено зміну швидкості сушіння стружки гарбуза шаром 5 мм. Як видно з рис. 3 найбільша максимальна швидкість сушіння за режимом 100/65 °C і становить в залежності від вологості 1,66 %/хв та вологовмісту 34,21%/хв. Найменша за режимом 3800Вт/м² +65 °C і становить в залежності від вологості 0,99 %/хв та вологовмісту 32,42%/хв.

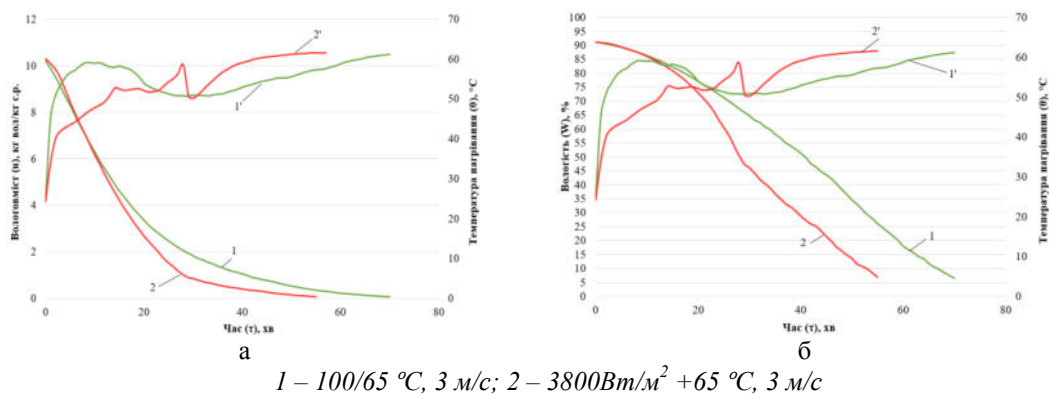


Рис. 4 – Зміна вологовмісту (а), вологості (б) (1, 2) та температури всередині шару (1', 2') скибочки гарбуза $\delta \approx 2$ мм від часу

На рис. 4. представлені експериментальні криві кінетичні та швидкості сушіння скибочки гарбуза при застосуванні комбінованого та ступеневого режимів. Як видно з рис. 4., тривалість сушіння для ступеневого до 70 хв, а для комбінованого до 55 хв.

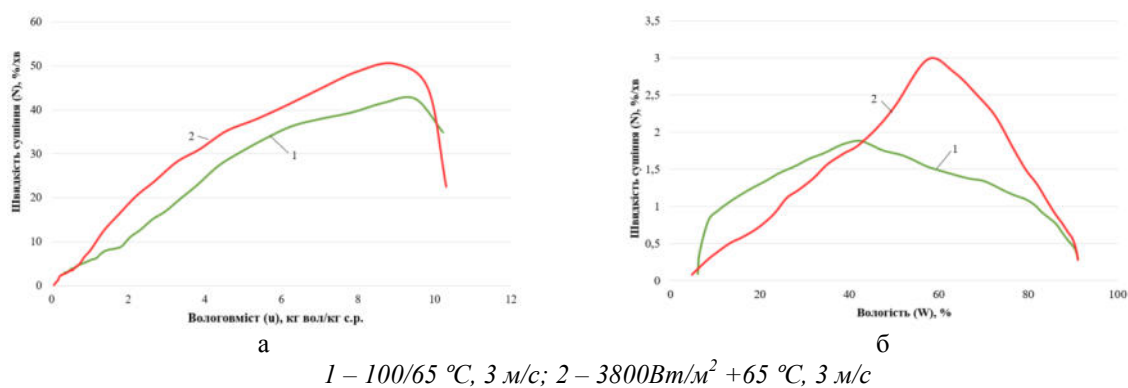


Рис. 5 – Зміна швидкості сушіння (1, 2) від вологовмісту (а) та вологості (б) скибочки гарбуза $\delta \approx 2$ мм

На рис. 5 представлено зміну швидкості сушіння скибочки гарбуза товщиною 2 мм. Як видно з рис. 5 найбільша максимальна швидкість сушіння за режимом $3800\text{Вт}/\text{м}^2 + 65^\circ\text{C}$ і становить в залежності від вологості $2,97\text{ \%}/\text{хв}$ та вологовмісту $50,51\text{ \%}/\text{хв}$. Найменша за режимом $100/65^\circ\text{C}$ і становить в залежності від вологості $1,88\text{ \%}/\text{хв}$ та вологовмісту $41,52\text{ \%}/\text{хв}$.

Порівнюючи форму матеріалу, можна зробити висновок, режими впливають по різному. Так при сушінні стружки гарбуза тривалість у ступеневого на 1,1 рази менше за комбінований. А при сушінні скибочок тривалість сушіння за комбінованим режимом у 1,3 рази менша за ступеневий. При сушінні гарбуза скибочками тривалість зневоднення у 1,7 – 2,3 рази менше за третій гарбуз не залежно від режиму. При цьому сушіння скибочками добре підходить для виробництва чипсів, а стружку можна використовувати при виробництві функціональних порошків.

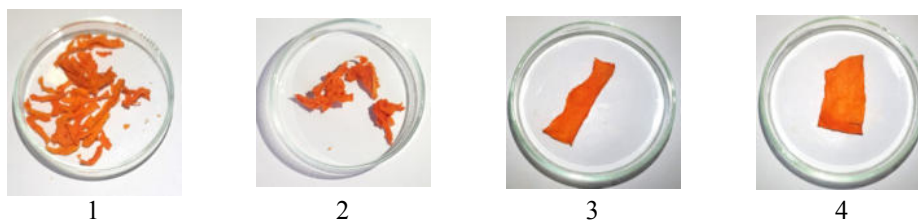


Рис. 6 – Порівняння висушених зразків гарбуза
1 – третій гарбуз $100/65^\circ\text{C}$; 2 – третій гарбуз $3800\text{Вт}/\text{м}^2 + 65^\circ\text{C}$; 3 – скибочка гарбуза $100/65^\circ\text{C}$; 4 – скибочка гарбуза $3800\text{Вт}/\text{м}^2 + 65^\circ\text{C}$;

На рисунку 6 зображено висушений гарбуз за різних режимів та форми матеріалу. Як видно з рис. 6 про високу якість підібраних режимів свідчить яскраво помаранчевий колір сухих зразків, що підтверджує максимальне збереження каротиноїдів.

Висновки. У роботі представлено дослідження сушіння гарбуза за ступеневим та комбінованим режимами. Визначено, що застосування цих запропонованих режимів дозволяє зменшити тривалість сушіння

порівняно з 65 °С. Досліджено вплив форми матеріалу при сушінні. Порівнюючи форму матеріалу, можна зробити висновок, режими впливають по-різному. Так при сушінні стружки гарбуза тривалість у ступеневого на 1,1 рази менше за комбінований. А при сушінні скибочок тривалість сушіння за комбінованим режимом у 1,3 рази менша за ступеневий. При сушінні гарбуза скибочками тривалість зневоднення у 1,7 – 2,3 рази менше за третій гарбуз не залежно від режиму. При цьому сушіння скибочками добре підходить для виробництва чипсів, а стружку можна використовувати при виробництві функціональних порошків.

References

1. Intraseek, J., Tsusaka, T. W., & Anal, A. K. (2024). Trends and current food safety regulations and policies for functional foods and beverages containing botanicals. *Journal of food and drug analysis*, 32(2), 112–139. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3499>
2. Vlaicu, P. A., Untea, A. E., Varzaru, I., Saracila, M., & Oancea, A. G. (2023). Designing Nutrition for Health-Incorporating Dietary By-Products into Poultry Feeds to Create Functional Foods with Insights into Health Benefits, Risks, Bioactive Compounds, Food Component Functionality and Safety Regulations. *Foods (Basel, Switzerland)*, 12(21), 4001. <https://doi.org/10.3390/foods12214001>
3. Poe, M. R., McLain, R. J., Emery, M., & Hurley, P. T. (2013). Urban forest justice and the rights to wild foods, medicines, and materials in the city. *Human ecology*, 41(3), 409–422. <https://doi.org/10.1007/s10745-013-9572-1>
4. Meléndez-Martínez, A. J., Stinco, C. M., & Mapelli-Brahm, P. (2019). Skin carotenoids in public health and nutricosmetics: The emerging roles and applications of the UV radiation-absorbing colourless carotenoids phytoene and phytofluene. *Nutrients*, 11(5), 1093. <https://doi.org/10.3390/nu11051093>
5. Petrova, Zh., Novikova, Yu., Slobodianiuk, K., Grakov, O., & Koval, I. (2024). Pererobka khurmy (Diospyros Kaki L.) Sushinniam. *Scientific Works*, 88(1), 19–29. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2955>
6. Bas, T. G. (2024). Bioactivity and Bioavailability of Carotenoids Applied in Human Health: Technological Advances and Innovation. *International journal of molecular sciences*, 25(14), 7603. <https://doi.org/10.3390/ijms25147603>
7. Shalaby, E., & Azzam, G. M. (Eds.). (2018). *Antioxidants in foods and its applications*. BoD–Books on Demand. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.72008>
8. Mussagy, C. U., Winterburn, J., Santos-Ebinuma, V. C., & Pereira, J. F. B. (2019). Production and extraction of carotenoids produced by microorganisms. *Applied microbiology and biotechnology*, 103(3), 1095–1114. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9557-5>
9. Jamuna, S., Karthika, K., & Paulsamy, S. J. J. R. B. (2015). Phytochemical and pharmacological properties of certain medicinally important species of Cucurbitaceae family—a review. *Journal of Research in Biology*, 5(6), 1835–1849.
10. Adil, A., Khan, S. S., Naeem, S., Alqahtani, A., Alqahtani, T., Asgher Shuja, A., & Tahir, A. (2025). Evaluation of Sub-acute toxicity and safety profile of Charmagaz seed oil in rats. *PloS one*, 20(7), e0327697. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327697>
11. Mukherjee, P. K., Singha, S., Kar, A., Chanda, J., Banerjee, S., Dasgupta, B., Haldar, P. K., & Sharma, N. (2022). Therapeutic importance of Cucurbitaceae: A medicinally important family. *Journal of ethnopharmacology*, 282, 114599. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2021.114599>
12. Oyeleke, A. W., Oluwajuyitan, D. T., Oluwamukomi, O. M., & Enujiugha, N. V. (2019). Amino acid profile, functional properties and in-vitro antioxidant capacity of Cucurbita maxima and Cucurbita mixta fruit pulps and seeds. *European Journal of Nutrition and Food Safety*, 10(4), 224–241. <https://doi.org/10.9734/ejnf/2019/v10i430117>
13. Men, X., Choi, S. I., Han, X., Kwon, H. Y., Jang, G. W., Choi, Y. E., Park, S. M., & Lee, O. H. (2020). Physicochemical, nutritional and functional properties of Cucurbita moschata. *Food science and biotechnology*, 30(2), 171–183. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00835-2>
14. Arshad, Z., Ashraf, N., Ali, A., Iqbal, A., Rafique, M., Gulzar, M., ... & Hassan, S. A. (2025). Evaluation of the Antioxidant and Antimicrobial Properties of Pumpkin Pulp During Storage Through the Ultrasonication Process. *Food Science and Engineering*, 6(1), 87–102. <https://doi.org/10.37256/fse.6120255657>
15. Al-Anoos, I. M., El-dengawy, R., & Hasanin, H. (2015). Studies on chemical composition of some Egyptian and Chinese pumpkin (Cucurbita maxima) seed varieties. *Journal of Plant Science & Research*, 2(2), 1–4.
16. Islam, M., Jothi, J. S., Habib, M. R., & Iqbal, A. (2014). Evaluation of nutritional and sensory quality characteristics of pumpkin pies. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, 1(07), 1091–1097.
17. Uchasnyky proektiv Wikimedia. (2011b, 19 lypnia). Konservuvannia — Vikipediia. Vikipediia. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Konservuvannia>
18. Hyun, J. E., Kim, J. Y., Kim, E. M., Kim, J. C., & Lee, S. Y. (2019). Changes in microbiological and physicochemical quality of dried persimmons (Diospyros kaki Thunb.) stored at various temperatures. *Journal of Food Quality*, 2019(1), 6256409. Doi: 10.1155/2019/6256409
19. Caballero-Gutiérrez, B. L., Márquez-Cardozo, C. J., Ciro-Velásquez, H. J., & Cortés-Rodríguez, M. (2025).

- Pumpkin powder with co-products seeds and peel: effect on the physicochemical and functional properties by spray drying. *Applied Food Research*, 5(1), 100879. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100879>
20. Joudi-Sarighayeh, F., Abbaspour-Gilandeh, Y., Kaveh, M., & Hernández-Hernández, J. L. (2022). The Optimization of the Physical–Thermal and Bioactive Properties of Pumpkin Slices Dried in a Hybrid Microwave–Convective Dryer Using the Response Surface Method. *Agronomy*, 12(10), 2291. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102291>
 21. Lucan, C. A., Cugorean, M. I., Gălan, I. M., Ciobanu, A., Pop, A., Oprinescu, C. I., ... & Hădărugă, N. G. (2024). State-of-the-art on the Dehydration and Drying of Cucurbita Species. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Food Science and Technology*, 81(2), 1-14.
 22. Can, A. (2007). An analytical method for determining the temperature dependent moisture diffusivities of pumpkin seeds during drying process. *Appl Therm Eng*, 27, 682-7. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.030>
 23. Mashitoa, F.M., Shoko, T., Shai, J.L., Slabbert, R.M., Sultanbawa, Y. & Sivakumar, D. (2021). Influence of Different Types of Drying Methods on Color Properties, Phenolic Metabolites and Bioactivities of Pumpkin Leaves of var. Butternut squash (*Cucurbita moschata* Duchesne ex Poir). *Front. Nutr.* 8, 694649. doi: 10.3389/fnut.2021.694649
 24. Mohammed, H. H., Tola, Y. B., Taye, A. H., & Abdisa, Z. K. (2022). Effect of pretreatments and solar tunnel dryer zones on functional properties, proximate composition, and bioactive components of pumpkin (*Cucurbita maxima*) pulp powder. *Heliyon*, 8(10). <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10747>
 25. Grassino, A. N., Karlović, S., Šošo, L., Dujmić, F., Sabolović, M. B., Marelja, M., & Brnčić, M. (2024). Influence of Different Drying Processes on the Chemical and Texture Profile of *Cucurbita maxima* Pulp. *Foods*, 13(4), 520. <https://doi.org/10.3390/foods13040520>
 26. Henriques, F., Guiné, R., & João Barroca, M. (2012). Chemical properties of pumpkin dried by different methods. *Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam*, 7(1-2), 98-105.
 27. Santos, L.G., Martelli, S.M. & Werle, L.O. Carotenoid retention in mini-moranga pumpkin: the role of temperature in the kinetics and thermodynamic parameters of hot-air drying. *J Food Sci Technol* (2025). <https://doi.org/10.1007/s13197-025-06301-3>
 28. Sniezhhin Yu.F., Petrova Zh.O. (2007). *Teplomasoobminni protsesy pid chas oderzhannia karotynovmistnykh poroshkiv*. Kyiv: VD «Akademperiodyka».
 29. Hosen, M., Rafii, M. Y., Mazlan, N., Jusoh, M., Oladosu, Y., Chowdhury, M. F. N., Muhammad, I., & Khan, M. M. H. (2021). Pumpkin (*Cucurbita* spp.): A Crop to Mitigate Food and Nutritional Challenges. *Horticulturae*, 7(10), 352. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100352>
 30. Hussain, A., Kausar, T., Sehar, S., Sarwar, A., Ashraf, A. H., Jamil, M. A., ... & Zerlasht, M. (2022). Utilization of pumpkin, pumpkin powders, extracts, isolates, purified bioactives and pumpkin based functional food products: A key strategy to improve health in current post COVID 19 period: An updated review. *Applied Food Research*, 2(2), 100241. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100241>
 31. Hussain, A., Kausar, T., Sehar, S., Sarwar, A., Ashraf, A. H., Jamil, M. A., ... & Majeed, M. A. (2022). A Comprehensive review of functional ingredients, especially bioactive compounds present in pumpkin peel, flesh and seeds, and their health benefits. *Food Chemistry Advances*, 1, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100067>
 32. Adiletta, G., Wijerathne, C., Senadeera, W., Russo, P., Crescitelli, A., & Di Matteo, M. (2018). Dehydration and rehydration characteristics of pretreated pumpkin slices. *Italian Journal of Food Science*, 30(4). <https://doi.org/10.14674/IJFS-1176>
 33. Petrova, Z., & Grakov, D. (2025). Teplomasoobminni protsesy pid chas oderzhannia kombinovanykh karotynovmistnykh produktiv. *Teplofizyka ta Teploenerhetyka*, 47(1), 30-40. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.3>

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS AND MATERIAL FORM ON THE DRYING OF MUSCAT PUMPKIN (*CUCURBITA MOSCHATA*)

Petrova Zh.O., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Novikova Y.P., PhD

Abstract. The pumpkin family (*Cucurbitaceae*) is the most widespread in the world, comprising about 956 species, including pumpkins, cucumbers, melons, watermelons, squash, and many others. Pumpkins (*Cucurbita*) are divided into edible and fodder varieties. The five most popular species grown worldwide are musk pumpkin (*Cucurbita moschata*), which has been widely cultivated since ancient times. The demand for pumpkin is growing every year due to its functional properties. It is rich in carotenoids, B vitamins, minerals and trace elements, pectin's, dietary fiber, polysaccharides, while being low in calories. The carotenoids contained in pumpkin are natural pig-

ments that are converted in the human body into vitamin A, which is essential for vision, immune function, and skin health. Pumpkin is a seasonal product that can be stored using well-known preservation methods. Drying is the most common and oldest method of preservation. Pumpkins have been dried using various methods, such as sun drying, convective drying, microwave drying, vacuum microwave drying, freeze drying, infrared drying, and various combined methods. Convective drying is the most common method, but the demand for combined methods is constantly growing. Therefore, the aim of this work is to study stepwise and combined drying modes, as well as the influence of material shape, to reduce the duration of the process. The research was carried out on an experimental convective stand equipped with additional infrared lamps. Before the experiments, the pumpkin was washed, cleaned, and cut into slices and shavings. It was determined that the use of these proposed modes allows for a reduction in drying time compared to 65 °C. The influence of the shape of the material on drying was investigated. Comparing the shape of the material, it can be concluded that the modes affect it differently. Thus, when drying pumpkin shavings, the duration of the stepwise mode is 1.1 times shorter than that of the combined mode. And when drying slices, the duration of drying in the combined mode is 1.3 times shorter than that of the stepwise mode. When drying pumpkin slices, the dehydration time is 1.7–2.3 times shorter than for grated pumpkin, regardless of the mode. Slice drying is well suited for the production of chips, while the chips can be used in the production of functional powders.

Keywords: drying, pumpkin, convection, combined drying, intensification.

Список використаної літератури

1. Intrastook J., Tsusaka T. W., Anal A. K. Trends and current food safety regulations and policies for functional foods and beverages containing botanicals // *Journal of food and drug analysis*. 2024, 32(2). P. 112–139. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3499>
2. Designing Nutrition for Health-Incorporating Dietary By-Products into Poultry Feeds to Create Functional Foods with Insights into Health Benefits, Risks, Bioactive Compounds, Food Component Functionality and Safety Regulations / P.A. Vlaicu et al // *Foods (Basel, Switzerland)*. 2023, 12(21), 4001. <https://doi.org/10.3390/foods12214001>
3. Poe M.R., McLain R.J., Emery M., Hurley P.T. Urban Forest justice and the rights to wild foods, medicines, and materials in the city // *Human ecology*. 2013, 41(3). P. 409–422. <https://doi.org/10.1007/s10745-013-9572-1>
4. Meléndez-Martínez A.J., Stinco C.M., Mapelli-Brahm P. Skin Carotenoids in Public Health and Nutricosmetics: The Emerging Roles and Applications of the UV Radiation-Absorbing Colourless Carotenoids Phytoene and Phytofluene // *Nutrients*. 2019., 11, 1093. <https://doi.org/10.3390/nu11051093>
5. Переробка хурми (*Diospyros Kaki L.*) сушінням / Ж.О. Петрова та інші // *Scientific Works*. 2024, 88(1). С. 19–29. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2955>
6. Bas T. G. Bioactivity and Bioavailability of Carotenoids Applied in Human Health: Technological Advances and Innovation // *International journal of molecular sciences*. 2024, 25(14), 7603. <https://doi.org/10.3390/ijms25147603>
7. Shalaby E., Azzam, G. M. (Eds.). *Antioxidants in foods and its applications*. BoD–Books on Demand, 2018. 178 p. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.72008>
8. Mussagy C. U., Winterburn J., Santos-Ebinuma V. C., Pereira J. F. B. Production and extraction of carotenoids produced by microorganisms // *Applied microbiology and biotechnology*. 2019, 103(3). P. 1095–1114. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9557-5>
9. Jamuna S., Karthika K., Paulsamy, S. J. J. R. B. Phytochemical and pharmacological properties of certain medicinally important species of Cucurbitaceae family—a review // *Journal of Research in Biology*. 2015, 5(6). P.1835–1849.
10. Evaluation of Sub-acute toxicity and safety profile of Charmagaz seed oil in rats / A. Adil et al // *PloS one*. 2025, 20(7), e0327697. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327697>
11. Therapeutic importance of Cucurbitaceae: A medicinally important family / P. K. Mukherjee et al // *Journal of ethnopharmacology*. 2022, 282, 114599. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2021.114599>
12. Oyeleke A. W., Oluwajuyitan D. T., Oluwamukomi O. M., Enujiugha N. V. Amino Acid Profile, Functional Properties and In-Vitro Antioxidant Capacity of Cucurbita Maxima and Cucurbita Mixta Fruit Pulps and Seeds // *European Journal of Nutrition and Food Safety*. 2019, 10(4). P.224–241. <https://doi.org/10.9734/ejns/2019/v10i430117>
13. Physicochemical, nutritional and functional properties of *Cucurbita moschata* / X. Men et al // *Food science and biotechnology*. 2020, 30(2). P.171–183. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00835-2>
14. Evaluation of the Antioxidant and Antimicrobial Properties of Pumpkin Pulp During Storage Through the Ultrasonication Process / Z. Arshad et al // *Food Science and Engineering*. 2025, 6(1). P.87–102. <https://doi.org/10.37256/fse.6120255657>
15. Al-Anoos I. M., El-dengawy R., Hasanin, H. Studies on chemical composition of some Egyptian and Chinese pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed varieties // *Journal of Plant Science & Research*. 2015, 2(2). P.1–4.

16. Islam M., Jothi J. S., Habib M. R., Iqbal A. Evaluation of nutritional and sensory quality characteristics of pumpkin pies // *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*. 2014, 1(07). P.1091-1097.
17. Учасники проєктів Вікімедіа. Консервування – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Консервування> (дата звернення: 01.07.2025).
18. Changes in Microbiological and Physicochemical Quality of Dried Persimmons (*Diospyros kaki* Thunb.) Stored at Various Temperatures / J.-E. Hyun et al // *Journal of Food Quality*. 2019. Vol. 2019. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2019/6256409>.
19. Caballero-Gutiérrez B. L., Márquez-Cardozo C. J., Ciro-Velásquez H. J., Cortés-Rodríguez M. Pumpkin powder with co-products seeds and peel: effect on the physicochemical and functional properties by spray drying // *Applied Food Research*. 2025, 5(1), 100879. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100879>
20. Joudi-Sarighayeh F., Abbaspour-Gilandeh Y., Kaveh M., Hernández-Hernández J. L. The Optimization of the Physical–Thermal and Bioactive Properties of Pumpkin Slices Dried in a Hybrid Microwave–Convective Dryer Using the Response Surface Method // *Agronomy*. 2022, 12(10), 2291. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102291>
21. State-of-the-art on the Dehydration and Drying of Cucurbita Species / C. A. Lucan et al // *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Food Science and Technology*. 2024, 81(2). P.1-14.
22. Can A. An analytical method for determining the temperature dependent moisture diffusivities of pumpkin seeds during drying process // *Appl Therm Eng.* 2007, 27, 682-7. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.030>.
23. Influence of Different Types of Drying Methods on Color Properties, Phenolic Metabolites and Bioactivities of Pumpkin Leaves of var. Butternut squash (*Cucurbita moschata* Duchesne ex Poir) / F.M. Mashitoa et al // *Front. Nutr.* 2021, 8, 694649. doi: 10.3389/fnut.2021.694649
24. Mohammed H. H., Tola Y. B., Taye A. H., Abdisa Z. K. Effect of pretreatments and solar tunnel dryer zones on functional properties, proximate composition, and bioactive components of pumpkin (*Cucurbita maxima*) pulp powder // *Heliyon*. 2022, 8(10). <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10747>
25. Influence of Different Drying Processes on the Chemical and Texture Profile of *Cucurbita maxima* Pulp / A. N. Grassino et al // *Foods*. 2024, 13(4), 520. <https://doi.org/10.3390/foods13040520>
26. Henriques F., Guiné R., João Barroca M. Chemical properties of pumpkin dried by different methods // *Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam*. 2012, 7(1-2). P. 98-105.
27. Santos L.G., Martelli S.M. Werle, L.O. Carotenoid retention in mini-moranga pumpkin: the role of temperature in the kinetics and thermodynamic parameters of hot-air drying // *J Food Sci Technol*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s13197-025-06301-3>
28. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О. Тепломасообмінні процеси під час одержання каротиновмістних порошків. Київ: ВД «Академперіодика», 2007. 162с.
29. Pumpkin (*Cucurbita* spp.): A Crop to Mitigate Food and Nutritional Challenges / M. Hosen et al // *Horticulturae*. 2021, 7(10), 352. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100352>
30. Utilization of pumpkin, pumpkin powders, extracts, isolates, purified bioactives and pumpkin based functional food products: A key strategy to improve health in current post COVID 19 period: An updated review / A. Hussain et al // *Applied Food Research*. 2022), 2(2), 100241. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100241>
31. A Comprehensive review of functional ingredients, especially bioactive compounds present in pumpkin peel, flesh and seeds, and their health benefits / A. Hussain et al // *Food Chemistry Advances*. 2022, 1, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100067>
32. Adiletta G., Wijerathne C., Senadeera W., Russo P., Crescitelli A., Di Matteo, M. Dehydration and rehydration characteristics of pretreated pumpkin slices // *Italian Journal of Food Science*. 2018. 30(4). <https://doi.org/10.14674/IJFS-1176>
33. Петрова Ж.О., Граков Д.П. Тепломасообмінні процеси під час одержання комбінованих каротиновмісних продуктів // *Теплофізика та Теплоенергетика*. 2025, 47(1), С. 30-40. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.3>

Отримано в редакцію 16.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 16.06.2025

Approved 02.09.2025

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПАРОКОНТАКТНОГО ТЕРМО-КОАГУЛЯТОРА З РОЗПОДІЛЕНИМ ВВОДОМ ПАРИ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Ощипок І. М. д-р техн. наук, професор
Львівський національний університет ім. Івана Франка, м. Львів

Анотація. У роботі розглянуто процес коагуляції білка та його вплив на якісні характеристики і структуру поліпшених ліверно-паштетних виробів при використанні одного з перспективних методів термічної обробки — прямого контакту пари з м'ясним фаршем. Внутрішня, безумовна, перебудова молекули білка - сама денатурація - виявляється в агрегації поліпептидних ланцюгів. Визначено ключові аспекти теплообміну у паро-контактних термокоагуляторах (ТК) з розподіленим введенням пари, що безпосередньо впливають на однорідність прогріву та якість готового продукту. Підкреслено важливість оптимального добору температури, тиску та швидкості пари для різних видів м'ясної сировини з метою уникнення переварювання, втрати поживних речовин та погіршення органолептичних властивостей. Основну увагу приділено необхідності забезпечення високої швидкості теплообміну і рівномірної коагуляції білків для досягнення бажаної текстури, вологості й смаку готової продукції. Показана важливість забезпечення правильного поєднання температури та часу обробки, оскільки для різних видів м'ясної сировини потрібні різні режими. Одержання продукту з певною текстурою або вмістом води вимагає специфічних умов проведення процесу. Кінцевий продукт з найкращою текстурою має забезпечувати правильну вологість, яка залежить від температури пари і її розподілу в ТК. Надмірне зневоднення призводить до втрати якості м'яса. Показано важливий фактор який має контроль за коагуляцією білків під час теплової обробки, що вирішальним чином впливає на текстуру і смакові якості виробу. Швидка і рівномірна коагуляція дозволить досягти бажаних властивостей.

Ключові слова: коагуляція, білок, термокоагулятор, пара, вироби

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями На нинішній день, на ринку устаткування для м'ясної промисловості лідируючі позиції обіймають закордонні компанії. Підприємства м'ясопереробної галузі, за різними оцінками, на 85–90 % оснащені імпортним устаткуванням. З іншого боку справді, на багатьох м'ясопереробних підприємствах потрібна повна модернізація виробничих потужностей. В поточних умовах конкурентної боротьби на ринку збуту готової продукції пріоритет мають ті підприємства, які випускають продукцію, що відповідає сучасним мінливим вимогам щодо якості, гігієни і безпеки. Висока якість устаткування, його технічна досконалість, енергоощадність дуже сильно впливають на ці показники. Важливим чинником стає розробка та удосконалення вітчизняного устаткування [2,14].

Інтенсифікація попередньої термообробки м'ясної сировини актуальне завдання подальшого удосконалення технологічних ліній з поліпшення ліверних і-паштетних виробів. Одним з перспективних способів термообробки є прямий контакт пари з продуктом [3,4].

Процес нагрівання білків супроводжується розгортанням глобул і вивільненням вільних радикалів, що сприяє утворенню міжмолекулярних зв'язків, агрегації частинок і їх осадження. Це, у свою чергу, призводить до зниження розчинності білків [6,9]. Внутрішня перебудова молекули білка, тобто власне денатурація, проявляється в агрегації поліпептидних ланцюгів. Цей процес відбувається у два етапи: спочатку збільшується розмір білкових частинок без їх виходу з розчину, а потім настає етап згортання.

Агрегація денатурованих молекул або, інакше кажучи, зміна їхньої четвертинної структури, що є наслідком попередніх змін у вторинній та третинній структурі, супроводжується зменшенням кількості ліофільних центрів молекули білка. Це знижує здатність м'ясної тканини утримувати воду. Агрегація і згортання білків сприяють формуванню безперервного просторового каркасу у готовому продукті [13].

Перебудова білкової молекули під час денатурації знижує її гідрофільність і посилює гідрофобні властивості тканин. Унаслідок цього ослаблюється стабілізуючий ефект гідратаційних шарів поблизу полярних груп. Внутрішньо-молекулярні зв'язки замінюються на міжмолекулярні, в результаті чого утворюється нерозчинний згусток — відбувається згортання білків. У розведених розчинах білки випадають у вигляді пластівців, а в концентрованих — утворюють коагель [2,9].

Денатурація білка також супроводжується порушенням структури води. У результаті зростає значення вторинних сил (зокрема, Ван - дер - Ваальсових), що діють між протофібрилами, і молекула міозину набуває більш компактної форми. Частина води при цьому виділяється.

Внаслідок денатурації та згортання м'язових білків підвищуються міцнісні властивості м'яса. Натомість варіння колагену та його подальший гідроліз мають протилежний ефект — знижують ці властивості, робля-

чи продукт більш м'яким.

Теплообмінні процеси в пароконтактних термокоагуляторах (ТК) з розподіленим вводом пари для обробки м'ясної сировини є важливим чинником, оскільки від ефективності цих процесів залежить якість кінцевого продукту [2,4,6]. Ось кілька ключових аспектів та важливих питань, які слід враховувати рис 1.



Рис. 1 – Ключові аспекти забезпечення роботи пароконтактних термокоагуляторів з розподіленим вводом пари

Важливим фактором роботи устаткування є забезпечення рівномірного розподілу пари в ТК. Неоднорідний її розподіл може призвести до нерівномірного прогріву м'ясної сировини, що, в свою чергу, погіршує якість оброблюваного продукту [2,6,9]. Температура, тиск і швидкість пари повинні бути обґрунтовані для кожного виду сировини та виду обробки, щоб досягти бажаного результату. Занадто висока температура може спричинити переварювання або втрату поживних речовин [7,8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з основних завдань, під час роботи ТК, є досягнення високої швидкості теплообміну між парою та сировиною яка обробляється, щоб мінімізувати теплову обробку, заощаджуючи енергоресурси і зберігаючи органолептичні властивості продукту [5-7]. При цьому, важливо забезпечити правильне поєднання температури та часу обробки, оскільки для різних видів м'ясної сировини потрібні різні режими. Наприклад, обробка для одержання продукту з певною текстурою або вмістом вологи вимагатиме специфічних умов проведення процесу.

Для отримання кінцевого продукту з найкращою текстурою важливо забезпечити відповідну вологість, яка може залежати від температури пари і її розподілу в ТК. Надмірне зневоднення може призвести до втрати якості м'яса. Важливим є контроль за коагуляцією білків під час теплової обробки, оскільки це визначає текстуру і смакові якості продукту [9]. Швидка і рівномірна коагуляція дозволить досягти бажаних властивостей.

Для підвищення ефективності процесу обробки важливо зменшити енергетичні витрати [8,14]. Використовуючи, ефективні теплообмінні елементи і розраховані параметри паропостачання для обробки м'ясної сировини. Під час обробки парою важливо забезпечити відповідний рівень температури для знищення патогенних мікроорганізмів, що гарантує безпечність продукту для споживання [11-13]. Ентерококи в продуктах харчування – дилема безпеки харчових продуктів. Застосування лізоциму, нізину та ЕДТА у присутності нітриту та хлориду натрію при 24 °C для інтерактивного пригнічення псування м'яса та патогенних бактерій. Врахування впливу температури та активності води на швидкість росту плісняви, що спричиняє псування харчових продуктів.

Кількість тепла пароутворення (g) впливає на конденсацію пари передає приховану теплоту і є дуже ефективним джерелом нагрівання. Використання пари з високим g дозволяє досягти швидкої коагуляції без перегрівання [1].

Впровадження високоефективного тепло- та масообмінного обладнання у виробництво з удосконаленням технологічних процесів переробки харчових продуктів, зокрема при виробництві паштетної – і ліверної продукції, вимагає впровадження сучасного обладнання з підвищеними показниками теплової та масообмінної ефективності. Одним із перспективних напрямів є розробка і впровадження теплообмінних систем на

основі використанням водяної пари як теплоносія та масообмінного агента. Механізм впливу водяної пари на масообмін у системі "тверде тіло – розчин – пара". У процесі обробки фаршевої маси водяна пара здійснює інтенсивний теплоперенос і масообмін завдяки фазовому переходу (конденсації) на межі твердої та рідкої фаз. Пара проникає в структуру продукту, сприяючи активному витісненню вологи, підвищенню температури та прискоренню коагуляції білків. Відбувається одночасна передача тепла та маси, що суттєво покращує однорідність термічної обробки [2,3,4,8].

Фізичні властивості рідин (вода, пара, емульсії тощо) у термокоагуляторах безпосередньо впливають на ефективність теплопередачі, швидкість і повноту коагуляції білків, однорідність термічного впливу та енергоефективність процесу. Правильний підбір рідини з урахуванням її теплопровідності, в'язкості, густини та теплоємності є критичним для якісної роботи термокоагуляторів.

Постановка завдання. Одним з основних завдань, під час роботи ТК, є вивчення умов досягнення високої швидкості теплообміну між парою та сировиною яка обробляється, щоб мінімізувати теплову обробку і зберегти органолептичні властивості продукту. Важливо забезпечити правильне поєднання температури та часу обробки, оскільки для різних видів м'ясної сировини потрібні різні режими. Одержання продукту з певною текстурою або вмістом вологи вимагає специфічних умов проведення процесу. Необхідно забезпечувати відповідну вологість, яка залежить від температури пари і її розподілу в ТК для отримання кінцевого продукту з найкращою текстурою. Надмірне зневоднення може призвести до втрати якості м'яса. Важливим також є контроль за коагуляцією білків під час теплової обробки, оскільки це визначає текстуру і смакові якості продукту. Швидка і рівномірна коагуляція дозволить досягти бажаних властивостей.. Використання ефективних теплообмінних елементів і обґрунтування параметрів паропостачання можуть значно зменшити витрати енергії на обробку. Під час обробки м'ясної сировини парою також важливо забезпечити відповідний рівень температури для знищення патогенних мікроорганізмів, що гарантує безпечність продукту для споживання. Усі ці фактори взаємопов'язані, і правильний підбір кожного з них є важливим для досягнення високої якості кінцевого продукту, збереження його харчової цінності і енергоефективності обладнання.

Пароконтактні апарати які експлуатуються з розподіленим вводом пари в подрібнену на вовчку сировину, при її транспортуванні шнеком, забезпечують рівномірне прогрівання маси, покращують теплообмінні процеси та сприяють більш повній обробці білкових фракцій завдяки ефективнішому контакту пари з сировиною протягом усього шляху транспортування. Аналітичний опис теплообміну в таких апаратах є дуже складним через труднощі визначення фактичної поверхні взаємодії сировини з парою.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оцінку енергоефективності пароконтактного термокоагулятора розглянемо на моделі теплообміну в апараті з розподіленим вводом пари у фарш, який розглядається як квазітверда структура потоку в гвинтовому каналі за умови пристінного ковзання м'ясної сировини. При цьому передбачається, що сировина в шнековому апараті рухається у вигляді спіралі.

Типову діаграму швидкості побудуємо у вигляді графіка, де по осі x відображено положення частин фаршу в перерізі апарату (від осі шнека до стінок апарату), а по осі y — швидкість руху частинок фаршу. Форма кривої руху може бути з різким зменшенням швидкості до периферії.

У межах шнекової зони, де частини фаршу контактують безпосередньо з шнеком, швидкість їх руху буде максимальною через механічне обертання шнека, ближче до виходу з апарату швидкість частин зазвичай зменшується, оскільки вони втрачають енергію через тертя та інші фактори. Розглянемо основні складові руху частин фаршу з квазітвердою структурою, які зображені на діаграмі рис 2. При цьому будь-яка його частина переміщається вздовж гвинтового каналу з швидкістю ω_k і одночасно обертається з шнеком з швидкістю $\omega_{ш}$, (α – кут нахилу гвинтової лінії шнека), ω_x проекція швидкості ω_k на вісь x .

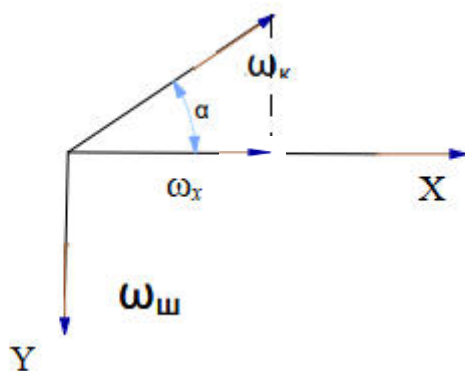


Рис. 2 – Діаграма швидкостей руху частин фаршу з квазітвердою структурою в шнековому апараті

Для точнішого моделювання такої діаграми потрібно враховувати різні фактори: коефіцієнт тертя, геометрію шнека та взаємодію між частинами фаршу.

Діаграма швидкостей частин фаршу при русі з квазітвердою структурою в шнековому апараті зазвичай відображає залежність швидкості руху різних його частин від розташування в апараті та від характеристик самого апарату. Для шнекових апаратів, де фарш має квазітвердий характер, важливо враховувати деякі фізичні і технологічні площини, такі як зміщення і взаємодія частин фаршу з шнеком і стінками апарату.

Характеристику швидкостей руху частин фаршу в термокоагуляторі зобразимо на рис. 3

Швидкість на різних ділянках шнекового апарату

- Розподіл швидкості частин по перерізу апарату

Вплив консистенції фаршу

- Інтенсивність змішування та розрідження

Рис. 3 – Характеристика швидкості частин фаршу при русі з квазітвердою структурою в шнековому апараті

В шнекових апаратах як правило спостерігається різниця у швидкостях частин фаршу в залежності від їхнього розташування в потоці. Фарш з квазітвердою структурою має властивості, схожі на тверді тіла, тому частини можуть рухатися не так вільно, як у рідких або м'яких середовищах. Це може призводити до більш нерівномірного розподілу швидкостей в потоці. Швидкість також залежить від того, наскільки добре змішується фарш і чи виникає додаткове розрідження через тертя, зминання або подрібнення частин фаршу

Для точного математичного чи числового моделювання цієї діаграми, можна застосувати рівняння для потоку в шнекових апаратах, наприклад, рівняння Нав'є-Стокса для густих матеріалів або відповідні емпіричні моделі для потоку квазітвердих речовин.

Температурне поле в фарші при підведенні теплоти парою можна описати за допомогою рівнянь теплопередачі, зокрема рівняння дифузії тепла. Для цього використаємо математичні вирази, які враховують теплообмін між паром та продуктом (фаршем) і розподіл температури в ньому.

Під час приготування виробів можуть відбуватися різні види тепло-масопередачі: в твердих або рідких середовищах з одного боку та на межі між ними з іншого. Коли йдеться про передачу теплоти на межі між двома матеріальними частинами, можна записати тепловий потік Q за загальним рівнянням:

$$Q = hA\Delta T \quad (1)$$

де ΔT — це різниця температур з обох боків межі, °C;

A — площа межі, м²

h — коефіцієнт теплопередачі між фаршем і паром.

Саме цей коефіцієнт теплопередачі може бути більш або менш простою функцією, яка залежить від багатьох фізичних параметрів, зокрема від різниці температур.

Загальне рівняння для температурного поля в безперервному середовищі (рівняння дифузії теплоти) має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T, \quad (2)$$

де: T — температура (функція простору та часу), °C,

t — час,

λ — коефіцієнт теплопровідності фаршу,

∇^2 — оператор Лапласа (який визначає просторове розподілення температури).

Для задачі з підведенням теплоти паром температура в різних точках фаршу змінюватиметься з часом, і цей процес можна описати за допомогою рівняння з граничними умовами. Якщо фарш знаходиться в контакті з паром, температура на межі контакту буде визначатися температурою пари. На поверхні фаршу, де є контакт з навколишнім середовищем (простір апарату), можна використати умови теплообміну з навколишнім середовищем.

Граничні умови першого роду запишемо наступним чином:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{поверхня фаршу}} = -h(T_{\text{пари}} - T_{\text{фаршу}}) \quad (3)$$

де: $T_{\text{пари}}$ — температура пари, °C,

$T_{\text{фаршу}}$ — температура на поверхні фаршу, °C.

Для моделювання температурного поля в середині фаршу можна використати числові методи, наприклад, методи кінцевих елементів або методи кінцевих різниць, щоб обчислити температурне поле на різних глибинах фаршу. Температура в середині буде залежати від теплопередачі через молекули фаршу і змінюватиметься з часом, поки не досягне стаціонарного розподілу. При цьому вектор швидкості сировини буде направлений вздовж гвинтового каналу під кутом α до осі шнека. Проекція ω_k на вісь x (рис. 2) становитиме вектор поздовжньої швидкості сировини ω_x , яку визначимо з виразу.

$$\omega_x = \frac{G_s}{3600 F_c \rho \phi}, \quad (4)$$

де G_s — витрата сировини (продуктивність апарату), кг/г;

ρ — щільність продукту, кг/м³;

ϕ — коефіцієнт, враховуючий умови руху сировини;

F_c — площа поперечного січення апарату, м².

$$F_c = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} - \frac{b \sqrt{S^2 + (\pi d)^2} (D - d)}{2S}, \quad (5)$$

де D — діаметр шнека, м;

d — діаметр вала шнека, м;

b — товщина витка шнека;

S — крок шнека, м.

Прийняті допущення про розподіл сировини яка обертається в нерухомих напрямних на елементи гвинтового потоку (елементарні прошарки або умовні сферичні частинки) з товщиною δ дозволяють оцінити геометричні характеристики термооброблюваної сировини.

$$\delta = \frac{w_x}{n \cdot m}, \quad (6)$$

де n — частота обертання шнека, с⁻¹;

m — число напрямних з форсунками в поперечному січенні корпусу.

З урахуванням припущення про можливе дроблення елементарних шарів при їх ефективному перемішуванні в апараті задача теплообміну зводиться до розгляду нагрівання умовної сферичної частинки з характерним розміром δ . Оскільки має місце конденсація пари безпосередньо у фарш, то нагрівання прошарку проходить при граничних умовах першого роду (тобто температуру поверхні сировини приймаємо рівною температурі пари). Розраховуємо тривалість прогріву залежно від радіусу частинок $\tau = f(R)$, де $R = \delta/2$.

Тоді довжину апарата, на якій продукт нагрівається до заданої температури, визначимо співвідношенням $L_H = w_x \tau$.

В результаті наближеного аналітичного розв'язку задачі про нагрівання сферичної частинки радіусом R з застосуванням гіпотези про наявність «температурного фронту», опускаючи громіздкі математичні викладки, отримаємо вираз для визначення тривалості прогрівання центру частинки до заданої температури

$$\tau = \frac{R^2 [29 - 48 \ln(1 - U)]}{720a}, \quad (7)$$

де $U = \frac{u_k - u_n}{u_p - u_n}$ — відносна температура;

u_k — кінцева температура центра частинки, °C;

u_n — початкова температура фаршу, °C;

u_p — температура пари на вході в апарат, °C;

a — температуропровідність оброблюваної сировини м²/с.

Враховуючи конструктивні особливості апарату, розмір частинок і виконуючи деякі перетворення, отримаємо вираз, зручний для розрахунку і аналізу

$$L_H = \frac{\Psi K G_s^2}{4 a n \rho^2}, \quad (8)$$

де $\Psi = 0,04 - 0,067 \ln(1 - Y)$ — технологічний параметр, який залежить від початкової і кінцевої темпера-

тури фаршу і від температури пари на вході в апарат;

K – конструктивний параметр апарату;

l_f – відстань між напрямними з форсунками, м;

Y – конструктивний параметр відхилення відстані, м.

Середньо-масову температуру визначимо за формулою

$$u = \frac{2u_c + 3u_p}{5}, \quad (9)$$

де u_c – температура центра чистинки, °С;

u_p – температура поверхні чистинки, °С.

Таким чином, отриманий вираз для розрахунку довжини апарату, який враховує теплофізичні характеристики термооброблюваної сировини, технологічні параметри нагрівання, конструктивні особливості апарату.

Отримані результати розрахунку узгоджуються з експериментальними даними (рис. 4) з точністю до 18 %.

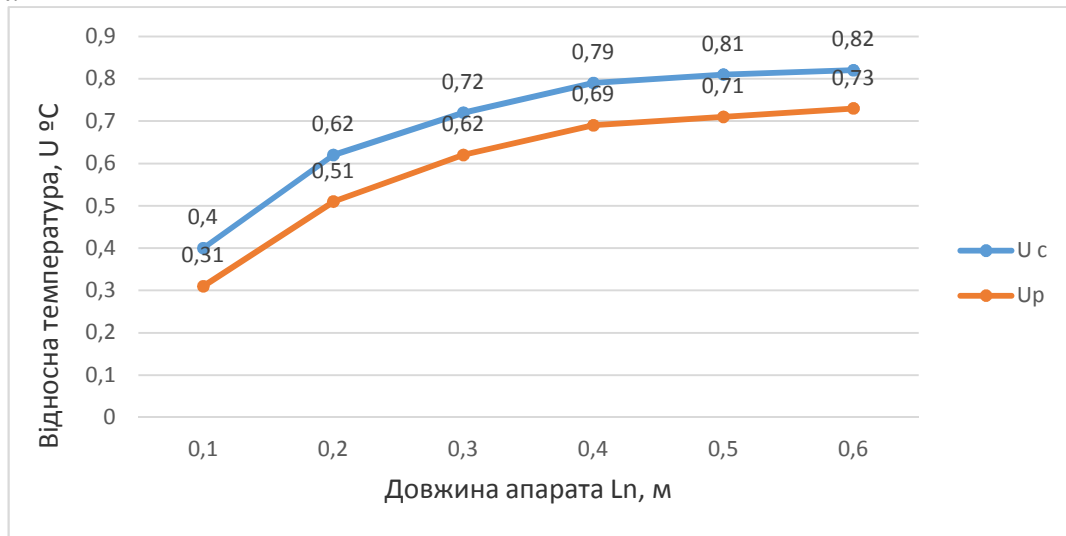


Рис. 4 – Експериментальні і розрахункові дані відносної температури від довжини апарату

Отриманий вираз (8) може бути використаний для розрахунку при проектуванні пароконтактних термокоагуляторів з розподіленим вводом пари в сировину.

Для розрахунку температурного поля в фарші з урахуванням заданих параметрів можна взяти типові значення для теплових характеристик, наприклад курячого м'яса (фаршу).

Задані параметри:

Температура пари: $T_{\text{парі}}=110$ °С;

Початкова температура фаршу: $T_{\text{поч}}=20$ °С;

Кінцева температура фаршу: $T_{\text{кін}}=80$ °С;

Товщина фаршу: $B=30$ мм=0.03 м

Температурна теплоємність курячого м'яса (в середньому): $c_p=3.7$ кДж/(кг °С)

Теплопровідність курячого м'яса: $a=0.5$ Вт/м °С)

Коефіцієнт теплообміну між парою та поверхнею фаршу (для м'яса): $h=50$ W/(м² °С).

1. Тепловий потік через конвекцію (від пари до поверхні фаршу):

$$Q=50 \cdot 1 \cdot (110-20)=50 \cdot 90=4500 \text{ Вт}$$

2. Температурна зміна в середині фаршу:

Рівняння теплопередачі для простого одномірного потоку тепла має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

де γ — температурна дифузія фаршу:

$$\gamma = \frac{a}{\rho * C_p} = \frac{0.5}{1030 * 3.7} = 1.31 * 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$$

де: ρ — густина фаршу (курячого м'яса), приблизно $\rho=1030$ кг/м³

3. Оцінимо час до досягнення кінцевої температури за товщиною фаршу. Для простоти можна зробити грубу оцінку часу, необхідного для досягнення кінцевої температури в середині фаршу, використовуючи час

теплопереносу для однотипного процесу:

$$t = \frac{B^2}{\gamma} = \frac{0.0009}{1.31 \cdot 10^{-4}} = 6.87 \text{ с}$$

Ми отримали дуже грубу оцінку часу, що потрібен для досягнення рівноважної температури в середині фаршу через теплопровідність.

Тепловий потік через конвекцію (від пари до фаршу) при заданих параметрах становитиме 4500 Вт. Груба оцінка часу для досягнення кінцевої температури в середині фаршу є близько 6,87 секунд (але на практиці час буде значно більшим через більш складні процеси теплопередачі, які вимагають числового моделювання).

Розглянутий підхід дає основу для подальших точних розрахунків із використанням числових методів для більш складних сценаріїв.

Простежимо необхідні конструктивні і геометричні параметри апарата. Наприклад: $D=100$ мм, $d=40$ мм, $S=50$ мм, $b=2$ мм, $l_f=80$ мм, $m=3$.

Приймаючи $\phi=0,80$, визначаємо конструктивний параметр, $K=7,77 \cdot 10^{-5}$

Визначаємо технологічний параметр попередньо розрахувавши U : $U=0,67$, $\psi=0,114$.

Приймаючи, $a=12,2 \cdot 10^{-8}$ м²/с і $\rho=1030$ кг/м³. за рівнянням (8) розрахуємо довжину апарата

$$L_n = \frac{0,114 \cdot 7,77 \cdot 10^{-5} \cdot 9 \cdot 10^4}{4 \cdot 12,2 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 1,06 \cdot 10^6} = 0,77 \text{ м}$$

Встановлено, що при максимальному збереженні поживної цінності фаршу пароконтактне нагрівання збільшує вихід сировини на 4-6 %, зменшує тривалість термообробки в порівнянні з традиційною в 20-25 разів, скорочує чисельність обслуговуючого персоналу в 2,5 разів, зменшує витрату пари до 20 %.

Висновок. Удосконалення технологічних процесів переробки ковбасних виробів, зокрема при виробництві паштетної продукції, вимагає впровадження сучасного енергоощадного обладнання з підвищеними показниками теплової та масообмінної ефективності. Одним із перспективних напрямів є розробка і впровадження теплообмінних систем на основі використанням водяної пари як теплоносія та масообмінного агента. У процесі обробки паштетної маси водяна пара здійснює інтенсивний теплоперенос і масообмін завдяки фазовому переходу (конденсації) на межі твердої та рідкої фаз. Пара проникає в структуру продукту, сприяючи активному витісненню вологи, підвищенню температури та прискоренню коагуляції білків. Відбувається одночасна передача тепла та маси, що суттєво покращує однорідність термічної обробки.

Отриманий вираз для розрахунку довжини апарата з урахуванням енергоефективної роботи ТК, який враховує теплофізичні характеристики термо-оброблюваної сировини, технологічні параметри нагрівання його конструктивні особливості. Для більш точного результату розрахунку, фаршевої системи таких апаратів, необхідно використовувати числові методи, наприклад, метод кінцевих різниць або кінцевих елементів і розв'язку рівняння теплопередачі і опису температурного поля в кожній точці фаршу та відслідковувати зміну його температури.

Розраховано температурне поле в фарші з урахуванням заданих параметрів для типових значень теплових характеристик курячого фаршу. Встановлено, що при максимальному збереженні поживної цінності фаршу пароконтактне нагрівання збільшує вихід сировини на 4-6 %, зменшує тривалість термообробки в порівнянні з традиційною в 20-25 разів, скорочує чисельність обслуговуючого персоналу в 2,5 разів, зменшує витрату пари до 20 %.

References

1. Ponomarenko, V. V., Pushanko, M. M., Slyusenko, A. M., & Yeshchenko, O. A. (2019). *Influence of the physical properties of liquids on the operation of liquid-gas ejectors*. *Naukovi pratsi Natsionalnogo universytetu kharkovykh tekhnologii*, 25(2), 111–120.
2. Melnyk, V. A., Boiko, V. O., Pryadko, M. O., Naumchyk, S. A., et al. (2017). *Experience in introducing high-efficiency heat and mass transfer equipment into production: From theory to implementation*. *Tsukor Ukrainy*, (2[134]), 12–17.
3. Myronchuk, V. H. (1998). *Mechanism of the influence of water vapor on mass transfer in the solid-solution-vapor system*. *Kharkova promyslovist*, (43–44), 150–154.
4. Petrenko, V. P., Riabchuk, O. M., Pylypenko, O. Yu., & Myroshnyk, M. M. (2015). *Modeling of thermohydrodynamic processes in boiling downward annular flows of sugar solutions*. *Tsukor Ukrainy*, (8[116]), 20–25.
5. Moklyak, V. F., Forsyuk, A. V., & Vasylenko, S. M. (2014). *Study of the average volumetric vapor content of a dynamic two-phase layer in closed thermosiphons*. *Tsukor Ukrainy*, (6[102]), 20–23.
6. Petrenko, V. I., Pryadko, M. O., Riabchuk, O. M., & Myroshnyk, M. M. (2017). *Features of calculation of heat exchangers using rarefied steam from the tail part of the evaporation plant*. *Tsukor Ukrainy*, (3[135]), 6–10.

7. Petrenko, V. P., Pryadko, M. O., & Riabchuk, O. M. (2013). *Efficiency of using film evaporators and calculation of heat transfer intensification to boiling sugar solutions in them. Tsukor Ukrainy*, (6[90]), 21–25.
8. Pohorilyi, T. M., Myronchuk, V. H., & Shtangeiev, K. O. (2016). *Analytical expressions for determining the contact time of cell systems with the surface of the heating tube of the vacuum apparatus heating chamber. Naukovi pratsi Natsionalnogo universytetu kharchovykh tekhnologii*, 22(1), 119–128. [Electronic resource].
9. Prylipko, T. M., Kutsyi, V. M., & Yanovych, V. P. (2014). *Justification of operating parameters for the sterilization process of turkey meat pâtés. Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnologii*, 2(46), 177–182.
10. Publications Office of the European Union. (2011). *Food: From farm to fork statistics*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
11. Franz, C., Stiles, M. E., Schleifer, K. H., & Holzapfel, W. H. (2003). Enterococci in foods – A conundrum for food safety. *International Journal of Food Microbiology*, 88, 105–122.
12. Gill, A. O., & Holley, R. A. (2003). Interactive inhibition of meat spoilage and pathogenic bacteria by lysozyme, nisin, and EDTA in the presence of nitrite and sodium chloride at 24°C. *International Journal of Food Microbiology*, 80(3), 251–259.
13. Sautour, M., et al. (2002). Comparison of the effects of temperature and water activity on growth rate of food spoilage moulds. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 28(6), 311–315.
14. Leistner, L. (2002). Hurdle effect and energy saving. In *Food Quality and Nutrition* (pp. 345–350). London: Applied Science Publishers. [Available at <https://rrbusiness.ru/journal/article/347/>].

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF A STEAM CONTACT THERMOCOAGULAR WITH DISTRIBUTED STEAM INPUT TAKING INTO ACCOUNT ENERGY EFFICIENCY

Oshchypok I.M. Dr. Sciences, Professor
Lviv National University named after Ivan Franko, Lviv, Ukraine

Abstract. *The paper considers the process of protein coagulation and its effect on the quality characteristics and structure of improved liver-pâté products when using one of the promising methods of heat treatment - direct contact of steam with minced meat. The internal, unconditional, restructuring of the protein molecule - denaturation itself - is manifested in the aggregation of polypeptide chains. The key aspects of heat transfer in steam-contact thermal coagulators (TC) with distributed steam injection are determined, which directly affect the uniformity of heating and the quality of the finished product. The importance of optimal selection of temperature, pressure and steam speed for different types of meat raw materials is emphasized in order to avoid over-digestion, loss of nutrients and deterioration of organoleptic properties. The main attention is paid to the need to ensure a high rate of heat transfer and uniform coagulation of proteins to achieve the desired texture, moisture and taste of the finished product. The importance of ensuring the correct combination of temperature and processing time is shown, since different types of meat raw materials require different modes. Obtaining a product with a certain texture or moisture content requires specific process conditions. The final product with the best texture must provide the correct moisture, which depends on the temperature of the steam and its distribution in the TC. Excessive dehydration leads to a loss of meat quality. An important factor has been shown to control the coagulation of proteins during heat treatment, which decisively affects the texture and taste of the product. Fast and uniform coagulation will allow to achieve the desired properties.*

Keywords: coagulation, protein, thermal coagulator, steam, products

Список використаної літератури

1. Вплив фізичних властивостей рідин на роботу рідинно-газових ежекторів / В. В. Пономаренко, М. М. Пушанко, А. М. Слюсенко, О. А. Єщенко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 111–120.
2. Досвід впровадження в виробництво високоефективного тепло- та масообмінного обладнання. Від теорії до впровадження / В. А. Мельник, В. О. Бойко, М. О. Прядко, С. А. Наумчик та ін. // Цукор України. – 2017. – № 2 (134). – С. 12–17
3. Мирончук, В. Г. Механізм впливу водяної пари на масообмін в системі тверде тіло - розчин- пара / В. Г. Мирончук // Харчова промисловість. – 1998. – Вип. 43-44. – С. 150–154
4. Моделювання теплогідродинамічних процесів в киплячих низхідних кільцевих потоках цукрових розчинів / В. П. Петренко, О. М. Рябчук, О. Ю. Пилипенко, М. М. Мирошник // Цукор України – 2015. – № 8 (116). – С. 20–25.

5. Мокляк, В. Ф. Дослідження середнього об'ємного паровмісту динамічного двофазного шару в замкнутих термосифонах / В. Ф. Мокляк, А. В. Форсюк, С. М. Василенко // Цукор України. – 2014. – № 6 (102). – С. 20–23.
6. Особливості розрахунку теплообмінних апаратів, що споживають розріджену пару хвостової частини випарної установки / В. І. Петренко, М. О. Прядко, О. М. Рябчук, М. М. Мирошник // Цукор України. – 2017. – №3 (135). – С. 610.
7. Петренко, В. П. Ефективність застосування плівкових випарних апаратів та розрахунок інтенсифікації тепловіддачі до киплячих цукрових розчинів в них / В. П. Петренко, М. О. Прядко, О. М. Рябчук // Цукор України. – 2013. – № 6 (90). – С. 21–25.
8. Погорілий, Т. М. Аналітичні вирази для визначення часу контакту систем комірок з поверхнею гріючої трубки нагрівальної камери вакуумапарата [Електронний ресурс] / Т. М. Погорілий, В. Г. Мирончук, К. О. Штангеев // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 119–128.
9. Приліпко, Т. М. Обґрунтування режимних параметрів процесу стерилізації паштетів із м'яса індиків / Т. М. Приліпко, В. М. Куций, В. П. Янович // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2014. – Т. 2 : Актуальні проблеми зберігання та переробки рослинної сировини і гідробіонтів, Вип. 46. – С. 177–182.
10. Food: from farm to fork statistics // Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. 164 p.
11. Franz C. Enterococci in foods – a conundrum for food safety / C. Franz, M.E. Stiles, K.H. Schleifer, W. H. Holzapfel // Int. J. Food Microbiol, 2003. – Vol. 88. – P. 105–122.
12. Gill A. O. Interactive inhibition of meat spoilage and pathogenic bacteria by lysozyme, nisin, and EDTA in the presence of nitrite and sodium chloride at 24 C / A. O. Gill, R. A.Holley// Int. J. of Food Microbiology. 2003. 80 (3). P. 251-259.
13. Sautour M. Comparison of the effects of temperature and water activity on growth rate of food spoilage moulds / M. Sautour at al. //J. of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2002. №28 (6). P. 311-315.
14. Leistner L. Hurdle effect and enrgy saving. In: Food Quality and Nutrition / L. Leistner. London:Applied Science Publishers, 2002. P. 345-350. [URL: <https://rrbusiness.ru/journal/article/347/>].

Отримано в редакцію 26.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 26.06.2025

Approved 02.09.2025

ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВІДБІЛЮВАННЯМ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ

Буйваленко А. А., Осадчук П.І. д.т.н, Хоменко А. Д., аспірант
Одеський національний технологічний університет, Одеса

Анотація. Соняшникова олія є найпоширенішим видом рослинного жиру в харчуванні людей в Україні. При виробництві соняшникової олії важливим технологічним етапом є її відбілювання. Актуальним є автоматичне керування відбілюванням. Воно дозволяє забезпечити високу якість готового продукту, знизити витрати сорбентів та енергоресурсів, забезпечити стабільність технологічних параметрів, тощо. Аналіз існуючих технічних рішень з автоматизації відбілювання олії показує, що всі вони мають низьку динамічну точність керування.

В Одеському національному технологічному університеті запропоновано ефективну систему автоматичного керування процесом відбілювання соняшникової олії. Промислове відбілювання харчових олій досягається видаленням барвників методом адсорбційної рафінації. Побудовано математичні моделі динаміки каналів об'єкта регулювання після обробки результатів комплексу активних експериментів на підприємстві. Як критерій оптимальності прийнято модульний інтегральний показник ефективності регулювання. Складено концептуальну модель САР технологічним процесом відбілювання соняшникової олії найпростішої структури на основі принципу замкнутого керування.

Для підвищення динамічної точності в САР введено два коригувальні міжрегуляторні зв'язки, які забезпечать виконання принципу автономності сепаратних САР. Щоб підвищити динамічну точність у каналі регулювання, де відносно велике запізнення, застосовано упереджувач Сміта. Порівняльний аналіз перехідних процесів у базових САР та САР підвищеної динамічної точності показує покращення динаміки як за прямими показниками якості (максимальне динамічне відхилення, коефіцієнт перерегулювання тощо), так і за інтегральним модульним показником якості.

Ключові слова: автоматичне керування, відбілювання, соняшникова олія, автономна САР, компенсація запізнення в контурі керування.

Вступ. Соняшникова олія є традиційним і найпоширенішим видом рослинного жиру в харчуванні людей в Україні. Вона містить необхідні для організму людини поліненасичені жирні кислоти, вітаміни, антиоксиданти та добре засвоюється. Саме тому висока якість соняшникової олії має вирішальне значення для забезпечення міцного здоров'я її споживачів.

Якість олії безпосередньо залежить від дотримання технологічного регламенту її виробництва та стабільного ходу всіх етапів технологічного процесу.

При виробництві соняшникової олії важливим технологічним етапом є її відбілювання, коли з неї видаляють природні барвники, залишки фосфоліпідів, мила, металів та інші домішки, що можуть негативно впливати на колір, смак та споживчу цінність продукту.

Процес відбілювання здійснюють у відбілювальних фільтрах або контактних апаратах з сорбентами. Ефективність цього процесу значною мірою залежить від дотримання регламентних параметрів - температури, часу контакту, ступеня вакууму, дозування сорбенту тощо.

Щоб забезпечити стабільну якість відбіленої олії та ефективне використання ресурсів, процесом відбілювання необхідно керувати.

У зв'язку з цим актуальним є автоматичне керування процесом відбілювання, яке дозволяє забезпечити високу якість готового продукту, знизити витрати сорбентів та енергоресурсів, забезпечити стабільність технологічних параметрів, зменшити вплив суб'єктивного фактора.

Таким чином, розробка та впровадження ефективної автоматичної системи керування процесом відбілювання соняшникової олії є актуальним завданням.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми.

Оскільки розглянуте питання є актуальним, багато дослідників займалися його вивченням. Так на Ново-волинському комбінаті запропонована автоматична система керування ділянкою відбілювання із застосуванням мікроконтролера Modicon TSX Micro, що регулює температуру, тиск та параметри сорбенту [1]. С.В. Шумова та І.Г. Лисаченко розробили систему автоматичного регулювання температури і витрати сорбенту на етапі відбілювання, інтегровану зі SCADA [2]. Ф.Л.Т. Фавр та К. Бхагган запропонували автоматичну систему дозування сорбенту і контролю температури в процесі відбілювання методом адсорбції [3]. S. Masayoshi, H. Ryuji, A.Hisashi et al. запропонували регулювання дози активованої глини (0.05–0.7 %) для

освітлення олії і підтримання температури 75–110 °C протягом 5–60 хв під вакуумом [4]. М. В. Kruidenberg запропонував комплексну автоматичну систему керування з контролем подачі олії, параметрів відбілювання і температури/тиску, інтегровану зі SCADA [5]. К. Bhaggan, J. L. Werleman, J. Franx запропонували автоматичне керування дозуванням адсорбенту та режимом вакуумного відбілювання в межах 60–120 °C та 5–120 хв. [6].

Аналіз існуючих технічних рішень з автоматизації процесу відбілювання олії показує, що всі вони мають схожі недоліки, а саме низьку динамічну точність керування, оскільки об'єкт керування є багатовимірним і має, крім прямих, перехресні зв'язки, які негативно впливають на динаміку сусідніх контурів регулювання. Також в деяких каналах регулювання відносно велике запізнення погіршує динаміку системи керування.

В Одеському національному технологічному університеті, на кафедрі електромеханіки та мехатроніки запропоновано ефективну систему автоматичного керування процесом відбілювання соняшникової олії.

Мета і завдання дослідження.

Метою першого етапу дослідження є підвищення ефективності процесу відбілювання соняшникової олії шляхом підвищення динамічної точності керування процесом.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- аналіз процесу відбілювання олії як об'єкту керування;
- розробка комплексу моделей процесу відбілювання олії як об'єкту регулювання і проведення моделювання для підтвердження відповідності отриманих моделей експериментальним даним;
- розробка варіантів алгоритмів регулювання, проведення їх параметричної оптимізації, порівняльного аналізу САР, синтезу та аналізу САР підвищеної динамічної точності;

Методи і матеріали досліджень.

Основним використаним методом дослідження є метод системного аналізу. Для ідентифікації моделей використано метод активного експерименту, метод типової статистичної ідентифікації та інженерні методики ідентифікації моделі об'єкта керування (ОК). При синтезі САР було використано методи теорії автоматичного керування, а саме інженерні методики параметричного синтезу САР, оптимального параметричного синтезу, принцип автономності та компенсації запізнення в каналі керування. Основним експериментальним методом обрано імітаційне моделювання.

Результати досліджень.

Проаналізовано технологічний процес відбілювання соняшникової олії. У розплавленому вигляді розливної олії – безбарвної, у застиглому вигляді мають колір за рахунок розчинення в них барвників. Промислове відбілювання харчових олій досягається видаленням барвників методом адсорбційної рафінації за допомогою відбілюючих порошків, які додають у попередньо висушений жир і які поглинають розчинені в жирі барвники та утримують їх на своїй поверхні. Після інтенсивного перемішування суспензію жиру фільтрують. Відбілюючі порошки разом з поглиненими ними барвниками відокремлюються від жиру, а освітлений жир стікає в резервуар. Визначають кольоровість олії по йоду за допомогою кольороміру.

На рис.1 зображено схему ділянки відбілювання олії. Жир після лужної рафінації, промивання та сушіння з резервуару I відцентровим насосом II подається на відбілювання. У напірному трубопроводі жир поділяється на два потоки: 75% жиру надходить у трубчастий нагрівач III, а 25% жиру прямує до змішувача IV. У трубчастому нагрівачі III гріючою парою олія нагрівається і направляється в апарат для попереднього відбілювання VI. У змішувачі IV жир змішується з відбілюючим порошком, який подається з бункеру V за допомогою дозуючого шнека.

Таким чином у змішувачі IV утворюється суспензія, яка безперервно засмоктується в апарат для попереднього відбілювання VI, де і змішується з усією масою жиру, що обробляється. Оскільки апарат VI знаходиться під розрідженням і має парову сорочку, в ньому відбувається додаткове підсушування жиру та його деаерація. Це має важливе значення для підвищення ефективності відбілювання та запобігання небажаним хімічним реакціям, які інтенсифікуються в присутності відбілюючих порошків.

У парову сорочку апарату VI надходить гріюча пара, за рахунок чого температура масла в ньому підвищується. В апараті VI підтримується рівень продукту. З апарату VI суспензія відбілюючого порошку в жирі безперервно перекачується відцентровим насосом VII через трубчастий підігрівач VIII в колонний апарат для остаточного відбілювання олії IX. У трубчастий підігрівач VIII подається пара, тому температура олії в ньому підвищується.

В апараті IX за рахунок подачі пари у парову сорочку апарата температура олії також підвищується. У апараті для остаточного відбілювання IX підтримується розрідження та рівень продукту. Після відбілювання суспензія насосом X подається в резервуар XI. Необхідним результатом відбілювання є отримання кольорового числа олії. Розрідження в апаратах створюється за допомогою пароежекторного вакуум-насоса XII.

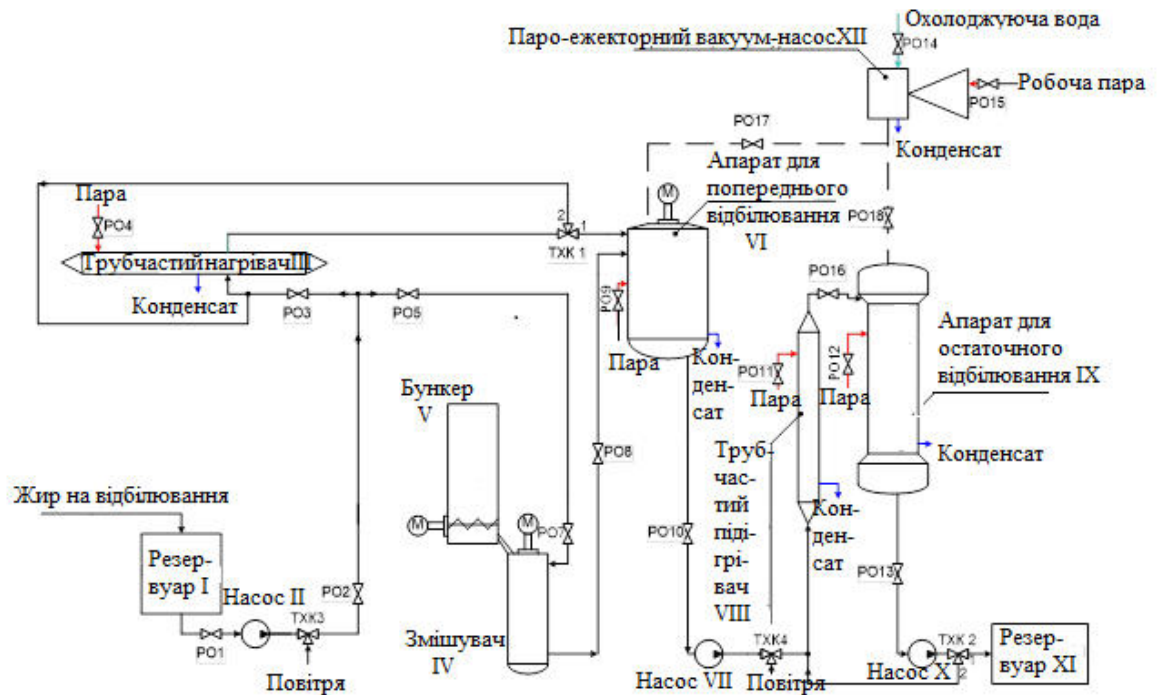


Рис. 1 – Технологічна схема відбілювання жирів

Наступним етапом дослідження було проведення аналізу впливу режимів ведення технологічного процесу відбілювання та роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз відповідних регламентів та наслідків їх порушень. Складено параметризовану технологічну схему остаточного процесу відбілювання (рис. 2).

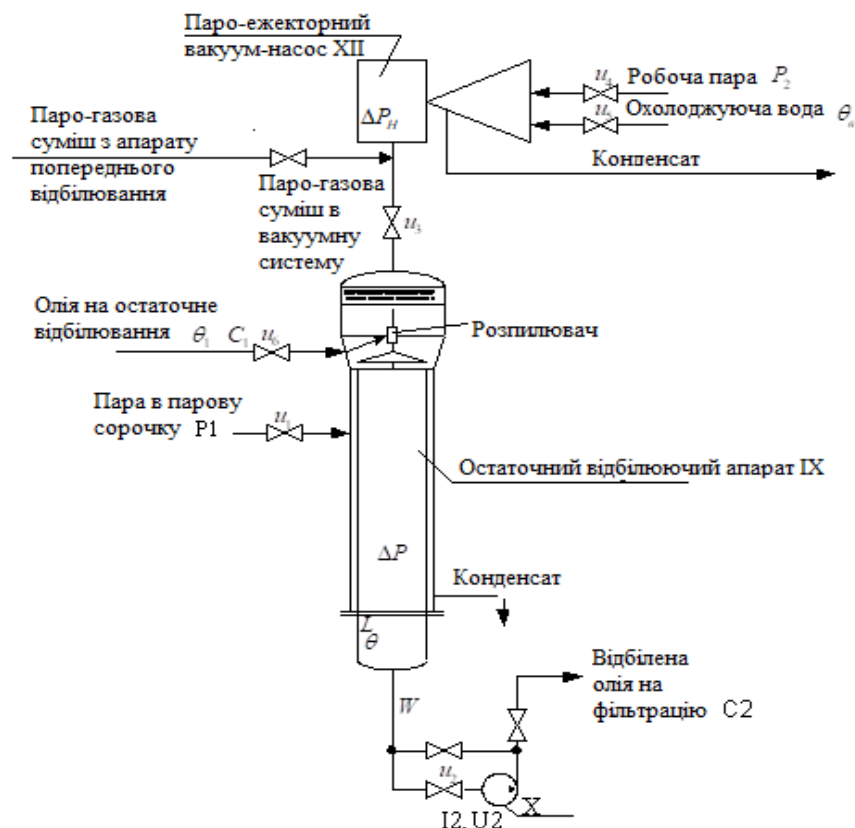


Рис. 2 – Параметризована схема остаточного процесу відбілювання

Нормативи ведення технологічного процесу подамо у вигляді трьох регламентів з урахуванням позначень на рис.2: технологічний регламент: температура θ і розрідження ΔP в остаточному відбілюючому апа-

раті, кольорова кількість олії після відбілювання C_2 ; експлуатаційний регламент: рівень в остаточному відбілюючому апараті L ; розрідження у вакуум-насосі ΔP ; техніко-економічний регламент: продуктивність остаточного відбілюючого апарату W .

До параметрів, що характеризують умови ведення технологічного процесу та роботи технологічного обладнання відносяться: сировинні параметри: температура θ_1 та кольорова кількість C_1 олії, що надходить у остаточний відбілюючий апарат; енергетичні параметри: тиск пари, що підводиться в парову сорочку остаточного відбілюючого апарату P_1 ; тиск робочої пари пароежекторного вакуум-насосу P_2 ; температура охолоджувальної води для вакуум-насосу θ_6 ; електроенергія, що підводиться до насосу XIV I_2 , U_2 ; механічні параметри: зміна положення регулюючого органу (РО) подачі пари в пароежекторний вакуум-насос u_4 ; подачі пари в парову сорочку остаточного відбілюючого апарату u_1 ; подачі жиру з відбілюючого апарату на фільтрацію u_2 , подачі парогазової суміші з відбілюючого апарату у вакуум-насос u_3 , подачі олії в апарат остаточного відбілювання u_6 .

Як регульовані параметри обрано θ , ΔP , L ; C_2 . Вимоги до відхилень регульованих змінних представлені як регламентні зони. Регулюючими впливами є: u_1 , u_3 , u_2 , u_6 .

Структурна схема об'єкта регулювання представлена у розгорнутому вигляді на рис. 3.

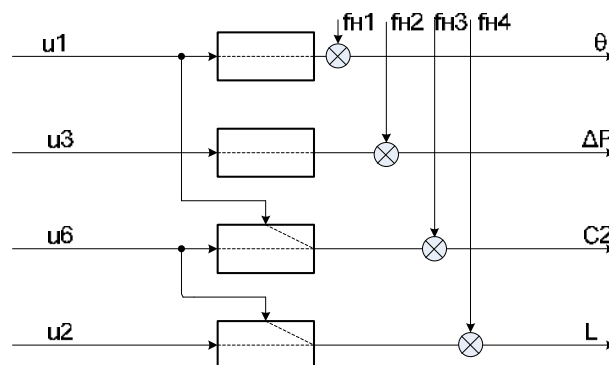


Рис. 3 – Структурна схема ОР у розгорнутому вигляді

Було побудовано математичні моделі динаміки каналів об'єкта регулювання після обробки результатів комплексу активних експериментів на підприємстві, а саме одержаних перехідних характеристик каналів ОР в околі номінальних режимів ТП, що дало можливість використовувати лінійну форму моделей та подати їх у вигляді передавальних функцій каналів (табл. 1).

Таблиця 1

Математичні моделі каналів об'єкту регулювання

Канал перетворення	Модель 1-го порядку	Модель 2-го порядку
$u_1 - \theta$	$W(p) = \frac{0.1 \cdot e^{-1.94p}}{2.71p + 1}$	$W(p) = \frac{0.1 \cdot e^{-0.56p}}{(1.93p + 1)^2}$
$u_1 - C_2$	$W(p) = \frac{-0.03 \cdot e^{-2.97p}}{3.38p + 1}$	$W(p) = \frac{-0.03 \cdot e^{-1.47p}}{(2.31p + 1)^2}$
$u_3 - \Delta P$	$W(p) = \frac{-0.05 \cdot e^{-8.06p}}{7.55p + 1}$	$W(p) = \frac{-0.05 \cdot e^{-3.89p}}{(5.51p + 1)^2}$
$u_6 - C_2$	$W(p) = \frac{0.05 \cdot e^{-1.71p}}{2.53p + 1}$	$W(p) = \frac{0.05 \cdot e^{-0.74p}}{(1.67p + 1)^2}$
$u_6 - L$	$W(p) = \frac{e^{-2.53p}}{1000p}$	$W(p) = \frac{e^{-1.51p}}{1000p(1.78p + 1)}$
$u_2 - L$	$W(p) = \frac{e^{-1.9p}}{810p}$	$W(p) = \frac{e^{-0.92p}}{810p(1.7p + 1)}$

Вид перехідних характеристик моделей ОР за каналами регулювання наведено рис. 4. Кольори графіків моделей: 1-го порядку – синій; 2-го порядку – зелений.

Канали перетворення « $u_1 - \theta$ », « $u_3 - \Delta P$ », « $u_6 - C_2$ », « $u_1 - C_2$ » є статичними, канали « $u_6 - L$ » та « $u_2 - L$ » -

астатичними.

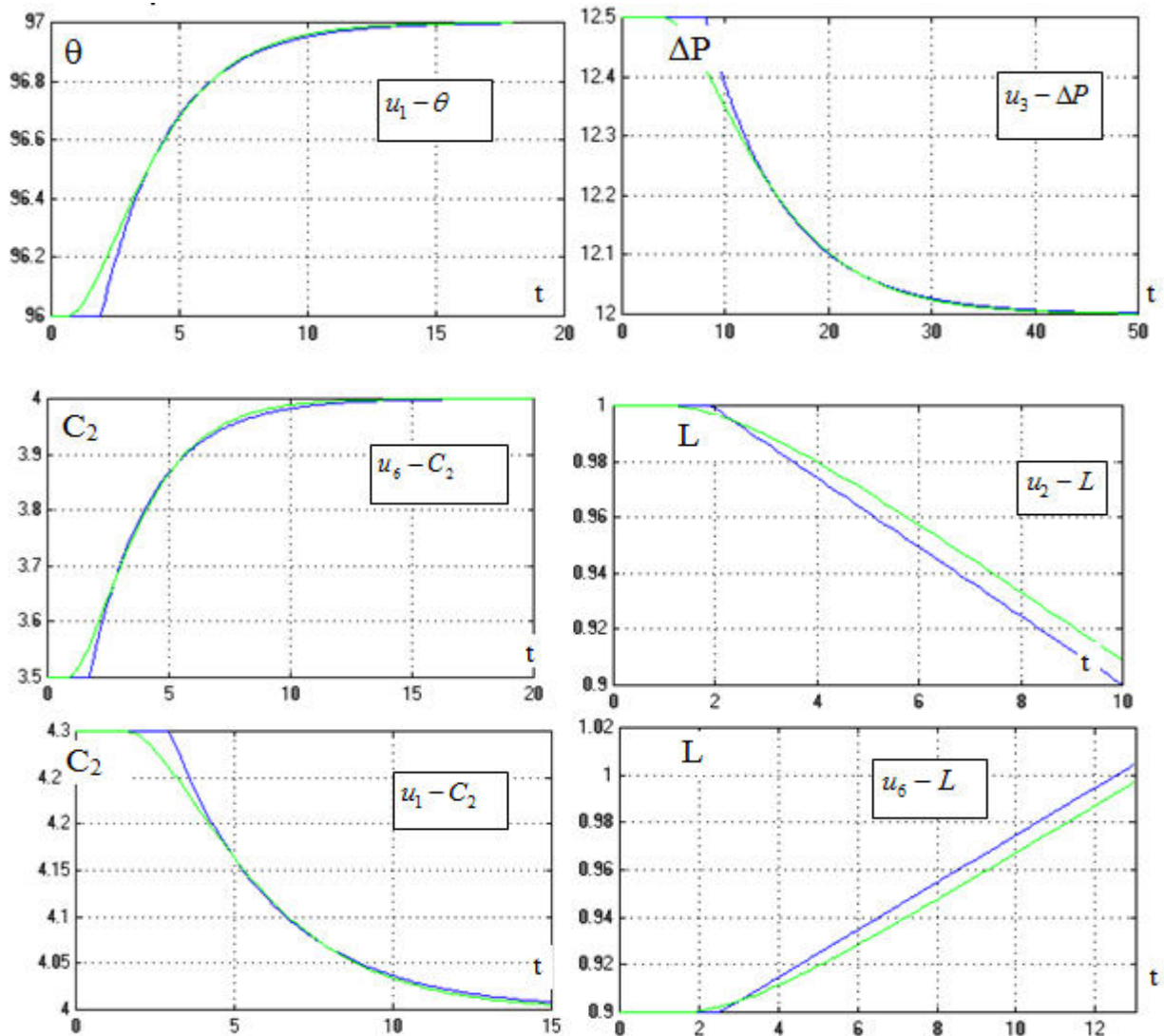


Рис. 4 – Вид перехідних характеристик моделей ОР

Розробка математичної моделі ефективності процесу регулювання є, по суті, розробкою критерію оптимізації налаштувальних параметрів регуляторів САР процесу відбілювання олії. Особливість критерію оптимальності для даної САР полягає в тому, що він повинен відображати якість регулювання кожної із її змінних 4-х контурів регулювання. При цьому всі регульовані змінні САР, і, отже, їх помилки регулювання, мають різні фізичні розмірності і абсолютні значення. Для формування загального для САР критерію I у вигляді суми окремих критеріїв I_i окремих i -тих контурів регулювання, необхідно: а) привести його доданки до однакової розмірності; б) задати відносний рівень важливості кожної зі складових. Обидві ці завдання можна вирішити введенням перед складовими вагових коефіцієнтів α_i . Тоді, формально, критерій САР матиме такий вигляд:

$$I = \alpha_1 \cdot I_1 + \alpha_2 \cdot I_2 + \alpha_3 \cdot I_3 + \alpha_4 \cdot I_4$$

Прийmemo I_i як модульний інтегральний показник ефективності (якості) регулювання:

$$I_i = \int_0^{\infty} |\Delta y_i(t)| dt$$

де $\Delta y_i(t)$ – помилка регулювання i -того контура САР.

Вагові коефіцієнти, що вирішують відразу обидві завдання узгодження, знайдемо із співвідношень:

$$\alpha_1 = 1 / \Delta \theta^{\max} = 1/10 \text{ } ^\circ\text{C}; \alpha_2 = 1 / \Delta P^{\max} = 1/2 \text{ кПа}; \alpha_3 = 1 / \Delta C_2^{\max} = 1/1 \text{ мг йоду}; \alpha_4 = 1 / \Delta L^{\max} = 1/0,5 \text{ м,}$$

де $\Delta \theta^{\max}$, $\Delta P^{\max}$, $\Delta C_2^{\max}$, $\Delta L^{\max}$ – максимально припустимі помилки регулювання, встановлені технологічним регламентом для відповідних регульованих змінних.

Було складено та реалізовано моделі зовнішніх збурень об'єкта регулювання у вигляді випадкового гаусовського процесу з кількома адитивними складовими. Для відтворення моделі випадкової складової неконтрольованих збурень використовуватимемо метод формуючого фільтра.

У середовищі імітаційного моделювання Simulink реалізовано повну схему моделювання об'єкта регу-

лювання (рис. 5).

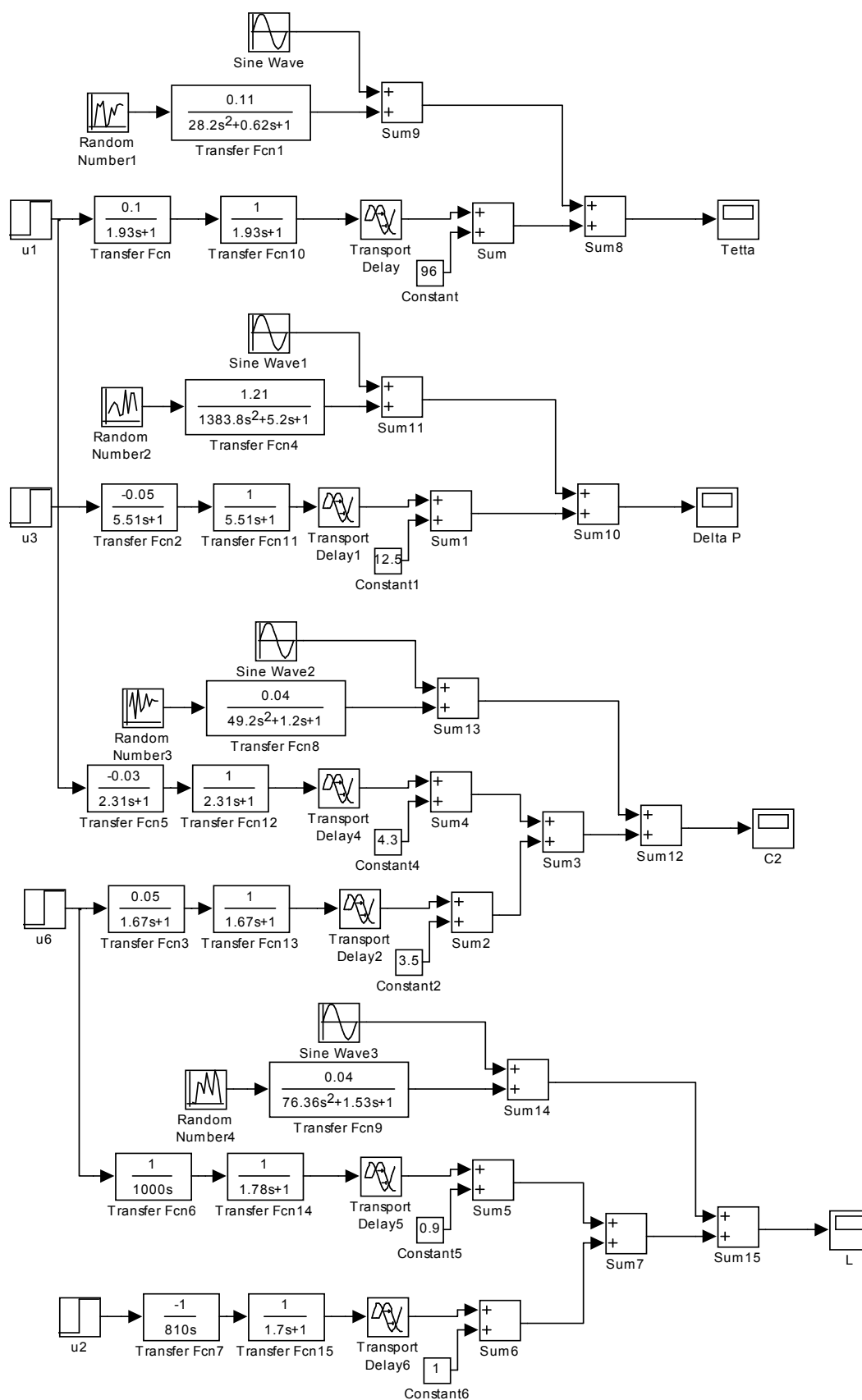


Рис. 5 – Повна схема моделювання процесу відбілювання олії як об'єкта регулювання з моделями каналів 2-го порядку

Складено концептуальну модель системи автоматичного регулювання (САР) технологічним процесом відбілювання соняшникової олії найпростішої структури на основі принципу замкнутого керування у формі структурної схеми (рис. 6). Для всіх чотирьох регуляторів використовуються ПІД-алгоритми регулювання.

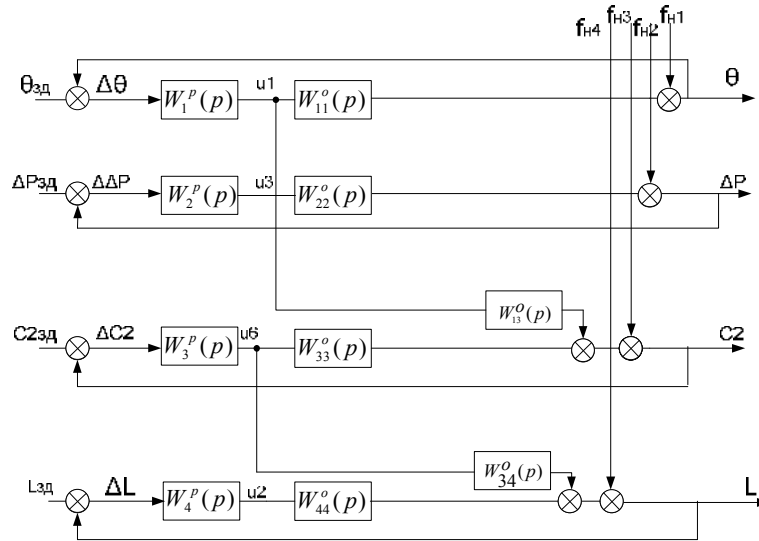


Рис. 6 – Структурна схема САР найпростішої структури

Підвищення ефективності САР найпростішої структури можливе за рахунок удосконалення її структури на основі обліку особливостей відбілюючого апарату як об'єкта регулювання. Насамперед, це - багатовимірний об'єкт, у якого чотири регульовані змінні. І оскільки канали ОР мають два перехресні зв'язки, то вони негативно впливають на роботу сусідніх контурів регулювання. У цій ситуації, щоб підвищити динамічну точність САР, потрібно максимально зменшити зазначений вплив перехресних каналів. Це досягається введенням в САР двох коригувальних міжрегуляторних зв'язків з такими властивостями, які забезпечать виконання принципу автономності сепаратних САР.

Щоб підвищити динамічну точність у другому каналі регулювання, де відносно велике запізнення, можна застосувати упереджувач Сміта.

При цьому алгоритми регулювання регуляторів зберігаються такими ж, як і в системі найпростішої структури.

Концептуальна модель САР підвищеної динамічної точності у формі її структурної схеми представлена на рис. 7.

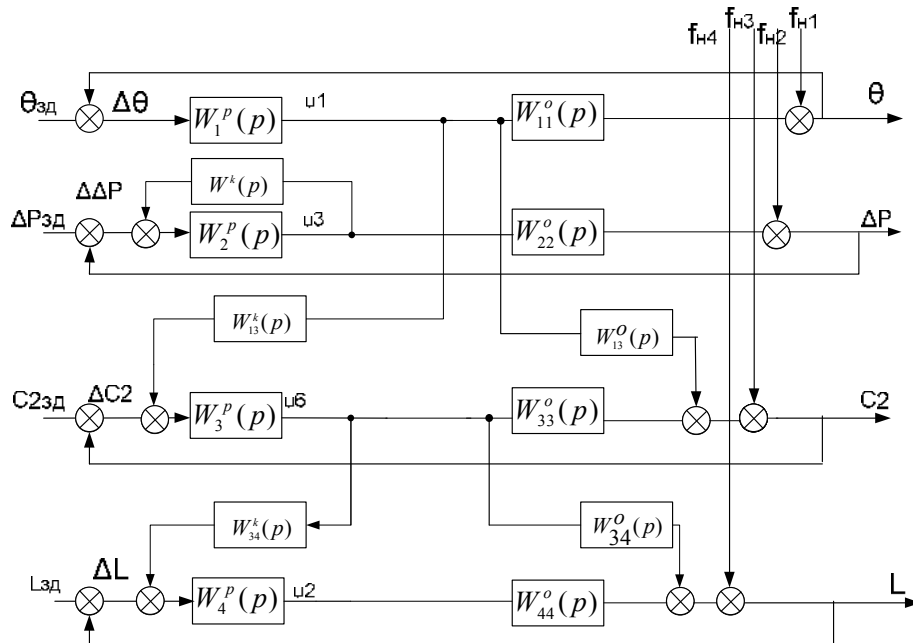
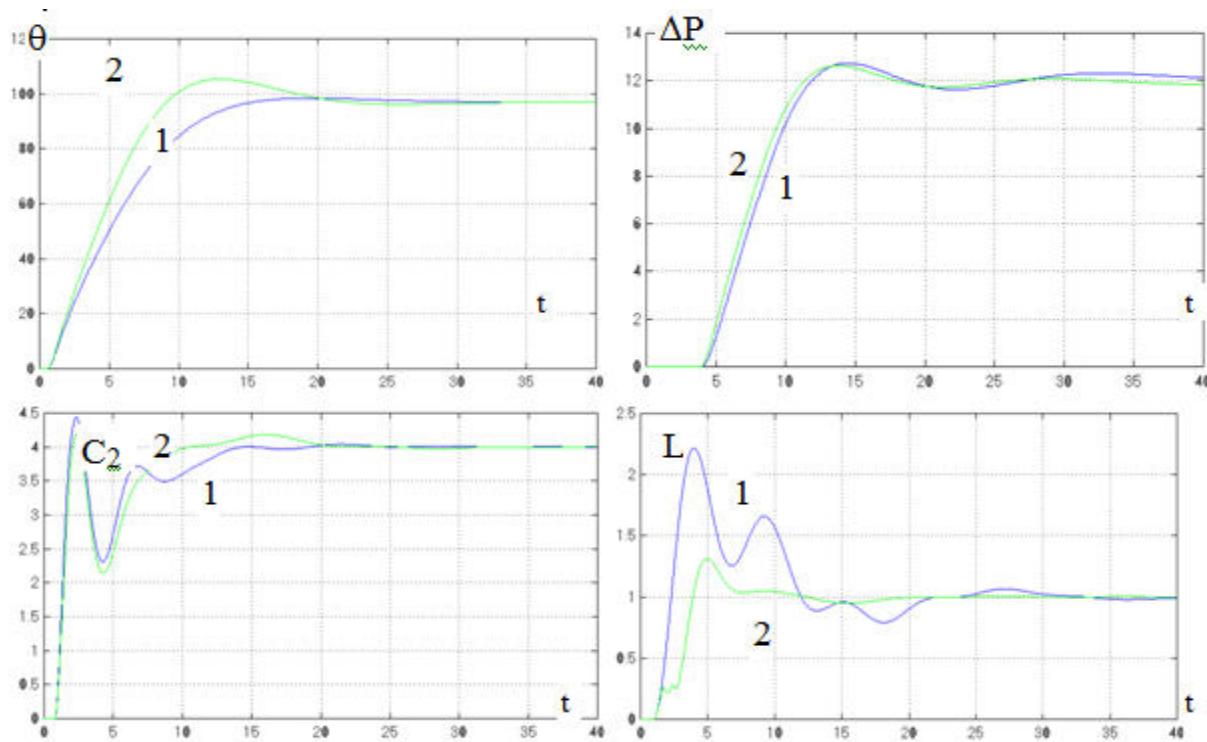


Рис. 7 – Структурна схема САР підвищеної динамічної точності

В результаті структурного синтезу отримано передаточні функції міжрегуляторних перехресних коригувальних зв'язків та спрощено їх вигляд:

$$W_{13}^k(p) = 0.01e^{-0.73} \frac{0.95p}{5.79p+1}; \quad W_{34}^k(p) = -e^{-0.59} \frac{0.004p}{4.87p+1}$$

Для порівняльного аналізу на рис. 8 показано в загальних системах координат перехідні процеси в САР звичайної структури та САР підвищеної динамічної точності з оптимальними параметрами.



1 – звичайної структури, критерій оптимальності $I = 25,4$; 2 – підвищеної динамічної точності, критерій оптимальності $I = 19,3$.

Рис. 8. – Перехідні процеси у параметрично оптимізованих САР у режимі виведення технологічного процесу з вихідного стану до номінального:

Порівняльний аналіз перехідних процесів у базових САР та САР підвищеної динамічної точності показує покращення динаміки як за прямими показниками якості (максимальне динамічне відхилення, коефіцієнт перерегулювання тощо), так і за інтегральним модульним показником якості.

Висновки. Соняшникова олія є найпоширенішим видом рослинного жиру в харчуванні людей в Україні.

При виробництві соняшникової олії важливим технологічним етапом є її відбілювання.

Актуальним є автоматичне керування процесом відбілювання, яке дозволяє забезпечити високу якість готового продукту, знизити витрати сорбентів та енергоресурсів, забезпечити стабільність технологічних параметрів, зменшити вплив суб'єктивного фактору.

Аналіз існуючих технічних рішень з автоматизації процесу відбілювання олії показує, що всі вони мають низьку динамічну точність керування.

В Одеському національному технологічному університеті, на кафедрі електромеханіки та мехатроніки запропоновано ефективну систему автоматичного керування процесом відбілювання соняшникової олії.

Метою першого етапу дослідження є підвищення ефективності процесу відбілювання соняшникової олії шляхом підвищення динамічної точності керування процесом.

У розплавленому вигляді рослинні олії – безбарвні, у застиглому вигляді мають колір за рахунок розчинення в них барвників.

Промислове відбілювання харчових олій досягається видаленням барвників методом адсорбційної рафінації.

Визначають кольоровість олії по йоду за допомогою кольороміру.

Побудовано математичні моделі динаміки каналів об'єкта регулювання після обробки результатів комплексу активних експериментів на підприємстві, а саме одержаних перехідних характеристик каналів ОР в околі номінальних режимів ТП.

Як критерій оптимальності прийнято модульний інтегральний показник ефективності регулювання:

Складено концептуальну модель САР технологічним процесом відбілювання соняшникової олії найпростішої структури на основі принципу замкнутого керування.

Для підвищення динамічної точності в САР введено два коригувальні міжрегуляторні зв'язки, які забезпечать виконання принципу автономності сепаратних САР.

Щоб підвищити динамічну точність у каналі регулювання, де відносно велике запізнення, застосовано упереджувач Сміта.

Порівняльний аналіз перехідних процесів у базових САР та САР підвищеної динамічної точності показує покращення динаміки як за прямими показниками якості (максимальне динамічне відхилення, коефіцієнт перерегулювання тощо), так і за інтегральним модульним показником якості.

References

1. *Avtomatyzatsiia vyrobnytstva olii* [Automation of oil production]. (n.d.). Retrieved from https://stud.wiki/manufacture/2c0b65625a3ac78b4d43a88521206d37_0.htm
2. Shumova, S. V., & Lysachenko, I. H. (n.d.). *Systema avtomatyzovanoho upravlinnia protsesom rafinuvannia soniashnykovoi olii* [Automated control system for sunflower oil refining process]. Retrieved from https://stud.wiki/manufacture/2c0b65625a3ac78b4d43a88521206d37_0.html
3. Favr, F. L. T., & Bkhaggan, K. (2015). *Sposib obrobky roslynnoi olii* [Method of processing vegetable oil] (Patent UA108648 C2). Ukrainian Intellectual Property Institute. Retrieved from <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/889890/>
4. Masayoshi, S., Ryuji, H., & Hisashi, A. (2021, September 14). *Method for suppressing coloration of frying fats and oils composition* (U.S. Patent No. 11118132 B2). United States Patent and Trademark Office. Retrieved from <https://patents.justia.com/patent/11118132>
5. Kruidenberg, M. B. (2012, July 18). *Method and apparatus for processing vegetable oils* (U.S. Patent No. 8952187 B2). United States Patent and Trademark Office. Retrieved from <https://patentimages.storage.googleapis.com/1d/cf/cb/31eedf302dfa02/US8952187.pdf>
6. Bhaggan, K., Werleman, J. L., & Franx, J. (2012, December 21). *Method of treating a vegetable oil* (U.S. Patent No. 9217120 B2). United States Patent and Trademark Office. Retrieved from <https://patentimages.storage.googleapis.com/f8/20/f7/4b708698d0a512/US9217120.pdf>

FEATURES OF SUNFLOWER OIL BLEACHING AUTOMATIC CONTROL

Buiwalenko A., Osadchuk P., Khomenko A.
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. *Sunflower oil is the most common type of vegetable fat in human nutrition in Ukraine. In the production of sunflower oil, bleaching is an important technological stage. Automatic bleaching control is relevant. It allows to ensure high quality of the finished product, reduce the consumption of sorbents and energy resources, ensure the stability of technological parameters, etc. Analysis of existing technical solutions for the automation of oil bleaching shows that they all have low dynamic control accuracy. An effective system for automatic control of the process of bleaching sunflower oil has been proposed at the Odessa National Technological University. Industrial bleaching of edible oils is achieved by removing dyes by the method of adsorption refining. Mathematical models of the dynamics of the channels of the control object have been built after processing the results of a complex of active experiments at the enterprise. The modular integral indicator of control efficiency has been adopted as the optimality criterion. A conceptual model of the ACS with the technological process of bleaching sunflower oil of the simplest structure based on the principle of closed-loop control has been developed. To increase the dynamic accuracy in the ACS, two corrective inter-regulator connections have been introduced, which will ensure the implementation of the principle of autonomy of separate ACS. To increase the dynamic accuracy in the control channel, where the delay is relatively large, a Smith biaser has been used. A comparative analysis of transient processes in the basic ACS and ACS of increased dynamic accuracy shows an improvement in dynamics both in terms of direct quality indicators (maximum dynamic deviation, overshoot coefficient, etc.), and in terms of the integral modular quality indicator.*

Key words: automatic control, bleaching, sunflower oil, autonomous ACS, delay compensation in the control loop.

Список використаних джерел

1. Автоматизація виробництва олії [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://stud.wiki/manufacture/2c0b65625a3ac78b4d43a88521206d37_0.htm.
2. Шумова С.В., Лисаченко І.Г. Система автоматизованого управління процесом рафінування соняшникової

- олії [Електронний ресурс].- Режим доступу:
https://stud.wiki/manufacture/2c0b65625a3ac78b4d43a88521206d37_0.html.
3. Патент на винахід UA108648 C2 Спосіб обробки рослинної олії [Електронний ресурс] / Фавр Ф.Л.Т., Бхаттан К. МПК A23D 7/00, C11B 3/10, C11C 3/10. Заявл. 28.06.2011 №а201301109. Опубл.25.05.2015, Бюл. № 10. - Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/889890/>.
4. Patent US No. 11118132 B2 Method for suppressing coloration of frying fats and oils composition / Masayoshi S., Ryuji H., Hisashi A. et al. IPC C11B 3/00, A23D 9/02, C11B 3/08, A23D 9/00, C11B 3/12. Date of Patent: Sep 14, 2021. Patent Publication Number: 20210054304/ URL: https://patents.justia.com/patent/11118132?utm_source.
5. Patent US No. 8952187 B2 Method and apparatus for processing vegetable oils / Kruidenberg M. B.. IPC C11B 3/00, B01D 3/38, B01D 1/30, B01D 5/00, C11B 3/12. Appl. No.: 13/552,084. Filed: Jul.18, 2012/ URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/1d/cf/cb/31eedf302dfa02/US8952187.pdf>.
6. Patent US No. 9217120 B2 Method of treating avegetable oil / Bhaggan K., Werleman J. L., Franx J. IPC C11B 3/10, C11C 1/10, C11B 3/14, C11C 1/08, A23L 1/015 Appl. No.: 14/367,155 PCT Filed: Dec. 21, 2012 URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/f8/20/f7/4b708698d0a512/US9217120.pdf>.

Отримано в редакцію 17.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 17.06.2025
Approved 02.09.2025

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСЕННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЕФІРНИХ ОЛІЙ

Славинський Р.Л., аспірант кафедри, Славинська В.О., інженер,
Грищенко Р.О., аспірант
Одеський національний технологічний університет, Одеса

Анотація. Важливим інноваційним процесом в технології отримання ефірних олій є обробка рослинної сировини в мікрохвильовому полі, в порівнянні з іншими методами дозволяє отримати більший вихід олій при менших витратах. Вибір енергоефективного режиму обробки є перспективним напрямком, оснований на детальному вивченні фізичних процесів, що протікає в капілярах рослинної матриці та збільшує вихід олій, покращує її якісні показники та знижує енерговитрати. В статті представлено параметричну модель установки, в якій об'єкти визначаються набором параметрів і залежностей між ними, що дозволяє автоматично змінювати і адаптувати модель при зміні цих параметрів. На основі цього запропоновано фізичну модель установки. Це реальний об'єкт, який використовується для дослідження, демонстрації, вивчення властивостей і динаміки системи. Являє собою фізичне втілення об'єкта, яке дозволяє працювати з ним у спрощеному або наочному вигляді, виділяючи тільки найважливіші характеристики для вирішення поставленого завдання. Сформовано нестационарну модель тепломасопереносу в двовимірному просторі та описано за допомогою рівнянь енергії, суцільності та Нав'є-Стокса у відповідних координатах. Визначено граничні умови на межі поділу об'єкта дослідження. Для визначення структури моделі в узагальнених змінних використані методи теорії подібності. Прийнятий кінетичний коефіцієнт - коефіцієнт масовіддачі β_E , що визначає інтенсивність процесу та представлений у загальному вигляді функціональної залежності. Використаний аналіз розмірностей замінив цю функцію залежності між числами подібності. Знайдено рівняння, що використовуються для пошуку співвідношень, які дозволяють представити рівняння у вигляді чисел подібності. Наведено критеріальне рівняння у неявній формі для розрахунку інтенсивності фазових перетворень в капілярі рослинної матриці. Для визначення констант в критеріальному рівнянні було виконано ряд дослідів на експериментальній установці з кожурою лимону, в результаті яких отримано інформацію, яку можливо використовувати для відповідних розрахунків, та побудовано відповідні графіки залежностей. Проілюстровано експериментальний стенд для отримання ефірної олії з кожтури лимону методом мікрохвильового екстрагування при атмосферному тиску.

Здобуті результати є базою для організації та визначення енергоефективних режимів обробки рослинної сировини в мікрохвильовому полі завдяки використанню математичного моделювання.

Ключові слова: масоперенесення, математична модель об'єкту досліджень, граничні умови, рівняння енергії та суцільності, критеріальне рівняння.

Вступ. В останні роки інтерес людства до ефірних олій значно зріс. Незважаючи на те що ефективність складових компонентів, що можуть діяти як ароматизатори, була доведена ще здавна, а біологічна активність нещодавно виявлена — це позиціонує їх як натуральну альтернативу для розробки нових застосувань в області особистої гігієни, косметики та продуктів харчування завдяки зростаючій перевазі споживачів до натуральних інгредієнтів. Крім того, очікується, що попит у медичній промисловості, зростаюча обізнаність споживачів про користь для здоров'я та перевагу незначних побічних ефектів ефірних олій стимулюватимуть розширення їх застосування [1]. Таким чином обсяг світового ринку ефірних олій у 2024 році склав майже в 12,5 млрд. доларів США, при цьому дефіцит ринку склав приблизно 87 мільйонів доларів США. Серед країн експортерів лідируючу позицію займає Індія з 912 млн. доларів США, доля країни в світовому експорті складає - 14,5 %, друге місце серед країн експортерів займає США — приблизно 751 млн. доларів США (11,9 % в світовому експорті) та перше місце серед країн імпортерів з 1,3 млрд. доларів США (20,2 % в світовому імпорті) — дефіцит торгового балансу країни дорівнює 540 млн. доларів США. Річне зростання вартості ринку ефірних олій склало майже 11 % [9]. Ефірні олії можна видобувати різними методами, як традиційними (дистиляція, пресування, анфлераж) так і інноваційними (надкритична екстракція рідини, обробка сировини мікрохвильовим полем та ультразвуком) [1]. Сучасні технології дозволяють інтенсифікувати процеси, покращуючи тепло- і масообмін за рахунок нових методів отримання енергії, скорочуючи час обробки, енергоспоживання і вплив на навколишнє середовище [2]. Застосування інноваційних методів отримання ефірних олій у промислових масштабах, як і раніше, обмежене, оскільки їх проектування та експлуатація вимагають сучасного підходу. Розуміння ролі масоперенесення і динаміки нагрівання в ефективності цих інтенсифікованих процесів має вирішальне значення для їх ефективного проектування. Крім того,

економічна доцільність і відповідність процесу вимогам можуть відігравати важливу роль при виборі технології отримання в конкретній ситуації [6].

Математичні моделі є цінним інструментом для вивчення, розробки, проектування та оптимізації промислових процесів. Такі моделі також використовуються для узагальнення експериментальних результатів і дозволяють адаптувати деякі експериментальні дані для моделювання процесу. Для вибору відповідної математичної моделі для моделювання процесу вирішальне значення мають знання та інформація про розподіл ефірної олії в рослинному матеріалі, а також кінетичні дані [5]. Існують різні математичні моделі для опису отримання ефірної олії. В цілому, їх можна розділити на ті, що пояснюють механізми масо- і теплоперенесення, які беруть участь у процесі, і ті, що статистично оцінюють вплив факторів процесу (фактор форми, час, температура, тиск, тип сировини, витрати енергії, вологість) на отриманий вихід екстракції та температурні профілі [3].

Аналіз проблематики та останніх досліджень.

Існують традиційні методи отримання ефірних олій (застарілі, але більш популярні) та інноваційні (високоєфективні), які потребують більш глибоко вивчення завдяки використанню сучасних новітніх та “зелених” технологій [1].

Традиційні методи можуть мати деякі недоліки, такі як деградація ненасичених сполук і втрата деяких компонентів. Ведуться постійні роботи з удосконалення та оптимізації методів екстракції, і що ці методи ретельно підбираються з урахуванням особливостей органу рослини і бажаної якості продукту. Також важливо відзначити, що аналітичний склад ефірних олій може варіюватися в залежності від використовуваного методу, а такі фактори, як тривалість процесу, температура, робочий тиск і якість рослинної сировини, можуть впливати на вихід ефірних олій [10].

До інноваційних методів відносять - мікрохвильову обробку рослинної сировини — революційна технологія, яка викликала великий інтерес. Вона використовує унікальний механізм нагрівання, заснований на принципі “механодифузії”. Цей метод забезпечує більший вихід, коротший час процесу та кращу селективність у порівнянні з традиційними методами. Цей процес також менш складний і витратний у порівнянні з іншими інноваційними методами, не потребує розчинника, та коштовного обладнання. Процес базується на відносно простому принципі, який називається «суха дистиляція з використанням мікрохвиль»: рослинна матриця поміщається в мікрохвильовий реактор без додавання води або органічного розчинника [2].

Перспективним напрямком ефективної організації процесу виробництва ефірних олій є застосування МХ-технологій, використання МХ-енергії електромагнітного поля надвисокої частоти середньо в технологічному процесі [2]. Завдяки накладенню ЕМП на взаємодіючі фази при отриманні олії вдається отримати концентрований екстракт, скоротити тривалість технологічного процесу і істотно інтенсифікувати його, знижуючи при цьому питомі енерговитрати. Для визначення ефективних режимів процесу і параметрів установок, що його реалізують, необхідно мати математичний опис (математичну модель), що адекватно описує досліджуваний процес. Складний характер взаємодії факторів, що визначають інтенсивність процесу обробки рослинної матриці в МХП, не дозволяє встановити точну математичну модель [4]. Тому для дослідження можна вибрати спрощений механізм процесу і використовувати для його формалізації відомий загальний опис явищ тепломасопереносу в капілярно-пористому тілі, а параметри отриманої моделі ідентифікувати за даними експериментальних досліджень. Отримана таким чином модель нестационарних процесів може бути використана для оптимізації параметрів і автоматизації технічних засобів виробництва ефірних олій [7].

В зв'язку з тим, що вартість ефірної олії залежить від її кінцевого складу, і будь-яка математична модель, яка намагається передбачити отримання олії, повинна враховувати всі важливі якісні компоненти суміші, як основні, так і другорядні [4]. Робота, описана в даній статті, являє собою нову модель, яка враховує недоліки раніше відомих моделей і показує, наскільки добре вона відповідає експериментальним даним, отриманим в ході роботи пілотної установи кафедри “ПО та ЕМ” ОНТУ з використанням безпосередньо цитрусових.

Метою роботи є отримання математичної моделі процесу вилучення олійної сировини в електромагнітному полі надвисокої частоти для інтенсифікації його параметрів за даними експериментальних досліджень.

Методи визначення.

Ідея пілотної установки для отримання даних сформульована у наступній гіпотезі: «Вплив на сировину ЕМП різної частоти дозволить ініціювати потік пароповітряної суміші з продукту за рахунок дії бародифузійних рушійних сил, що сприяють зниженню дифузійного опору рослинної матриці». При цьому об'ємне підведення енергії здійснюється магнетронами, завдяки впровадженню яких знижується час процесу та витрати енергії. Запропонуємо параметричну та фізичну моделі процесу екстрагування ефірних олій у системі «сировина - електромагнітне поле» [11]. Запропонуємо параметричну та фізичну моделі процесу екстрагування ефірних олій у системі. Нестационарна модель тепломасопереносу формується у двовимірному просторі з координатами точок (Z, X).

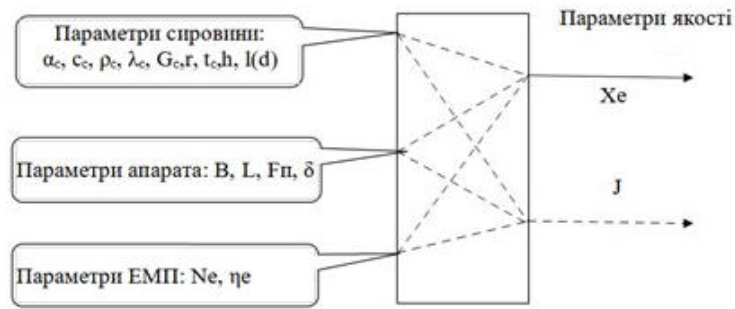


Рис.1 – Параметрична модель

Основними параметрами сировини є: витрати сировини - G_c ; температура t_c ; геометричні параметри: h – висота шару сировини, $l(d)$ – довжина шару сировини (діаметр); фізичні властивості - $\alpha_c, c_c, \rho_c, \lambda_c, \tau$. Ключовими характеристиками апарату є: B — ширина, L – довжина, F_p — площа поверхні, δ — товщина поверхні. Енергетичні параметри магнетрону апарату: потужність - N . ККД - η . Параметри якості моделі: концентрація поліекстракту — X_e (кг/м³), j – питома витрата енергії, (Дж/кг).

Завданням моделювання є формування фізичної схеми екстрактора з МХ генераторами (рис. 2).

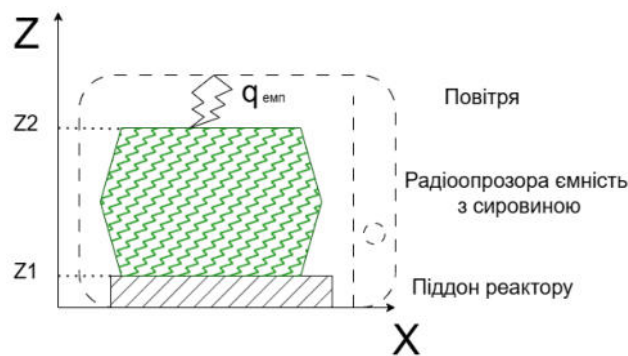


Рис.2 – Фізична модель

Нестационарна модель тепломасопереносу формується у двовимірному просторі з координатами точок (Z, X) . Опишемо процеси що протікають за допомогою рівнянь:

1) При $Z > Z_2$ (повітря):

Рівняння Нав'є — Стокса:

$$\rho_{nos} \omega_{nos} \left(\frac{d\omega_{nos}}{dx} + \frac{d\omega_{nos}}{dz} \right) = \rho_{nos} g - \frac{dP_{nos}}{dx} - \frac{dP_{nos}}{dz} + \mu_{nos} \left(\frac{d^2\omega_{nos}}{dx^2} + \frac{d^2\omega_{nos}}{dz^2} \right) \quad (1)$$

Рівняння енергії:

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \left(\frac{d^2 t_{nos}}{dx^2} + \frac{d^2 t_{nos}}{dz^2} \right) + \frac{q_v}{c_{nos} \rho_{nos}} \quad (2)$$

В зв'язку з тим, що внутрішніх джерел тепла у повітрі немає, то складовою:

$$\frac{q_v}{c_{nos} \rho_{nos}} \quad (3)$$

необхідно знехтувати, тоді вищенаведена формула прийме наступний вигляд:

$$\frac{1}{\rho_{nos}} + \frac{d\rho_{nos}}{dt} + \frac{d\omega_{nos}}{dy} + \frac{d\omega_{nos}}{dz} = 0 \quad (4)$$

Рівняння суцільності:

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \left(\frac{d^2 t_{nos}}{dx^2} + \frac{d^2 t_{nos}}{dz^2} \right) \quad (5)$$

2) При $Z = Z_2$ (межа контакту фаз «повітря — рослинна сировина»):

В цьому діапазоні діють електромагнітні джерела згідно з граничних умов II роду:

2.1) В рослинній сировині при $Z_2 > Z > Z_1$

Рівняння нергії:

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{q_{емп}}{c_{pc} \rho_{pc}} \right) \quad (6)$$

$$\text{Рівняння Фіка:} \quad \frac{dW}{d\tau} = D \left(\frac{d^2 W}{dx^2} + \frac{d^2 W}{dz^2} \right) + \frac{dW}{dz} v_z \quad (7)$$

2.2) При $Z < Z_1$ (на межі контакту «піддону реактору — повітря»)

$$\text{Рівняння Нав'є — Стокса:} \quad \frac{dt}{d\tau} = \alpha \left(\frac{d^2 t_{nos}}{dx^2} + \frac{d^2 t_{nos}}{dz^2} \right) + \frac{q_v}{c_{nos} \rho_{nos}} \quad (8)$$

$$\text{Рівняння енергії:} \quad \rho_{nos} \omega_{nos} \left(\frac{d\omega_{nos}}{dx} + \frac{d\omega_{nos}}{dz} \right) = \rho_{nos} g - \frac{dP_{nos}}{dx} - \frac{dP_{nos}}{dz} + \mu_{nos} \left(\frac{d^2 \omega_{nos}}{dx^2} + \frac{d^2 \omega_{nos}}{dz^2} \right) \quad (9)$$

$$\text{Рівняння суцільності:} \quad \frac{1}{\rho_{nos}} + \frac{d\rho_{nos}}{dt} + \frac{d\omega_{nos}}{dy} + \frac{d\omega_{nos}}{dz} = 0 \quad (10)$$

Виведені рівняння (1 — 10) являють собою нестационарне двовірне поле температур по висоті продукту (координата Z), так і по ширині розташування продукту (координата X).

Граничні умови на межах розділу приведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Граничні умови об'єкту досліджень

Граничні умови	Модель ГУ	Координати розташування згідно з рис.2.6	Місце розташування
II роду	$q_v = q_{emf} = \text{const} \quad (11)$	$Z_1 > Z > Z_2$	Рослинна сировина
III роду	$\frac{dt_{пов}}{d\tau} = -\frac{a_{пов}}{\lambda_{pc}} (t_{pc} - t_{пов}) \quad (12)$	$Z = Z_2$	Межа контакту «рослинна сировина - повітря»
	$\frac{dt_{пов}}{d\tau} = -\frac{a_{пов}}{\lambda_{np}} (t_{np} - t_{пов}) \quad (13)$	$Z < Z_1$	Межа контакту «піддон реактору — повітря»
IV роду	$\lambda_{pc} \frac{dt}{dn} \Big _{CT1} = \lambda_{np} \frac{dt}{dn} \Big _{CT2} \quad (14)$	$Z = Z_1$	Межа контакту «піддон реактору — рослинна сировина»

Наведені рівняння (1 — 14) представляють собою нестационарну модель поєднаних масообмінних процесів перенесення та тепло аеродинамічних процесів. Цю систему необхідно доповнити рівняннями, які характеризують початкові умови, та співвідношення відповідного середовища та рослинної сировини.

Для вирішення завдання вважатимемо, що потік маси визначається ефективним специфічним коефіцієнтом масовіддачі β_p та різницею тисків у капілярі P_k (надлишковий тиск у капілярі) і P_o (тиск навколишнього середовища). Цей потік створюється потужною рушійною гідродинамічною силою, який турбує приграничний шар та зазвичай у багато разів більше традиційного дифузійного потоку [11]. Як ми знаємо неможливе іншого рішення даної моделі ніж аналітичне. Відтак подальші дослідження повинні бути спрямовані на спрощення поставленої моделі за допомогою теорії подоби. Завдяки чому запропонований безрозмірний комплекс — число енергетичної дії [11] фізичний зміст, якого визначає співвідношення витрат енергії ЕМП (Q) та базового варіанту (Q_o). З огляду на сказане число Бурдо має наступний вигляд:

$$Bu = Q / Q_o \quad (15)$$

$$Q = N\eta/\phi \quad (\text{Вт/кг}) \quad (16)$$

де: N – потужність ЕМП (Вт), η – ККД мікрохвильового апарата, ϕ — вологомісткість (кг);

$$Q_o = 1 \quad (\text{Вт/кг}) \quad (17)$$

$$Bu = N\eta/\phi \quad (18)$$

Для визначення структури моделі в узагальнених змінних необхідно залучити методи теорії подоби. В основі розрахунку використовується друга теорема подоби Федермана-Бекінгема, яка представляє собою методику постановки експериментів і обробки відповідних результатів.

Приймаємо, що кінетичним коефіцієнтом, визначаючим інтенсивність процесу екстрагування, вважається коефіцієнт масовіддачі - β_E [11]. Процес екстрагування здійснюється конвективно-дифузійним та гідродинамічним потоком. Результатом перетворень стане модель в узагальнених змінних, яка буде враховува-

ти специфіку задачі. Залежність ефективного коефіцієнту масовіддачі від основних параметрів екстрагування сформуємо з допомогою параметричної моделі процесу (рис. 1).

Таким чином конвективно-дифузійний потік визначається щільністю потоку пароповітряної фази ρ ; та в'язкістю μ ; товщиною шару сировини h ; рушійною силою процесу, тобто різницею концентрацій ΔX ; гравітаційною константою g [4].

Значення гідродинамічного потоку залежить від наступних параметрів: N – потужність випромінювання, r – питома теплота фазового переходу, h – висота шару сировини, l – довжина шару сировини. Тоді у загальному виді функціональна залежність масовіддачі матиме наступний вигляд:

$$\beta_E = f(h, l, \rho, \mu, r, N, \Delta X, D, g) \quad (19)$$

Вищенаведені параметри представимо у таблиці 2. В зв'язку з тим, що вказані параметри мають три основні розмірності: довжина та висота шару (L), масу (m), час (τ) [5].

Таблиця 2

Параметри процесу екстрагування у ЕМП

Параметри	Позначення	Розмірність
Ефективний коефіцієнт масовіддачі	β_E	$m \cdot c^{-1}$
Висота шару сировини	h	m
Довжина шару сировини	l	m
Середня щільність потоку	ρ	$kg \cdot m^{-3}$
Середня в'язкість потоку	μ	$kg \cdot m^{-1} \cdot c^{-1}$
Питома теплота фазового переходу	r	$m^2 \cdot c^{-2}$
Потужність мікрохвильового поля	N	$kg \cdot m^2 \cdot c^{-3}$
Гравітаційна постійна	g	$m \cdot c^{-2}$
Різниця концентрацій	ΔX	$kg \cdot m^{-3}$
Коефіцієнт дифузії	D	$m^2 \cdot c^{-1}$

Використовуючи аналіз розмірностей замінимо цю функцію залежністю між числами подоби. У нашому випадку число змінних $n = 10$, число одиниць вимірювання $m=3$. Відповідно до π — теореми число безрозмірних комплексів, які описують процес, повинно бути рівним:

$$(n-m)=7 \quad (20)$$

Параметри h, ρ, μ беремо загальними для всіх безрозмірних груп. Для першої групи запишемо:

$$\pi_1 = h^a \rho^b \mu^c \beta_E^d \quad (21)$$

У розмірному вигляді вираз прийме вигляд:

$$1 = [L]^a \left[\frac{M}{L^3} \right]^b \left[\frac{M}{L\tau} \right]^c \left[\frac{L}{\tau} \right]^d \quad (22)$$

Розмірна матриця для рівняння (22) має наступний вигляд (див. табл.2):

Таблиця 3

Розмірна матриця

	a	b	c	d	Рівняння
M		1	1		$b+c=0$ (23)
L	1	-3	-1	1	$a-3b-c+d=0$ (24)
τ			-1	-1	$-c-d=0$ (25)

Рішенням системи рівнянь (23 — 25) є: $a = b = -c = d$.

Відтак рівняння (21) прийме вид:

$$\pi_1 = \frac{h \rho \beta_E}{\mu} \quad (26)$$

Комплекси, які залишилися, необхідно визначити аналогічним шляхом, об'єднавши h, ρ, μ з невизначеними параметрами в таблиці 2.4.

$$\pi_2 = \frac{h^2 \rho^2 r}{\mu^2} ; \quad \pi_3 = \frac{h \rho^2 N}{\mu^3} ; \quad \pi_4 = \frac{h^3 \rho^2 g}{\mu^2} \quad (27)$$

$$\pi_5 = \frac{\Delta X}{\rho} \quad \pi_6 = \frac{\rho D}{\mu}$$

Виразимо комплекс, що залежить від геометричних параметрів:

$$\pi_7 = \frac{l}{h} \quad - \text{співвідношення параметрів сировини;} \quad (28)$$

Рівняння (26 — 28) використовують для пошуку співвідношень, які дадуть можливість представити рівняння у вигляді узагальнених змінних (табл. 4).

Таблиця 4

Числа подібності та співвідношення

№	Комплекс	Модель	Числа подібності в узагальненому виді
1	π_1	$\frac{h \rho \beta_E}{\mu} \quad (29)$	Коефіцієнт масовіддачі
2	$\frac{\pi_1}{\pi_6}$	$Sh = \frac{h \rho \beta_E}{\mu} * \frac{\mu}{\rho D} = \frac{\beta_E h}{D} \quad (30)$	Число Шервуда
3	$(\pi_6)^{-1}$	$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (31)$	Число Шмидта
4	$\pi_4 \pi_5 (\pi_7)^3$	$Gr = \frac{h^3 \rho^2 g}{\mu^2} * \frac{\Delta X}{\rho} * \left(\frac{l}{h}\right)^3 = gl^3 \rho \Delta X \mu^{-2} \quad (32)$	Число Грасгофа
5	π_7	$f(c) = \frac{l}{h} \quad (33)$	Параметр сировини
6	-	$Bu = \frac{N \eta}{\varphi} \quad (34)$	Число Бурдо

Для мікрохвильового поля враховується енергетичним числом Бурдо (Bu), при цьому базова енергія вважається та, яка потрібна для виходу пароповітряної суміші із капіляру сировини. В представленому завданні доцільним вважається співвідношення сумарної енергії ЕМП та енергії потрібної для перетворення вмісту капіляру в пароповітряну суміш [8]. Залежність числа Бурдо (Bu) від потужності ЕМП (N) прямопропорційне, також зростає різниця тисків, яка прискорює та збільшує вихід суміші з капілярів. Вищенаведене сприяє росту коефіцієнту масовіддачі β_E сумісно з цим відбувається турбулентність прикордонного шару.

Отримуємо наступний вираз:

$$Sh = A \cdot (Sc)^c (Gr)^k (Bu)^p (f(c))^u \quad (35)$$

Число Шервуда в рамках завдання відображає інтенсивність масовіддачі у безрозмірній формі, яке дорівнює відношенню конвективного перенесення до дифузії.

В даному завданні можливо знехтувати числом Грасгофа, через малий вплив природної конвекції. Внаслідок чого показник ступеню k прагне до нуля.

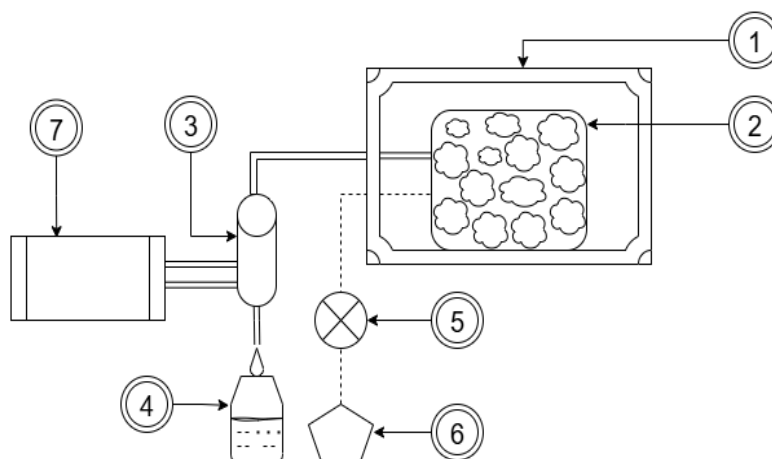
При цьому структура критеріального рівняння прийме наступний вигляд:

$$Sh = A \cdot (Sc)^c (Bu)^p (f(c))^u \quad (36)$$

Проаналізувавши вищенаведену схему масоперенесення можливо зробити наступний висновок, значення β_E для мікрохвильового екстрактора визначається інерцією потоку, розміри установки не впливають на масовіддачу [12]. Константи в рівнянні (36) визначають при розрахунку відповідних даних, отриманих в результаті проведення досліджень: **A, c, p, u**.

Матеріали досліджень та аналіз отриманих результатів.

На рисунку 1 показана малогабаритна пілотна установка, використана для отримання експериментальних результатів при обробці шкіри цитрусових плодів. Оскільки конструкція обладнання забезпечувала адіабатичні умови, необхідно враховувати тільки механізми перенесення компонентів. Наша модель розглядає ефірну олію як суміш різних органічних компонентів і враховує перенесення окремих компонентів олії [13].



1 – резонаторна камера; 2 – радіо прозора ємність з сировиною; 3 – конденсатор; 4 – ємність для збору рідини; 5 – манометр; 6 – вакуум-насос; 7 – холодильна установка

Рис 1 – Схема експериментального стану

У резонаторній камері 1 розташована радіопрозора ємність з сировиною 2, яка приєднана до конденсатора 3, де паровоз-душна фаза конденсується завдяки охолоджувальній рідині, яка поступає з холодильної установки 7, після чого дистилят потрапляє у ємність для збору рідини. При необхідності тиск в резонаторній камері знижується підключенням до системи вакуум-насоса 6 та контролюється манометром 5. Далі за допомогою шприца відбирали прошарок з ділільних воронки та зважували на лабораторних вагах для визначення виходу олії.

На вищевказаній установці була проведена серія експериментальних досліджень з визначення параметрів обробки в МХП, які забезпечують найбільший вихід цільових компонентів. Дослідження кінетики основних факторів проводили на кожурі цитрусових, визначаючи вплив на процес наступних технологічних параметрів: витрат енергії (N, Вт); температури (t, °C); часу екстракції (τ, с); тиску (P, МПа); типу сировини; факторів форми; вологості (φ, %).

При проведенні експериментальних досліджень використовувалися контрольно-вимірні прилади, обладнання та експериментальні стенди. У лабораторній установці потужність магнетронів може варіюватися від 0,34 до 1,2 кВт. Частота МХ - випромінювання становить 2450 МГц.

Аналітичні розрахунки проводили з використанням пакетів програм для ПК: Excel (Office 2020) та побудовано наступні графіки на основі проведених експериментів з корою лимону при атмосферному тиску [15].

Результати досліджень приведено на нижчевказаних графіках.

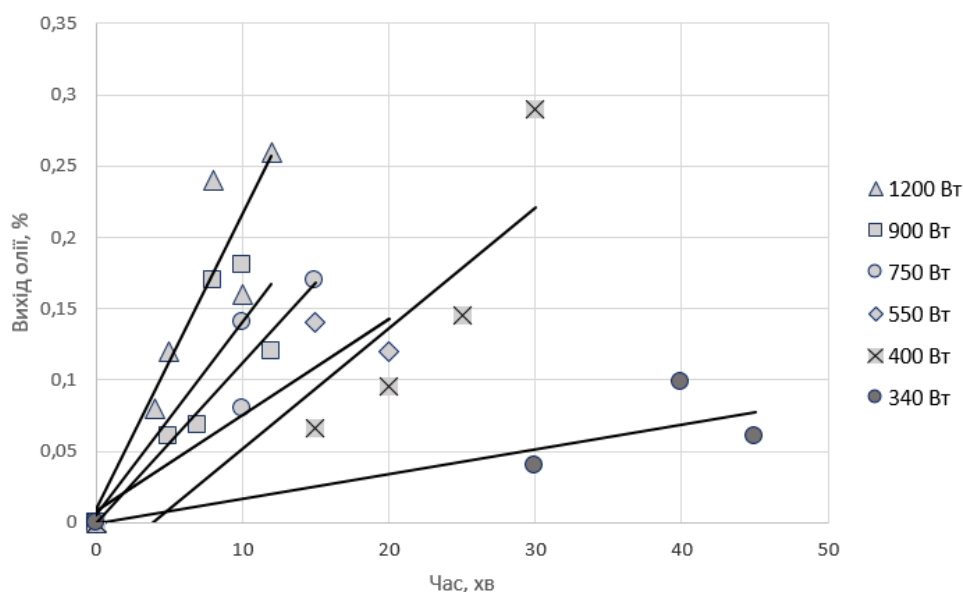


Рис.2 – Графік кінетики виходу ефірної олії

Інформація приведена на графіку (рис.2) свідчить про те що вихід ефірної олії при обробці рослинної сировини в МХП прямопропорційно потужності електромагнітного поля. Так при режимі роботи мікрохвильової печі 1,2 КВт вихід найбільший.

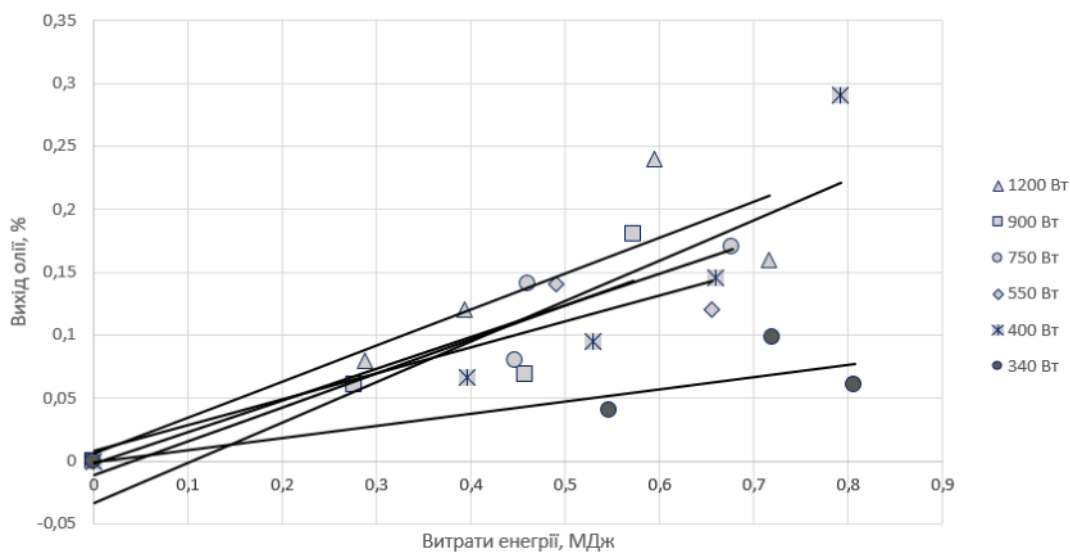


Рис.3 – Графік кінетики виходу ефірної олії

Отримані результати свідчать про те що вихід ефірної олії збільшується з витратами енергії. При потужності мікрохвильового поля 0,4 КВт та витратах енергії близько 0,8 МДж вихід олії максимальний.

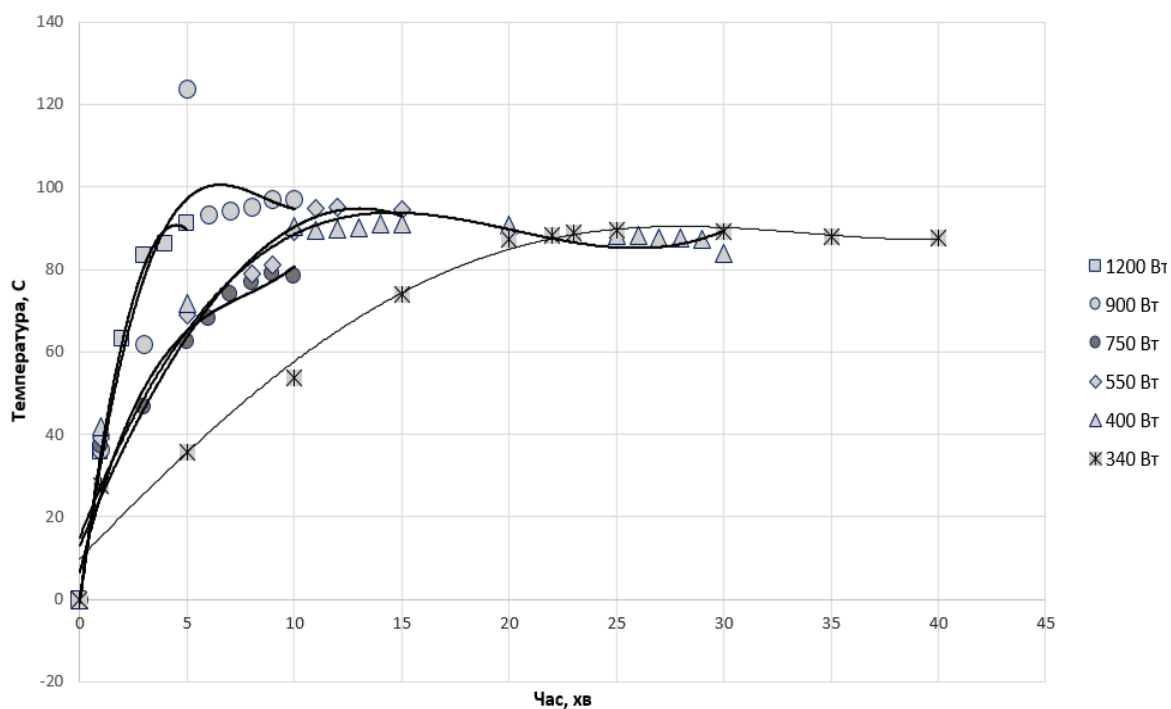


Рис.4 – Термограма

Після близько 5...12 хвилин проведення експерименту температура у резонаторній камері досягає близько 100 °C і далі практично не змінюється, що свідчить про стабілізацію процесу масоперенесення. Це характерно для різних потужностей МХП.

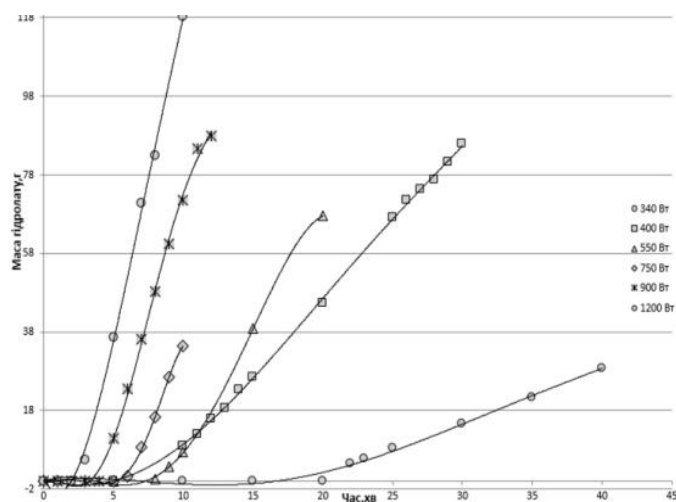


Рис.5 – Графік кінетики маси гідролату

Найбільша масу гідролату та вихід ефірної олії отримані при потужності МХП 1,2 кВт та часу проведення експерименту близько 10 хвилин. Це свідчить про те що потужність МХП позитивно впливає на зростання виходу ефірної олії [14].

Висновки. 1. Представлена математична модель процесу обробки рослинної сировини під дією МХП розширює фізичні уявлення про процеси тепломасоперенесення в системі «тверде тіло — пароповітряна суміш - рідина», дозволяє кількісно оцінити параметри процесу.

2. Запропонований метод параметричної ідентифікації математичного опису динаміки екстракції дозволяє визначити кінетичні коефіцієнти процесу з експериментального досвіду на діючій установці.

3. Розроблено загальну математичну модель та чисельний метод розрахунку динаміки та кінетики тепло- та масообміну, а також фазових перетворень під час МХ обробки сировини; яка дозволяє визначити необхідні параметри режиму, з урахуванням конструктивних особливостей обладнання.

References

1. Kovalenko, O., Slavinskyi, R., Fedosov, Ya., & Slavinska, V. (2024, September). Innovative methods of essential oil production. *Scientific Works*, 88(1), 149–155. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2978>
2. Lainez-Cerón, E., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A., & Franco-Vega, A. (2022, June). An overview of mathematical modeling for conventional and intensified processes for extracting essential oils. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 109032. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109032>
3. Maharaj, S., & McGaw, D. (2020, August). Mathematical model for the removal of essential oil constituent during steam distillation extraction. *Processes*, 8, 400. <https://doi.org/10.3390/pr8040400>
4. Araújo dos Santos, A. C. (2020). Mathematical modeling of the extraction process of essential oils *Schinus terebinthifolius Raddi* using supercritical fluids. *Journal of Bioengineering and Technology Applied to Health*, 2(4), 130–135. <https://doi.org/10.34178/jbth.v2i4.91>
5. Hamid, K. J., Kurji, B. M., & Abed, K. M. (2021). Extraction and mass transfer study of *Cupressus sempervirens* L. oil by hydro-distillation method. *Materials Today: Proceedings*, 42(5), 2227–2232. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.308>
6. Lainez-Cerón, E., Jiménez-Munguía, M. T., López-Malo, A., & Ramírez-Corona, N. (2021). Effect of process variables on heating profiles and extraction mechanisms during hydrodistillation of eucalyptus essential oil. *Heliyon*, 7(10), e08234. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08234>
7. Bandura, V., Kotov, B., Gyrych, S., Gricshenko, V., Kalinichenko, R., & Lysenko, O. (2021). Identification of mathematical description of the dynamics of extraction of oil materials in the electric field of high frequency. *Agraarteadus*, 32(1), 8–16. <https://doi.org/10.15159/jas.21.01>
8. Teshale, F., Narendiran, K., Beyan, S. M., & Srinivasan, N. R. (2022). Extraction of essential oil from rosemary leaves: Optimization by response surface methodology and mathematical modeling. *Applied Food Research*, 2(2). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100133>
9. International Trade Centre. (n.d.). *Trade statistics for international business development*. Trade Map – Trade Statistics for International Business Development. <https://www.trademap.org>
10. Souiy, Z. (2023). Essential oil extraction process. In *Biochemistry*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.113311>
11. Burdo, O., et al. (2020, June). Electrodynamics technologies – effective solution to the food industry problems. *Elektronna Obrobka Materialiv*, 56(3–4), 74–88. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3970438>
12. Sliczniuk, O., & Oinas, P. (2024, November). Mathematical modelling of essential oil supercritical carbon dioxide extraction from chamomile flowers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*.

<https://doi.org/10.1002/cjce.25557>

13. Joco, R. A., et al. (2023, October). Recent development on the extraction process of plant essential oils and its effect on chemical composition: A review. *Advanced Journal of Graduate Research*, 14(1), 9–20. <https://doi.org/10.21467/ajgr.14.1.9-20>
14. Cueto, S., & Schwartz, M. (2024, September). Extraction, properties and uses of essential oils in the food industry: A review. *Journal of Agricultural Sciences Research*, 4(12), 2–25. <https://doi.org/10.22533/at.ed.9734122419096>
15. Ravindran, A., Jayashree, E., & Anees, K. (2025, February). Recent advances in the extraction of spice essential oil and oleoresin: A review. *Agricultural Reviews*, 46(1). <https://doi.org/10.18805/AG.R-2519>

MATHEMATICAL AND EXPERIMENTAL MODELLING OF MASS TRANSFER PROCESSES IN THE PRODUCTION OF ESSENTIAL OILS

Slavinsky R.L., graduate student, Slavinska V.O., engineer, Grishenko. R. A., graduate student
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. An important innovative process in the technology of obtaining essential oils is the treatment of plant raw materials in a microwave field, which, compared to other methods, allows for a higher oil yield at lower costs. The selection of an energy-efficient processing mode is a promising direction based on a detailed study of the physical processes occurring in the capillaries of the plant matrix, which increases oil yield, improves its quality indicators and reduces energy costs. The article presents a parametric model of the installation, in which objects are defined by a set of parameters and dependencies between them, which allows the model to be automatically changed and adapted when these parameters change. Based on this, a physical model of the installation is proposed. This is a real object used for research, demonstration, and study of the properties and dynamics of the system. It is a physical embodiment of the object, which allows you to work with it in a simplified or visual form, highlighting only the most important characteristics for solving the task at hand. A non-stationary model of heat and mass transfer in two-dimensional space has been formed and described using energy, continuity and Navier-Stokes equations in the corresponding coordinates. Boundary conditions at the boundary of the object under study are determined. Methods of similarity theory are used to determine the structure of the model in generalised variables. The accepted kinetic coefficient is the mass transfer coefficient βE , which determines the intensity of the process and is represented in the general form of a functional dependence. The dimensional analysis used replaced this function with the dependence between similarity numbers. Equations were found that are used to search for relationships that will allow the equations to be represented in the form of similarity numbers. A criterion equation in implicit form is given for calculating the intensity of phase transformations in the capillary of the plant matrix. To determine the constants in the criterion equation, a series of experiments were carried out on an experimental setup (see Fig. 1) with lemon peel, which yielded information that can be used for the corresponding calculations, and the corresponding graphs of dependencies were constructed. An experimental stand for obtaining essential oil from lemon peel by microwave extraction at atmospheric pressure is illustrated.

The results obtained are the basis for organising and determining energy-efficient modes of processing plant raw materials in a microwave field through the use of mathematical modelling.

Key words: mass transfer, mathematical model of the research object, boundary conditions, energy and continuity equations, criterion equation.

Список використаної літератури

1. Коваленко, О., Р. Славинський, Я. Федосов, і В. Славинська. «Інноваційні методи виробництва ефірних олій.» *Scientific Works*, Vol 88, no 1, Sept. 2024, pp 149-55, [doi:10.15673/swonaft.v88i1.2978](https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2978)
2. Elizabeth Lainez-Cerón, Nelly Ramírez-Corona, Aurelio López-Malo, Avelina Franco-Vega «An overview of mathematical modeling for conventional and intensified processes for extracting essential oils.» *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, June. 2022, p. 109032, [doi:10.1016/j.cep.2022.109032](https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109032).
3. Maharaj, S.; McGaw, D. «Mathematical model for the removal of essential oil constituent during steam distillation extraction.» *Processes* 2020, August, p. 400, doi.org/10.3390/pr8040400.
4. Araújo dos Santos, Ana Carolina. «Mathematical modeling of the extraction process essential oils schinus terebinthifolius raddi using supercritical fluids.» *Journal of bioengineering and technology applied to health*, v. 2, 4, 2020, p. 130-35, [doi:10.34178/jbth.v2i4.91](https://doi.org/10.34178/jbth.v2i4.91).
5. Khaled J. Hamid, Badoor M. Kurji, Khalid M. Abed, «Extraction and mass transfer study of cupressus sempervirens l. oil by hydro-distillation method», *Materials today: Proceedings*, v. 42, part 5, 2021, p. 2227-2232, doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.308
6. Elizabeth Lainez-Cerón, María Teresa Jiménez-Munguía, Aurelio López-Malo, Nelly Ramírez-Corona, «Effect of process variables on heating profiles and extraction mechanisms during hydrodistillation of eucalyptus essential oil», *Heliyon*, Volume 7, Issue 10, 2021, e08234, doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08234.

7. Bandura, V., Kotov, B., Gyrych, S., Gricshenko, V., Kalinichenko, R., Lysenko, O. 2021. «Identification of mathematical description of the dynamics of extraction of oil materials in the electric field of high frequency.» *Agraarteadus*, 32(1):8–16. doi.org/10.15159/jas.21.01
8. Frew Teshale, K. Narendiran, Surafel M. Beyan, N. R. srinivasan, «Extraction of essential oil from rosemary leaves: optimization by response surface methodology and mathematical modeling», *Applied food research*, volume 2, issue 2, 2022, doi.org/10.1016/j.afres.2022.100133.
9. International Trade Centre. «Trade statistics for international business development.» Trade Map - Trade Statistics for International Business Development, www.trademap.org.
10. Souiy, Zoubaida. «Essential oil extraction process.» *Biochemistry, IntechOpen*, 2023, [doi:10.5772/intechopen.113311](https://doi.org/10.5772/intechopen.113311).
11. Burdo, O., et al. «Electodynamic technologies – effective solution to the food industry problems.» Електронна обробка матеріалів, vol. 56, no. 3-4, Zenodo, June 2020, с. 74–88, doi.org/10.5281/zenodo.3970438.
12. Sliczniuk, Oliwer, and Pekka Oinas. «Mathematical modelling of essential oil supercritical carbon dioxide extraction from chamomile flowers.» *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Nov. 2024, [doi:10.1002/cjce.25557](https://doi.org/10.1002/cjce.25557)
13. Joco, Randy A. et al., «Recent Development on the Extraction Process of Plants Essential Oil and its Effect on Chemical Composition: A Review». *Advanced Journal of Graduate Research*, v. 14, № 1, October. 2023, p. 9-20, [doi:10.21467/ajgr.14.1.9-20](https://doi.org/10.21467/ajgr.14.1.9-20).
14. Cueto, S., M. Schwartz. «Extraction, properties and uses of essential oils in the food industry: a review.» *Journal of Agricultural Sciences Research* (2764-0973), vol. 4, № 12, Septem. 2024, p. 2-25, [doi:10.22533/at.ed.9734122419096](https://doi.org/10.22533/at.ed.9734122419096).
15. Archana Ravindran, E. Jayashree, K. Anees «Recent Advances in the Extraction of Spice Essential Oil and Oleoresin: A Review» 2025, *Agricultural Reviews*, Volume 46 Issue 1 (February 2025) doi.org/10.18805/AG.R-2519.

Отримано в редакцію 11.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 11.06.2025
Approved 02.09.2025

ІНЖЕНЕРНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ЕКСТРАКТОРІВ ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ТИПУ

Молчанов М.Ю. аспірант, Коцур І.О. аспірант, Терзієв С.Г. д.т.н., доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. У сучасному виробництві спостерігається тенденція до розширення використання концентратів рослинної сировини, які, попри складність виготовлення, характеризуються зручністю зберігання, високою концентрацією біологічно активних речовин і тривалим терміном придатності. Разом із тим, традиційні технології екстрагування залишаються енергоємними та екологічно неефективними через застосування застарілого обладнання. Це зумовлює необхідність удосконалення технологічних процесів та впровадження нових методів обробки сировини, спрямованих на підвищення виходу екстрактивних речовин і зменшення енергетичних витрат.

Перспективним напрямом є використання мікрохвильового (МХ) поля для інтенсифікації процесів екстрагування. Такий підхід дає змогу дослідити кінетику масообміну, ефект механодифузії та можливість екстрагування без попереднього подрібнення сировини.

Проведено аналіз робіт, присвячених МХ-екстрагуванню кавової сировини з використанням води, етанолу та CO_2 . Встановлено перспективність методу для підвищення ефективності вилучення екстрактивних речовин.

Ключові слова: екстрагування, мікрохвильове поле, експериментальне моделювання, тепломасообмін.

Вступ. Концентрати, отримані з рослинної сировини, вирізняються швидкістю підготовки до використання, тривалим терміном зберігання, зручністю транспортування та універсальністю застосування у різних галузях промисловості. Сукупність цих характеристик визначає зростання попиту на рослинні концентрати (РК) як у хімічній та фармацевтичній промисловості, так і в харчовому секторі, де вони використовуються у вигляді харчових концентратів (ХК) [1]. Останніми роками спостерігається стабільне розширення асортименту РК і збільшення масштабів їх виробництва. Продукція даного типу активно застосовується не лише на промислових підприємствах, але й у сфері громадського харчування та побуті — для приготування страв, десертів і напоїв [2].

У харчовій промисловості найбільш розповсюдженим продуктом цього напрямку є порошок розчинної кави, а також набувають популярності рідкі кавові концентрати [3]. Кавова галузь залучає понад 25 млн працівників у світі, що свідчить про її значну соціально-економічну роль. Продажі розчинної кави стабільно зростають, а ринок рослинних концентратів демонструє позитивну динаміку, зумовлену підвищенням інтересу споживачів до натуральних інгредієнтів. Згідно з прогнозами, у 2022–2030 роках очікується середньорічне зростання ринку рослинних екстрактів на рівні близько 7 % [4]. Такі тенденції пояснюються підвищенням рівня обізнаності щодо користі натуральних продуктів, зростанням поширеності хронічних захворювань і розвитком профілактичної медицини. Додатковими чинниками є підвищений попит на рослинні екстракти у виробництві харчових продуктів, напоїв, косметики та нутрицевтиків.

Ключовими стадіями технологічного процесу отримання РК є екстрагування та сушіння, які характеризуються високими енергетичними витратами та екологічними ризиками [5, 6]. Оскільки собівартість сировини є фактором, що практично не підлягає регулюванню з боку виробника, підвищення конкурентоспроможності можливе у двох напрямках: впровадження інноваційних технологій для інтенсифікації процесів екстрагування та сушіння або ж використання технологій глибокої переробки, спрямованих на максимальне вилучення цільових компонентів із сировини при мінімальному впливі на довкілля.

На кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту Одеського національного технологічного університету розроблено інноваційні технологічні рішення, що базуються на використанні мікрохвильового (МХ) поля для цілеспрямованого підведення енергії до структурних елементів сировини — клітин, пор та частинок. Такий підхід забезпечує підвищення енергоефективності процесів, покращення якісних показників готової продукції та розширення асортименту виробів. Але обробка МХ полем можлива лише в спеціальних апаратах електродинамічного типу в яких поле буде діяти лише на сировину не екрановану екстрагентом, тому для цього обрано електродинамічні екстрактори циркуляційного типу що дозволяють обробляти сировину циркулюючим екстрагентом в певні періоди часу. Через складність конструкції такого апарату і ускладнення процесу в ньому за рахунок утворення нового ефекту, що впливає на процес, ускладняється і розрахунок таких апаратів. Тому ставиться завдання привести приклад інженерного методу розрахунку електродинамічного екстрактора циркуляційного типу.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми. У публікації [7] наведено результати дослідження процесу мікрохвильового (МХ) екстрагування олії із зелених кавових зерен. Встановлено, що ви-

користання МХ-енергії дає змогу скоротити тривалість екстрагування до 10 хв при температурі 45 °С, тоді як традиційний метод у апараті Сокслета потребує близько чотирьох годин. Отримані екстракти характеризуються високою антиоксидантною активністю. Водночас залишаються відкритими питання, пов'язані з можливістю ефективного вилучення кавової олії з кавового шламу. Ймовірно, це обумовлено нижчим вмістом олії у відходах порівняно з меленими зернами. Проте згідно з експериментальними даними, у кавовому шламі міститься 7–12 % олії, а залишкові компоненти мають повноцінний хімічний склад, подібний до вихідної сировини. Таким чином, кавовий шлам може розглядатися як перспективна вторинна сировина для одержання кавової олії, що потенційно дає змогу знизити собівартість кінцевого продукту.

У роботі [8] представлено результати МХ-екстрагування відпрацьованої фільтрованої кави, яка утворюється як побічний продукт у закладах громадського харчування та побутових умовах. Як екстрагент застосовували 20 %-й розчин етанолу, у результаті чого отримано поліфенольні екстракти з вираженими антиоксидантними властивостями.

У працях [9, 10] розглянуто альтернативні методи вилучення біоактивних речовин із кавової сировини — зокрема, рідинне екстрагування під тиском олії із зелених кавових зерен при 50 °С, а також МХ-екстрагування олії з кавового шламу із застосуванням суміші CO₂ та етанолу. Зазначено, що використання цих методів забезпечує підвищений вихід екстрактивних речовин, скорочення тривалості процесу та зменшення обсягу використаних органічних розчинників.

У роботі [11] досліджено процес МХ-екстрагування полісахаридів із кавового шламу. Експерименти проводили за умов підвищених температур (140–200 °С) та тиску (до 4 МПа). Водночас встановлено, що застосування високих тисків, особливо у випадку надкритичного екстрагування CO₂, суттєво підвищує енергоспоживання процесу. Крім того, такі технології характеризуються складною апаратурною реалізацією, що обмежує їх промислове застосування.

Інженерна методика розрахунку електродинамічного екстрактора циркуляційного типу. Розрахунок екстрактора електродинамічного типу є відмінним від традиційного тим що процес у ньому йде не лише за рахунок хімічної взаємодії розчинних цільових компонентів сировини і розчинника, а й за рахунок механічного видалення слабозрчинних і нерозчинних компонентів під дією ефекту механодифузії. Тому при розрахунку потрібно враховувати потужність і вплив електромагнітного поля на сировину.

Для подальших розрахунків базовими незмінними параметрами виступають початкові характеристики сировини та екстрагента і продуктивність екстрактора. До основних параметрів належать: вміст екстрактивних речовин у сировині, що можуть переходити в екстрагент, їх концентрація в отриманому екстракті, початкова температура екстрагента. Змінними параметрами є теплофізичні характеристики екстрагента, гідромодуль, потужність електромагнітного поля, конструктивні особливості апарата, температура в процесі обробки та кінцева концентрація екстракту.

Крім зазначених змінних і незмінних параметрів, на процес обробки впливають додаткові чинники: термодинамічні, гідродинамічні, кінетичні, масообмінні та технологічні.

Розрахунок дозволяє визначити кінцеві концентрації цільових компонентів у сировині та екстрагенті, необхідну потужність електромагнітного поля в заданому температурному діапазоні, коефіцієнт масовіддачі β , а також енергетичні витрати на процес обробки. Алгоритм розрахунку електродинамічного екстрактора циркуляційного типу приведено на рис. 1.



Рис. 1 – Алгоритм розрахунку електродинамічного екстрактора циркуляційного типу

Основними теплофізичними параметрами екстрагенту які нас цікавлять є його щільність ρ , кг/м³, питома теплоємність Дж/(кг*К) та прихована теплота пароутворення Дж/кг, ці параметри визначаються за спрощеними формулами приведеними у БС-ТФВ (рис. 2.)

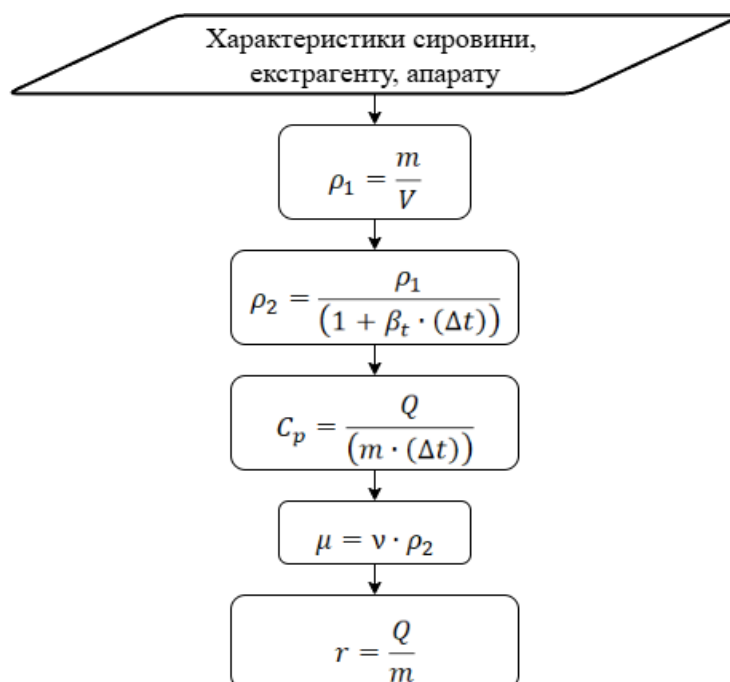


Рис. 2 – Блок-схема визначення теплофізичних властивостей (БС-ТФВ)

Де: ρ_1 – густина при певній температурі, кг/м³, може бути обрана за таблицею; m – маса рідини, кг; V – об'єм рідини, м³; ρ_2 – густина з урахуванням впливу температури, кг/м³; β_t – коефіцієнт температурного розширення рідини, К⁻¹, може бути обрано за таблицею; Δt – різниця температур початкової та кінцевої, °С; c_p – питома теплоємність, Дж/(кг/К), може бути обрано за таблицею; Q – кількість енергії для нагріву сировини на певну температуру, Дж; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па*с, може бути обрано за таблицею; v – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с, може бути обраний за таблицею; r – питома теплота пароутворення, Дж/кг, може бути обрано за таблицею.

Для визначення концентрації екстрактивних речовин у сировині можна використати БС-КМП (рис. 3), з використанням відомих густин сировини та екстрагенту, їх витрати та максимально допустимої кількості екстрактивних речовин які можна витягнути з сировини.

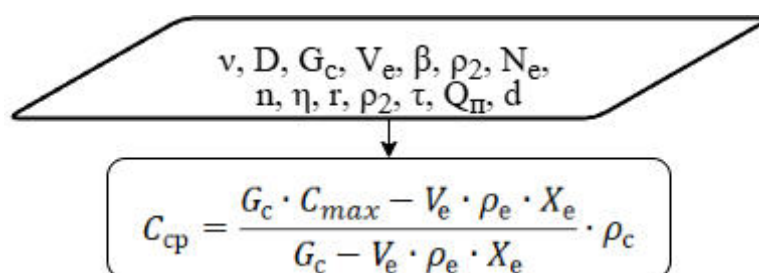


Рис. 3 – Блок-схема визначення поточної концентрації в твердій фазі (БС-ПК)

Де: C_{cp} – поточна концентрація цільових компонентів в сировині; G_c – маса сировини, кг; C_{max} – максимальна концентрація цільових компонентів в сировині; V_e – об'єм екстрагенту, м³; ρ_e – густина екстрагенту, кг/м³; ρ_c – густина сировини, кг/м³; X_e – концентрація цільових компонентів в екстрагенті.

Наступним йде визначення кінетики масопереносу, ціль розрахунку цього параметру це отримання ефективного коефіцієнту масовіддачі β_{ef} . Для розрахунку β_{ef} потрібно врахувати число Sc – зміна властивостей потоку, Γ – гідромодуль, співвідношення сировини та екстрагента, число Bu – число енергетичної дії МХ поля. Коефіцієнт масовіддачі визначається з числа Шервуда (Sh), яке буде в основі розрахунку. Рівняння визначення поточної концентрації приведено в БС-ПК (рис. 3.).

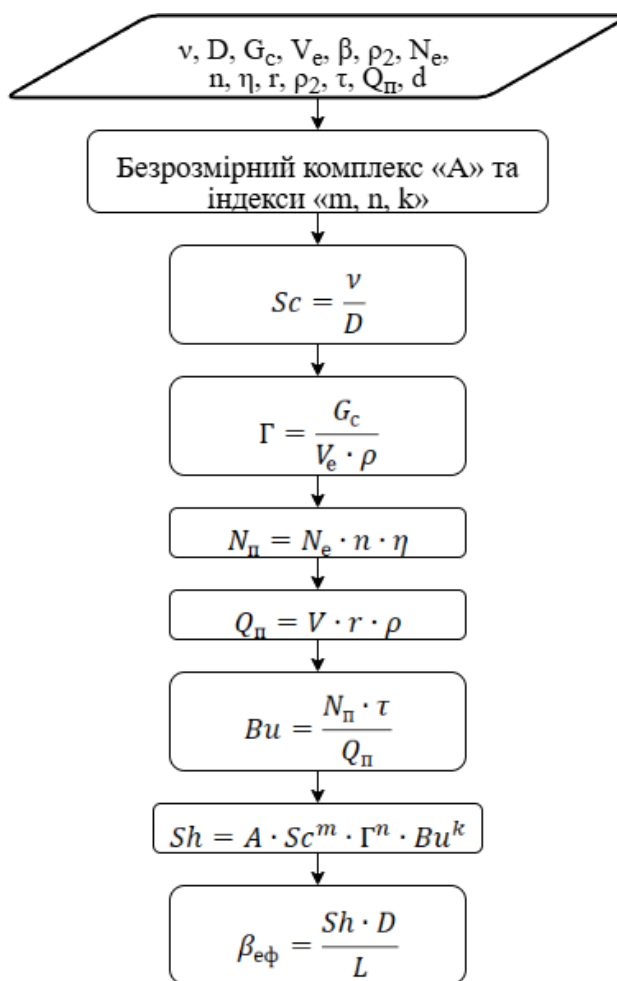


Рис. 4 – Блок-схема визначення кінетики масопереносу (БС-КМП)

Де: D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$, визначається експериментально; Γ – гідромодуль, співвідношення сировини та екстрагенту; G_c – витрата сировини, $\text{кг}/\text{с}$; V_e – витрата екстрагенту, $\text{м}^3/\text{с}$; N_n – потужність що споживається продуктом, Вт ; N_e – потужність що споживається магнетроном; n – коефіцієнт робочого часу магнетрону; η – ККД роботи магнетрона. Q_n – енергія витрачена на нагрів сировини, Дж ; V – об'єм сировини, м^3 ; τ – час обробки, с ; L – цільовий розмір, м . Величина «А» та індекси «m, n, k» визначаються графічно чи аналітично.

Для розрахунку використано наступні числа подоби: Sc – число Шмідта, яке є співвідношенням кількості руху потоку до дифузійного потоку; Bu – число Бурдо, яке є числом енергетичної дії магнетрона;

Sh – число Шервуда, яке є співвідношенням коефіцієнту конвективного масообміну до коефіцієнту дифузії.

Після визначення даних з приведених вище блок-схем стає можливим побудова загального алгоритму розрахунку параметрів електродинамічного екстрактора циркуляційного типу. Метою розрахунку алгоритму на рис. 5. є отримання кількості екстрактивних речовин що перейшли до екстракту, енергетичні витрати на процес обробки та його час. Вхідними параметрами для розрахунку є: початкові параметри екстрагенту (його тип, витрати, початкова температура); характеристики сировини (загальна маса, площа поверхні 1 кг сировини, густина сировини); гідромодуль; енергетичні параметри апарату; коефіцієнт дифузії для обраної сировини та екстрагенту; початкова та цільова концентрація цільових компонентів; температури процесу. Потужність МХ поля що буде робочою визначається заданою температурою процесу обробки. У 6 блоці блок-схеми проводиться розрахунок поточної та середньої температури процесу, за якою визначаються теплофізичні властивості екстрагенту. У блоках 8 – 12 визначається поточні значення концентрації. У блоці 11 визначається маса цільових компонентів які перейшли з сировини до екстрагенту за певний проміжок часу обробки, за допомогою коефіцієнта масовіддачі, який визначається з критеріального рівняння на основі результатів досліджень окремо для певних комбінацій сировини, екстрагенту та апарату. Для визначення площі поверхні контакту фаз потрібно знати питому поверхню та масу сировини. Час обробки екстрактора визначається моментом, коли концентрація цільових компонентів у сировині досягає рівноважної концентрації і екстрагент не може розчинити більше екстрактивних речовин.

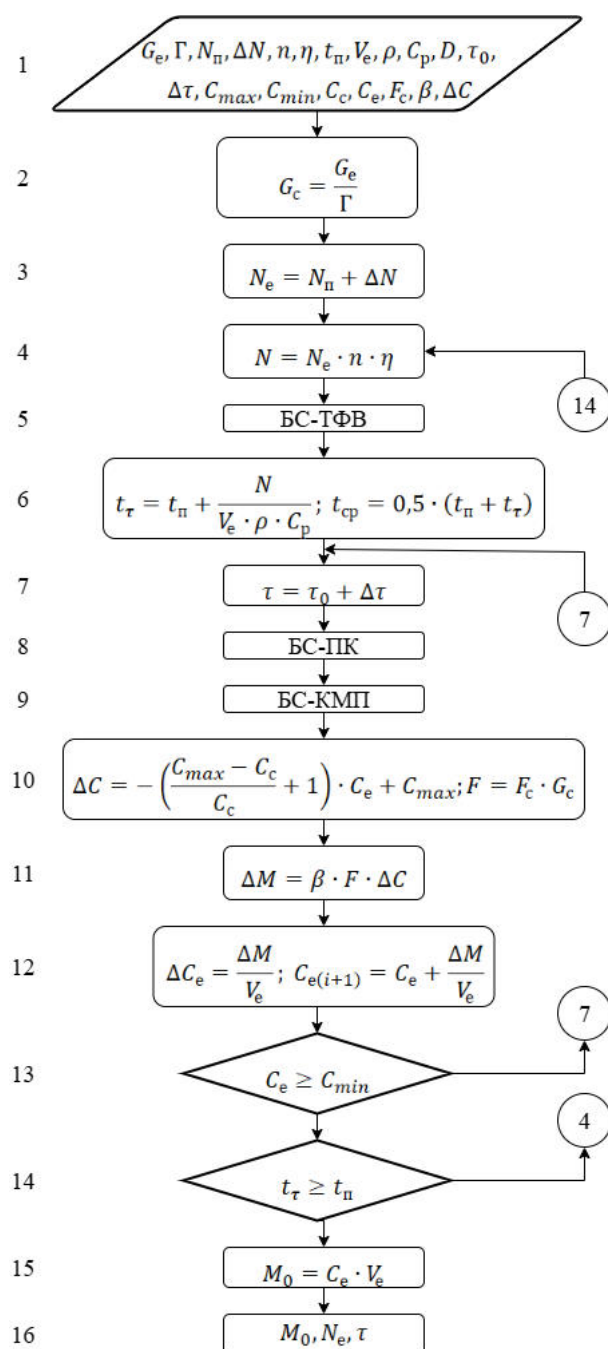


Рис. 5 – Загальний алгоритм розрахунку параметрів електродинамічного екстрактора циркуляційного типу

Де: G_c - маса сировини для обробки, кг; Γ – гідромодуль; t_τ - температура процесу обробки, °C; t_n - початкова температура сировини, °C; t_{cp} - середня температура обробки, °C; τ – час обробки сировини, с; τ_0 – час початку обробки сировини, с; $\Delta \tau$ – проміжок часу обробки, с; ΔC – різниця концентрацій між сировиною та екстрагентом; ΔC_{cp} – різниця поточних концентрацій сировини за проміжок часу обробки; ΔM – різниця маси екстрактивних речовин що перейшла до екстрагенту за проміжок часу обробки; M_0 - маса екстрактивних речовин у екстракті.

Екстрагент для обробки повинен мати нульову концентрацію цільових компонентів для збільшення масообмінних характеристик. Кількість циклів обробки сировини в циркуляційному екстракторі залежить від необхідної кінцевої концентрації екстракту.

Висновки. Розроблений алгоритм дозволяє здійснити інженерний розрахунок електродинамічного екстрактора циркуляційного типу. В основі розрахунку лежить принцип застосування аналітичних моделей з числами подібності. Результатом розрахунку є ефективний коефіцієнт масовіддачі, який дає змогу визначити кількість вилученого цільового компоненту з сировини за певний проміжок часу і необхідну для цього

потужність електромагнітного поля.

References

1. Ahangari, B., & Sargolzaei, J. (2012). Extraction of lipids from spent coffee grounds using organic solvents and supercritical carbon dioxide. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37(5), 1014–1021. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00757.x>
2. Belandria, V., Aparecida de Oliveira, P. M., Chartier, A., Rabi, J. A., de Oliveira, A. L., & Bostyn, S. (2016). Pressurized-fluid extraction of cafestol and kahweol diterpenes from green coffee. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.07.022>
3. Kim, J. H., Ahn, D. U., Eun, J. B., & Moon, S. H. (2016). Antioxidant effect of extracts from the coffee residue in raw and cooked meat. *Antioxidants*, 5(3), 21. <https://doi.org/10.3390/antiox5030021>
4. Ozyurt, V. H., Çakaloglu, B., & Otles, S. (2021). Optimization of cold press and enzymatic-assisted aqueous oil extraction from tomato seed by response surface methodology: Effect on quality characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(5), e15471. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15471>
5. Ruckmangathan, S., Ganapathyswamy, H., Sundararajan, A., Thiyaamoorthy, U., Green, R., & Subramani, T. (2022). Physico-chemical, structural, and functional properties of protein concentrate from selected pulses: A comparative study. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022(202246). <https://doi.org/10.1111/jfpp.17169>
6. Samsalee, N., & Sothornvit, R. (2022). Different novel extraction techniques on chemical and functional properties of sugar extracts from spent coffee grounds. *Aims Agriculture and Food*, 7(4), 897–915. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2022055>
7. Todaro, A., Arena, E., Timpone, R., Parafati, L., Proetto, I., Pesce, F., Pisana, F., Fallico, B., & Palmeri, R. (2023). Use of concentrated fruit juice extracts to improve the antioxidant properties in a soft drink formulation. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 31(6), 100649. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100649>
8. Tsukui, A., Santos Júnior, H. M., Oigman, S. S., de Souza, R. O. M. A., Bizzo, H. R., & Rezende, C. M. (2014). Microwave-assisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC. *Food Chemistry*, 164, 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.039>
9. Zia, S., Khan, M. R., Shabbir, M. A., Maan, A. A., Khan, M. K. I., Nadeem, M., Khalil, A. A., Din, A., & Aadil, R. M. (2020). An inclusive overview of advanced thermal and nonthermal extraction techniques for bioactive compounds in food and food-related matrices. *Food Reviews International*, 38(6), 1166–1196. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1772283>

ENGINEERING METHODS FOR CALCULATION OF ELECTRODYNAMIC EXTRACTORS OF CIRCULATION TYPE

Molchanov M.Yu. postgraduate student, Kotsur I.O. postgraduate student, Terziev S.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. In modern production, there is a tendency to expand the use of plant raw material concentrates, which, despite the complexity of production, are characterized by ease of storage, high concentration of biologically active substances and long shelf life. At the same time, traditional extraction technologies remain energy-intensive and environmentally inefficient due to the use of outdated equipment. This necessitates the improvement of technological processes and the introduction of new methods of processing raw materials aimed at increasing the yield of extractive substances and reducing energy costs.

A promising direction is the use of a microwave (MX) field to intensify extraction processes. This approach makes it possible to study the kinetics of mass transfer, the effect of mechanodiffusion and the possibility of extraction without prior grinding of raw materials.

An analysis of works devoted to the MX extraction of coffee raw materials using water, ethanol and CO₂ was carried out. The prospects of the method for increasing the efficiency of extractive substances extraction were established. The calculation, based on the principle of using analytical models with similarity numbers (or dimensionless numbers) is proposed. The result of the calculation is the effective mass transfer coefficient, which makes it possible to determine the amount of the target component extracted from the raw material over a certain period of time and the electromagnetic field power required for this purpose.

Key words: extraction, microwave field, experimental modeling, heat and mass transfer.

Список використаної літератури

1. Ruckmangathan S., Ganapathyswamy H., Sundararajan A., Thiyaamoorthy U., Green R., Subramani T. Physico-Chemical, Structural, and Functional Properties of Protein Concentrate From Selected Pulses: A

- Comparative Study. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 202246. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17169>
2. Todaro A., Arena E., Timpone R., Parafati L., Proetto I., Pesce F., Pisana F., Fallico B., Palmeri R. Use of concentrated fruit juice extracts to improve the antioxidant properties in a soft drink formulation. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2023, 31(6), 100649. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100649>
 3. Zia S., Khan M.R., Shabbir M.A., Aslam Maan A., Khan M.K.I., Nadeem M., Khalil A.A., Din A., Aadil R.M. An Inclusive Overview of Advanced Thermal and Nonthermal Extraction Techniques for Bioactive Compounds in Food and Food-related Matrices. *Food Reviews International*, 2020, 38(6), 1166–1196. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1772283>
 4. Ozyurt V.H., Çakaloglu B., Otles S. Optimization of cold press and enzymatic-assisted aqueous oil extraction from tomato seed by response surface methodology: Effect on quality characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(5), e15471. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15471>
 5. Tsukui A., Santos Júnior H.M., Oigman S.S., de Souza R.O.M.A., Bizzo H.R., Rezende C.M. Microwaveassisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC. *Food Chemistry*, 2014, 164, 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.039>
 6. Kim J.H., Ahn D.U., Eun J.B., Moon S.H. Antioxidant Effect of Extracts from the Coffee Residue in Raw and Cooked Meat. *ANTIOXIDANTS*, 2016, 5(3), 21. <https://doi.org/10.3390/antiox5030021>
 7. Belandria V., Aparecida de Oliveira P.M., Chartier A., Rabi J.A., de Oliveira A.L., Bostyn S. Pressurized-Fluid Extraction of Cafestol and Kahweol Diterpenes from Green Coffee. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 37, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.07.022>
 8. Ahangari B., Sargolzaei J. Extraction of Lipids from Spent Coffee Grounds Using Organic Solvents and Supercritical Carbon Dioxide. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2012, 37(5), 1014–1021. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00757.x>
 9. Samsalee N., Sothornvit R. Different Novel Extraction Techniques on Chemical and Functional Properties of Sugar Extracts from Spent Coffee Grounds. *Aims Agriculture and Food*, 2022, 7(4), 897–915. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2022055>

Отримано в редакцію 01.07.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 01.07.2025

Approved 02.09.2025

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

Мординський В.П.¹, к.т.н., доц., Грещук В.П.¹, аспірант, Коляновська Л.М.², к.т.н., доц.

¹Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

²Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

Анотація. Розглянуто методи опріснення солоних вод. Наведено енергетичні та якісні переваги низькотемпературних технологій опріснення, дана їх класифікація та визначено проблеми. Аналізуються перспективи технологій блочного виморожування. Метою роботи є розробка методів розрахунку та оптимізації комплексу «кристалізатор – сепаратор». Поставлено задачу системного моделювання основних процесів блочного виморожування. Розроблено статичні балансові моделі процесів кристалізації та сепарування. Розглянуто параметричні, фізичні та енергетичні моделі цих процесів. Обґрунтовано, що ключовим параметром, яким можна оптимізувати роботу системи, є температура поверхні кристалізатора. Наведено математичні моделі кінетики кристалізації та сепарування. Проведено випробування дослідного зразка опріснювача блочного типу. Результати випробувань становлять основний науково-практичний результат роботи. За критерієм енергетичної ефективності рекомендуються режими виморожування 2 години, та сепарування 6 годин. Температура поверхні кристалізації -8°C потребує найменших витрат енергії. Проведено випробування на воді Чорного моря. Отримано, що через короткий час роботи опріснювача блок льоду вже відповідав допустимим стандартам питної води як по загальному вмісту солей, так й по основним показникам.

Ключові слова. водні розчини, енергоефективність, технології водопідготовки, харчові технології, блочне виморожування.

Вступ. Низькотемпературні технології, порівняно з традиційним випарюванням, характеризуються нижчим рівнем енергетичних витрат. Найменша робота потрібна для переведення речовини у більш організовану структуру. Тому технології виморожування відрізняються меншою енергоемністю, ніж випарювання. Ніколи не заперечується той факт, що процеси низькотемпературного поділу розчинів забезпечують високу якість готового продукту, цей фактор особливо цінний для харчових технологій, метою яких є максимально зберегти весь комплекс природних корисних компонентів сировини.

Формування на стадії кристалізації блоку льоду дає можливість простими методами організувати процес сепарування розчину з структури пористої блоку. Процеси гравітаційного сепарування дозволяють надійно регулювати концентрацію неводних компонентів у розплаві льоду. Використання нових методів організації процесів кристалізації та сепарування дозволило створити гамму установок блочного типу, що виморожують. Це установки багатофункціонального призначення. Вони випробувані в технологіях концентрування соків, екстрактів, молочних продуктів, оцтових розчинів, кави, фракціонування вина та молочної сироватки.

Аналіз останніх досліджень і формулювання проблеми. Система зворотного осмосу Aquarum AMRO-250 L з мембраною Hydranautics – Aquarum AMAquarum AMRO-250L – це високопродуктивна система зворотного осмосу для професійного використання на автомийках, у лабораторіях та невеликих виробництвах. Установка призначена для знесолення води та видалення до 98% розчинених солей, жорсткості, заліза, марганцю, органіки та інших шкідливих домішок. У системі використовується мембрана Hydranautics ESPA4-LD 4040, яка забезпечує стабільну якість очищення та тривалий термін служби. Відцентровий насос Lowaga (Італія) забезпечує високий тиск і надійну роботу. Контролер з дисплеєм повністю автоматизує процес очищення, включно з захистом від «сухого ходу», промивками, відображенням стану та управлінням дозуванням антискалantu. Продуктивність до 250 л/год, потужність 0,75 кВт, габарити: 450×600×1300 мм [1]. Потужні установки зворотного осмосу широко використовуються у харчовій, фармацевтичній, хімічній промисловості, автомийках, котельнях і теплицях [2]. Вони забезпечують 99% фільтрації та оптимізують витрати підприємства. Комплектуються мембранами Hydranautics – продукцією провідного світового виробника мембранних елементів, що гарантує найвищий рівень очищення та довговічність обладнання. Системи зворотного осмосу (RO) це технології фільтрації води, в якій використовується напівпроникна мембрана для видалення домішок і забруднень з води [3]. Зазвичай використовуються для очищення питної води в будинках, на підприємствах та промисловості. У стандартній системі вода спочатку проходить через попередній фільтр видалення великих частинок і осаду. Потім попередньо відфільтрована вода проходить через напівпроникну мембрану, яка пропускає лише молекули води, блокуючи інші молекули та забруднюючі речовини, такі як бактерії, віруси, мінерали та розчинені тверді речовини. Очищена вода зберігається в резервуарі для використання. Системи зворотного

осмосу можуть видаляти широкий спектр забруднюючих речовин, включаючи хлор, фторид, нітрати, миш'як, свинець та інші шкідливі хімічні речовини та мінерали. Вони використовуються для виробництва чистої та безпечної питної води. Для більш простих завдань очищення і знезараження води використовується змінна ультрафіолетова лампа Sterilight S950RL-HO [4]. Ресурс роботи обмежений – 1 рік або 9000 годин (до зменшення інтенсивності УФ до 75%). Sterilight S950RL-HO – лампа низького тиску, середньої інтенсивності ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі 254 нм. Чутлива до перепадів напруги, тому при експлуатації рекомендується використовувати з регулятором напруги. Використовують сорбційні методи очищення [5]. Так, зерниста засипка TerraMIX Sorb A, основним компонентом якої є Сорбент АС, служить для знезалізнєння води. Даний сорбент використовується в якості основного шару і є придатним для роботи сумісно з усіма окисниками, які прискорюють реакцію перенесення нерозчинного заліза у вигляді суспензії з подальшим його осадженням і вмістом фільтрувального шару. Основою при виготовленні Сорбенту АС є активні метали без нанесеного оксидного напilenня. Завдяки цьому гарантується висока зносостійкість матеріалу, а також унеможливаються втрати каталітичних властивостей, зумовлених стиранням активного шару. До переваг також можна віднести простоту завантаження та легкість промивання. Низький рівень рН і вміст сірководню у воді не створюють складнощів при використанні TerraMIX SORB A з метою знезалізнєння.

Способи водопідготовки суттєво відрізняються за енергетичними витратами, за її реалізації. Найменші витрати енергії мають мембранні методи, вони не вимагають витрат на фазові перетворення [4]. Найбільші витрати енергії вимагають термічні методи, оскільки в результаті процесу утворюється менш організована структура води – пара. А ця пов'язана із значними енергетичними витратами. Холодильні методи стали відомі з другої половини ХХ століття і нині менш поширені, незважаючи на низку їх переваг. У порівнянні з дистиляційними опріснювачами, холодильні мають меншу корозію, менші капітальні витрати, більш високу термодинамічну ефективність. У них відсутня утворення накипів.

Розглянемо два методи очищення води – дистиляцію та кріоконцентрування. Останній застосовують для ефективного очищення води шляхом її перекристалізації. Кріоконцентрування є значно ефективнішим дистиляції, оскільки фенол, хлорфеноли і легка хлорорганіка (ряд хлорвмісних сполук є отруйними) є леткими і при випарюванні транспортуються разом з водяною парою. При цьому, якщо ми очищатимемо воду виморожуванням, то нам вдасться відокремити її від даних шкідливих домішок. Крім вищесказаного метод кріоконцентрування найбільш економічний порівняно з дистиляційним методом очищення води, оскільки питома теплота пароутворення приблизно дорівнює 2258 кДж/кг, а питома теплота утворення льоду дорівнює 338 кДж/кг.

Вибір методу і технології опріснення води залежить від вимог до якості та солевмісту, що пред'являються до води, а також техніко-економічних показників. В залежності від реалізованого методу знесолєння води використовуються різні типи опріснювачів [5]. Дистилятори застосовуються при опрісненні морської води і солоних вод з високим солевмістом до 35 г/л. на частку дистиляційних опріснювальних установок, 2,9% – електродіалізних, 1% – зворотноосмотичних та 0,1% – на частку заморожувальних та іонообмінних опріснювальних установок.

Головним завданням опріснення води є організація процесу з мінімальними витратами енергії та коштів на обладнання. Це є важливою вимогою, оскільки країна, яка вимушена в більшій мірі покладатися на опріснену воду, має витримувати економічну конкуренцію з іншими країнами, що мають більш доступні та дешеві джерела прісної води.

Відповідно до проектних розробок транспортування прісної води з природного джерела навіть на відстань до 400–500 км дешевше за опріснення тільки для невеликих водоспоживачів. Оцінка прогнозних експлуатаційних запасів солонуватих і солоних підземних вод у посушливих районах з урахуванням їх віддаленості від природних прісноводних джерел дозволяє дійти невтішного висновку у тому, що опріснення є єдиним можливим і економічно виправданим методом водозабезпечення. Методи, що застосовуються при опрісненні солоних вод, можуть бути ефективно використані для повернення природі використаної води, що не чинить негативного впливу на загальний стан прісних водоймищ.

Холодильні технології опріснення класифікують на: кристалогідратне, природне, вакуумне, контактне та штучне, яке має найбільше розповсюдження. Ключові положення технологій блочного виморожування наведено на сайті [6] та в публікаціях [7, 8].

Постановка задачі системного моделювання основних процесів штучного виморожування.

Ключовими процесами запропонованої технології опріснення солоних вод є кристалізація та гравітаційне сепарування. На першому етапі моделювання необхідно визначити технологічний параметр, який має суттєвий вплив на кінетику та енергетику цих процесів. Таким параметром, який допоможе «зшивати» математичні моделі процесів кристалізації та гравітаційного сепарування, має стати температура поверхні кристалізації (t_0). Тоді системна модель процесів буде мати вигляд (рис. 1). Саме температура t_0 визначальним чином впливає на кінетику формування твердої фази (льоду), на його структуру та на енергетичні характеристики процесу кристалізації. Температура t_0 визначає час процесу і масовий витрата льоду в блоці M_6 . Структура льодового блоку (його пористість ϵ) також є функцією температури t_0 . У свою чергу, споживана установкою потужність залежить від цих параметрів.

Якщо t_0 зменшується, то маса блоку (M_6) збільшується, час процесу (τ) скорочується і пористість блоку (ϵ) зростає. При сепаруванні ключовим фактором є температура навколишнього середовища (t_c). Саме вона визначає час сепарування (τ_2), масу льоду (M_l) та концентрацію в ньому солей (X_l).

Поеднання розглянутих параметрів 1 стадії впливають на значення продуктивності очищеної води M_d , і на вміст солей у цій воді X_d . Важливе значення ефективності сепарування надає температура t_c , коли організується процес сепарування. Енергетика процесу сепарування (необхідна процесу потужність N_c) залежить від часу процесу τ_2 .

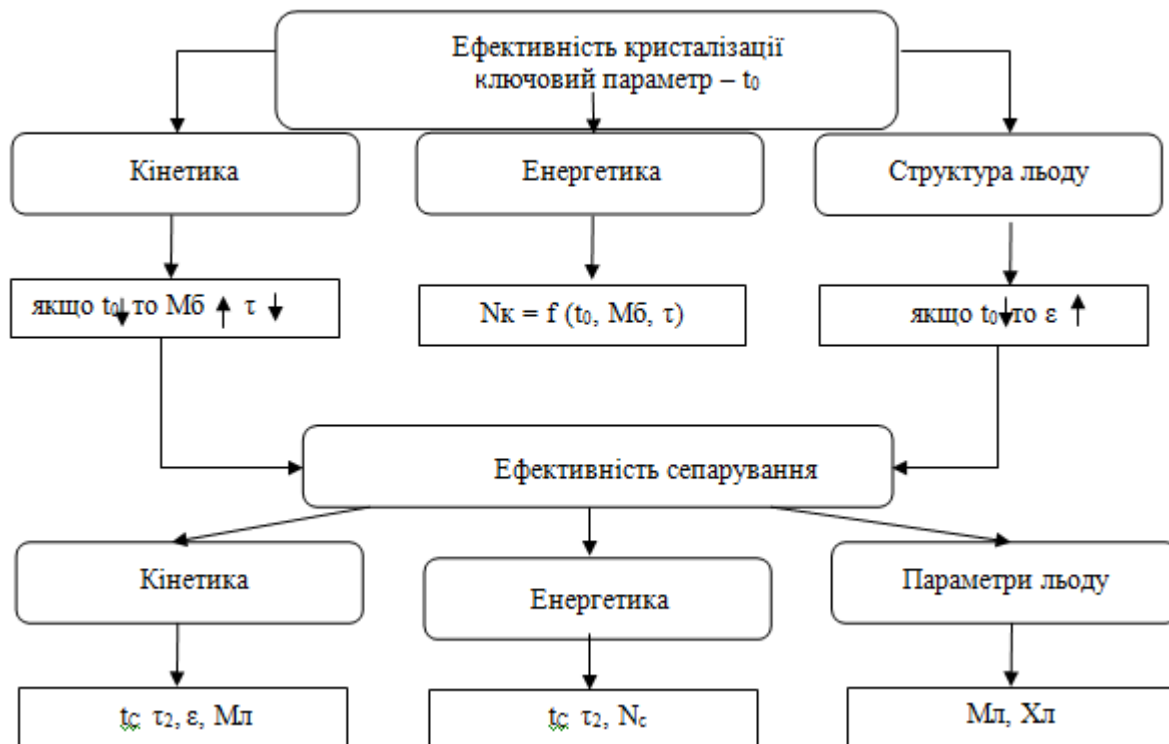


Рис. 1 – Системна модель взаємного зв'язку технологічних параметрів при виморожуванні

На основі рис.1 складено параметричну модель:

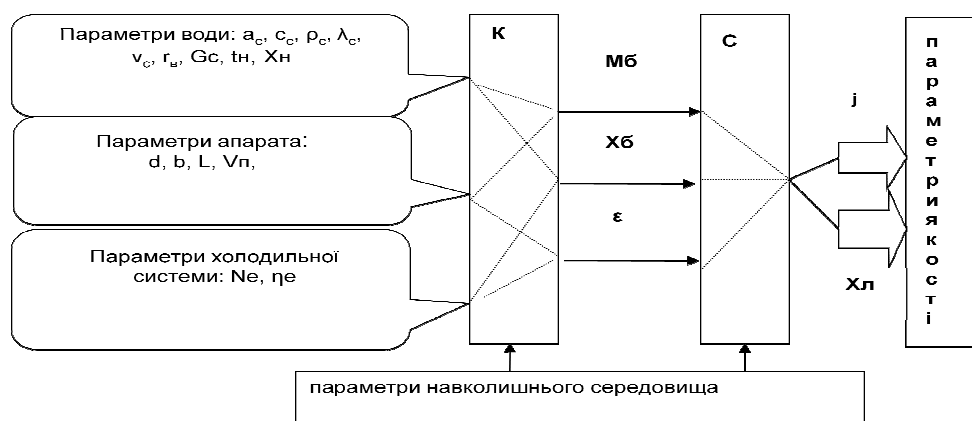


Рис. 2 – Параметрична модель опріснювача

Зі схеми (рис. 2) можна встановити завдання аналітичного та експериментального дослідження.

1. Визначити умови фазових рівноваг у системі «лід – розчин». Побудувати кріоскопічну криву.
2. Розробити методику та експериментальний стенд для дослідження впливу режимних та конструктивних параметрів на кінетику формування блоку льоду та його структурні характеристики.
3. Розробити методику та експериментальний стенд для дослідження впливу режимних та конструктивних параметрів на кінетику сепарування блоку льоду.
4. Встановити залежність між енергетичними, економічними та якісними показниками при опрісненні води методом виморожування.

Розглянемо завдання моделювання статичних процесів.

Статичні моделі матеріальних та енергетичних потоків при кристалізації та сепарування.

Схема матеріальних потоків (рис. 3) показує співвідношення кількостей (витрат) розчину та льоду.

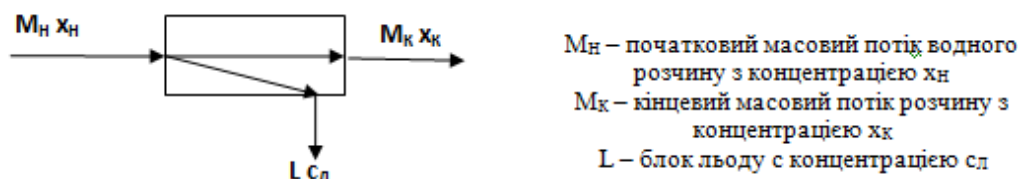


Рис. 3 – Балансова модель матеріальних потоків під час кристалізації

Для традиційних технологій характерно, що процес утворення кристалів льоду протікає інтенсивно, а сепарування, як правило, є тривалим, трудомістким і потребує великих витрат енергії. У загальному енергетичному балансі витрати енергії на кристалізацію становлять лише половину всіх витрат енергії. Можна зробити висновок, що сепарування значною мірою визначає енергетику технології та величину втрат продукту з крижаною фракцією. Системний аналіз показує, що можна отримати загальний вииграш у тривалості, енергетичних витратах, якщо інакше організувати процеси. Видається доцільним узгодити інтенсивність процесів генерації льоду та сепарування. Ця ідея є основою технології блочного виморожування.

Формулюється кілька принципів для реалізації ідеї блочного виморожування:

- виключити з технологічної схеми допоміжне обладнання: насоси, проміжні ємності тощо;
- організувати процес утворення на холодній поверхні блоку льоду із щільною упаковкою кристалів;
- вирощування блоку льоду проводити за умови постійного зростання величини поверхні розділу «лід - розчин». Для цього процес поділу проводити на голчастих випарниках.

Такий підхід дозволяє серйозно спростити другий етап сепарування. Ставиться задача:

- виключити з технологічної схеми спеціальні апарати для поділу льоду та розчину;
- сепарування проводити в умовах гравітаційного стікання концентрату із блоку льоду;
- як керуючий фактор використовувати температуру в сепараторі.

Основна відмінність технології блочного виморожування полягає в тому, що замість машинного принципу роботи кристалізатора використовують апаратний. Це є серйозними передумовами для суттєвого спрощення технологічної схеми, що дозволяє створити просту і надійну конструкцію роздільної установки, що виморожує, значно знизити витрату енергії. Поділ потоків виражається співвідношенням повного матеріального балансу та балансу за сухими речовинами:

$$\left. \begin{aligned} M_H - M_K &= L \\ M_H x_H - M_K x_K &= L c_L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Із системи (1) визначаються невідомі складові матеріального балансу процесу кристалізації. Нескладно визначаються початкові (M_H) та кінцеві (M_K) кількості розчину, звідки розраховується кількість льоду (L). Концентрація розчину в твердій фазі, що утворилася, знаходиться шляхом спільного вирішення рівнянь системи (1):

$$c_L = \frac{M_H x_H - M_K x_K}{M_H - M_K} \quad (2)$$

Розглянемо енергетичні баланси процесу кристалізації. Постановка задачі передбачає теплову взаємодію між розчином, холодильним агентом та навколишнім середовищем (рис.4). Розглядається апарат з горизонтальним розташуванням кристалізатора, в якому при зростанні блоку льоду формуються в основному вертикальні капілярні канали, з яких при сепаруванні ефективніше евакуюється рідина.

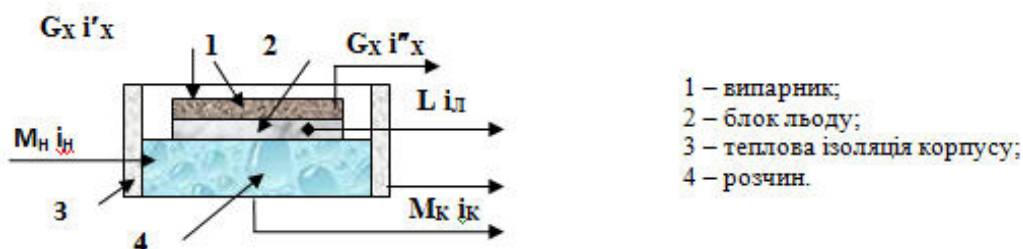


Рис. 4 – Схема теплових потоків під час кристалізації

Тепловий баланс складемо за схемою (рис.4) з урахуванням наступних припущень:

- розчин є квазігомогенним, а тепловим випромінюванням у системі можна знехтувати;
- теплофізичні властивості розчину та блоку льоду постійні у часі та в об'ємі;
- процес кристалізації є спрямованим, розвивається тільки по осі у.

При таких припущеннях тепловий баланс процесу кристалізації може бути записаний у вигляді рівнос-

тей на основі суми відповідних густин теплових потоків. Так, рівняння теплового балансу щодо щільності теплового потоку через стінку кристалізатора (q_{CT}) матиме вигляд:

$$q_{CT} = q_p + (\rho w_y)_p i_{pg} - (\rho w_y)_l i_{lg} \quad (3)$$

де $(\rho w_y)_p$ – густина потоку маси суміші з розчину до межі розділу фаз; i_{pg} – ентальпія розчину на межі розділу фаз; $(\rho w_y)_l$ – густина потоку маси в розчин від поверхні блоку льоду; i_{lg} – ентальпія льоду на межі поділу фаз.

У співвідношенні (3) сумарний ефект конвективного теплообміну від приграничного шару до об'єму розчину виражений доданком (q_p). Це загальний внесок теплопровідності, конвекції та молекулярної дифузії. З приграничного шару здійснюється процес кристалізації льоду. Потік теплоти, що приходить до межі розділу від розчину та обумовлений безпосередньо процесом кристалізації льоду, враховано другим складником рівняння (3). Третій член цього співвідношення представляє тепловий потік, що переноситься від поверхні поділу всередину приграничного шару.

В умовах режиму зростання блоку льоду справедливо:

$$(\rho w_y)_p = (\rho w_y)_l = (\rho w_y) \quad (4)$$

Інтенсивність процесу охолодження розчину характеризується коефіцієнтом тепловіддачі (α) і визначається рівняння Ньютона – Ріхмана. Тоді:

$$q_p = \frac{\alpha}{c_{pp}} (i_p - i_{pg}) \quad (5)$$

а ентальпію розчину на межі розділу фаз можна записати як суму ентальпії льоду на межі фаз та теплоти кристалізації (Ω):

$$i_{pg} = i_{lg} + \Omega \quad (6)$$

Враховуючи (5) та (6) співвідношення (3) можна подати у вигляді:

$$q_{CT} = \frac{\alpha}{c_{pp}} (i_p - i_{pg}) + \rho w_y (i_{lg} - \Omega) + \rho w_y (i_{lg}) \quad (7)$$

Оскільки число Стантона записується як:

$$St = \frac{\alpha}{\rho w c_{pp}} \quad (8)$$

то

$$q_{CT} = \frac{\alpha}{c_{pp}} \left[(i_p - i_{pg}) + \frac{\Omega}{St} \right] \quad (9)$$

Рівняння (9) може бути перетворене на основі того, що ентальпія розчину, дотримуючись положення адитивності, представляється через концентрації компонентів розчину ($i = \sum m_j i_j$):

$$q_{CT} = \frac{\alpha}{c_{pp}} \left\{ \left[\left(\sum c_{pj} i_{pj} - \sum c_{pgj} i_{pgj} \right) \right] + \frac{\Omega}{St} \right\} \quad (10)$$

Співвідношення (10) вимагає знання масових потоків компонентів розчину, тобто. підключення до їхнього розрахунку математичного апарату теорії дифузійного перенесення при кристалізації.

Випробування опріснювача. Завдання стендових випробувань №1 «Визначити залежність продуктивності опріснювача від температури кипіння холодильного агенту» (табл. 1).

Таблиця 1

Результати випробувань по завданню №1

№	Параметри	Температура кипіння, °C		
		–8	–12	–15
1	Маса блоку льоду, кг	20	20	20
2	Час процесу, с	5540	5370	4620
3	Питомі енерговитрати, МДж/кг	0,86	1,15	1,29

Чим менше температура кипіння, тим більша продуктивність опріснювача, але енергоефективні режими при температурах кипіння –8°C.

Завдання стендових випробувань №2 «Визначити залежність продуктивності опріснювача, витрат енергії та параметрів прісної води від режимів (часу) виморожування та сепарування» (табл. 2).

Таблиця 2

Результати випробувань по завданню №2

№	Параметри	Режими			
		1	2	3	4
1	Маса блоку льоду, кг	5	10,5	13,5	16
2	Час виморожування, год	1	2	3	4
3	Час сепарування, год	3	6	6	6
4	Питомі енерговитрати, МДж/кг	1,46	1,44	1,51	1,66

Після 2 годин роботи продуктивність опріснювача по льоду зменшується. Тому, за критерієм продуктивності рекомендується режим №2 із часом заморожування 2 години.

Завдання стендових випробувань №3 «Обґрунтувати доцільні режими роботи опріснювача, які забезпечують мінімальні витрати енергії».

На основі системного аналізу бази даних (таблиця 2) за критерієм енергетичної ефективності рекомендуються режими виморожування 2 години, та сепарування 6 годин. Досліджено вплив на ефективність роботи опріснювача температури навколишнього середовища. Отримані результати показали, що для всіх значень температур навколишнього середовища графічні залежності питомої енергоефективності ($J = f(\tau)$) мають локальний мінімум при значенні $\tau = 2$ год. Причому, для $\tau > 2$ год J зростає швидше, ніж при $\tau < 2$ год. Так як в межах $0 < \tau < 2$ год мінімум має нечіткий характер, то рекомендуються значення $\tau = 1,5 - 2$ год.

Завдання стендових випробувань №4 «Визначити кінетичні залежності формування блоку льоду та концентрацій стоків для режимів за п. 3». Результати випробувань наведено на рис. 5–7.

Під час виконання досліджень було отримано та побудовано такі залежності, як: кінетика формування блоку льоду, процес кристалізації води, концентрація солей, як у блоці льоду, так і у воді (рис.5–7).

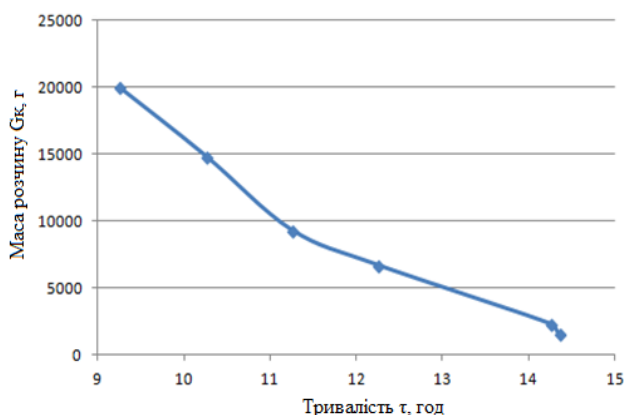


Рис. 5 – Кінетика зміни маси розчину

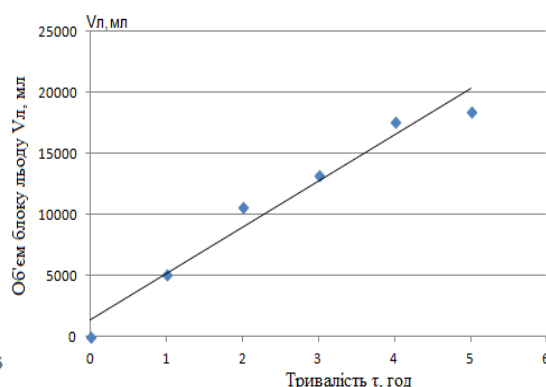


Рис. 6 – Кінетика формування блоку льоду

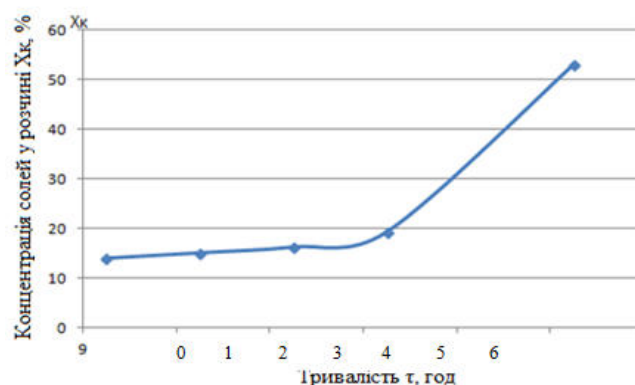


Рис. 7 – Зміна концентрації солей у розчині в часі

Витрати електроенергії на процес блочного виморожування в схемі з рециклінгом льоду скорочуються в 1,2–1,4 рази.

Визначено залежності питомих енерговитрат від температури кипіння холодильного агента для різних початкових концентрацій розчину. Згідно проведеному аналізу можна дійти висновку, що кожна початкова

концентрація розчину має свій яскраво виражений мінімум.

Самостійний інтерес мають результати експериментів із водою Чорного моря (табл.3).

Таблиця 4

Результати аналізу складу води

Показник	Вода Чорного моря	Тала вода	Показник	Вода Чорного моря	Тала вода
pH	9,0	8,5	NO ₃ , мг/л	4	0
kH, °	7,5	5,5	NO ₂ , мг/л	0	0
PO ₄ , мг/л	0,1	0	NH _{3/4} , мг/л	0,25	0

Отримано, що через короткий час роботи опріснювача блок льоду вже відповідав допустимим стандартам питної води як по загальному вмісту солей, так й по основним показникам (таблиця 3).

Висновки. Опріснювач (апарат блочного виморожування) реалізує ефект «термічного парадоксу» та принцип керованої кристалізації. Інструментом реалізації таких процесів є оригінальна конструкція випарників, виконаних у вигляді трубок Фільда. Це голчасті випарники, термічний опір процесу тепло перенесення при зростанні блоку льоду може не зростати (ефект термічного парадоксу). По-перше, це забезпечує стабільні режими формування блоку льоду із щільною упаковкою кристалів льоду. По-друге, спрощує процес сепарування льоду, переходу до гравітаційного розділення твердої фази та рідини.

Визначено за енергетичними критеріями раціональні температури кипіння холодильного агенту – 8°C, час виморожування – 2 години, час сепарування – 6 годин. Визначена економічна ефективність використання при «рециклінгу» частотного перетворювача, що зменшує на 30% витрати енергії.

Створений опріснювач має 3 важливі інновації: використання випарників голчастого типу, формування блоку льоду при його кристалізації та рециклінг льоду. Опріснювач має відмінні технологічні та енергетичні характеристики і перспективи впровадження в школах, лікарнях, дитячих садках, офісах.

Експериментальні зразки знесоленої води із опріснювача пройшли аналіз в ДП Українського науково-дослідного інституту медицини транспорту МОЗ України в лабораторії гігієни та екології води. Об'єктами дослідження були 2 зразки. Перший – після одноступеневого очищення водопровідної води, а другий – після двоступеневого очищення водопровідної води. Згідно (ДСанПіН 2.2.4-171-10) обидва зразки відповідають нормативам для питної води, що фасується у пунктах розливу. Зразок за №2 за жорсткістю в 10 разів чистіше, ніж зразок за №1, за сухим залишком – у 5 разів, за вмістом нітратів – у 4,5 рази.

References

1. Aquarum. (n.d.). *Reverse osmosis system Aquarum AMRO 250 L/h with Hydranautics membrane*. Retrieved from <https://www.aqua-room.com.ua/sistema-obratnogo-osmosa-aquarum-amro-250-l-s-membranoj-hydranautics>
2. Aquarum. (n.d.). *Industrial water treatment: Industrial reverse osmosis systems*. Retrieved from <https://www.aqua-room.com.ua/promyshlennaya-vodopodgotovka/prom-osmos>
3. Aquarum. (n.d.). *Advantages of Aquarum industrial reverse osmosis systems*. Retrieved from <https://www.aqua-room.com.ua/post-perevagi-promislovih-sistem-zvorotnogo-osmosu-virobnitstva-aquarum>
4. Aquarum. (n.d.). *Sterilight S950RL UV disinfection system*. Retrieved from <https://www.aqua-room.com.ua/sterilight-s950rl>
5. Aquarum. (n.d.). *Terramix Sorb-A filtering medium*. Retrieved from <https://www.aqua-room.com.ua/terramix-sorb-a-filtruyuschaya-zagruzka>
6. Nanofood. (n.d.). *Nanofood – Innovative food technologies and equipment*. Retrieved from <http://nanofood.com.ua>
7. Burdo, O. G., Terziev, S. G., Mordynskiy, V. P., & Sirotyuk, I. V. (2022). Development of low-temperature block type facility for sea water desalination. *Problemele Energeticii Regionale*, 54(2), 13–25.
8. Trishyn, F. A., Trach, O. R., & Orlovskaya, Yu. V. (2018). Management of energy flows in low-temperature separation units. *Problemele Energeticii Regionale*, 36(1), 72–86.

LOW-TEMPERATURE INSTALLATIONS FOR SEPARATION OF AQUEOUS SOLUTIONS

Mordynskiy V.P., Greschuk V.P., Kolianovska L.M.

¹Odesa National University of Technology, Odesa

²Vinnitsia National Agrarian University, Vinnitsia, Ukraine

Abstract. In current paper methods for desalination of salt water are considered. The energy and qualitative advantages of low-temperature desalination technologies are presented, their classification is given and problems are identified. The prospects of block freezing technologies are analyzed. The aim of the work is to develop methods for calculating and optimizing the “crystallizer-separator” complex. The task of system modeling of the main pro-

cesses of block freezing is set. Static balance models of crystallization and separation processes are developed. Parametric, physical and energy models of these processes are considered. It is substantiated that the key parameter by which the system operation can be optimized is the surface temperature of the crystallizer. Mathematical models of crystallization and separation kinetics are presented. A prototype block-type desalination unit is tested. The test results constitute the main scientific and practical result of the work. According to the criterion of energy efficiency, freezing modes of 2 hours and separation of 6 hours are recommended. The temperature of the crystallization surface of -8°C requires the least energy consumption. Tests were conducted on the water of the Black Sea. It was found that after 30 minutes of operation of the desalination plant, the ice block already met the permissible standards for drinking water both in terms of the total salt content and the main indicators. The desalinators have excellent technological and energy characteristics and prospects for implementation in schools, hospitals, kindergartens, and offices.

Keywords: aqueous solutions, energy efficiency, water treatment technologies, food technologies, block freezing.

Список використаної літератури

1. Електронний ресурс: <https://www.aqua-room.com.ua/sistema-obratnogo-osmosa-aquarum-amro-250-l-s-membranoj-hyadranautics>.
2. Електронний ресурс: <https://www.aqua-room.com.ua/promyshlennaya-vodopodgotovka/prom-osmos>
3. Електронний ресурс: <https://www.aqua-room.com.ua/post-perevagi-promislovih-sistem-zvorotnogo-osmosu-virobnitstva-aquarum>
4. Електронний ресурс: <https://www.aqua-room.com.ua/sterilight-s950rl>
5. Електронний ресурс: <https://www.aqua-room.com.ua/terramix-sorb-a-filtruyuschaya-zagruzka>
6. Електронний ресурс: <http://nanofood.com.ua>
7. Burdo O.G., Terziev S.G., Mordynskiy V.P., Sirotyuk I.V. Development of Low-Temperature Block Type Facility for Sea Water Desalination. Problemele Energeticii Regionale. 2022. Vol. 54. Is. 2. pp. 13–25.
8. Trishyn F.A., Trach O.R., Orlovskaya Yu/ V. Management of Energy Flows in Low-temperature Separation Units. Problemele Energeticii Regionale. 2018. Vol. 36. Is. 1. pp. 72–86.

Отримано в редакцію 11.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 11.06.2025

Approved 02.09.2025

ВПЛИВ ПОКРИТТЯ З МАЛЬТОДЕКСТРИНУ НА АКТИВНІСТЬ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЯКІСТЬ ЯГІД СУНИЦІ САДОВОЇ

Заморська І.Л., доктор технічних наук, професор, Смілянець О.В., здобувач PhD
Уманський національний університет, Умань, Україна

Анотація. Ягоди суниці садової – це неклімактеричні плоди зі схильністю до швидкого псування. У статті наведено результати досліджень оцінювання впливу покриття мальтодекстрином ягід суниці садової сорту Мальвіна на інтенсивність дихання, природні втрати маси та вихід товарної продукції впродовж зберігання залежно від концентрації розчину та тривалості зберігання. Зібрані в стадії споживної зрілості та попередньо охолоджені ягоди обробляли покриттям, приготованим з розчину мальтодекстрину марки DE 15-20 (Польща), розведеному в дистильованій воді до концентрації 1, 2, 3, 4, 5 %. Після нанесення покриття суницю підсушували, фасували в перфоровані пластикові (PET) контейнери (не більше 0,5 кг) і зберігали впродовж 7 діб за температури $1 \pm 0,5$ °C і відносної вологості повітря 90-95 %. За контроль приймали ягоди оброблені дистильованою водою. В процесі досліджень визначали інтенсивність дихання ягід, природні втрати маси та вихід товарної продукції.

Впродовж періоду зберігання ягід внаслідок охолодження інтенсивність їхнього дихання знизилася з 18,3 до 1,8-2,2 мл CO_2 кг/год. Виявлено достовірний зв'язок між інтенсивністю дихання ягід суниці, концентрацією розчину мальтодекстрину та тривалістю зберігання. Мінімальне значення показника зафіксовано у варіанті дослід з покриттям ягід розчином мальтодекстрину з концентрацією 5-%.

Втрати маси ягід впродовж періоду зберігання склали 3,0-5,4 % за найвищих втрат на контролі. Достовірно доведено залежність втрат маси від наявності покриття: ягоди з покриттям за період зберігання мали в 1,2-2,0 рази менші втрати проти контролю.

Виявлено достовірний вплив покриття на вихід товарної продукції. Частка товарної продукції у варіантах з покриттям на 3,2-10,6 % перевищувала, тоді як нестандартних ягід була на 2,7-8,6 % нижчою проти аналогічних показників контролю. Максимум товарної продукції отримано від покриття ягід у 5 %-го розчині мальтодекстрину.

Нанесення мальтодекстринового покриття сприяє гальмуванню інтенсивності дихання продукції, знижує втрати маси ягід суниці в 1,2-2,0 рази з підвищенням виходу товарної продукції на 3,2-10,6 %.

Ключові слова: суниця садова, харчове покриття, зберігання, втрати маси, дихання, товарна продукція

Вступ. Суниця садова є однією із найбільш популярних ягідних культур, що високо цінується споживачами за багатий хімічний склад та гармонійний смак і аромат. Завдяки швидкоплідності, широкому сортименту, невибагливості до умов вирощування та високій рентабельності виробництва, суниця садова широко поширена в світі. За даними ФАОСТАТ у 2023 році світове виробництво ягід суниці склало 10,455 млн. т з площі 434977 га врожайності 24,1 т/га. Виробництво ягід суниці в Україні за вказаний період було на рівні 53,4 тис. т з площі 6900 га. Найбільшими виробниками ягід суниці садової у світі є Китай (4,2 млн. т), США (1,2 млн. т), Туреччина (676,8 тис. т), Мексика (641,5 тис. т) та Іспанія (329,3 тис. т) [2].

Значний вміст біологічно активних сполук в поєднанні з аскорбіновою кислотою свідчать про високий антиоксидантний потенціал ягід, що мають протизапальні, протиракові та антимікробні властивості [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ягоди суниці – не клімактеричні плоди, що характеризуються коротким післязбиральним періодом через високу активність метаболізму, що спричиняє швидке псування, ознаками якого є розм'якшення тканин внаслідок деградації клітинної стінки [4], зміни забарвлення та смаку [5]. Окрім цього ягоди схильні до механічних ушкоджень та мікробіологічного псування [6] через тонкі покривні тканини, наявність численних заглиблень та волосоподібних виступів, які дозволяють більшості патогенної мікрофлори прикріплюватися та розмножуватися [7, 8].

Сьогодні дослідження методів післязбирального зберігання зосереджені на застосуванні екологічно чистих технологій для заміни використання фунгіцидів та інших високотоксичних методів обробки для боротьби з патогенами та підтримання якості плодів та овочів [9].

Охолодження за низької температури, нанесення їстівних плівок, ультрафіолетове опромінення, санітарна обробка продукції, застосовуються для зниження інтенсивності дихання і запобігання втрат вологи, збереження пружності тканин і обмеження поширення патогенної мікрофлори [10].

Впродовж останніх років значний практичний інтерес викликають плівкові покриття, що створюють бар'єр між продукцією і навколишнім середовищем, мають механічні, антибактеріальні, паро- та газобар'єрні властивості [11]. В якості їстівного покриття використовують полісахариди, в т.ч. крохмалю, тапіоки,

кукурудзи, целюлози і її похідних зокрема гідроксилпропілметилцелюлози, карбоксиметилцелюлози і метилцелюлози, альгінату, карагенану, хітозану тощо [12, 13]. Перевагою використання полісахаридів є їхнє натуральне походження, здатність до біодеградації, запобігання втратам вологи, зниження швидкості окиснення та можливості виступати в ролі носіїв функціональних інгредієнтів [14].

Доведено ефективність зберігання ягід суниці садової з покриттям на основі хітозану [15, 16], крохмалю з бобів ямсу [17], пектину цитрусового [18], слизу насіння чіа та целюлозного нано-волокна [19] і інших [20, 21].

Метою досліджень було вивчення впливу покриття мальтодекстрином ягід суниці садової на інтенсивність дихання, природні втрати маси та вихід товарної продукції впродовж зберігання.

Матеріал і методи дослідження. Дослідження проводили на кафедрі харчових технологій Уманського національного університету з ягодами суниці сорту Мальвіна згідно з методичними вказівками по зберіганню плодів, овочів і винограду [22].

Ягоди суниці садової першого товарного сорту збирали у стадії споживної зрілості з наступним попереднім охолодженням. Робочі розчини мальтодекстрину марки DE 15-20 виробництва Польщі готували шляхом розчинення наважки мальтодекстрину в дистильованій воді до досягнення концентрації 1, 2, 3, 4, 5 %. Дослідні зразки суниці занурювали у розчини з досліджуваними концентраціями на 30 с, з наступним підсушуванням за температури навколишнього середовища (22 °C) до формування суцільної плівки на поверхні. За контроль приймали ягоди, оброблені у дистильованій воді. Зразки контрольного та дослідних варіантів фасували в перфоровані пластикові (PET) контейнери (не більше 0,5 кг) і зберігали впродовж 7 діб за температури $1 \pm 0,5$ °C і відносної вологості повітря 90-95 %. Критерієм зняття продукції зі зберігання були втрати маси на рівні 5 %. Дослідження проводили у трьох повторностях.

В процесі досліджень визначали природні втрати маси зважуванням фіксованих проб [22], інтенсивність дихання ягід за кількістю виділеного CO₂ [22] та вихід товарної продукції за ДСТУ ЕЭК ООН FFV-35:2007. Нестандартними вважали ягоди з відсутніми ознаками свіжості та розм'якшеною консистенцією, відходами – ягоди з ознаками ураження фітопатогенною мікрофлорою. Статистичний аналіз виконували в програмі StatSoft STATISTICA 10.0.1011.6 EnterpriseSingleUser (2011).

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження інтенсивності дихання ягід суниці показали

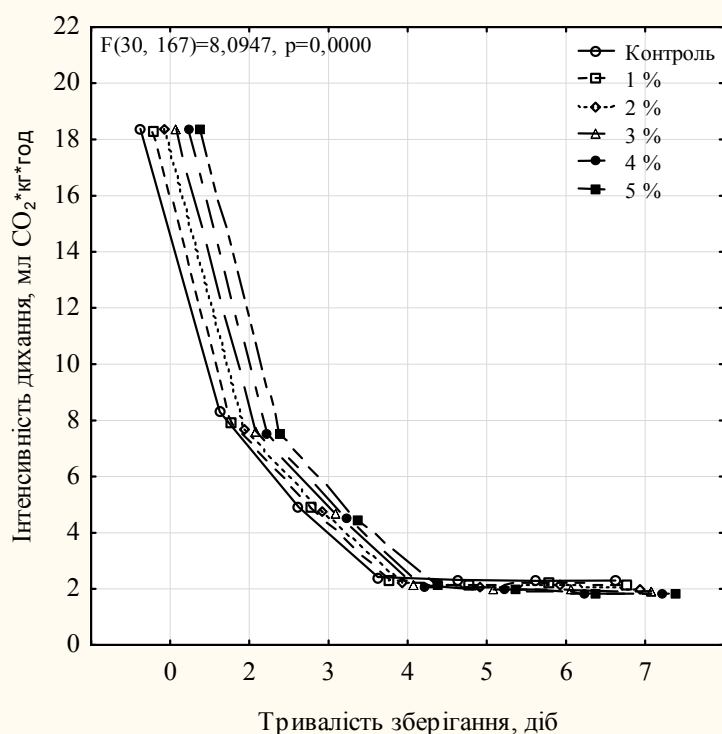


Рис. 1 – Вплив покриття розчином мальтодекстрину на інтенсивність дихання ягід суниці (результати дисперсійного аналізу)

достовірну різницю у значеннях досліджуваного показника залежно від тривалості зберігання і концентрації розчину мальтодекстрину (рис. 1). Так, перед закладанням на зберігання інтенсивність дихання свіжих ягід суниці сорту Мальвіна складала 18,3 мл CO₂ кг/год. Впродовж першої доби зберігання інтенсивність дихання суттєво знизилася за рахунок дії низької температури до 7,5-8,3 мл CO₂ кг/год, за нижчих показників у ягід, з покриттям розчином мальтодекстрину 5 %-ної концентрації, що, очевидно, зумовлено найбільшою товщиною плівки. Через добу інтенсивність дихання ягід коливалася в межах від 4,5 до 4,8 мл CO₂ кг/год, поступово знижуючись на четверту добу зберігання до значення 2,1-2,3 мл CO₂ кг/год. Впродовж наступних трьох діб інтенсивність дихання ягід суниці коливалася в межах від 1,8 до 2,2 мл CO₂ кг/год залишаючись на цьому рівні до кінця періоду зберігання за максимальних значень досліджуваного показника у ягід без покриття. Слід відмітити істотні відмінності значень інтенсивності дихання залежно від концентрації розчину мальтодекстрину: підвищення концентрації розчину ефективніше гальмувало дихальний газооб-

мін ягід із навколишнім середовищем внаслідок сформованої на поверхні ягід плівки різної товщини.

Експериментальними дослідженнями виявлено достовірну залежність між зниженням маси ягід, строком зберігання та масовою часткою мальтодекстрину в розчині (рис. 2). Отримані результати свідчать про збільшення втрат впродовж досліджуваного періоду зберігання та істотний вплив концентрації розчину

мальтодекстрину на їхній розмір. На початку періоду зберігання розмір втрат маси ягід складав 0,22-0,50 % маси ягід сягнувши за усередненими даними 3,0-5,4 % до кінця досліджуваного періоду за найвищих втрат на контролі. В цілому, за період зберігання ягоди з плівкою мальтодекстрину мали в 1,2-2,0 рази менші втрати проти контролю.

Товарна оцінка ягід після зберігання продемонструвала достовірну залежність їхньої якості від наявності покриття мальтодекстрином та його концентрації в розчині (рис. 3). Так, вихід товарної продукції коливався в межах від 85,2 до 95,8 %, залежно від варіанту досліджу, частка нестандартної продукції складала 4,2-12,8%, відходів – 1,5-2,0 %.

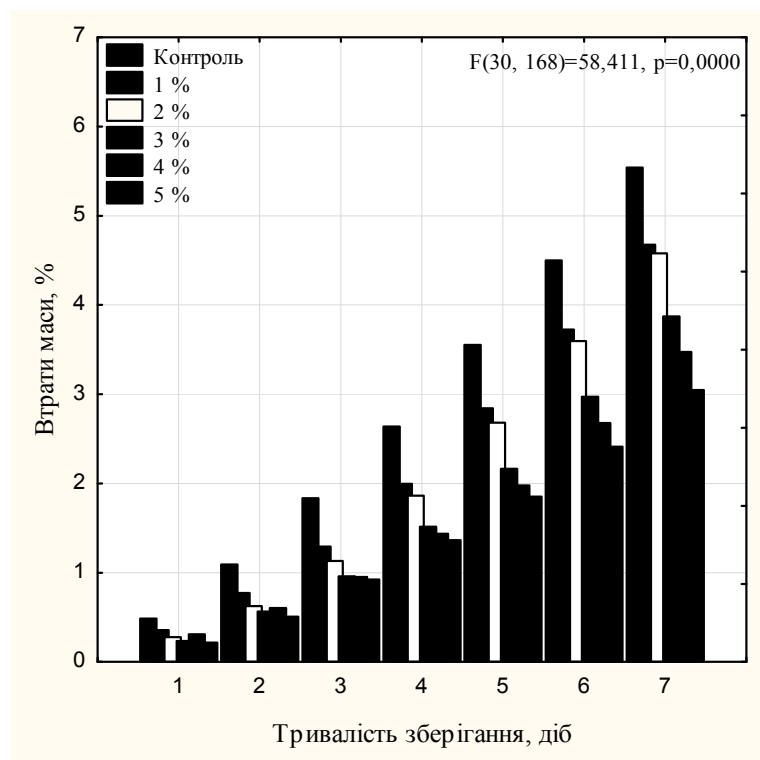


Рис. 2 – Вплив покриття розчином мальтодекстрину на втрати маси ягід суниці (результати дисперсійного аналізу)

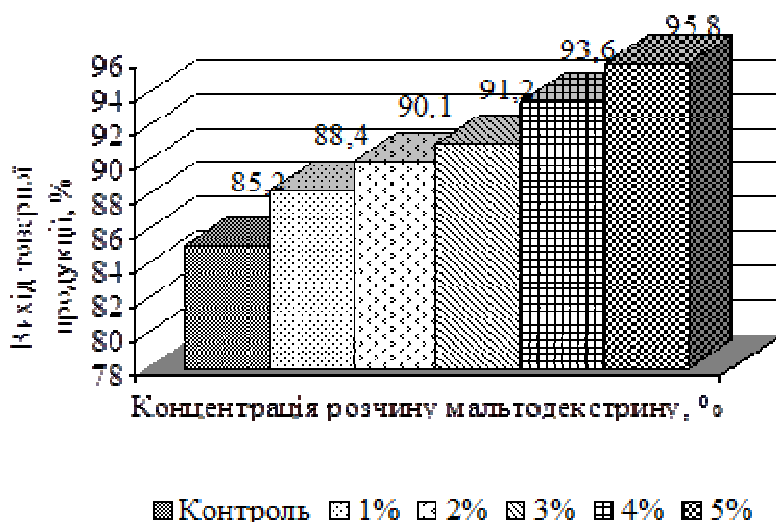


Рис. 3 – Вихід товарної продукції ягід суниці, %

Слід відмітити, що наявність відходів зафіксовано у варіантах досліджу без покриття мальтодекстрином та з покриттям в концентрації 1 %. В цілому, пересічно по досліджу, частка товарної продукції у варіантах з покриттям на 3,2-10,6 % перевищувала значення контролю, тоді як нестандартних ягід була на 2,7-8,6 %

нижчою. Максимальний вихід товарної продукції виявлено у варіанті із застосуванням 5 %-го розчину мальтодекстрину в якості покриття.

Висновки. Таким чином, плівка, утворена розчином мальтодекстрину на поверхні ягід суниці садової ефективно гальмує дихання, запобігає втратам маси ягід та підвищує вихід товарної продукції під час зберігання. Ягоди з покриттям розчином мальтодекстрину мають в 1,2-2,0 рази менші втрати маси та на 3,2-10,6 % вищий вихід товарної продукції проти контролю. За комплексом досліджуваних показників найбільш ефективним є покриття 5 %-ним розчином мальтодекстрину.

References

1. Khammayom, N., Maruyama, N., Chaichana, C. (2022). The effect of climatic parameters on strawberry production in a small walk-in greenhouse. *AgriEngineering*, №4(1), pp. 104-121.
2. FAO. <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/FS>
3. Hernández-Martínez, N. R., Blanchard, C., Wells, D., Salazar-Gutiérrez, M. R. (2023). Current state and future perspectives of commercial strawberry production: A review. *Scientia Horticulturae*, 312, 111893.
4. Xu, C., Zhang, X., Liang, J., Fu, Y., Wang, J., Jiang, M., Pan, L. (2022). Cell wall and reactive oxygen metabolism responses of strawberry fruit during storage to low voltage electrostatic field treatment. *Postharvest Biology and Technology*, 192, 112017.
5. Huang, Z., Omwange, K. A., Saito, Y., Kuramoto, M., & Kondo, N. (2023). Monitoring strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) quality changes during storage using UV-excited fluorescence imaging. *Journal of Food Engineering*, 353, 111553.
6. Piechowiak, T., Migut, D., Józefczyk, R., & Balawejder, M. (2022). Ozone treatment improves the texture of strawberry fruit during storage. *Antioxidants*, 11(5), 821.
7. Błaszczak, J., Bieniasz, M., Nawrocki, J., Kopeć, M., Mierzwa-Hersztek, M., Gondek, K., ... & Bogdał, S. (2022). The effect of harvest date and storage conditions on the quality of remontant strawberry cultivars grown in a gutter system under covers. *Agriculture*, 12(8), 1193.
8. Shen, D., Chang, X., Zhou, L., Hao, D., Fang, Z., Shan, Y., ... & Li, G. (2024). Ultrasonic preparation of citral/hydroxypropyl-β-cyclodextrin inclusion complex: Application as a potential antifungal preservative in strawberry storage. *Food Control*, 155, 110046.
9. Promyou, S., Raruang, Y., & Chen, Z. Y. (2023). Melatonin treatment of strawberry fruit during storage extends its post-harvest quality and reduces infection caused by *Botrytis cinerea*. *Foods*, 12(7), 1445.
10. Quarshi, H. Q., Ahmed, W., Azmant, R., Chendouh-Brahmi, N., Quyyum, A., & Abbas, A. (2023). Post-harvest problems of strawberry and their solutions. In *Recent studies on strawberries*. IntechOpen.
11. Galus, S. (2019). Development of edible coatings in the preservation of fruits and vegetables. *Polymers for agri-food applications*, 377-390.
12. Taha, I. M., Zaghlool, A., Nasr, A., Nagib, A., El Azab, I. H., Mersal, G. A., ... & Fahmy, A. (2022). Impact of starch coating embedded with silver nanoparticles on strawberry storage time. *Polymers*, 14(7), 1439.
13. Magri, A., Landi, N., Capriolo, G., Di Maro, A., & Petriccione, M. (2024). Effect of active layer-by-layer edible coating on quality, biochemicals, and the antioxidant system in ready-to-eat 'Williams' pear fruit during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 212, 112873.
14. Pillai, A. R., Eapen, A. S., Zhang, W., & Roy, S. (2024). Polysaccharide-based edible biopolymer-based coatings for fruit preservation: A review. *Foods*, 13(10), 1529.
15. Popescu, P. A., Palade, L. M., Nicolae, I. C., Popa, E. E., Miteluț, A. C., Drăghici, M. C., ... & Popa, M. E. (2022). Chitosan-based edible coatings containing essential oils to preserve the shelf life and postharvest quality parameters of organic strawberries and apples during cold storage. *Foods*, 11(21), 3317.
16. Quintana, S. E., Llalla, O., García-Risco, M. R., & Fornari, T. (2021). Comparison between essential oils and supercritical extracts into chitosan-based edible coatings on strawberry quality during cold storage. *The Journal of Supercritical Fluids*, 171, 105198.
17. Wigati, L. P., Wardana, A. A., Tanaka, F., & Tanaka, F. (2023). Strawberry preservation using combination of yam bean starch, agarwood Aetoxylon bouya essential oil, and calcium propionate edible coating during cold storage evaluated by TOPSIS-Shannon entropy. *Progress in Organic Coatings*, 175, 107347.
18. Hernández-Carrillo, J. G., Orta-Zavalza, E., González-Rodríguez, S. E., Montoya-Torres, C., Sepúlveda-Ahumada, D. R., & Ortiz-Rivera, Y. (2021). Evaluation of the effectivity of reuterin in pectin edible coatings to extend the shelf-life of strawberries during cold storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 30, 100760.
19. Mousavi, S. R., Rahmati-Joneidabad, M., & Noshad, M. (2021). Effect of chia seed mucilage/bacterial cellulose edible coating on bioactive compounds and antioxidant activity of strawberries during cold storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 190, pp. 618-623.
20. Eshghi, S., Karimi, R., Shiri, A., Karami, M., & Moradi, M. (2021). The novel edible coating based on chitosan and gum ghatti to improve the quality and safety of 'Rishbaba' table grape during cold storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(4), pp. 3683-3693.

21. Vakili-Ghartavol, M., Arouiee, H., Golmohammadzadeh, S., Naseri, M., & Bandian, L. (2024). Edible coatings based on solid lipid nanoparticles containing essential oil to improve antimicrobial activity, shelf-life, and quality of strawberries. *Journal of Stored Products Research*, 106, 102262.
22. Naichenko V. M., Zamorska I. L. Tekhnolohiia zberihannia i pererobky plodiv ta ovochiv: navch. posib [Technology of storage and processing of fruits and vegetables: a textbook]. Uman: vydavets «Sochinskyi» [Sochinsky Publishing House], 2010. 328 s.

INFLUENCE OF MALTODEXTRIN COATING ON ACTIVITY OF POST-HARVEST PROCESSES AND QUALITY OF STRAWBERRIES

**Zamorska I.L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Smilyanets O.V., PhD candidate
Uman National University, Uman, Ukraine**

Abstract. *Strawberries are non-climacteric fruits that are prone to rapid spoilage. The article presents the results of studies evaluating the effect of coating Malvina strawberries with maltodextrin on respiration intensity, natural weight loss, and marketable yield during storage, depending on the concentration of the solution and the duration of storage. The berries, harvested at the stage of consumer maturity and pre-cooled, were treated with a coating prepared from a solution of maltodextrin grade DE 15-20 (Poland), diluted in distilled water to a concentration of 1, 2, 3, 4, 5%. After coating, the strawberries were dried, packed in perforated plastic (PET) containers (no more than 0.5 kg) and stored for 7 days at a temperature of 1 ± 0.5 °C and relative humidity of 90-95%. Berries treated with distilled water were used as a control. During the research, the respiration rate of the berries, natural weight loss, and marketable yield were determined.*

During the storage period, the intensity of respiration decreased from 18.3 to 1.8-2.2 ml CO₂ kg/hour due to cooling. A significant correlation was found between the intensity of strawberry respiration, the concentration of maltodextrin solution, and the duration of storage. The minimum value of the indicator was recorded in the experiment variant with berries coated with a 5% maltodextrin solution.

The weight loss of berries during the storage period was 3.0-5.4%, with the highest losses in the control group. A reliable dependence of weight loss on the presence of coating was proven: coated berries had 1.2-2.0 times less weight loss during the storage period compared to the control group.

A significant effect of the coating on the yield of marketable products was found. The share of marketable products in the coated variants was 3.2-10.6% higher, while the share of non-standard berries was 2.7-8.6% lower than in the control group. The maximum marketable yield was obtained from coating the berries in a 5% maltodextrin solution.

Applying a maltodextrin coating helps to slow down the respiration rate of the product, reduces the weight loss of strawberries by 1.2-2.0 times, and increases the marketable yield by 3.2-10.6%.

Keywords: strawberry, food coating, storage, mass loss, respiration, marketable products

Список використаної літератури

1. Khammayom N., Maruyama N., Chaichana C. The effect of climatic parameters on strawberry production in a small walk-in greenhouse. *AgriEngineering*. 2022. №4(1). pp. 104-121.
2. FAO. <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/FS>
3. Hernández-Martínez N. R., Blanchard C., Wells D., Salazar-Gutiérrez M. R. Current state and future perspectives of commercial strawberry production: A review. *Scientia Horticulturae*. 2023. №312. 111893.
4. Xu C., Zhang X., Liang J., Fu Y., Wang J., Jiang M., Pan L. Cell wall and reactive oxygen metabolism responses of strawberry fruit during storage to low voltage electrostatic field treatment. *Postharvest Biology and Technology*. 2022. №192. 112017.
5. Huang Z., Omwange K. A., Saito Y., Kuramoto M., Kondo N. Monitoring strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) quality changes during storage using UV-excited fluorescence imaging. *Journal of Food Engineering*. 2023. №353. 111553.
6. Piechowiak T., Migut D., Józefczyk R., Balawejder M. Ozone treatment improves the texture of strawberry fruit during storage. *Antioxidants*. 2022. №11(5), 821.
7. Błaszczyk J., Bieniasz M., Nawrocki J., Kopeć M., Mierzwa-Hersztek M., Gondek, K., ... Bogdał, S. The effect of harvest date and storage conditions on the quality of remontant strawberry cultivars grown in a gutter system under covers. *Agriculture*. 2022. №12(8). 1193.
8. Shen D., Chang X., Zhou L., Hao D., Fang Z., Shan Y., ... Li G. Ultrasonic preparation of citral/hydroxypropyl-β-cyclodextrin inclusion complex: Application as a potential antifungal preservative in strawberry storage. *Food Control*. 2024. №155. 110046.
9. Promyou S., Raruang Y., Chen Z. Y. Melatonin treatment of strawberry fruit during storage extends its post-harvest quality and reduces infection caused by *Botrytis cinerea*. *Foods*. 2023. №12(7). 1445.

10. Quarshi H. Q., Ahmed W., Azmant R., Chendouh-Brahmi N., Quyyum A., Abbas A. Post-harvest problems of strawberry and their solutions. In Recent studies on strawberries. IntechOpen. 2023.
11. Galus S. Development of edible coatings in the preservation of fruits and vegetables. Polymers for agri-food applications. 2019. pp. 377-390.
12. Taha I. M., Zaghloul A., Nasr A., Nagib A., El Azab I. H., Mersal G. A., ... Fahmy A. Impact of starch coating embedded with silver nanoparticles on strawberry storage time. Polymers. 2022. №14(7). 1439.
13. Magri A., Landi N., Capriolo G., Di Maro A., Petriccione M. Effect of active layer-by-layer edible coating on quality, biochemicals, and the antioxidant system in ready-to-eat 'Williams' pear fruit during cold storage. Postharvest Biology and Technology. 2024. №212. 112873.
14. Pillai A. R., Eapen A. S., Zhang W., Roy S. Polysaccharide-based edible biopolymer-based coatings for fruit preservation: A review. Foods. 2024. №13(10). 1529.
15. Popescu P. A., Palade L. M., Nicolae I. C., Popa E. E., Miteluț A. C., Drăghici, M. C., ... Popa M. E. Chitosan-based edible coatings containing essential oils to preserve the shelf life and postharvest quality parameters of organic strawberries and apples during cold storage. Foods. 2022. №11(21). 3317.
16. Quintana S. E., Llalla O., García-Risco M. R., Fornari T. Comparison between essential oils and supercritical extracts into chitosan-based edible coatings on strawberry quality during cold storage. The Journal of Supercritical Fluids. 2021. №171. 105198.
17. Wigati L. P., Wardana A. A., Tanaka F., Tanaka F. Strawberry preservation using combination of yam bean starch, agarwood Aetoxylon bouya essential oil, and calcium propionate edible coating during cold storage evaluated by TOPSIS-Shannon entropy. Progress in Organic Coatings. 2023. №175. 107347.
18. Hernández-Carrillo J. G., Orta-Zavalza E., González-Rodríguez S. E., Montoya-Torres, C., Sepúlveda-Ahumada, D. R., Ortiz-Rivera, Y. Evaluation of the effectivity of reuterin in pectin edible coatings to extend the shelf-life of strawberries during cold storage. Food Packaging and Shelf Life. 2021. №30. 100760.
19. Mousavi S. R., Rahmati-Joneidabad M., Noshad M. Effect of chia seed mucilage/bacterial cellulose edible coating on bioactive compounds and antioxidant activity of strawberries during cold storage. International Journal of Biological Macromolecules. 2021. №190. pp. 618-623.
20. Eshghi S., Karimi R., Shiri A., Karami M., Moradi M. The novel edible coating based on chitosan and gum ghatti to improve the quality and safety of 'Rishbaba' table grape during cold storage. Journal of Food Measurement and Characterization. 2021. №15(4). pp. 3683-3693.
21. Vakili-Ghartavol M., Arouiee H., Golmohammadzadeh S., Naseri M., Bandian L. Edible coatings based on solid lipid nanoparticles containing essential oil to improve antimicrobial activity, shelf-life, and quality of strawberries. Journal of Stored Products Research. 2024. №106. 102262.
22. Найченко В. М., Заморська І. Л. Технологія зберігання і переробки плодів та овочів: навч. посіб. Умань: видавець «Сочінський», 2010. 328 с.

Отримано в редакцію 10.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 10.06.2025

Approved 02.09.2025

ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА КРУПИ З ПРОСА

Соц С.М., канд. техн. наук, доцент, Кустов І.О., канд.техн.наук, доцент, Чеглатонєв В.І., аспірант
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Просо є однією з найдавніших культур – археоботанічні дані свідчать, що його обробіток віся в Китаї близько 8000 р. до н.е. Сьогодні ця зернова культура відіграє важливу роль у харчуванні населення аридних регіонів Азії й Африки, хоча в глобальній аграрній структурі має скоріше нішеве значення. Загалом світова площа посівів сягає 30–33 млн га, а річне виробництво – 28–32 млн т. Основні виробники – Індія (понад 10 млн т із понад 10 млн га), Нігер (3–4 млн т із понад 6 млн га), Китай (до 2 млн т із 1–1,5 млн га), а також Малі, Нігерія, Судан і інші країни. У 2023 р. ООН проголосила Міжнародний рік проса, що стимулювало дослідження та популяризацію культури у країнах із традиційно низьким рівнем його споживання.

Харчова цінність проса зумовлює його використання в безглютеновому харчуванні: зерно містить 10–12 % білка, 65–75 % крохмалю, 3–4 % жиру, 8–10 % клітковини, а також феноли, флавоноїди й токоферолі. Його білки представлені проламінами й глобулінами, багатими на лізин, але з нижчою біологічною цінністю порівняно з пшеницею чи кукурудзою. Крохмаль характеризується низькою температурою набухання, що покращує кулінарні властивості крупи.

Різнокольорові типи проса мають специфічні властивості: біле – легко шліфується, дає світлу крупу із високим вмістом крохмалю; кремове – із м'якою текстурою й виразними антиоксидантними властивостями; жовте – містить багато каротиноїдів, добре підходить для функціональних продуктів; червоне – з високим поліфенольним профілем; сіре – має найгрубішу оболонку, багате на мікроелементи і антиоксиданти, цінне у виробництві функціонального харчування.

В Україні, за даними FAO і Держстату, за останнє десятиліття площі під просом коливалися від 20 до 100 тис. га, а валовий урожай – від 50 до 250 тис. т. У 2022–2024 рр. площі скоротилися до 20–25 тис. га, а виробництво до 40–70 тис. т; у 2023 р. зібрано близько 58 тис. т із 21 тис. га. Просо становить менше 1 % внутрішнього ринку круп'яних продуктів.

ДСТУ 5026:2008 регламентує класифікацію й якість зерна проса: поділ за кольоровими групами (I тип – біле/кремове, II – жовте, III – червоно-коричневе) і призначенням (вищі класи – для крупи, нижчі – для солоду або кормових цілей). Встановлені нормативи до вологості ($\leq 13,5$ %), цілісності ядра (≥ 76 –80 %), крупності, домішок тощо.

В Україні станом на липень 2025 р. у Реєстрі сортів рослин зареєстровано 37 сортів *Panicum miliaceum*, серед них найбільшпопулярні – Миронівське 51, Київське 87, Київське 96, а за останні п'ять років – дев'ять сучасних сортів (наприклад Дивовижене, Казкове джерело, Переможне, ПС Лілея тощо). Ці сорти забезпечують розширення сировинної бази круп'яної промисловості.

Класична технологія виробництва шліфованої крупи ґрунтує очищення, сортування, луцення (з одно- або двома деками), шліфування, сепарування, контроль якості та фасування. Вихід готового продукту становить близько 60 %, але процес є складним, вимагає значних площ для розміщення відповідного обладнання, при цьому вихід готової продукції не перевищує 65 %.

Розроблено і запропоновано оновлений технологічний процес який передбачає попередню воднотеплову обробку (пропарювання при 0,05–0,10 МПа протягом 5–7 хв, підсушування до ≤ 14 %) перед об'єднаним луценням-шліфуванням на двох системах та застосуванням фотосепараторів і сучасних сушарок («Каскад», «ВПС-О»). Це дозволяє знизити крихкість ендосперму, підвищити вихід цілого ядра, мінімізувати втрати біологічно активних елементів. Фотосепаратори на основі ШІ забезпечують точний контроль зерна/ядра за кольором і внутрішніми дефектами, підвищуючи якість і товарність кінцевого продукту.

Ключові слова: круп'яне виробництво, просо, крупа шліфована, пропарювання, підвищення якості крупи, скорочення технологічного процесу.

Просо належить до злакових культур з найдавнішою історією вирощування: археоботанічні свідчення його обробітку вказують на Китай (близько 8000 років тому) як один із первинних центрів його походження. Сьогодні просо вирощують у багатьох регіонах Азії, Африки, Європи та Америки. У структурі світового землеробства просо має нішевий характер, проте відіграє критично важливу роль у харчуванні населення аридних регіонів [1].

Загальна площа посівів проса у світі, за даними FAO, коливається в межах 30–33 млн гектарів, а річне виробництво – близько 28–32 млн тонн. Найбільшими виробниками є Індія, Нігер, Китай, Малі, Нігерія та Судан. У цих країнах просо не лише важлива продовольча культура, але й складова агрокультурної ідентичності. Найбільше проса вирощується в тропічній та субтропічній Азії (переважно дрібнозернисте просо – *Panicum miliaceum*, *Eleusine coracana*, *Setaria italica*) і в напівпустельній Африці (переважно перлове просо – *Pennisetum glaucum*, відоме як pearl millet). Індія – беззаперечний лідер за обсягом виробництва проса у світі.

У середньому вона вирощує понад 10–11 млн тонн проса щороку на площах, що перевищують 10 млн гектарів. Африканські країни мають найвищу частку проса у раціонах харчування. Наприклад, Нігер щороку засіває понад 6 млн гектарів під просо, виробляючи близько 3–4 млн тонн зерна, залежно від погодних умов. Китай також є великим виробником проса, хоча площі значно поступаються Індії. Загальні площі сягають 1–1,5 млн гектарів, а виробництво – до 2 млн тонн [2].

У глобальному контексті спостерігається тенденція до зростання інтересу до проса через його харчову цінність і безглютеновий характер. У 2023 році ООН проголосила Міжнародний рік проса, що дало значний імпульс для досліджень і просування культури в країнах, де вона раніше мала другорядне значення. У продовольчому аспекті просо є основою раціону мільйонів людей в Азії та Африці, особливо в аридних регіонах, де інші зернові не забезпечують стабільного врожаю. Найчастіше зерно проса використовується у вигляді крупі після оброблення, що дозволяє видалити оболонки та зародок і отримати ядро з високим вмістом крохмалю, невеликою кількістю білка та мінімальним вмістом жиру. Каша з проса – одна з найстаріших страв у Європі та Азії. У Східній Європі найбільш поширеним є використання звичайного проса для виробництва шліфованої крупі. Залежно від ступеня обробки розрізняють шліфовану, поліровану і дроблену крупу. У Китаї та Кореї з проса готують каші, супи, напої і солодощі. У Африці зерно перлового проса перетирають і використовують для приготування традиційних коржів, каш і ферментованих страв [3].

Просо є одним з провідних злаків у дієтах для осіб з целиакією. Це зробило дану культуру популярною у функціональному харчуванні країн ЄС, США та Японії, де зерно проса використовується для виготовлення пластівців, каш швидкого приготування, екструдованих снєків, круп'яного борошна, хлібців і макаронів. У країнах із розвинутою органічною переробкою зростає попит на зерно проса для виготовлення молокозамінників, ферментованих напоїв та дитячого харчування.

У середньому просо містить 10–12 % білка, 65–75 % крохмалю, 3–4 % жиру, до 1,5 % золи, 8–10 % харчових волокон. Білковий склад представлений переважно проламінами і глобулінами з порівняно високим вмістом лізину. Водночас протеїни проса мають нижчу біологічну цінність, ніж у пшениці чи кукурудзи, через нестачу лізину і триптофану. Крохмаль має низьку температуру набухання, добре піддається термічній обробці, забезпечуючи гарну кулінарну якість каш і високий рівень засвоєння. Завдяки високому вмісту флавоноїдів, фенольних кислот і токоферолів просо розглядається як джерело антиоксидантів [4].

Кольорове різноманіття проса зумовлене як генетичними чинниками, так і умовами вирощування, сортовими особливостями та кількістю і типом фенольних сполук у оболонках й алейроновому шарі зерна. Найпоширенішими за кольоровими ознаками є п'ять типів: біле просо, кремове (світло-жовте), жовте, червоне і сіре (іноді сіре з фіолетовим відтінком). Кожен з цих типів має різний ступінь поширення, придатність до переробки та поживну цінність [5-7].

Біле просо характеризується найнижчим вмістом пігментів у зерновій оболонці. Його зерно гладке, круглясте, з тонкою оболонкою і слабо вираженим кольоровим шаром. Завдяки цьому біле просо є найбільш придатним для виготовлення шліфованої крупі високої якості, що має світлий, привабливий вигляд після переробки. При шліфуванні з нього видаляється мінімальна частка ендосперму, що дозволяє отримати високий вихід цілого ядра. Біле просо є найменш гірким за смаком, має найнижчий вміст дубильних речовин і практично не містить водорозчинних фенольних сполук з групи флавоноїдів. Воно має високий вміст крохмалю (до 75 %) і помірний рівень білка (10–11 %), добре розварюється і використовується у виробництві каш, пластівців, дитячого харчування.

Кремове просо, або просо із зерном світло-жовтого відтінку, займає проміжне положення між білим і жовтим. Його зерно має м'який, золотисто-кремовий колір, що формується внаслідок наявності флавонів і незначної кількості каротиноїдних пігментів. Кремове просо характеризується добрим співвідношенням між технологічною придатністю і біологічною цінністю. Воно добре шліфується, дає середній або високий вихід крупі, має тонку оболонку і порівняно м'який ендосперм. Після термічної обробки утворює крупу з м'якою текстурою та приємним нейтральним смаком. За хімічним складом кремове просо подібне до білого, проте має дещо вищий вміст поліфенольних сполук, зокрема флавоноїдів, що забезпечують антиоксидантні властивості. У зернопереробній промисловості кремове просо є потенційною сировиною для пластівців, сухих сніданків і каш швидкого приготування.

Жовте просо – один з найпоширеніших типів, особливо у Східній Європі та Центральній Азії. Зерно жовтого проса має інтенсивне забарвлення завдяки наявності каротиноїдів, які надають зерну характерного золотистого або яскраво-жовтого відтінку. Ці пігменти мають не лише декоративну, але й функціональну цінність – антиоксидантну дію та провітамінну активність. Жовте просо часто має дещо щільніший ендосперм і твердішу структуру зерна, що ускладнює шліфування і знижує вихід цілого ядра але водночас підвищує термостійкість каші. Воно має дещо вищий вміст білка (до 12 %), помірну кількість жиру (до 4 %) і вищу біологічну цінність, ніж біле. Така крупа використовується для каш, пудингів, гарнірів, а також як сировина для функціональних продуктів харчування.

Червоне просо характеризується зерном з насиченим червоно-коричневим або бордовим відтінком, що пов'язано з підвищеним вмістом фенольних сполук у зерновій оболонці. Воно має найвищий вміст поліфенолів серед усіх кольорових типів, що надає зерну яскравих антиоксидантних властивостей. Водночас зерно червоного проса має грубшу оболонку, нижчу шліфованість і менший вихід крупі. Ендосперм часто має

щільну структуру, з високим вмістом амілопектину, що впливає на текстуру готової каші. Червоне просо частіше використовується у формі цілнзернової крупи або борошна. У ряді африканських країн червоне просо використовується для ферментації, виготовлення традиційних напоїв і страв.

Сіре просо – найменш пошене, має зерно з попелястим, сірим або сіро-фіолетовим відтінком. Сіре просо має найгрубішу оболонку, низьку шліфувальність і потребує спеціальних режимів переробки. Його перевага полягає у високому вмісті харчових волокон, кремнію, магнію, а також у винятковій антиоксидантній активності. Через темний колір і характерні смакові властивості, воно рідко використовується у масовому продовольстві, однак є цінним у виробництві функціонального борошна, збагачених каш, сухих сумішей та продуктів із високою антирадикальною активністю.

Найкращі технологічні властивості має біле просо, зокрема сорти проса звичайного (*Panicum miliaceum*) з круглим, однорідним, світлим зерном.

За офіційними статистичними даними Державної служби статистики України та FAO, упродовж останніх десяти років площі під просом змінювались у межах від 20 до 100 тис. га, а валовий збір – від 50 до 250 тис. тонн на рік. У 2022–2024 роках через війну, скорочення площ у зоні бойових дій і зміну структури посівів в багатьох регіонах, площі проса зменшилися ще більше – орієнтовно до 20–25 тис. га, а валове виробництво впало до 40–70 тис. тонн на рік. У 2023 році, за оцінками Інституту зернових культур НААН, в Україні було зібрано близько 58 тис. тонн проса з площі приблизно 21 тис. га. У структурі внутрішнього споживання зернових культур просо займає незначне місце – менше 1 % від загальної кількості круп'яних продуктів, що споживаються в країні [8-10].

ДСТУ 5026:2008 «Просо. Технічні умови» є чинним національним стандартом України, який регламентує вимоги до зерна проса, призначеного для продовольчого, кормового, технічного використання та експорту. Стандарт установлює чітку систему класифікації зерна за кольором і призначенням. За кольоровими типами зерно поділяється на три основні групи: тип I – біле або кремове просо, тип II – зерно з жовтими відтінками, тип III – червоно-коричнєве. Така градація має як технологічне, так і товарне значення, оскільки колір зерна впливає на смакові властивості, вихід крупи та попит з боку споживачів. За призначенням зерно класифікується на чотири класи: перший і другий клас використовуються для виробництва крупи, третій – для виготовлення солоду, а четвертий – як сировина для комбікормової або технічної переробки [11].

Ключовими показниками якості, які регламентує стандарт, є вологість, вміст ядра, крупність, вміст зернової та сміттевої домішки. Максимально допустима вологість зерна не повинна перевищувати 13,5 % незалежно від класу. У зерні першого класу частка цілих зерен має становити не менше 76 %, крупність – не менше 90 %. Для другого класу відповідні значення становлять 74 % і 80 %. Для нижчих класів ці показники не нормуються, що відображає їх невисоку технологічну якість. Зміст зернової домішки обмежується 5 % для зерна першого класу, 8 % – для другого, і до 15 % – для четвертого класу. Сміттева домішка допускається в межах 2–8 %, причому вміст мінеральних і галькових частинок суворо обмежується – не більше 0,2 % і 0,1 % відповідно. Шкідливі домішки (зокрема, сажкові зерна, бур'яни з токсичними властивостями) мають бути не вище 0,2 % у всіх класах.

У Державному реєстрі сортів рослин, дозволених для поширення в Україні [12] станом на липень 2025 року, нарахується 37 сортів проса посівного звичайного (*Panicum miliaceum* L.), придатних для використання як сировина для виробництва круп.

В Україні найпоширенішим сортом проса вважається Миронівське 51, яке було внесено до Державного реєстру ще у 1978 році. У подальші роки до нього додалися сорти Київське 87 та Київське 96, зареєстровані відповідно у 1991 та 1999 роках. Упродовж перших двох десятиліть XXI століття реєстрація нових сортів відбувалася майже щороку, а найбільший приріст відзначено у 2006 році, коли до Реєстру [12] було внесено сорти Денівське, Золушка, Константинівське, Лана та Таврійське. Протягом останніх п'яти років з'явилося дев'ять нових сортів: Дивовижне, Казкове джерело та Корнбергер Міттельфрюе (2020), Ярдуш (2021), Кеша (2022), Переможне (2023), ПС Лілея, ПС Чиста криниця та Славетне (2024). Такі дані підтверджують, що селекційна робота не припиняється, і в Україні створюються сучасні перспективні сорти проса, здатні розширити сировинну базу для виробництва круп.

Найбільш поширеним харчовим продуктом, який отримують в Україні під час переробки зерна проса, є крупа пшоно шліфоване. Цей продукт належить до регламентованих відповідно до діючих нормативів і являє собою очищене від квіткових плівок і відшліфоване ядро зерна проса. Водночас, незважаючи на те, що технологія виробництва пшоно шліфованого чітко визначена Правилами ведення та організації технологічного процесу на круп'яних заводах, ця крупа не користується широким споживчим попитом у порівнянні з іншими традиційними крупами. В свою чергу обмежена популярність пшоно на внутрішньому ринку частково пояснює низький рівень інновацій у сфері створення нових харчових продуктів на основі проса. Це, своєю чергою, стримує активне впровадження нових технологій переробки проса в українській круп'яній промисловості та зменшує зацікавленість виробників у розширенні асортименту продуктів на його основі [13].

Технологічний процес виготовлення пшоно шліфованого передбачає послідовне виконання операцій очищення зерна від домішок, його сортування за фракціями, лущення, сортування продуктів лущення, шліфування ядра, сортування після шліфування та контролю. Підготовлене зерно спершу надходить на сорту-

вання, яке здійснюють за допомогою ситоповітряних сепараторів і круп'яних розсійників типу А1-БРУ. Схема виробництва може передбачати переробку зерна одним потоком без поділу на фракції або двома потоками із фракціонуванням, при цьому зерно розділяють на крупну та дрібну фракції. Крупну отримують проходом через сито з отворами $\varnothing$ 3,0 мм та сходом із сит розміром $1,7 \times 20$ мм, дрібну – проходом через $1,7 \times 20$ мм і сходом $1,5 \times 20$ мм. Обидві фракції далі надходять на лушення. Ця операція виконується на вальцедекових верстатах з одною або двома деками. Якщо використовуються верстати з одною декою, зерно пропускають через чотири послідовні лущильні системи, а при фракціонуванні – через три системи: перша працює окремо для кожної фракції, а друга й третя – сумісно. У разі використання дводекових верстатів передбачається послідовне лушення на двох системах. Продукти лушення після кожної системи піддаються сортуванню за допомогою повітряних сепараторів, завдання яких полягає у вилученні лузги, подрібнених частинок ядра та борошнця, оскільки їх присутність може значно знизити ефективність наступних операцій. Після першої лущильної системи продукт тричі пропускають через повітряні сепаратори, після другої, третьої й четвертої – двічі. У результаті цих операцій отримують ядро проса, де частка нелущених зерен не перевищує 1 %. Воно вважається напівфабрикатом, придатним до споживання. Для покращення зовнішнього вигляду, підвищення споживчих характеристик і тривалості зберігання проводиться шліфування, під час якого видаляють плодове й насіннєві оболонки та частково зародок. Шліфування здійснюють на одній системі з використанням машин А1-ЗШН і гвинтопресових шліфувальних установок У1-БШП. Продукти шліфування двічі сепарують у повітряних сепараторах, вилучаючи борошенце, дрібні частинки ядра та залишки оболонки. Ціле шліфоване ядро направляють у круп'яний розсійник для контролю: на ситах $\varnothing$ 2,3–2,5 мм або $1,8\text{--}1,9 \times 20$ мм видаляють великі домішки, а проходом сит $\varnothing$ 1,6–1,7 мм – залишки борошнця та подрібнених частинок. Сходом із сит $\varnothing$ 1,6–1,7 мм отримують готову крупу пшоно шліфоване, яку додатково двічі пропускають через повітряні сепаратори перед фасуванням. Вихід готової продукції по базису за такою схемою становить близько 65 %. [14].

Серед недоліків виробництва пшоно шліфованого варто відзначити значну протяжність і складність технологічного процесу, що зумовлено необхідністю використання чотирьох лущильних систем у разі застосування верстатів з одною декою або двох систем при роботі з дводековими верстатами. Додаткову складність становить сортування продуктів лушення, яке здійснюється із залученням до дев'яти повітряних сепараторів, а також контроль ядра за допомогою круп'яних розсійників і повітряних сепараторів. Це потребує значних виробничих площ для розміщення відповідного обладнання, що створює труднощі під час впровадження процесу на підприємствах із невеликою продуктивністю. Аналіз класичної технології свідчить, що головними її обмеженнями є вузький асортимент продукції та порівняно низький вихід готової крупи, який становить близько 65 %, тоді як після лушення відсоток вилученої лузги досягає 15,5 %, а решта втрачає формується через надмірне утворення подрібнених частинок ядра і борошнця під час лушення.

Підвищення виходу крупи пшоно в Україні можливе лише за умови комплексного технічного та технологічного оновлення на всіх етапах переробки. Найважливішим фактором є ефективне лушення зерна, оскільки саме під час цього процесу втрачається найбільша частка ядра через його крихкість і зрощення з оболонками. Вирішальне значення має застосування сучасних лущильних машин з абразивно-фрикційним принципом дії, які забезпечують зняття оболонки із мінімальним пошкодженням ядра. Українські підприємства досі часто використовують морально застарілі установки, при використанні яких утворюється достатньо велика кількість подрібненого ядра що в свою чергу призводить до зниження виходу крупи менше 55 %.

Важливим технічним рішенням є кондиціонування зерна перед обробкою. Традиційні технології переробки проса в Україні тривалий час не включали воднотеплову обробку через відсутність технічних можливостей ефективно контролювати якість зерна на вході. Просо – культура дрібна, неоднорідна за кольором і структурою, і звичайні сортувальні та очистні машини не давали змоги виділити зіпсовані, недозрілі чи уражені зерна. Через це включення воднотеплової обробки без належного попереднього відбору могло призводити до погіршення якості і навіть збільшення втрат. Але у світі даний технологічний етап для підвищення ефективності виробництва на відміну від вітчизняної галузі застосовується. Відомий спосіб підготовки зерна проса до лушення який передбачає попереднє очищення зерна, замочування у воді температурою $20\text{--}70^\circ\text{C}$ протягом 2–16 годин, пропарювання при тиску не більше 0,5 МПа упродовж від 2 до 20 хвилин, підсушування до вологості 8–16 %, лушення. Вихід цілого ядра проса при здійсненні обробки за такою структурою зростає приблизно в 1,5 рази. Застосування воднотеплової обробки для проса в Україні – це перспективний напрям модернізації просопереробної галузі, який дозволяє знизити технологічні втрати, підвищити рентабельність і конкурувати за якістю з крупами з інших культур [15].

Застосування фотосепараторів у переробці проса – один із ключових напрямів сучасної модернізації круп'яного виробництва, що має безпосередній вплив як на якість готової продукції, так і на економічну ефективність підприємства. На сьогодні фотосепарація перестала бути допоміжним елементом очищення – вона перетворилась на високоточний інструмент контролю, який завдяки цифровим камерам, гіперспектральному аналізу й програмному забезпеченню на базі штучного інтелекту дозволяє не лише відсортовувати зерно за кольором, а й виявляти приховані дефекти, невидимі візуально: потемніння ендосперми, наслідки ураження фузаріозом, початкову стадію проростання, ферментативні порушення тощо. В українських умовах часто зустрічається суміш різних кольорових форм, а також домішки дикого або недозрілого зерна, що

придають крупі нехарактерний відтінок і знижують товарну якість. Фотосепаратори дозволяють точно розділити партії зерна за відтінками, зокрема за відбиттям у ближньому інфрачервоному діапазоні, що відображає внутрішній стан зерна, а не лише його поверхню. Це означає, що навіть зерна однакового кольору, але з різною структурою ендосперму, можуть бути розділені.

Інтеграція фотосепараторів у технологічну лінію переробки проса є перспективним рішенням для покращення якості крупи та підвищення ефективності процесу. Аналіз зерна за кольором дозволяє видаляти сторонні домішки, зерна з дефектами або інших видів проса, що важливо як на етапі очищення, так і при контролі готової продукції. Сучасні фотосепаратори Sortex J Spectravision (Buhler) використовують алгоритми штучного інтелекту та спеціалізоване програмне забезпечення для точного аналізу кольору ядра, забезпечуючи глибоке сортування навіть при мінімальній кольоровій варіації. Вони здатні розрізняти зерна за відтінками жовтого, кремового, червоного та сірого кольору, а також виділяти уражені зерна, ядра з темними плямами, пліснявою або ознаками псування. Використання таких систем на двох ключових етапах – на вході та на виході – забезпечує подвійний контроль якості, зменшує частку забракованої продукції, покращує зовнішній вигляд і підвищує товарну вартість шліфованої крупи. Впровадження фотосепараторів також дозволяє скоротити кількість механічних операцій, компенсуючи недоліки класичних методів лушення та шліфування, зберігаючи більший обсяг цілого ядра.

В ході проведення досліджень нами було розроблено технологічний процес переробки проса в крупу шліфовану відповідно до якого очищене від домішок зерно проса з вологістю не більше 14 % спрямовується на етап воднотеплової обробки, який здійснюють за схемою гарячого кондиціонування. При цьому враховуючи особливості проса, як зернової культури, пропарювання проводять у пропарювачах безперервної дії при тиску пари 0,05-0,10 МПа, тривалість пропарювання складає 5-7 хв. На наступному етапі зерно проса підсушують на вертикальних парових сушарках, наприклад «ВПС-О», (виробництва ТОВ «ОЛИС», м. Одеса). Зерно підсушують до вологості не більше 14 %. Після цього одним потоком зерно проса спрямовують на лушення-шліфування. Для даного етапу використовують лущильно-шліфувальні машини типу «Каскад» (виробництва ТОВ «ОЛИС», м. Одеса) або їх аналоги, які працюють за тим же принципом дії. Кількість систем на даному етапі складає дві. Після кожної системи лушення-шліфування суміш продуктів для вилучення борошенця провіюють у повітряних сепараторах із замкнутим циклом повітря. Після цього отримане ядро проса спрямовують на фотосепаратор, який забезпечує контроль якості шліфованого ядра, а також вилучення із суміші шліфованого ядра нелущених зерен, які повертають на першу лущильно-шліфувальну систему. Отримане після обробки у фотосепараторі ядро проса контролюють на вміст металоманітних домішок і спрямовують на фасування або на зберігання у бункери готової продукції.

Розроблений технологічний процес переробки проса в крупу шліфовану має низку переваг, що зумовлюють його ефективність і доцільність у промисловому масштабі. В першу чергу, він враховує фізіолого-технологічні особливості зерна проса, що дозволяє забезпечити оптимальні умови обробки на всіх стадіях технологічного процесу. Застосування гарячого кондиціонування з використанням пропарювання в апаратах безперервної дії при невисокому тиску пари дозволяє досягти зниження крихкості ендосперму і, відповідно, підвищення виходу цілого ядра після лушення-шліфування. Скорочена тривалість термічної обробки (5–7 хв) у поєднанні з помірними температурними параметрами забезпечує збереження біологічної цінності зерна, мінімізуючи втрати термолабільних сполук.

Використання сушарок типу «стрічкових», що забезпечують рівномірне підсушування до регламентованої вологості, сприяє стабільності подальших лущильно-шліфувальних операцій. Застосування двох послідовних систем лушення та шліфування дозволяє поступово видаляти оболонки без надмірного пошкодження ядра. Робота машин типу «Каскад», адаптованих під характер термічно підготовленого зерна проса, сприяє досягненню високих якісних показників готового продукту. Уведення повітряних сепараторів із замкнутим циклом повітря після кожної системи забезпечує ефективне видалення борошенця.

Додатковим технологічним етапом, що посилює переваги процесу, є застосування фотосепараторів. Вони дають змогу автоматизовано контролювати якість шліфованого ядра за кольором і структурною однорідністю, а також повертати у технологічний процес нелущене зерно, підвищуючи загальний вихід кінцевого продукту.

Висновки. Узагальнюючи результати аналізу, можна зробити висновок, що просо є однією з найдавніших і водночас перспективних зернових культур, яка відіграє важливу роль у забезпеченні продовольчої безпеки в аридных регіонах світу, зокрема в Азії та Африці. Незважаючи на нішевий характер у глобальному агропромисловості, просо має значний потенціал для розширення як у сфері харчування людей з особливими потребами (зокрема при целиації), так і в контексті функціонального харчування завдяки своїм антиоксидантним властивостям, безглютеності та високому вмісту складних вуглеводів. Попри наявність сучасної нормативної бази та стабільну селекційну роботу, в Україні просо залишається малопоширеною культурою як за площею посівів, так і за обсягами переробки. Основним продуктом, що виробляється, є крупа пшона шліфована, проте її невисокий попит на внутрішньому ринку обмежує розвиток асортименту продукції з проса. Розроблена технологія виробництва крупи з проса забезпечить скорочення етапів технологічного процесу та підвищити якість отриманої продукції.

References

1. He, K., Lu, H., Zhang, J., & Wang, C. (2022). Holocene spatiotemporal millet agricultural patterns in northern China: A dataset of archaeobotanical macroremains. *Earth System Science Data*.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *FAOSTAT: Crops and livestock products: Millet, area harvested and production data by country* [Elektronnyi resurs]. Otrymano z <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
3. Prodovol'cha ta sil'skohospodars'ka orhanizatsiia OON. (2023). *Mizhnarodnyi rik prosa 2023* [Elektronnyi resurs]. Otrymano z <https://www.fao.org/millet-2023/en/>
4. Saleh, A. S. M., Zhang, Q., Chen, J., & Shen, Q. (2013). Millet grains: Nutritional quality, processing, and potential health benefits. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(3), 281–295. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12012>
5. Zieliński, H. (2023). Proso millet (*Panicum miliaceum* L.) as alternative source of starch and phenolic compounds: A study on twenty five worldwide accessions. *Molecules*, 28(17), Article 6339. <https://doi.org/10.3390/molecules28176339>
6. Dykes, L., & Rooney, L. W. (2021). Millets as potential nutri cereals: A review of nutrient composition, phytochemical profile and techno functionality. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(8), 3703–3718.
7. El Shemy, A., et al. (2024). Varietal differences in phenolic compounds and antioxidant activity in finger millet (*Eleusine coracana*): A comprehensive review. *Planta*. <https://doi.org/10.1007/s00425-024-04502-2>
8. Drebot, O., & Vysochans'ka, M. (2024). Shchodo efektyvnosti vyrobnytstva prosa–nishevoi sil'skohozyais'koi kultury. *Ekonomika ta suspilstvo*, (67).
9. Shevchenko, N. V. (2024). Sortovi resursy prosa v Ukraini. *Ahrarni innovatsii*, (25), 102–107.
10. Il'chuk, M., & Berezovska, L. (2025). Perspektyvy eksportu zerna ukrains'kykh nishevykh kultur. *Pidpriemnytstvo ta innovatsii*, (34), 205–210. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/34.33>
11. DSTU 5026:2008 «Proso. Tekhnichni umovy».
12. Ministerstvo ahrarnoi polityky ta prodovol'stva Ukrainy. (2025). *Derzhavnyi reiestr sortiv roslin, prydatnykh dlia poshyrennia v Ukraini na 2025 rik* [Elektronnyi resurs]. Otrymano z <https://minagro.gov.ua/file-storage/reiestr-sortiv-roslin>
13. Shutenko, Ye. I., & Sots, S. M. (2010). *Tekhnolohiia krupiannoho vyrobnytstva* [Navchalnyi posibnyk]. Kyiv: Osvita Ukrainy.
14. Pravyta orhanizatsii i vedennia tekhnolohichnoho protsesu na krupianykh zavodakh. (1998). Kyiv, 164 s.
15. Malleshi, N. G. (2006). *U.S. Patent No. 7,029,720*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Otrymano z <https://patentimages.storage.googleapis.com/d6/55/ef/c34cf27857318f/US7029720.pdf>

FEATURES OF MILLET GROAT PRODUCTION

Sots S., PhD of Technical Science, Associate Professor, Kustov I., PhD of Technical Science, Associate Professor, Chehlatoniev V., post graduate student
Odesa National University of Technology

Abstract. Millet is one of the oldest cultivated crops—archaeobotanical evidence indicates that it was grown in China around 8000 BCE. Today, this cereal plays an important role in the diets of populations in arid regions of Asia and Africa, although it occupies rather a niche position in the global agricultural system. Worldwide, the sown area reaches 30–33 million hectares, and annual production amounts to 28–32 million tonnes. The leading producers include India (over 10 million tonnes from more than 10 million hectares), Niger (3–4 million tonnes from over 6 million hectares), China (up to 2 million tonnes from 1–1.5 million hectares), as well as Mali, Nigeria, Sudan, and other countries. In 2023, the UN declared the International Year of Millets, which stimulated research and popularization of the crop in countries with traditionally low consumption levels.

The nutritional value of millet determines its use in gluten-free diets: the grain contains 10–12% protein, 65–75% starch, 3–4% fat, 8–10% fiber, as well as phenolic compounds, flavonoids, and tocopherols. Its proteins consist mainly of prolamins and globulins, which are rich in lysine but have lower biological value compared to wheat or maize. The starch is characterized by a low swelling temperature, which enhances the culinary properties of the groats.

Colored types of millet exhibit specific properties: white millet is easy to polish and yields light-colored groats with high starch content; cream-colored millet has a soft texture and pronounced antioxidant properties; yellow millet is rich in carotenoids and well-suited for functional foods; red millet has a high polyphenolic profile; and gray millet has the coarsest hull, is rich in micronutrients and antioxidants, and is valuable in the production of functional foods.

In Ukraine, according to FAO and State Statistics data, the millet sown area over the past decade has ranged from 20 to 100 thousand hectares, with gross harvests between 50 and 250 thousand tonnes. In 2022–2024, the area

decreased to 20–25 thousand hectares and production fell to 40–70 thousand tonnes; in 2023, around 58 thousand tonnes were harvested from 21 thousand hectares. Millet accounts for less than 1% of the domestic groat market.

Ukrainian national standard DSTU 5026:2008 regulates the classification and quality of millet grain: it defines color groups (Type I – white/cream, Type II – yellow, Type III – red-brown) and intended uses (higher classes for groats, lower ones for malt or feed). The standard also specifies requirements for moisture content ($\leq 13.5\%$), kernel integrity ($\geq 76\text{--}80\%$), grain size, foreign matter, and impurities.

As of July 2025, 37 varieties of *Panicum miliaceum* are registered in the Ukrainian Plant Variety Register. Among them, the most popular are Myronivske 51, Kyivske 87, Kyivske 96, and nine modern varieties registered over the last five years (e.g., Dyvovyzhne, Kazkove Dzherelo, Peremozhne, PS Lileia, and others). These varieties support the expansion of the raw material base for the groat-processing industry.

The classical technology for producing polished millet groats includes cleaning, sorting, dehulling (using one or two decorticators), polishing, separation, quality control, and packaging. The yield of the final product is approximately 60%, but the process is complex, requires considerable space for equipment placement, and the final output rarely exceeds 65%.

An updated technological process has been developed and proposed, involving preliminary hydrothermal treatment (steaming at 0.05–0.10 MPa for 5–7 minutes, followed by drying to $\leq 14\%$) before combined dehulling and polishing using a two-system setup, along with the application of photoseparators and modern dryers (e.g., “Cascade”, “VPS-O”). This approach reduces endosperm brittleness, increases the yield of whole kernels, and minimizes the loss of biologically active components. AI-based photoseparators provide precise control of grain and kernel quality by detecting color and internal defects, improving both the quality and marketability of the final product.

Keywords: groat production, millet, polished groats, steaming, improvement of groat quality, shortening of technological process.

Список використаної літератури

1. He K., Lu H., Zhang J., Wang C. Holocene spatiotemporal millet agricultural patterns in northern China: a dataset of archaeobotanical macroremains. *Earth Syst. Sci. Data*, 2022.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT: Crops and livestock products: Millet, area harvested and production data by country [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
3. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН. Міжнародний рік проса 2023 [Електронний ресурс] // FAO. – Режим доступу: <https://www.fao.org/millet-2023/en/>
4. Saleh A. S. M., Zhang Q., Chen J., Shen Q. Millet Grains: Nutritional Quality, Processing, and Potential Health Benefits // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. – 2013. – Vol. 12, № 3. – С. 281–295. – DOI: 10.1111/1541-4337.12012.
5. Zieliński H. Proso Millet (*Panicum miliaceum* L.) as Alternative Source of Starch and Phenolic Compounds: A Study on Twenty-Five Worldwide Accessions // *Molecules*. – 2023. – Vol. 28(17). – Article 6339. – DOI: 10.3390/molecules28176339.
6. Dykes L., Rooney L. W. Millets as potential nutri-cereals: a review of nutrient composition, phytochemical profile and techno-functionality // *Int. J. Food Sci. Technol.* – 2021. – Vol. 56(8), pp. 3703–3718.
7. El-Shemy A. et al. Varietal differences in phenolic compounds and antioxidant activity in finger millet (*Eleusine coracana*): a comprehensive review // *Planta*. – 2024. – DOI: 10.1007/s00425-024-04502-2.
8. Дребот, О., & Височанська, М. (2024). Щодо ефективності виробництва проса-нішевої сільськогосподарської культури. *Економіка та суспільство*, (67).
9. Шевченко, Н. В. (2024). Сортові ресурси проса в Україні. *Аграрні інновації*, (25), 102–107.
10. Льчук, М., & Березовська, Л. (2025). ПЕРСПЕКТИВИ ЕКСПОРТУ ЗЕРНА УКРАЇНСЬКИХ НІШЕВИХ КУЛЬТУР. *Підприємництво та інновації*, (34), 205–210. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/34.33>
11. DSTU 5026:2008 «Просо. Технічні умови»
12. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2025 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://minagro.gov.ua/file-storage/reystir-sortiv-roslin>
13. Шутенко, Є.І. Технологія круп'яного виробництва: навч. Посібник [Текст] / Є.І. Шутенко, С.М. Соц. – К.: Освіта України, 2010. – 272 с.
14. Правила організації і ведення технологічного процесу на круп'яних заводах. – К., 1998. – 164 с.
15. Malleshi, N. G. (2006). U.S. Patent No. 7,029,720. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://patentimages.storage.googleapis.com/d6/55/ef/c34cf27857318f/US7029720.pdf>

Отримано в редакцію 20.06.2025

Received 20.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Approved 02.09.2025

ПІДГОТОВКА НАСІННЯ НУТУ ДО ПЕРЕРОБКИ В КРУП'ЯНІ ПРОДУКТИ

Соц С.М., канд. техн. наук, доцент, Кустов І.О., канд.техн.наук, доцент, Буценко І.І., аспірант
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. У статті розглянуто, сучасний стан вирощування нуту, його харчову та технологічну цінність, а також обґрунтовано підходи до його переробки з урахуванням морфологічних і біохімічних особливостей даної бобової культури. Основні обсяги виробництва нуту зосереджені в Індії, де вирощується до 70 % світового врожаю, а також в Австралії та Туреччині. Світове виробництво нуту коливається в межах 14–18 млн тонн на рік, з яких близько половини переробляється на крупи, борошно та плющені продукти. В Україні нут залишається нішовою культурою з річним обсягом виробництва не більше 50 тис. тонн і посівними площами до 40 тис. га, основними регіонами вирощування якої є південні та частково центральні області. Проаналізовано досягнення селекційної роботи, результатом якої стало зростання кількості зареєстрованих сортів нуту до 22, серед яких представлені як фуражні, так і високоякісні зернові, призначені для харчової промисловості. Виробництво харчових продуктів на основі нуту в Україні перебуває на етапі становлення і обмежується невеликими обсягами виготовлення круп, борошна та пластівців, що зумовлено відсутністю усталеного споживчого сегмента, низькою поінформованістю населення про цінність нуту, високою конкуренцією з боку традиційних культур і відсутністю нормативно-технічних регламентів для його переробки. Аналіз нормативної бази показав, документом, що регламентує показники якості нуту, є ДСТУ 6019:2008, який визначає чіткі вимоги до харчового та кормового зерна, зокрема за вологістю, вмістом домішок, рівнем ураженості, а також вмістом токсичних елементів, мікотоксинів і пестицидів. Особливу увагу приділено антипоживним речовинам, серед яких інгібітори протеаз, фітинова кислота, лектини, сапоніни та таніни, що суттєво знижують біодоступність білків і мінералів, а також обґрунтовано технологічні підходи до їх інактивації шляхом замочування, пропарювання, варіння та луцення. Визначено, що пропарювання під тиском 0,15–0,20 МПа та подальше луцення методом інтенсивного стирання є найбільш ефективними способами зниження вмісту антипоживних компонентів і підвищення харчової придатності нуту. Обґрунтовано технологічний процес очищення й підготовки насіння нуту до переробки, який включає очищення, замочування, двоетапне підсушування, пропарювання та луцення на луцильно-шліфувальній машині «Каскад» виробництва ТОВ «ОЛІС». Перевагами каскадного луцення є поетапне зняття оболонкових шарів із мінімізацією втрат внутрішніх шарів, зниження утворення дрібних фракцій на 15–20 %, підвищення виходу цілого ядра, а також поліпшення органолептичних властивостей і скорочення тривалості варіння готової продукції. Застосування запропонованих технологічних рішень забезпечує значне зниження вмісту клітковини, фенольних сполук і дубильних речовин, підвищення біодоступності поживних компонентів та формує передумови для розширення асортименту нутових продуктів в Україні. Отримані результати демонструють доцільність впровадження вдосконалених технологічних схем переробки нуту з метою підвищення ефективності виробництва та якості кінцевих продуктів, що створює перспективи розвитку круп'яної галузі в нашій країні.

Ключові слова: нут, бобові культури, антипоживні речовини, воднотеплова обробка, луцення, каскадне луцення, круп'яні продукти, технологія очищення і підготовки.

Нут вирощують понад 7 тисяч років, його історія сягає неолітичної доби на Близькому Сході, де ця культура була однією з перших бобових, що почали культивувати люди. Відтоді нут поширився в регіонах Середземномор'я, Індії та Північної Африки завдяки торгівлі та міграціям. Він став важливим джерелом білка для стародавніх цивілізацій, таких як шумери, єгиптяни і римляни. З часом нут набув широкого поширення у світі, особливо в країнах з посушливим кліматом, через свою посухостійкість і поживність. Зараз нут залишається однією з ключових бобових культур у світі, широко застосовується у харчуванні та промисловості. Сьогодні насіння нуту вирощується переважно у невеликих порівняно з традиційними злаковими і бобовими культурами кількостях і не зважаючи на достатньо широкий асортимент харчових продуктів, для більшості країн є нішовою культурою. Опосередковано об'єм вирощування насіння нуту в світі в змінюється у широких межах від 14 до 18 млн. тонн щорічно. Найбільша частка з усього вирощуваного насіння нуту в світі припадає на Індію, де вирощують понад 9 мільйонів тонн нуту на рік, що становить близько до 70 % світового виробництва. При цьому практично увесь вирощений нут (до 90 %) використовується для харчових потреб у вигляді вареного нуту для страв типу чат, нутового борошна (бесан), яке використовують у солодощах, закусках, соусах, локшині та безглютенових сумішах. Другою за об'ємами вирощування нуту в світі є Австралія, в якій щорічно вирощують до 1 млн. тонн даної бобової культури, при цьому більшість вирощеного насіння не використовується для внутрішніх потреб, а спрямовується на експорт. Для харчових

потреб в Австралії щорічно використовують до 50 тис тон нуту який споживається у вигляді консервованого нуту, борошна, вегетаріанських сумішей, хумусу, снєків тощо. Третьою за обсягами вирощування нуту у світі є Туреччина в якій за приблизними оцінками вирощується до 600 тис тонн даної культури. [1-3]

Не зважаючи на відносно невеликі об'єми вирощування нуту ця бобова культура переробляється в класичні для нашої країни круп'яні продукти – крупи, борошно, плющені продукти. Частка вироблених нutowих круп за орієнтовними оцінками складає 4-5 мільйонів тонн, нутове борошно яке має значний потенціал як самостійний продукт так і складового компоненту, наприклад для створення композиційних борошняних сумішей і їх подальшого використання у хлібопеченні складає 1,5-2,0 млн тонн на рік. Частка плющеного ядра орієнтовно складає від 500 до 700 тис. тонн на рік. Загалом в світі в класичні для нас крупи, плющені продукти і борошно переробляється орієнтовно до 8 млн. тонн даної культури що приблизно складає половину від усього вирощеного насіння.

В Україні як і у більшості країн нут не є основною бобовою культурою і вирощується більшою мірою як нішова культура, при цьому за останні роки максимальний об'єм вирощеного зерна не перевищував 50 тис тонн при цьому частка посівних площ не перевищує 40 тис. га. Основними регіонами вирощування нуту в нашій країні є Одеська, Миколаївська, Запорізька, Вінницька та Чернівецька області [4-6].

У Державному реєстрі сортів рослин, придатних для поширення на території України [7] станом на серпень 2025 року, налічується 22 сорти нуту звичайного. Першим із них у 2002 році був зареєстрований сорт Пам'ять, а у 2004 році – сорт Слобожанський. Варто зазначити, що ці два сорти були заявлені як зернофуражні й не призначалися для харчових потреб. Лише у 2005 році до реєстру внесено перший цінний зерновий сорт нуту – Триумф, а в 2008 році – сорт Буджак, що також належить до категорії цінних зернових. Подальший розвиток селекційної роботи підтверджує реєстрація у 2024 році двох нових сортів – Вента та Дарія, що свідчить про безперервність досліджень у цьому напрямі. Таким чином, якщо на початковому етапі реєстрації сорти нуту в Україні були орієнтовані переважно на використання як кормового насіння, то з часом культура набула значення й у виробництві продуктів харчування, що відображає еволюцію підходів до її вирощування та застосування.

В Україні виробництво харчових продуктів на основі нуту, зокрема круп, пластівців та борошна, перебуває на етапі становлення та представлено переважно у вузькоспеціалізованому сегменті ринку. Орієнтовні щорічні обсяги виготовлення нutowих круп становлять не більше ніж 400 тонн, продуктів типу пластівців та інших плющених виробів – до 100 тонн, а борошна з нуту – близько 1000 тонн. Такий рівень виробництва зумовлений низькою чинників, серед яких відсутність сформованого сегменту постійних споживачів нutowих продуктів, обмежений рівень поінформованості населення щодо харчової та біологічної цінності нуту, а також висока конкуренція з боку традиційних і більш звичних для вітчизняного ринку культур, таких як рис, овес, ячмінь, пшениця та горох. Додатково стримувальним фактором є відсутність чітко регламентованих технологічних нормативів переробки нуту, що ускладнює його інтеграцію у вітчизняну круп'яну промисловість [8,9].

В Україні наразі відсутній офіційно затверджений регламент щодо переробки зерна нуту в крупи та круп'яні продукти. Ця культура, цілеспрямована селекція якої на території нашої держави розпочалася у 1990-х роках, тривалий час не розглядалася як перспективна сировина для харчової промисловості, що зумовило повільний розвиток відповідних технологічних підходів і нормативної бази для її використання у виробництві продуктів харчування. Внаслідок цього технологічні процеси переробки насіння нуту реалізуються за аналогією до переробки гороху, що широко вирощується і переробляється в Україні, однак подібний підхід не враховує фізико-хімічні та біохімічні особливості нуту. Це призводить до недостатньої ефективності воднотеплової обробки, лущення та шліфування, що негативно позначається на якісних і безпечності кінцевих продуктів [10,11].

В Україні діє ДСТУ 6019:2008 «Нут. Технічні умови» [12] який встановлює чіткі граничні значення показників якості насіння нуту, дотримання яких є обов'язковим для допуску сировини до використання за призначенням. У межах ДСТУ 6019:2008 «Нут. Технічні умови» поділ зерна нуту на харчове та кормове ґрунтується на диференційованих вимогах до показників якості, що обумовлюють його кінцеве призначення. Харчове зерно має відповідати суворішим нормам, які забезпечують його придатність до споживання людиною та подальшої переробки у харчовій промисловості. Для цієї категорії нуту встановлено максимальну вологість на рівні 14 %, граничний вміст смітної домішки не більше 2 %, пошкоджених і битих зерен – не більше 3 %, а також повну відсутність ураження насіння шкідниками, пліснявою чи проростанням. Зерно повинно мати типовий для сорту колір і властивий культурі запах без сторонніх домішок, що забезпечує належні органолептичні характеристики. Крім того, харчове зерно повинно відповідати вимогам санітарного законодавства щодо вмісту токсичних елементів (свинцю, кадмію, миш'яку, ртуті), мікотоксинів (зокрема афлатоксину В1) та залишкових кількостей пестицидів, що не перевищують допустимі рівні для продуктів харчування.

Для кормового зерна нуту ДСТУ 6019:2008 «Нут. Технічні умови» встановлює більш лояльні показники якості, ніж для харчового, що пов'язано з його призначенням як складника кормових раціонів. Зокрема, гранична вологість такого зерна може становити до 15 %, що допускає дещо вищу залишкову вологість порівняно з харчовим нуту. Масова частка смітної домішки може сягати 3 %, тоді як кількість битих і по-

шкоджених зерен допускається на рівні до 5 %. Стандарт не нормує однорідність за кольором та розміром, що спрощує вимоги до партій, призначених для кормових цілей. Ураження шкідниками для кормового зерна допустиме в межах, що не призводять до істотної втрати кормової цінності або небезпеки для тварин. Органолептичні показники не підлягають суворому контролю: допускається менш однорідний запах та колір, за умови відсутності ознак псування, гнилі чи цвілі.

При цьому навіть для кормового нуту встановлені обмеження щодо вмісту токсичних елементів, мікотоксинів і залишкових кількостей пестицидів, що регламентуються санітарними нормами для кормових культур. Такі обмеження передбачені з метою запобігання негативному впливу на здоров'я тварин і безпечності продуктів тваринного походження.

Ключовими чинниками, що зумовлюють глобальну зацікавленість переробних підприємств у використанні різних різновидів нуту для виробництва харчових продуктів, є специфіка його хімічного складу, зокрема високий вміст білкових речовин. У розвинених країнах ці властивості активно використовують для розширення асортименту харчових продуктів, створюючи як традиційні вироби, так і продукти спеціального та функціонального призначення. Водночас для країн із нижчим рівнем економічного розвитку характерним залишається виробництво переважно традиційних продуктів на основі нуту [13-15].

Вчені з різних країн, звернули увагу на те, що насіння нуту містить певні компоненти, які суттєво знижують його харчову цінність. Ці речовини, відомі як антипоживні речовини, можуть негативно впливати на засвоюваність білків і інших поживних речовин, а також спричиняти небажані фізіологічні ефекти при споживанні. Враховуючи цей факт, виникає потреба у розробленні ефективних технологічних підходів, які б дозволили мінімізувати або усунути вплив цих шкідливих компонентів. Такий підхід сприятиме підвищенню харчової цінності нуту, розширенню сфери його застосування у харчовій промисловості, а також покращенню якості кінцевих продуктів, виготовлених на його основі [16-18].

До основних антипоживних речовин нуту відносять інгібітори протеаз, фітинові сполуки, лектини, сапоніни та таніни. Інгібітори протеаз, вміст яких у насінні сягає 1–3 %, блокують активність протеолітичних ферментів, передусім трипсину та хімотрипсину, що істотно знижує ефективність гідролізу білкових молекул і, відповідно, біодоступність амінокислот. Фітинова кислота, масова частка якої становить у середньому 0,8–1,5 %, характеризується високою здатністю утворювати нерозчинні комплекси з іонами дво- та тривалентних металів, зокрема кальцію, цинку, заліза й магнію, що призводить до зниження їх абсорбції в шлунково-кишковому тракті на 20–50 %. Крім того, фітати здатні взаємодіяти з білковими молекулами, ускладнюючи доступ протеолітичних ферментів до пептидних зв'язків, а також зменшують біодоступність фосфору, значна частка якого в насінні нуту представлена саме у формі фітинових сполук [19-21].

Термічна обробка є найрезультативнішим способом зниження активності інгібіторів протеаз, серед якого пропарювання демонструє найвищу ефективність завдяки поєднанню підвищеної температури (121°C) та тиску (0,1–0,2 МПа). П'ятнадцятихвилинна обробка дозволяє зменшити активність цих речовин на 85%, а тридцятихвилинна – до 95%. Окрім інактивації антинутрієнтів, пропарювання сприяє покращенню засвоюваності білків завдяки частковому розщепленню білкових комплексів і зростанню їхньої розчинності. Найпростішим способом зменшення вмісту фітатів є замочування, яке активує ендогенні фітази. Термічна обробка має обмежену ефективність, адже фітинова кислота стійка до нагрівання. Для інактивації лектинів термічне оброблення також є найбільш ефективним способом їх інактивації. Варіння при 100°C протягом пів години знижує їхню активність на 85–90%, а за годину – практично повністю (до 99%). Пропарювання за температури 121°C і тиску 0,1 МПа протягом 15–20 хвилин забезпечує повну денатурацію цих білків. Сапоніни, які здатні вимиватися водою, значно зменшуються під час замочування при 30–45°C протягом 12–24 годин, зниження становить 20–50% залежно від сорту нуту та початкового вмісту. Найбільш ефективною залишається термічна обробка, особливо варіння при 100°C, що зменшує рівень сапонінів на 50–80% упродовж 30–60 хвилин. Пропарювання при 121°C і тиску 0,1 МПа впродовж 15–20 хвилин забезпечує майже повну інактивацію сапонінів (до 95%). Таніни, завдяки своїй високій розчинності у воді, також ефективно видаляються під час замочування, особливо якщо вода має температуру 30–45°C. За 12–24 години їхній рівень може зменшитися на 30–50%, особливо за умови періодичного оновлення води. Високі температури сприяють денатурації танінів, тому варіння при 100°C протягом 30–60 хвилин значно знижує їхню концентрацію. Пропарювання за 121°C і тиску 0,1 МПа дозволяє зменшити рівень танінів на 80–95%. Враховуючи рівень антипоживних речовин у насінні нуту та їхній комплексний вплив на біодоступність білків, мінералів і мікронутрієнтів, технології переробки цієї бобової культури повинна включати операції, спрямовані на видалення або інактивацію зазначених речовин [16,22, 23].

В сучасних умовах розвитку харчової промисловості України при переробці нуту найбільш поширеним підходом є застосування адаптацій технологічних схем, які традиційно розроблені для переробки гороху. Такий методологічний вибір зумовлений близькістю ботанічних і технологічних характеристик цих бобових культур, а також відсутністю розроблених і нормативно затверджених технологічних регламентів, спеціально адаптованих для нуту. Проте варто підкреслити, що нут за складом має суттєві відмінності від гороху, зокрема у значно більшому вмісті антипоживних речовин. Вміст антипоживних речовин у нуті, таких як фенольні сполуки, сапоніни, фітинова кислота та інгібітори протеаз, істотно перевищує їхній рівень у горосі. Це обумовлює підвищені вимоги до режимів воднотеплової обробки, лущення, шліфування нуту. Застосу-

вання технологічних режимів, рекомендованих для гороху, не забезпечує належного руйнування або інактивації цих сполук у нуті, що призводить до збереження високого рівня антипоживних речовин у кінцевому продукті. Рекомендовані параметри пропарювання і лущення гороху є недостатніми для нуту, що загрожує неефективним видаленням оболонок, що в кінцевому результаті знижує вихід і якість круп'яних продуктів [24–26].

В ході проведення досліджень нами було розроблено технологічний процес очищення і підготовки насіння нуту до переробки який враховує усі особливості даної бобової культури. Насіння нуту із бункерів для неочищеного зерна надходить на попереднє очищення у скальператор, що забезпечує видалення найбільших за розміром грубих домішок, які значно перевищують за габаритами зерна культури. Вилучення цих домішок здійснюється за допомогою сит із крупними отворами розміром 20×20 мм та 10×10 мм. У випадку попередньої первинної очистки насіння нуту даний етап може бути пропущений. Після зважування на автоматичних вагах зерно спрямовується у ситоповітряний сепаратор, де відбувається вилучення основних зернових і сміттєвих домішок. Відходи III категорії вилучаються сходом сит із $\varnothing$ 10–12 мм, тоді як подрібнене ядро, дрібне та недорозвинене насіння, а також інші зернові та сміттєві домішки вилучаються проходом сита $\varnothing$ 4,2 мм. Основна фракція насіння нуту, яка утворюється сходом із сита $\varnothing$ 4,2 мм, надходить до пневматичного каналу сепаратора для очищення від аеродинамічних домішок. Наступним етапом є магнітний контроль за допомогою магнітного сепаратора. Воднотеплова обробка, що передує лущенню, складається з двох послідовних етапів для досягнення максимального ефекту. Спершу насіння замочують у воді, підігрітій до 40–60 °С, що сприяє частковій інактивації антипоживних речовин, зокрема фітинової кислоти – основної форми зберігання фосфору в зерні, яка здатна зв'язувати мікроелементи (залізо, кальцій, магній, цинк), утворюючи нерозчинні комплекси й знижуючи їх біодоступність. Під час замочування активізуються ендогенні фітази, ферменти, що гідролізують фітинову кислоту до менш фосфорильованих сполук або розщеплюють її повністю. Одночасно частково вимиваються лектини й сапоніни – інші антипоживні речовини, що погіршують харчову цінність нуту. Тривалість замочування становить 6–12 годин, під час яких вологість насіння підвищується до 35–40 %. Після замочування насіння проходить двоетапне підсушування на спеціалізованому обладнанні до вологості 15–16 %, після чого здійснюється охолодження у колонках або бункерах до температури навколишнього середовища. Другий етап воднотеплової обробки – пропарювання під надлишковим тиском 0,15–0,20 МПа протягом 10–15 хвилин. Такий режим забезпечує майже повну інактивацію лектинів і сапонінів, які можуть чинити шкідливу дію на організм при споживанні.

Після пропарювання насіння знову піддається сушінню у вертикальних парових сушарках до вологості, що не перевищує 14 %, та направляється на попереднє лущення.

Лущення нуту є однією з ключових операцій технологічного процесу його переробки, оскільки саме на цьому етапі формуються основні фізико-хімічні, органолептичні та технологічні характеристики готового продукту. Морфологічно насіння нуту характеризується наявністю щільних зовнішніх оболонок, що частка яких може становити 14–16 % маси насіння. Ці структурні елементи містять підвищені концентрації клітковини, фенольних сполук, дубильних речовин та залишків антипоживних речовин, серед яких інгібітори протеаз і фітинова кислота займають провідне місце. Зазначені речовини, локалізовані переважно в оболонкових шарах, істотно знижують біодоступність білкових і мінеральних компонентів сім'ядолей, негативно впливають на засвоюваність нуту в раціоні людини та формують небажані присмаки й відтінки, що погіршують органолептичні властивості кінцевого продукту.

Видалення оболонок у процесі лущення є важливим технологічним прийомом, що забезпечує зниження вмісту клітковини та антипоживних речовин, внаслідок чого підвищується харчова цінність та харчова придатність нуту. Лущення сприяє скороченню тривалості варіння готової продукції, оскільки видалення щільних оболонкових шарів ліквідує структурні бар'єри, що перешкоджають ефективному проникненню вологи під час варіння. Це безпосередньо зумовлює скорочення тривалості варіння на 25–40 % порівняно з нелущеним насінням, що є важливим фактором підвищення технологічної ефективності його кулінарної обробки та покращення споживчих властивостей готових продуктів.

Лущення нуту методом інтенсивного стирання оболонок має низку істотних переваг, що зумовлюють його широке використання у сучасних технологічних схемах переробки зернобобових культур. Даний метод ґрунтується на застосуванні робочих органів із підвищеною абразивною здатністю, які забезпечують багато-направлений механічний вплив на поверхню насіння, поєднуючи інтенсивне тертя з контрольованим ударним навантаженням. Такий характер обробки сприяє максимально ефективному видаленню оболонкових шарів навіть у разі переробки нуту з підвищеною щільністю оболонок та вираженою нерівномірністю мікрорельєфу поверхні, що є характерними морфологічними особливостями цієї культури.

Лущення методом інтенсивного стирання, в процесі якого видаляється 1,5–2,0 % поверхневих шарів дозволяє знизити рівень сапонінів і танінів у насінні на 60–70 %.

Застосування лущильно-шліфувальної машини «Каскад» виробництва ТОВ «ОЛІС», м. Одеса для лущення нуту має низку суттєвих технологічних переваг, що зумовлені особливостями її конструкції та принципом каскадної обробки зерна. Ця машина реалізує поетапне інтенсивне стирання оболонкових шарів шляхом проходження насіння крізь кілька послідовних зон абразивного впливу з поступовим регулюванням сили тиску та швидкості робочих органів. Такий каскадний принцип дозволяє досягати високого ступеня

видалення оболонок навіть у випадку морфологічно щільного і неоднорідного нуту, при цьому мінімізуючи механічні пошкодження сім'ядолей. Важливо, що саме поетапне зняття оболонкових шарів зменшує локальні напруження у структурі зернини, що характерні для ударно-відбійних методів, і таким чином запобігає утворенню тріщин та розщепленню ядра.

Однією з ключових переваг застосування «Каскаду» є значне підвищення виходу цілого ядра при лушненні. Оптимізована геометрія робочих органів та можливість тонкого регулювання технологічних параметрів (швидкості обертання, зазору, часу перебування у робочій зоні) забезпечують баланс між інтенсивністю лушення і збереженням маси сім'ядолей, що є критично важливим для ефективності технологічного процесу. Каскадний режим обробки може зменшити утворення дрібних фракцій на 15–20 % порівняно з одноетапними машинами ударного типу, що безпосередньо впливає на підвищення рентабельності процесу.

Застосування лушильно-шліфувальної машини «Каскад» виробництва ТОВ «ОЛІС», м. Одеса «Каскад» забезпечує глибоке очищення ядра від оболонкових шарів, що значно знижує вміст нерозчинної клітковини, фенольних сполук і дубильних речовин, локалізованих в оболонках. Це призводить до підвищення біодоступності білків і мінеральних речовин сім'ядолей та покращення смакових характеристик продукту. Додатковим ефектом є формування більш рівної та гладкої поверхні ядра, що зменшує тривалість термічної обробки за рахунок полегшеного проникнення вологи й рівномірного набухання під час варіння готової продукції.

Каскадне лушення має важливу перевагу: воно знижує поверхневу контамінацію зерна мікроорганізмами та пиловими частинками. Система аспірації, інтегрована в конструкцію машини, ефективно видаляє легкі частинки оболонок та пил, що зменшує ризик вторинного забруднення і створює сприятливі умови для подальшої переробки.

Суміш продуктів лушення сортують за допомогою двох послідовних систем повітряних сепараторів. Підготовлене таким чином насіння спрямовується на подальші етапи переробки для виробництва традиційного для України асортименту круп'яних продуктів.

Висновки. В результаті проведеної роботи було розроблено та науково обґрунтовано технологічний процес очищення і підготовки насіння нуту до переробки, який враховує морфологічні та біохімічні особливості цієї бобової культури. Запропонована технологія включає удосконалені етапи попереднього очищення, багатоступеневу воднотеплову обробку, що забезпечує інактивацію основних антипоживних компонентів (фітинової кислоти, лектинів, сапонінів), а також лушення методом інтенсивного стирання оболонок із поетапним регулюванням навантаження. Використання каскадного принципу обробки на лушильно-шліфувальній машині «Каскад» виробництва ТОВ «ОЛІС» забезпечує ефективне видалення оболонкових шарів за мінімальних втрат внутрішніх шарів, що сприяє підвищенню виходу цілої ядра та зниженню утворення дрібних фракцій. Застосування розробленої технології дозволяє суттєво зменшити вміст клітковини, фенольних сполук і дубильних речовин, підвищити біодоступність білків і мінеральних компонентів, покращити органолептичні характеристики та скоротити тривалість кулінарної обробки. Отримані результати підтверджують доцільність використання вдосконалених технологічних рішень для підготовки нуту різних видів *kabuli* та *desi* до переробки, що створює передумови для розширення його застосування у виробництві високоякісних круп'яних продуктів в Україні.

References

1. Samriti, S., Sharma, R., Sharma, A., & Pathania, A. (2020). Trends in area, production, productivity and trade of chick pea in India. *Economic Affairs*, 65(2), 261–265. DOI: 10.46852/0424-2513.2.2020.19.
2. Jha, D. K., et al. (2024). Unlocking the nutritional potential of chickpea: strategies. *Frontiers in Plant Science*. DOI: 10.3389/fpls.2024.1391496
3. Abbo, S., Kerem, Z., et al. (2007). Chickpea domestication in the Neolithic Levant through the nutritional perspective. *Journal of Archaeological Science*, 34(8), 1289–1293. DOI: 10.1016/j.jas.2006.10.015
4. Kovalenko, I. P., & Hryn, O. V. (2021). Osoblyvosti tekhnolohii vyrobnytstva krup'ianykh produktiv iz nutu. *Tekhnolohii kharchovykh produktiv*, (6(72)), 55–62. DOI: 10.24263/2310-6172-2021-6-07
5. Melnyk, O. P., & Rudenko, S. V. (2019). Analiz vyrobnytstva i pererobky nutu v Ukraini. *Visnyk ahrarynoi nauky*, (12(102)), 87–93. DOI:10.31073/agrovisnyk201912-10
6. Savchuk, T. V., & Petrenko, M. I. (2020). Perspektyvy rozshyrennia posivnykh ploshch nutu v Ukraini ta problemy yoho vyrobnytstva Ahroekolohiia, (5(34)), 44–50. DOI:10.30930/2412-0391.2020.05.06
7. Derzhavnyi reiestr sortiv roslyn, prydatnykh dlia poshyrennia v Ukraini na 2025 r. [Electronic resource]. Retrieved from [https://minagro.gov.ua/file-storage/reiestr-sortiv-roslyn]
8. Bondarenko, S. V., & Ivanenko, T. O. (2021). Osoblyvosti spozhyvchoho rynku nutovykh produktiv v Ukraini. *Ekonomika i upravlinnia v ahropromyslovomu kompleksi*, (45), 89–95. DOI:10.31073/agroec2021.45.11
9. Pavlenko, L. P., & Shevchenko, N. V. (2020). Tekhnolohichni aspekty pererobky nutu dlia kharchovoi promyslovosti Ukrainy. *Tekhnolohii kharchovykh produktiv*, (4(64)), 50–58. DOI:10.24263/2310-6172-2020-4-06

10. Honcharenko, L. I., & Ivanova, N. S. (2019). Porivnialnyi analiz tekhnolohii obrobky nutu ta horokhu v Ukraini: problemy ta perspektyvy rozvytku. Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu kharhovo tekhnolohiy, (41), 112–118.
11. Savchuk, O. P., & Romanenko, Yu. V. (2020). Osoblyvosti tekhnolohii pererobky nutu v umovakh vidsutnosti normatyvnoi bazy. Visnyk kharchovoi promyslovosti Ukrainy, (3), 29–36.
12. DSTU 6019:2008 "Nut. Tekhnichni umovy"
13. Venkatramanan, V., & Kumar, S. (2021). Nutritional and functional properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein isolates: A review. Food Chemistry, 344, 128664.
14. Singh, A., Singh, B., & Singh, R. (2020). Chickpea as a functional food: Nutritional properties and health benefits. Trends in Food Science & Technology, 96, 153–166.
15. Duranti, M. (2006). Grain legume proteins and nutraceutical properties. Fitoterapia, 77(2), 67–82.
16. Khattab, R. Y., & Arntfield, S. D. (2009). Nutritional quality of legume seeds as affected by some physical treatments. LWT - Food Science and Technology, 42(6), 1113–1118. DOI: 10.1016/j.lwt.2010.09.005
17. Mudryj, A. N., Yu, N., & Aukema, H. M. (2014). Nutritional and health benefits of pulses. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 39(11), 1197–1204.
18. Alonso, R., Orta, E., Marzo, F., & Marzo, G. A. (2000). Effect of germination and fermentation on nutritional quality of lupin seed. Food Chemistry, 70(1), 27–33.
19. Reddy, N. R., Sathe, S. K., & Salunkhe, D. K. (1982). Phytates in legumes and cereals. Advances in Food Research, 28, 1–92. DOI: 10.1016/S0065-2628%2808%2960158-0
20. Khan, N., & Rizvi, S. M. (2010). Impact of antinutritional factors on protein digestibility and mineral availability in food legumes: A review. Journal of Food Science and Technology, 47(2), 125–135. DOI: 10.1007/s13197-010-0052-0
21. Lestienne, I., Icard-Vernière, C., Mouquet, C., Picq, C., & Trèche, S. (2005). Effects of soaking whole cereal and legume seeds on iron, zinc and phytate contents. Food Chemistry, 89(3), 421–425. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.03.020
22. Alajaji, S. A., & El-Adawy, T. A. (2006). Nutritional composition of chickpea (*Cicer arietinum* L.) as affected by microwave cooking and other traditional cooking methods. Food Chemistry, 96(4), 614–620. DOI: 10.1016/j.foodchem.2005.03.033
23. Puranik, S., & Rani, A. (2018). Effect of soaking and thermal processing on antinutritional factors and in vitro protein digestibility of chickpea (*Cicer arietinum* L.) seeds. International Journal of Food Science & Technology, 53(5), 1152–1161. DOI: 10.1111/ijfs.13774
24. Dmytrenko, S. I. (2019). Problemy standartyzatsii tekhnolohichnykh rezhymiv pererobky nutu v Ukraini. Naukovyi visnyk aharnoi nauky, 6(54), 112–119.
25. Lytvynenko, T. V. (2022). Osoblyvosti lushchennia ta ochyshchennia nutu dlia pidvyshchennia yakosti krup'ianykh produktiv. Kharchova promyslovist Ukrainy, 18(3), 31–37. DOI: 10.15407/hpu2022.18.3.031
26. Dmytrenko, O. P., & Bondar, M. I. (2024). Vplyv rezhymiv vodnoteplovoi obrobky na yakist nutovykh krup. Naukovi pratsi NUKHT, 37(2), 78–85. DOI: 10.15407/nuphtech.2024.37.2.078

PREPARATION OF CHICKPEA SEEDS FOR PROCESSING INTO GROATS PRODUCTS

**Sots S., PhD of Technical Science, Associate Professor, Kustov I., PhD of Technical Science, Associate Professor, Butsenko I., post graduate student
Odesa National University of Technology**

Abstract. *The article examines the current state of chickpea cultivation, its nutritional and technological value, and substantiates approaches to its processing, taking into account the morphological and biochemical characteristics of this leguminous crop. The main production volumes of chickpea are concentrated in India, where up to 70% of the world's harvest is grown, as well as in Australia and Turkey. Global seed production ranges between 14 and 18 million tons per year, of which about half is processed into groats, flour, and flakes. In Ukraine, chickpea remains a niche crop with an annual production volume of no more than 50 thousand tons and sowing areas up to 40 thousand hectares, mainly in the southern and partly central regions. Emphasis is placed on breeding achievements, which have resulted in the registration of 22 chickpea varieties, including both forage and high-quality grain types intended for the food industry. The production of food products based on chickpea in Ukraine is at an early stage of development and is limited to small volumes of groats, flour, and flakes, due to the absence of a well-established consumer segment, low public awareness of chickpea's value, strong competition from traditional crops, and lack of regulatory and technical standards for its processing. An analysis of the regulatory framework shows that the only document governing chickpea quality indicators is DSTU 6019:2008, which sets clear requirements for food and feed grain, including moisture content, impurity levels, damage rates, as well as the content of toxic elements, mycotoxins, and pesticides. Special attention is given to antinutritional factors such as*

protease inhibitors, phytic acid, lectins, saponins, and tannins, which significantly reduce the bioavailability of proteins and minerals. Technological approaches to their inactivation through soaking, steaming, boiling, and dehulling are substantiated. It has been established that steaming under a pressure of 0.15–0.20 MPa followed by intensive abrasion dehulling is the most effective method to reduce antinutritional components and enhance the nutritional suitability of chickpeas. The technological process of cleaning and preparing chickpea seeds for processing is justified, including cleaning, soaking, two-stage drying, steaming, and dehulling using the "Cascade" dehulling-polishing machine manufactured by OLIS LLC. The advantages of cascade dehulling include staged removal of hull layers with minimal endosperm loss, a 15–20% reduction in fine fractions, increased whole kernel yield, improved organoleptic properties, and shorter cooking times of the finished products. The application of the proposed technological solutions ensures a significant reduction in fiber, phenolic compounds, and tannins, increases the bioavailability of nutrients, and creates prerequisites for expanding the range of chickpea products in Ukraine. The obtained results demonstrate the feasibility of implementing improved chickpea processing schemes to enhance production efficiency and the quality of final products, thereby creating prospects for the development of the groat industry in our country.

Keywords: chickpea, leguminous crops, antinutritional factors, water-heat treatment, dehulling, cascade dehulling, groat products, cleaning and preparation technology.

Список використаної літератури

1. Samriti, S., Sharma, R., Sharma, A., & Pathania, A. (2020). Trends in area, production, productivity and trade of chick pea in India. *Economic Affairs*, 65(2), 261–265. DOI: 10.46852/0424-2513.2.2020.19.
2. Jha, D. K. etc. (2024). Unlocking the nutritional potential of chickpea: strategies. *Frontiers in Plant Science*. DOI: 10.3389/fpls.2024.1391496.
3. Abbo, S., Kerem, Z., et al. (2007). Chickpea domestication in the Neolithic Levant through the nutritional perspective. *Journal of Archaeological Science*, 34(8), 1289–1293. DOI: 10.1016/j.jas.2006.10.015.
4. Коваленко І. П., Гринь О. В. Особливості технології виробництва круп'яних продуктів із нуту // Технології харчових продуктів. — 2021. — № 6(72). — С. 55–62. DOI: 10.24263/2310-6172-2021-6-07
5. Мельник О. П., Руденко С. В. Аналіз виробництва і переробки нуту в Україні // Вісник аграрної науки. — 2019. — № 12(102). — С. 87–93. — Режим доступу: DOI:10.31073/agrovisnyk201912-10
6. Савчук Т. В., Петренко М. І. Перспективи розширення посівних площ нуту в Україні та проблеми його виробництва // Агроекологія. — 2020. — № 5(34). — С. 44–50. DOI:10.30930/2412-0391.2020.05.06
7. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2025 р. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://minagro.gov.ua/file-storage/reystir-sortiv-roslin>
8. Бондаренко С. В., Іваненко Т. О. Особливості споживчого ринку нутових продуктів в Україні // Економіка і управління в агропромисловому комплексі. — 2021. — Вип. 45. — С. 89–95. DOI:10.31073/agroec2021.45.11
9. Павленко Л. П., Шевченко Н. В. Технологічні аспекти переробки нуту для харчової промисловості України // Технології харчових продуктів. — 2020. — № 4(64). — С. 50–58. DOI:10.24263/2310-6172-2020-4-06
10. Гончаренко Л. І., Іванова Н. С. Порівняльний аналіз технологій обробки нуту та гороху в Україні: проблеми та перспективи розвитку // Науковий вісник Національного університету харчових технологій. — 2019. — Вип. 41. — С. 112–118.
11. Савчук О. П., Романенко Ю. В. Особливості технології переробки нуту в умовах відсутності нормативної бази // Вісник харчової промисловості України. — 2020. — № 3. — С. 29–36.
12. ДСТУ 6019:2008 «Нут. Технічні умови»
13. Venkatramanan, V., & Kumar, S. (2021). Nutritional and functional properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein isolates: A review. *Food Chemistry*, 344, 128664.
14. Singh, A., Singh, B., & Singh, R. (2020). Chickpea as a functional food: Nutritional properties and health benefits. *Trends in Food Science & Technology*, 96, 153–166.
15. Duranti, M. (2006). Grain legume proteins and nutraceutical properties. *Fitoterapia*, 77(2), 67–82.
16. Khattab, R. Y., & Arntfield, S. D. (2009). Nutritional quality of legume seeds as affected by some physical treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 42(6), 1113–1118. DOI: 10.1016/j.lwt.2010.09.005
17. Mudryj, A. N., Yu, N., & Aukema, H. M. (2014). Nutritional and health benefits of pulses. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 39(11), 1197–1204.
18. Alonso, R., Orta, E., Marzo, F., & Marzo, G. A. (2000). Effect of germination and fermentation on nutritional quality of lupin seed. *Food Chemistry*, 70(1), 27–33.
19. Reddy, N. R., Sathe, S. K., & Salunkhe, D. K. (1982). Phytates in legumes and cereals. *Advances in Food Research*, 28, 1–92. DOI: 10.1016/S0065-2628%2808%2960158-0
20. Khan, N., & Rizvi, S. M. (2010). Impact of antinutritional factors on protein digestibility and mineral availability in food legumes: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 47(2), 125–135. DOI: 10.1007/s13197-010-0052-0

21. Lestienne, I., Icard-Vernière, C., Mouquet, C., Picq, C., & Trèche, S. (2005). Effects of soaking whole cereal and legume seeds on iron, zinc and phytate contents. *Food Chemistry*, 89(3), 421-425. DOI: 0.1016/j.foodchem.2004.03.020
22. Alajaji, S. A., & El-Adawy, T. A. (2006). Nutritional composition of chickpea (*Cicer arietinum* L.) as affected by microwave cooking and other traditional cooking methods. *Food Chemistry*, 96(4), 614-620. DOI: 10.1016/j.foodchem.2005.03.033
23. Puranik, S., & Rani, A. (2018). Effect of soaking and thermal processing on antinutritional factors and in vitro protein digestibility of chickpea (*Cicer arietinum* L.) seeds. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(5), 1152-1161. DOI: 10.1111/ijfs.13774
24. Дмитренко, С. І. (2019). Проблеми стандартизації технологічних режимів переробки нуту в Україні. *Науковий вісник аграрної науки*, 6(54), 112-119.
25. Литвиненко, Т. В. (2022). Особливості лущення та очищення нуту для підвищення якості круп'яних продуктів. *Харчова промисловість України*, 18(3), 31-37. DOI: 10.15407/hpu2022.18.3.031
26. Дмитренко, О. П., & Бондар, М. І. (2024). Вплив режимів воднотеплової обробки на якість нутових круп. *Наукові праці НУХТ*, 37(2), 78-85. DOI: 10.15407/nuphtech.2024.37.2.078

Отримано в редакцію 20.06.2025

Received 20.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Approved 02.09.2025

АНАЛІЗ СХЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ГРАНОЛИ

Ковальов М.О., к.т.н., ст.викл., Мельник І.В., к.т.н., доцент, Ковальова В.П., к.т.н., ст.викл
Одеський національний технологічний університет

Анотація. Дефіцит мікронутрієнтів з кожним роком збільшується, що пов'язано з шаленим темпом життя сучасної людини, відсутністю часу на приготування їжі. Сучасна структура харчування дозволяє розділити продукти на три групи: продукти масового споживання; функціональні продукти; продукти лікувального призначення. Таке розділення дозволяє споживачам все частіше обирати функціональні продукти, надаючи перевагу сухим сніданкам. Найбільш популярним сухим сніданком є гранола. Основним компонентом для її виробництва є вівсяні пластівці, які зміцнюють імунітет та забезпечують організм енергією.

Одним з мінусів такого продукту, як гранола є відсутність нормативної документації на виробництво і оцінку її якості, тобто немає єдиної технології виробництва, яка б регулювалась державою.

Тому метою роботи є аналіз загальної схеми виробництва граноли та дослідження її складу в зразках, представлених на ринку.

Встановлено, що основними технологічними операціями для виробництва граноли є: приготування суміші з сухих компонентів; приготування суміші з рідких компонентів; нагрівання рідкої суміші до розчинення; змішування рідких і сухих компонентів; сушіння; охолодження; фасування; зберігання.

Аналіз енергетичної цінності показав достатньо високу калорійність граноли з помірним вмістом білків, жирів і вуглеводів. Однак є зразки з високим вмістом жирів 23,3 г, 19,9 г, 17,8 г в Зразках 2, 4 та 8 відповідно. Зразок 2 має найнижчий вміст вуглеводів (37,8 г), що свідчить про низький вміст зернових компонентів.

Дослідження енергетичної цінності та за наявності харчових добавок показало, що в усіх зразках висока поживна цінність. В зразках 2, 7 і 9 невисокий вміст зернового компоненту – від 64,0 % до 78 %, в той час, як найбільший вміст дорівнює 98,8 %.

Встановлено, що при виборі граноли для споживання слід ретельно досліджувати склад продукту, адже на ринку представлений широкий асортимент даного продукту, однак не всі виробники використовують якісні продукти.

Ключові слова: сухі сніданки, гранола, технологічний процес, зернові пластівці, енергетична цінність

Постановка проблеми. З кожним роком асортимент зернових продуктів збільшується, що пов'язано з шаленим темпом життя сучасної людини, відсутністю часу на приготування їжі та свідомим ставленням до свого здоров'я. Сучасна структура харчування дозволяє розділити продукти на три групи:

- продукти масового споживання (харчові продукти, що призначені для харчування основних груп населення, які виробляються за традиційною технологією);
- функціональні продукти (харчові продукти, які призначені для основних груп населення з підвищеною користю);
- продукти лікувального призначення (харчові продукти спеціального призначення, які можуть бути використані як лікарські компоненти за рахунок зміни хімічного складу та фізичних властивостей) [1].

Дослідження технології виробництва граноли є актуальним з наступних причин:

1. Здоровий спосіб життя: Зростаючий інтерес до здорового харчування та активного способу життя стимулює попит на продукти, які є корисними та поживними. Гранола, як джерело клітковини, вітамінів та мінералів, відповідає цим вимогам.

2. Інновації у харчовій промисловості: Розробка нових рецептур та технологій виробництва граноли дозволяє створювати продукти з покращеними органолептичними властивостями та підвищеною харчовою цінністю. Наприклад, додавання йодовмісних компонентів може допомогти у боротьбі з дефіцитом йоду [2].

3. Економічний аспект: Виробництво граноли може стати вигідним бізнесом завдяки зростаючому попиту на здорові продукти. Це сприяє розвитку малого та середнього бізнесу у харчовій промисловості.

4. Екологічна стійкість: Використання натуральних інгредієнтів та екологічно чистих технологій виробництва граноли сприяє збереженню навколишнього середовища та зменшенню негативного впливу на природу.

5. Наукові дослідження: Вивчення технології виробництва граноли дозволяє розширити наукові знання у галузі харчових технологій та сприяє розвитку нових методів обробки та зберігання продуктів [1].

Сніданок є найважливішою складовою та основою харчування, який сильно відрізняється в різних культурах світу. Було встановлено, що всі люди повинні прагнути споживати близько 15-25% добової норми енергії під час сніданку (тобто 300-500 калорій для жінок і 375-625 для чоловіків). Зернові культури схвалені як основне джерело вуглеводів для сніданку [3] і дозволяють споживачам урізноманітнити свій перший

прийом їжі декількома різними продуктами на основі зернових. Зернові сніданки також можна споживати як готові до вживання продукти, які є поширеними завдяки своїй зручності, також їх охоче споживають майже всі вікові групи.

Зернові сніданки є продуктами, які або подаються гарячими, тобто мають бути приготовлені перед подачею, або це готові до вживання страви, які рідко готуються, перед подачею [4]. Зернові сніданки також є сухими злаками, які споживаються в їжу, і є, безумовно, найважливішими рослинами, що людина споживає під час сніданку [5]. Зернові сніданки міцно закріпилися на столах людей практично в усьому світі. Крім широкого розмаїття форм, кольорів і смаку, пластівці для сніданку також повинні відповідати суворим вимогам харчової якості. Вони мають ряд переваг:

- зміцнюють імунну систему людини;
- контролюють рівень холестерину;
- стабілізують рівень цукру в крові;
- покращують травлення;
- забезпечують енергією;
- позитивно впливають на роботу нервової системи;
- служить для профілактики захворювань щитоподібної залози;
- зміцнює кістки і м'язові тканини [6, 7].

У зв'язку з розмаїттям продуктів, представлених на ринку, виникає необхідність в аналізі складу та технології сухих сніданків на прикладі граноли.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка нових харчових продуктів для різних груп населення – актуальне завдання в рішенні проблеми здорового харчування. Важливу роль в сучасних дослідженнях відіграє розробка продуктів профілактичного призначення, які здатні покращувати функціонування, як певних органів і систем людини, так і всього організму загалом. Дефіцит мікронутрієнтів викликає серйозні порушення обміну речовин і важкі хронічні захворювання. Одним з таких продуктів є гранола, яка має різноманітний склад. Основними інгредієнтами є зернові (найчастіше вівсяні пластівці), горіхи, насіння та сухофрукти [8].

Так як, за останні роки гранола стала популярним продуктом, то розглянемо інгредієнти, які зазвичай містяться в її складі:

- вівсяні пластівці: формують основу граноли. Овес багатий клітковиною, корисний антиоксидантами, вітамінами та мінералами;
- горіхи: мигдаль, волоські горіхи, кеш'ю та багато інших. Вони додають здорові жири, білок і більше поживних речовин [9];
- насіння: насіння соняшнику, гарбуза або чіа є поширеним інгредієнтом. Вони дають більше клітковини і корисних жирів;
- сухофрукти: солодкість надають родзинки, журавлина, курага. Крім того, вони багаті вкрай необхідними поживними речовинами;
- підсолоджувачі: мед, кленовий сироп і нектар агаві зв'язують суміш і додають звичного солодкого смаку [10].

Формулювання цілей статті. При аналізі попередніх досліджень встановлено, що відсутня інформація щодо дослідження складу граноли, представленої на українському ринку, технології виробництва та можливості її споживання в якості першого прийому їжі.

Метою роботи є дослідження складу граноли, представленої на ринку та аналіз технологічної схеми її виробництва.

Основними завданнями дослідження є:

- аналіз схеми технологічного процесу виробництва граноли та можливість її реалізації на круп'яних заводах;
- оцінка енергетичної цінності та хімічного складу зразків граноли, представлених на ринку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Існують певні вимоги до компонентів сухих сніданків, їх пакування і зберігання, які прописані в державному стандарті ДСТУ 4634:2006 «Концентрати харчові. Сніданки сухі. Пластівці круп'яні. Загальні технічні умови» [11]. Проте нормативної документації саме на технологію виробництва граноли та вимог до технологічної лінії відсутні. Керуючись науковими та практичними доробками можна проаналізувати технологію виробництва граноли.

Технологічна схема виробництва граноли включає наступні операції:

- приготування суміші з сухих компонентів;
- приготування суміші з рідких компонентів;
- нагрівання рідкої суміші до розчинення (оптимальна температура – 38-40 °C);
- змішування рідких і сухих компонентів (тривалість змішування протягом 120 с для досягання однорідності);
- сушіння (режими: температура – 45-50 °C, тривалість: 7-8 годин). Вологість висушеного продукту – 6 % (згідно ДСТУ 2903:2005 «Концентрати харчові. Сніданки сухі»);
- охолодження (в сухих приміщеннях до температури – 20 °C);

– фасування (у різні типи упаковок відповідно до ДСТУ 4518-2008 «Продукти харчові. Маркування для споживачів. Загальні правила»;

– зберігання (температура не вище 25 °С при відносній вологості повітря не більше 75 %) [12].

Аналіз запропонованої технології показав, що існує ряд плюсів і мінусів. Почнемо з негативних моментів:

1. Невисока рентабельність виробництва;
2. Велика кількість ручних процесів, що призводить до впливу людського фактору на кінцевий результат;
3. Відсутність нормативної документації для побудови технологічного процесу та оцінки вхідної сировини і готової продукції.

Незважаючи на ряд мінусів є велика кількість переваг, які обґрунтовують доцільність виробництва граноли, а саме:

1. Невеликі затрати на встановлення лінії;
2. Можливість встановлення лінії на діючих круп'яних заводах з виробництва пластівців;
3. Розробка рецептури таким чином, щоб задовільнити потреби клієнтів і перекрити їх дефіцити вітамінів та мікроелементів;
4. Великий асортимент продукції на будь-який смак.

Результати досліджень. Було досліджено енергетичну цінність та хімічний склад, що представлена в мережах супермаркетів, доступних в багатьох містах України. Для дослідження було обрано 9 зразків граноли зі схожими смаками: зразок 1, зразок 2, зразок 3 – зразки торгівельної марки «АХА» зі смаками «Шоколад та мигдаль», «Мед та кокос» та «Полуниця», відповідно. Зразок 4, зразок 5, зразок 6 – зразки ТМ «Вее Granola» з наступними смаками: «Шоколад та кокос»; «Фісташка та м'ята»; «Молоко та вишня», відповідно. Зразок 7, зразок 8, зразок 9 торгівельної марки «Doctor Benner» зі смаками «Шоколад та горіхи», «Медова з горіхами», «Полуниця з вершками», відповідно.

Проведено аналітичну оцінку поживної цінності, вмісту основних нутрієнтів (білків, жирів, вуглеводів) та доданих інгредієнтів, таких як горіхи, сушені або сублімовані фрукти, доданий цукор та наявність емульгаторів та згущувачів. Результати представлені в таблиці 1.

Аналіз енергетичної цінності показав достатньо високу калорійність граноли з помірним вмістом білків, жирів і вуглеводів. Однак є зразки з високим вмістом жирів 23,3 г, 19,9 г, 17,8 г в Зразках 2, 4 та 8 відповідно. Зразок 2 має найнижчий вміст вуглеводів (37,8 г), що свідчить про низький вміст зернових компонентів.

Таблиця 1

Оцінка енергетичної цінності та хімічного складу деяких зразків граноли

Зразок	К, ккал	Б, г	Ж, г	В, г	ЗК, %	Наявність інших інгредієнтів			
						Горіхи	Фрукти	Цукор	Згущувачі/емульгатори
Шоколад та мигдаль (Зразок 1)	411,9	9,2	13,5	63,3	96,0	–	+	+	+
Мед та кокос (Зразок 2)	409,5	12,1	23,3	37,8	64,0	+	–	+	+
Полуниця (Зразок 3)	408,7	9,2	12,3	65,3	99,3	–	+	+	+
Шоколад та кокос (Зразок 4)	429,7	7,6	19,9	56,1	94,2	+	–	–	–
Фісташка та м'ята (Зразок 5)	380,1	10,5	13,4	58,7	98,8	+	–	–	–
Молоко та вишня (Зразок 6)	379,2	8,6	14,5	54,5	98,7	+	+	–	–
Шоколад та горіхи (Зразок 7)	439	8,7	14,2	65,2	78,0	+	+	+	+
Медова з горіхами (Зразок 8)	424	8,2	17,8	58,2	90,0	+	–	+	+
Полуниця з вершками (Зразок 9)	426	7,8	10,7	70,6	72,3	–	+	+	+

* К-калорійність, ккал; Б – білки, г/100гр продукту; Ж – жири, г/100гр продукту; В – вуглеводи, г/100гр продукту; ЗК – зерновий компонент.

За вмістом зернових компонентів, а саме пластівців, переважно вівсяних встановлено, що невисокий вміст мають Зразки 2, 7 і 9 (64,0 %, 78 % і 72,3 % відповідно). В інших зразках зернові компоненти складають більше 90 %, що свідчить про їх висок поживну цінність та користь організму. Однак є ще додані інгредієнти, які можуть або покращувати, або погіршувати якість та поживність граноли.

Вміст горіхів і фруктів різни у зв'язку з рецептурою та смаковими якість, а от наявність доданого цукру знижує поживну цінність продукту. Цукор відсутній тільки в Зразках 4, 5, 6, саме в цих Зразках відсутні згущувачі та емульгатори.

При виборі граноли для споживання на сніданок слід ретельно досліджувати склад продукту, адже на ринку представлений широкий асортимент даного продукту, однак не всі виробники використовують якісні продукти, здешевлюють продукт за рахунок додавання смакових добавок, збільшують терміни придатності за рахунок додавання цукру та емульгаторів.

Висновки відповідно до статті. Проаналізувавши асортимент зернових сніданків, представлених на ринку було встановлено:

1. Гранола є найбільш поширеним продуктом серед сухих сніданків;
2. Технологія виробництва граноли не потребує великих економічних затрат на будівництво цеху, включає в себе лінійні технологічні операції та доступна для реалізації на існуючих зернопереробних підприємствах (круп'яних заводах);
3. Широкий асортимент на ринку дозволяє споживачу вибирати той продукт, який буде відповідати його смаковим якостям та не зашкодить здоров'ю;
4. В досліджуваних зразках були зразки з високим вмістом зернового компоненту, однак в деяких зразках його вміст невисокий – 64,0%, 78 % та 72,3 % (Зразки 2, 7 та 9), що свідчить про низьку енергетичну цінність продукту;
5. При аналізі доданих компонентів, а саме цукру кристалічного та згущувачів і емульгаторів, встановлено, що тільки в трьох зразках (зразки 4,5,6) відсутні дані компоненти, що свідчить про їх переважну користь.

References

1. Zhihunov, D. O., & Voloshenko, O. S. (2013). *Flour mixtures from cereal crops* [Борошняні суміші з зернових культур]. Odesa: Osvita Ukrainy.
2. Korenman, M. I., & Ustenko, A. Ye. (2016). The usefulness of dry breakfasts [Корисність сухих сніданків]. In *Problems of forming a healthy lifestyle among youth: Proceedings of the IX All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students with International Participation* (pp. 68–69). Odesa National Academy of Food Technologies.
3. PwC. (2020). *Global Consumer Insights Survey 2020*. Retrieved January 20, 2025, from <https://www.pwc.com/gx/en/consumer-markets/consumer-insights-survey/2020/pwc-consumer-insights-survey2020.pdf>
4. NielsenIQ. (2020). *Recalibrating for diminished growth: Resolutions for 2021*. Retrieved January 20, 2025, from <https://nielseniq.com/global/en/insights/analysis/2020/recalibrating-for-diminished-growth-resolutions-for2021>
5. Verified Market Research. (2025). *Breakfast cereals market size and forecast*. Retrieved January 21, 2025, from <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/breakfast-cereal-market>
6. Zhihunov, D. O., Voloshenko, O. S., Broslavtseva, I. V., et al. (2021). *Technology and quality assessment of grain products: Monograph* [Технологія та оцінка якості зернових продуктів: монографія]. Odesa: Oldi-Plus.
7. Kordzaya, N. R., & Kovaliv, I. O. (2019). The assortment of cereal bars in the regional market [Асортимент батончиків зернових на регіональному ринку]. *Tovary i Rynky (Commodities and Markets)*, 29, 40–51.
8. Kalugina, I., Dzyuba, N., & Yakymenko, I. (2019). The prophylactic granola development with increased iodine content. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 21(91), 60–68.
9. Sots, S. M., et al. (2020). Study of the quality of oatmeal products presented in the retail trade network of Odesa [Дослідження якості вівсяних крупів, представлених у роздрібній торговій мережі м. Одеса]. In *Modern Science: Problems and Innovations: Abstracts of the I International Scientific and Practical Conference* (pp. 268–274). Stockholm, Sweden.
10. Simakhina, H. O., & Ukrainets, A. I. (2010). *Innovative technologies and products: Health nutrition* [Інноваційні технології та продукти. Оздоровче харчування]. Kyiv: NUKhT.
11. Syrokhman, I. V., & Lozova, T. M. (2006). *Quality and safety of cereal and flour products: Textbook* [Якість і безпечність зерноборошняних продуктів]. Kyiv: TsNL.
12. Shutenko, Ye. I. (2010). *Technology of groats production: Textbook* [Технологія круп'яного виробництва]. Kyiv: Osvita Ukrainy.

ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS SCHEME FOR GRANOLA PRODUCTION

Kovalov M., PhD of Technical Science, Senior lecturer, Kovalova V, PhD of Technical Science, Senior lecturer, Melnik I., PhD of Technical Science, Lecturer
Odesa National University of Technology

Annotation. Due to the frantic pace of life of modern people and the lack of time for cooking at home, the micronutrient deficiency in people's diets is increasing every year. The modern structure of nutrition allows to divide products into three groups: products of mass consumption; functional products; medicinal products. This division allows consumers to increasingly choose functional products, giving preference to breakfast cereals. granola is the

most popular breakfast cereal. Oat flakes are the main component for the production of granola, they strengthen the immune system and provide the body with energy.

The lack of regulatory documentation for the production and quality assessment of granola in Ukraine is one of the disadvantages of such a product, that is, there is no single technological base of production that would be regulated by the state.

Therefore, the purpose of the work is the analysis of the general scheme of granola production and the study of its composition in the samples presented on the market.

It was established that the main technological operations for the production of granola are: preparation of a mixture of dry components; preparation of a mixture of liquid components; heating the liquid mixture until it dissolves; mixing liquid and dry components; drying; cooling; packaging; storage.

Analysis of the energy value of granola showed a sufficiently high caloric content with a moderate content of proteins, fats and carbohydrates. However, there are samples with high fat content of 23.3 g, 19.9 g, 17.8 g in Samples 2, 4 and 8 respectively. Sample 2 has the lowest carbohydrate content (37.8 g), which indicates a low content of grain components.

The study of the energy value and the presence of nutritional supplements showed that all samples have a high nutritional value. In samples 2, 7 and 9, the low content of the grain component is from 64.0% to 78%, while the highest content is 98.8%.

It has been established that when choosing granola for consumption, you should carefully research the composition of the product, because there is a wide range of this product on the market, but not all manufacturers use high-quality products.

Key words: breakfast cereals; granola; technological process; cereal flakes; energy value

Список використаної літератури

1. Жигунов Д. О., Волошенко О. С. Борошняні суміші з зернових культур. Одеса: Освіта України, 2013. 156 с.
2. Коренман М. І., Устенко А. Є. Корисність сухих сніданків. Проблеми формування здорового способу життя у молоді // Збірник матеріалів IX Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених та студентів з міжнародною участю / Одеська національна академія харчових технологій. Одеса, 2016. С. 68-69.
3. PwC Global Consumer Insights Survey 2020 : [Веб-сайт]. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/consumermarkets/consumer-insights-survey/2020/pwc-consumer-insights-survey2020.pdf> (дата звернення: 20.01.2025).
4. Recalibrating for diminished growth: Resolutions for 2021: [Веб-сайт]. URL: <https://nielseniq.com/global/en/insights/analysis/2020/recalibrating-for-diminished-growth-resolutions-for2021> (дата звернення: 20.01.2025).
5. Breakfast Cereals Market Size And Forecast : [Веб-сайт]. URL: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/breakfast-cereal-market> (дата звернення: 21.01.2025).
6. Жигунов, Д.О., Волошенко, О.С., Брославцева, І.В. та інші. Технологія та оцінка якості зернових продуктів: монографія. – Одеса: Олді-плюс, 2021. – 351 с
7. Кордзая Н. Р., Ковалів І. О. Асортимент батончиків зернових на регіональному ринку // Товари і ринки. 2019. № 29. С. 40-51.
8. Kalugina, I., Dzyuba, N., & Yakymenko, I. The prophylactic granola development with increased iodine content. Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies, 2019 , V 21(91), P 60-68.
9. Дослідження якості вівсяних крупів, представлених у роздрібній торговій мережі м. Одеса / С. М. Соц та інші. // Modern science: problems and innovations : abstr. of I Intern. Scientific and Practical Conf., Stockholm (Sweden), 5–7 Apr. 2020. – Stockholm, 2020. – P. 268–274.
10. Сімахіна Г. О., Українець А. І., Інноваційні технології та продукти. Оздоровче харчування : навч. посіб. Київ, НУХТ, 2010. 294 с.
11. Сирохман І.В., Лозова Т.М. Якість і безпечність зерноборошняних продуктів: Навчальний посібник. К.: ЦНЛ, 2006. 384 с.
12. Шутенко, Є. І. Технологія круп'яного виробництва: Навчальний посібник. Київ : Освіта України, 2010. - 272 с.

Отримано в редакцію 24.05.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 24.05.2025

Approved 02.09.2025

НАУКОВІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ІМІТОВАНОЇ РИБНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Манолі Т. А., к.т.н, доцент, Суханов А. С., здобувач наук. ступеню PhD,
Мирошніченко О.М., к.т.н, доцент, Баришева Я. О., PhD, асистент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. У статті висвітлюються актуальні аспекти виробництва, контролю якості та безпеки крабових паличок, що є популярним продуктом з сурімі на українському та світовому ринках. У статті наведено основні історичні моменти та причини появи такого асортименту, як імітована продукція. Описано технологічний процес виготовлення сурімі, який є концентрованим рибним білком, та його перетворення на імітований продукт. У статті приділено увагу основним проблемам виробництва імітованої продукції, пов'язаними з відсутністю традиційних сировинних джерел для виробництва сурімі, необхідністю розробки технологій переробки у фарш сурімі вітчизняних сировинних джерел. Проаналізовано ключові етапи технології, включаючи вибір сировини (рибної та нерибної), вдосконалення рецептур та методів обробки для покращення гелеутворюючої здатності і сенсорних характеристик продукту. Особливу увагу приділено екологічним аспектам виробництва, зокрема, пошуку способів зменшення споживання води під час промивання фаршу, що є важливим для сталого розвитку галузі. Розглянуто питання безпеки харчових продуктів, зокрема застосування «бар'єрних технологій» та біоконсервантів для збільшення терміну придатності та запобігання росту патогенних мікроорганізмів, таких як *Listeria monocytogenes*. Показано, що застосування натуральних консервантів, зростає в майбутньому, що визначається зростанням споживчого попиту на органічні, свіжі та харчові продукти тривалого терміну зберігання. Наведено приклади інноваційних рішень, включаючи використання їстівних плівок та перспективність 3D-друку для створення продуктів із сурімі. Стаття підкреслює, що сучасні тренди в харчовій промисловості, такі як «натуральність» і «чиста етикетка», вимагають постійного удосконалення технологій виробництва. Це сприяє не лише задоволенню зростаючого попиту на якісну та безпечну продукцію, а й ефективному використанню білкових ресурсів, що є важливою проблемою сьогодення.

Ключові слова: крабові палички, технологія, сурімі, безпека, якість, білки, гелеутворююча здатність, сенсорний аналіз.

Вступ. Український ринок крабових паличок перебуває на новому етапі розвитку, який супроводжується зміною споживчих уподобань. Покупці дедалі частіше віддають перевагу якіснішій продукції, навіть якщо вона коштує дорожче, порівняно з товарами низької якості із сумнівним хімічним складом. Виробники та імпортери активно розширюють свої потужності та асортимент, демонструючи позитивну динаміку фінансових і ринкових показників [1].

За даними О. Андрощук & Н. Голембовська (2025) 2024 рік відзначився значним ростом обсягів експорту риби, продукції з риби та інших водних біоресурсів (+79,2 % проти 2023 року). Однією з основних товарних позицій експорту була готова продукція із сурімі (крабові палички) [2].

Продукти заданих складу та структури мають низку переваг у порівнянні з традиційними продуктами. Так, у харчовому виробництві використовуються нові джерела сировини (дрібні види риб, риби зниженої товарної цінності) і забезпечується комплексність його переробки. Аналоги, як правило, більш стабільні у зберіганні, зручні для роздрібної торгівлі та вживання у порівнянні з традиційними харчовими продуктами. Аналоги за своїми якісними показниками не поступаються натуральним продуктам, а часто і перевершують їх, що вирішує певною мірою питання забезпечення населення дефіцитними продуктами (ікрою, м'ясом лососевих, крабів). Виробництво аналогів є економічно доцільним.

Попри досить високий рівень обізнаності споживачів щодо продукції харчових підприємств, у суспільстві існує чимало хибних уявлень. Наприклад, багато хто помилково вважає, що крабові палички містять справжнє м'ясо краба. Однак реальність інша: справжнє м'ясо краба, особливо його преміальні частини (хоча дільні ноги та клешневі кінцівки), є дорогим делікатесом.

За даними українського онлайн ринку, перша фаланга краба коштує близько 12000 грн за кілограм, а морожені частини у панцирі – приблизно 6000 грн за кілограм. Сире м'ясо має драглисту, напівпрозору консистенцію і є досить складним у вилученні з панцира. Воно також характеризується високою біологічною цінністю [3-5]. Натомість крабові палички виготовляються із сурімі – рибного фаршу. Сурімі – це концентрований рибний білок, позбавлений ліпідів, крові, низькомолекулярних азотистих сполук, що надають певний рибний запах та смак. Їхня ціна (160-300 грн за 500 грамів) одразу дає зрозуміти, що справжнього крабового м'яса у цьому продукті немає. Вартість крабових паличок значною мірою визначається складом: обсягом сурімі, типом структуроутворювачів і використанням природних барвників. Більш доступні вироби зазвичай містять від 25 до 30 % сурімі. Спочатку крабові палички виготовляли майже виключно з сурімі, що забезпечувало високий вміст білка – близько 14 %. Однак із часом, для здешевлення виробництва, частка

фаршу в рецептурі стала зменшуватися. Склад, вказаний на етикетках, часто піддається критиці через вміст барвників, структуроутворювачів і відсутність натуральних компонентів. Це зумовлює неоднозначне ставлення українських споживачів до цього продукту. Проте в Японії, звідки походять крабові палички, культура їх споживання зовсім інша. Там вони цінуються як невід'ємна частина національної кухні. У країні навіть існує музей камабоко – виробу із сурімі, який є основою для крабових паличок. Елітні набори камабоко, які дарують на свята, можуть досягати вартості в \$ 100 [6]. У Японії сурімі вважається корисним харчовим продуктом, який рекомендують навіть для раціону немовлят.

Пошук та інтеграція нових компонентів для створення імітованих харчових продуктів, способів забезпечити мікробіологічну стабільність та подовження термінів зберігання з метою досягнення відповідності сучасним трендам у харчуванні, залишаються предметом численних наукових досліджень.

Мета статті. Метою статті є аналіз існуючих проблем та перспектив вдосконалення технології виробництва крабових паличок, а також оцінка їх якості та безпечності з урахуванням сучасних ринкових трендів і вимог сталого розвитку.

Для досягнення цієї мети у статті вирішуються такі завдання:

- дослідити особливості технології виробництва сурімі та його застосування для імітації м'яса ракоподібних;
- проаналізувати питання якості крабових паличок, зокрема, вплив сировини (рибної та нерибної), рецептурних компонентів та технологічних операцій на їх гелеутворюючу здатність і сенсорні властивості;
- оцінити аспекти безпечності продукції, включаючи мікробіологічні ризики (зокрема, *Listeria monocytogenes*) та застосування «бар'єрних технологій» для їх мінімізації;
- визначити шляхи вдосконалення виробництва з урахуванням екологічної ефективності та сучасних споживчих трендів (наприклад, «натуральність» і «чиста етикетка»);
- обґрунтувати актуальність розробки інноваційних підходів (таких як їстівні плівки, 3D-друк) для підвищення конкурентоспроможності та розширення асортименту продукції.

Виклад основного матеріалу. Попит на продукцію з сурімі зростає, що сприяє розвитку та удосконаленню технології та збільшенню обсягів виробництва сурімі. Близько 250 000 тонн сурімі з минтая Аляски, 40 000 тонн сурімі з інших холодноводних риб, 650 000 тонн сурімі з тропічних риб, 60 000 тонн сурімі з прісноводних риб та 10 000 тонн сурімі з інших видів риб були серед більш ніж одного мільйона тонн сурімі, вироблених у світі у 2020 році [7].

Технологія сурімі виникла ще у Південно-Східній Азії більше тисячі років тому. У перекладі з японської «сурімі» означає «промита перемелена риба». Завдяки нейтральному смаку та відсутності запаху сурімі почали використовувати для імітації різних морепродуктів [6]. У 1970-х роках Японія зіткнулася з дефіцитом натурального крабового м'яса, вартість якого почала стрімко зростати. Це спонукало місцевих кухарів створити альтернативний продукт – кані-камабоко («крабове філе»), що за текстурою та смаком нагадує м'ясо краба. Він швидко здобув популярність не лише в Японії, але й став одним із небагатьох традиційних японських продуктів, які отримали визнання на Заході. Промислова технологія виробництва сурімі стала основою для створення імітацій багатьох морепродуктів: хвостів креветок, омарів, кальмарових кілець тощо. У Південній Кореї, Китаї та інших країнах Азії у 1970-х почали активно будувати фабрики для виробництва цих продуктів.

Імітація крабових паличок належить до найвідоміших прикладів харчових продуктів, створених за принципом заміщення, і користується популярністю в усьому світі. У нашій країні є виробничі потужності для виробництва імітованої продукції з сурімі. Тому аналіз проблем в технології продукції, імітуючої м'ясо ракоподібних, є актуальним. Основу цих виробів становить сурімі. Значна частина досліджень у цій галузі зосереджена на пошуку нових сировинних джерел для виробництва сурімі, вдосконаленні рецептури та технологій, зокрема покращенні гелеутворюючих властивостей і сенсорних характеристик продукту [8].

Загалом, сурімі виробляють шляхом подрібнення, промивання, змішування з кріопротектором та заморожування [9-10].

Види риби, які є комерційно вигідними для виробництва сурімі, відрізняються за обсягами вилову, ціновою конкурентоспроможністю та існуючою рибогосподарською ситуацією (тобто, недовикористанням). Як правило, майже 25 % світового виробництва сурімі припадає на минтай з Аляски, який є найпоширенішою холодноводною білою рибою, що виловлюється переважно в США. Найбільшими рибними ресурсами для виробництва сурімі є 10 тропічних видів риби, на які припадає близько 60 % світового виробництва сурімі. До цих видів належать ляш з ниткоподібними плавниками, риба-ящірка, великий окунь, стрічкова риба, кракер та інші [7]. Уап та ін. (2021) стверджують, що, крім зібраних видів морської риби, Китай щороку виробляє понад 200 000 тонн сурімі з культивованої прісноводної риби товстолобика [11]. Індустрія виробництва сурімі має попит на білу рибу, головним чином через важливість білизни та текстурних властивостей отриманої продукції [12]. Завдяки розвитку нових технологій досліджується низка нових видів риб як сировина для сурімі [13].

У той же час, багато видів риби використовуються недостатньо, оскільки це пов'язано з певними технологічними проблемами. Навіть традиційні методи переробки, такі як консервування, засолювання, сушіння та копчення, мають обмеження для деяких так званих «менш цінних видів риби», до яких відносяться пела-

гічні види риб, наприклад, коли вони занадто малі [14-15]. Таким чином, виробництво сурімі є альтернативною переробкою малоцінних у харчовому відношенні видів рибної сировини.

Вже у 1995 році проводилися дослідження щодо дефіциту сировини для виробництва сурімі [16]. Тому досліджуються інші економічно доступні ресурси білкової сировини для виробництва високоякісного гелю сурімі. Тропічна та пелагічна риба розглядається як альтернативна сировина для виробництва сурімі. Однак сурімі, виготовлене з цієї риби, має темний колір, відносно низьку міцність гелю та сильний «рибний смак» [17].

Обмеженість рибної сировинної бази слугувала причиною пошуку нових джерел. Виробництво сурімі здійснюється не лише з рибної сировини [18].

Причиною розвитку виробництва матеріалів, подібних до сурімі, з нерибної сировини є доступність низькоцінного м'яса та субпродуктів для використання в харчових технологіях [19]. Коли сурімі отримують шляхом промивання з нерибної сировини, на відмінну від риби (сурімі), цей продукт називають сурімі-подібний матеріал [20]. Були досліджені технологічні характеристики матеріалів, подібних до сурімі, з яловичини, яловичого серця, свинини, баранини, гігантських кальмарів, м'ясо птиці та способи покращення їх властивостей до гелеутворення, утримання вологості тощо [18, 21-22]. З цього дослідження видно, що птиця має потенціал як недорога білкова сировина з високими функціональними властивостями порівняно з іншими видами матеріалів. Дослідження матеріалу, подібного до сурімі, показали, що матеріал, подібний до сурімі, також можна переробляти на функціональне м'ясо [16, 23-25]. Використання нерибної сировини для виробництва суріміподібного продукту також виявило низку проблем, пов'язану із темним забарвленням, високим вмістом жиру, недостатніми гелеутворюючими властивостями.

В нашій країні виробляють продукцію, імітуючу м'ясо ракоподібних, з традиційного сурімі. Сурімі — це стабілізований міофібрилярний білок, отриманий з механічно очищеного від кісток рибного фаршу, який промивають водою та змішують з кріопротекторами. Типові етапи виробництва сурімі включають видалення луски, оброблення, отримання фаршу, промивання, зневоднення, змішування з кріопротекторами, пакування та заморожування.

Сьогодення відзначається актуальністю дослідження важливості виробництва, заснованого на сталих стратегіях з урахуванням довкілля та сировинних ресурсів, а також обговорення можливостей, які пропонує сурімі для максимального використання білкових ресурсів. Для вирішення питань сталого розвитку в цьому секторі слід враховувати такі моменти: максимально можливе використання сировини, прилову рибацтва та недовикористовуваних видів, оцінка запасів, збереження навколишнього середовища та природних ресурсів, мінімізація забруднення та скорочення споживання води, з метою отримання вигоди від ініціатив щодо екологічної ефективності для досягнення більш сталого процесу, зменшення його впливу на навколишнє середовище, покращення економіки процесу та вирішення зростаючих проблем вуглецевого сліду сектору та вимог соціальної та екологічної відповідальності [17, 26].

Промивання рибного фаршу прісною водою для видалення саркоплазматичних білків, низькомолекулярних азотистих сполук, жиру, крові, пігментів, які можуть знизити якість сурімі, — одна з найважливіших технологічних операцій, оскільки саме від неї залежить стійкість фаршу при зберіганні, гелеутворююча здатність сурімі та знеособлення органолептичних характеристик фаршу (відсутність смаку та смаку риби) [27-29].

Зазвичай вважається, що більше співвідношення фаршу до води забезпечує хороший результат для властивостей гелю, оскільки це не тільки збільшує вартість виробництва, але й збільшує кількість стічних вод та часткову втрату міофібрилярних білків. Повідомлялося, що для виробництва 1 кг сурімі потрібно майже 15 об. води. Широке використання прісної води у виробництві сурімі мало серйозний вплив на навколишнє середовище через скидання неочищених технологічних вод [30]. Як наслідок, існує потреба в екологічно чистому виробництві сурімі з меншою кількістю циклів промивання, не лише для уникнення забруднення, але й для збільшення виходу та мінімізації об'єму промивної води. У кількох дослідженнях також використовувалися різні промивні середовища для виробництва сурімі різних видів риб, такі як газувана вода для сурімі з скумбрії, лужне сольове середовище, озонована вода (NaCl та NaHCO_3) [31-33]. Було показано, що всі вищевказані способи покращують характеристики сурімі. Також приділено увагу дослідженням, як зменшення кількості циклів миття впливає на якість сурімі з індійської скумбрії, що наразі слугує основою для сталого розвитку індустрії сурімі [34].

Кількість промивань залежить від виду риби, умов утримання риби, типу промивання та бажаної якості сурімі [35]. Етапи промивання вимагають великої кількості прісної води та утворюють відповідний об'єм стічних вод, багатих на органічні речовини [36-37]. Тому зазнають актуальності альтернативні методи промивання [38-40].

Більшість дослідників [4, 41-44] серед найвпливовіших факторів під час промивання виділяють тривалість процесу, температуру промивного розчину, співвідношення вода/рибна сировина (гідромодуль), кількість промивань та інтенсивність перемішування. Вітчизняні дослідники Віннов О. та Маєвська Т. досліджували способи інтенсифікації процесу промивки рибного фаршу. Для фаршу, промитого католітом, швидкість була найвищою, порівняно з промиванням водою та анолітом. Застосування електроактивованих вод дозволяє скоротити технологічний процес, зменшити гідромодуль, що відповідає цілям сталого розвитку

[45].

Харчові продукти, які імітують м'ясо ракоподібних, повинні сприйматися споживачем завдяки не тільки їхньому фізіологічно обґрунтованому складу, але, перед усім, їх відповідності органолептичним критеріям. Структура імітованих рибних продуктів впливає на характеристику одного з основних показників їх якості – консистенцію. Виробництво формованих продуктів засноване на унікальній здатності сурімі до гелеутворення, що дозволяє йому імітувати текстуру інших морепродуктів. Міофібрилярні білки мають вирішальне значення для гелеутворення сурімі. Під час гелеутворення міофібрилярні білки денатурують під дією тепла, що призводить до їх незворотної агрегації та зшивання, утворюючи тривимірну структуру [46]. Залежно від біологічних умов існування риби, здатність м'язів утворювати гель залежить від виду, віку, фізіологічного стану, статі, стадії постмортальних змін, способу та місця вилову тощо [47-48]. Численні інші характеристики, такі як вміст жиру у фарші, нестабільність м'язових білків, високе співвідношення темних і білих м'язів, а також значна кількість саркоплазматичних білків, впливають на здатність м'язів до гелеутворення [48].

Сурімі використовується як потенційна сировина для виробництва різноманітних продуктів, таких як імітація крабового м'яса, камабоко, ароматизоване камабоко, чікува, сацумі аге/тенпура, ханпен та рибні ковбаски. Сурімі стає дедалі популярнішим завдяки своїм унікальним текстурним властивостям, а також високій харчовій цінності [47-48.]. Було проведено багато досліджень щодо процесу виробництва сурімі [9, 49-52].

Є розробки з придатності сурімі як матеріалу для 3D-друку, який сприяє створенню індивідуального дизайну продуктів з сурімі та робить продукти з сурімі не тільки більш привабливими, але розширює їхнє застосування в спеціальних дієтах [53-54].

Крабові палички – це найбільш масовий кулінарний продукт, який виробляється з сурімі. До складу рецептурної суміші для приготування крабових паличок входять рибний фарш, кухонна сіль, крохмаль картопляний, яєчний білок, крабовий екстракт і ароматизатор, вода, а також глютамінат натрію і харчовий барвник. Підготовку суміші фаршу здійснюють так само, як і для камабоко, з невеликої кількості якої готують червоне тісто (чи забарвлену пасту). З цією метою використовують порошкоподібний барвник червоного кольору і воду з льодом. Потім червоне тісто поступає в екструдер, звідки подається у фаршефорсунку. З неї фаршмаса видавлюється у вигляді тонкого (товщина близько 1,6 мм) і широкого полотна на транспортерну стрічку з нержавіючої сталі, де вона піддається термообробці при температурі 40-70 °C протягом 1,5 хв. При цьому формується сітчаста тривимірна структура гелю, що надає суміші міцність і еластичність. Після охолодження стрічка проходить між двома валиками з рифленою поверхнею, що призводить до розрізання фаршмаси. Потім за допомогою роликів, що обертаються, стрічка цієї маси з насиченими волокнами формується в джгут (пучок) овальної форми, що має зовнішню подібність до м'яса крабових кінцівок, після чого джгут забарвлюють. З цією метою на полімерну плівку шириною 90 мм наносять вузьку смужку (10-15 мм) червоного тіста, що поступає з охолоджуваного екструдера. Сформований джгут розміщують на плівку поверх шару червоного тіста. Оскільки червоне тісто добре прилипає до суміші фаршу, то вона набуває забарвлення, властивого крабовому м'ясу. Потім джгут обертають плівкою на спеціальному автоматі, термозварюють і порціонують на палички завдовжки 100-105 мм з подальшим варінням при 92 °C впродовж 15 хв. і охолодженням впродовж 10 хв. Фасують в пакети з полімерної плівки і герметично упаковують під вакуумом. Готові крабові палички за органолептичними показниками нагадують натуральне м'ясо краба.

Нарешті, джгут загортають у плівку за допомогою автомата, розрізають на палички (100-105 мм), варять при 92 °C протягом 15 хвилин, охолоджують 10 хвилин, а потім фасують і пакують під вакуумом. У результаті виходять крабові палички, які за смаком і виглядом нагадують натуральне м'ясо краба.

Їжа є джерелом поживних речовин та енергії для людей і тварин. Їжа схильна до мікробного забруднення та псування, що призводить до ризиків для здоров'я та економічних втрат [55-56].

Безпека харчових продуктів є серйозною глобальною проблемою, оскільки приблизно 600 мільйонів людей щороку хворіють через забруднену їжу [57]. Для вирішення цієї проблеми ключові заходи включають вибір відповідних продуктів, дотримання належної гігієни, забезпечення безпеки харчових інгредієнтів та запобігання перехресному забрудненню під час обробки харчових продуктів [58].

Це вимагає механізму, який би зберігав їжу свіжою та безпечною протягом тривалого періоду часу. Досі в історії людства для продовження терміну придатності використовуються різні фізичні та хімічні методи. На жаль, ці методи мають багато недоліків, які створюють проблеми для якості та безпеки продукту, що перевищують потреби споживача.

Наприкінці минулого століття, після ретельного аналізу та узагальнення великого обсягу наукових даних щодо безпечності харчових продуктів із тривалим терміном зберігання, німецький учений професор Лотар Ляйстнер увів новий технічний термін – «бар'єрні технології» [59]. Згідно з визначенням професора Ляйстнера, такі технології передбачають застосування спеціального комплексу «бар'єрів», що забезпечують мікробіологічну стійкість, безпеку та стабільну споживчу цінність харчових продуктів протягом тривалого періоду зберігання. Серед найважливіших бар'єрів, які використовуються у виробництві рибних імітованих продуктів, можна виокремити наступні: температуру зберігання, температуру завершальної теплової обробки та герметичну споживчу упаковку.

Біологічне консервування з використанням мікробних, рослинних та тваринних метаболітів та антимікробних пептидів нещодавно привернуло значну увагу як найбезпечніший спосіб продовження терміну придатності харчових продуктів без негативного впливу на якість продукту. Було виявлено, що антимікробна ефективність антимікробних пептидів та метаболітів значно пригнічує ріст потужних харчових патогенів та мікроорганізмів, що спричиняють псування. Однак, ефективність біологічних антимікробних агентів для консервування харчових продуктів посилюється шляхом комбінованого застосування з меншою кількістю хімічних консервантів завдяки розумній формулі серії бар'єрних технологій, що називаються бар'єрними технологіями [59]. Дослідження багатьох авторів показали роль біоконсервантів у бар'єрних технологіях для збереження різних продуктів протягом значних періодів часу. Turgis et al. проілюстрували синергію нізину та γ -випромінювання, яка перешкоджає розмноженню *Listeria monocytogenes* та продовжує термін зберігання м'яса до 5 днів при температурі 4 °C [60]. Аналогічно, дослідниками було продемонстровано комбінований ефект ефірних олій та низькотемпературного зберігання рибних пресервів; мікрокапсульованої формули нізину та ефірних олій орегано і кориці, γ -випромінювання для пригнічення *Listeria monocytogenes* на готовій до вживання шинці під час зберігання [61-62]. Висновки авторів вказують на синергетичний ефект тому використання ефірних олій та технології мікрокапсульовання вважається перспективною системою перешкод для ефективного покращення безпеки харчових продуктів на ринку готових до вживання продуктів тваринного походження.

Перспективними є розробки сенсорів на основі вуглецевих точок для виявлення харчових патогенів, таких як золотистий стафілокок або кишкова паличка [63-64], а пакувальні матеріали, покриті вуглецевими точками, використовуються для продовження терміну придатності авокадо до 14 днів [65]. Вуглецеві точки також можуть утворювати комплекси включення з широким спектром молекул. Ця властивість була використана для розробки зондів та сенсорів для виявлення забруднюючих речовин у зразках харчових продуктів, таких як пестициди, гербіциди або важкі метали [66-67]. Однак інтеграція вуглецевих точок у харчові продукти вимагає всебічного розуміння аспектів їх безпеки.

Останнім часом у харчовій галузі, зокрема при переробці риби та морепродуктів, набирають все більшої популярності глобальні ринкові тренди, такі як «натуральність», «чиста етикетка», «зменшення харчових відходів» та інші. Роста попит споживачів на доступну, смачну і натуральну їжу, яка, однак, повинна бути безпечною, якісною і з достатньо довгими термінами придатності і відповідати вимогам щодо тренду здорового способу життя [68]. Попит на подібний підхід зумовлений зростаючим рівнем урбанізації, підвищенням обізнаності споживачів щодо складу та корисності харчових продуктів, а також прагненням до збереження здоров'я.

Таким чином, одним із ключових завдань харчової промисловості України на сучасному етапі є гарантування безпеки рибних продуктів. У рибній сировині та продукції, особливо за умови недотримання технологічних процесів і санітарно-гігієнічних норм виробництва, можуть міститися небезпечні для здоров'я людини мікроорганізми, зокрема лістерії.

У зв'язку з цим у країнах Європейської економічної зони, а також у державах з високорозвиненими харчовими стандартами, таких як США, Канада та Японія, жорстко регулюються вимоги до контролю присутності патогенних лістерій у рибній продукції. Такі мікроорганізми становлять ризик для здоров'я споживачів і можуть спричиняти серйозні захворювання. Українські рибопереробні підприємства, орієнтовані на експорт, приділяють особливу увагу забезпеченню високої якості та безпечності своєї продукції, що є обов'язковим для успіху на міжнародних ринках. Перевірка продукції на наявність збудника лістеріозу входить до переліку обов'язкових заходів.

Нормативними документами України не нормується мінімальна інфікуюча доза *L. monocytogenes*. У Сполучених Штатах Центром безпеки харчових продуктів та прикладного харчування (CFSAN) та Службою безпеки та інспекції харчових продуктів Міністерства сільського господарства США (FSIS) запроваджується політика «нульової толерантності» до присутності *L. monocytogenes* у готових до вживання продуктах харчування. На Маврикії наразі немає правил, що регулюють присутність *L. monocytogenes* у готових до вживання морепродуктах. Однак, для пригнічення росту *L. monocytogenes* рекомендується застосовувати додаткові заходи після обробки, такі як обробка натуральними антимікробними засобами [69].

Таким чином актуальними є розробки щодо контролю та регулювання вмісту *L. monocytogenes* у крабових паличках, що виробляються українськими виробниками.

У продуктах з сурімі зазвичай додають інгредієнти для покращення фізичних характеристик. До таких інгредієнтів належать різні види крохмалю та борошна, гідроколоїди [70]. Додавання крохмалю до рибних желе має на меті покращити текстуру, збільшити міцність гелю, забезпечити стабільність матриці гелю сурімі та збільшити водоутримувальну здатність та сенсорні властивості отриманого продукту [71]. Тапіоковий крохмаль є найпоширенішим наповнювачем, оскільки він містить високий вміст амілопектину (83 %), завдяки чому може утворювати гнучкий та когезивний гель [72]. Використання тапіокового крохмалю як сполучної речовини робить текстуру крабових паличок липкою або менш компактною, тому для покращення текстури потрібні різні види крохмалю, такі як кукурудзяний крохмаль. Кукурудзяний крохмаль містить близько 25 % амілози, яка надає йому твердих властивостей, тоді як амілопектин викликає липкість [73]. Борошно з високим вмістом амілози має твердіший, більш адгезивний та компактний борошняний гель [74].

Додавання пшеничного борошна як структуроутворювача має обмеження з точки зору вмісту глютену. Використання безглютенового борошна призведе до нестабільного тіста, а текстура крабових паличок стане ламаною та не жуальною, тому необхідно додавати інші харчові добавки, такі як гідроколоїди. Для отримання гелевої текстури з високою еластичністю можна використовувати різні типи гідроколоїдів. Карагенан може поєднувати полімерні ланцюги, утворюючи безперервну тривимірну сітку, яка є матрицею. Ця матриця робить карагенановий гель міцним, стабільним, жорстким та еластичним [75]. Додавання карагенану призвело до збільшення липкості, еластичності та міцності на розтяг у продуктах реструктуризації рибного м'яса [76]. Наукові дослідження раціональної пропорції борошна з квасолі джек-бін, тапіоки та кукурудзяного крохмалю дозволяє збільшити вміст білка в продукті до 34,80 %.

Для зберігання імітованих подуктів застосовують охолодження або заморожування. Проте цих процесів може бути недостатньо для запобігання окисненню ліпідів, появи прогірклих сторонніх присмаків та запахів або росту бактерій [77]. Додавання або застосування до морепродуктів рослинних екстрактів, їстівних плівок та покриттів є успішними методами обробки, які можуть продовжити термін придатності харчових продуктів [78].

Покриття імітованих продуктів їстівними плівками може розглядатися як перспективний та ефективний метод покращення якості харчових продуктів [79]. Хітозан та желатин як природні полімери демонструють чудові характеристики, такі як їстівність, біорозкладність та плівкоутворювальні властивості, і є цікавими біоматеріалами для розробки їстівної упаковки в харчовій промисловості, а також є нетоксичними та не забруднюючими навколишнє середовище. Їстівні плівкові покриття в поєднанні з охолодженням або іншою системою пакування виявилися ефективним методом консервації для продовження терміну придатності продуктів харчування та збереження якості широкого спектру свіжих охолоджених харчових продуктів. Ще однією функцією їстівних покриттів може бути їхня функція як носія антимікробних сполук [80-81].

Ця тенденція може слугувати повштовхом для розробки нових біорозкладних пакувальних матеріалів з натуральних полімерів, щоб створити часткову альтернативу пластиковій упаковці.

Висновки. Процес удосконалення технології є безперервним, оскільки вітчизняна та світова наука постійно відкриває все нові властивості основних компонентів їжі і коректує їхню роль у життєзабезпеченні людського організму. Український ринок крабових паличок активно розвивається, демонструючи зміну споживчих уподобань. Споживачі все частіше надають перевагу якіснішій продукції, що стимулює виробників та імпортерів до розширення асортименту та вдосконалення технологій. Крабові палички виготовляються з сурімі, концентрованого рибного білка, технологія виробництва якого постійно вдосконалюється для пошуку нових джерел сировини (в тому числі нерибних), покращення гелеутворюючої здатності та сенсорних характеристик продукту. Це дозволяє створювати якісні аналоги традиційних делікатесів. Промивання фаршу для сурімі потребує великих обсягів води, що створює екологічні виклики. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на зменшення споживання води та розробку альтернативних, більш екологічних методів, що відповідає глобальним цілям сталого розвитку. Гарантування безпеки продукції є ключовим завданням. У статті наголошується на застосуванні «бар'єрних технологій» та біоконсервантів для запобігання росту патогенних мікроорганізмів, зокрема *Listeria monocytogenes*. Інноваційні рішення, такі як їстівні покриття та 3D-друк, відкривають нові можливості для покращення якості, безпечності та естетичної привабливості продукції. Харчова промисловість повинна реагувати на сучасні тренди, такі як попит на «натуральність» і «чисту етикетку». Це вимагає розробки та впровадження науково обґрунтованих технологій, що дозволяють ефективно використовувати білкові ресурси та виробляти високоякісні, безпечні та здорові продукти харчування.

References

1. Ustenko, I., Mardar, M., & Pambuk, S. (2015). Marketinhovi doslidzhennya rinku produktsiyi z surimi. *Ahrosvit*, 9(1), 37–43.
2. Androshchuk, O., & Holembovska, N. (2025). Analiz suchasnoho stanu rybnoho rynku Ukrainy. *Zdorovia liudyny i natsi.*, 3(1), 21–36.
3. Marques, António, et al. (2010). Chemical composition of Atlantic spider crab *Maja brachydactyla*: Human health implications. *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(3), 230-237.
4. Omotoso, O. T. (2005). Chemical composition and nutritive significance of the land crab, *Cardisoma armatum* (Decapoda). *African Journal of Applied Zoology and Environmental Biology*. 7, 68-72.
5. Spindler-Barth, Margarethe. (1976), Changes in the chemical composition of the common shore crab, *Carcinus maenas*, during the molting cycle, *Journal of comparative Physiology*. 05(2), 197-205.
6. Sato, Maki. (2025). Centennial companies in Japan: Ethical strategies for sustainability and well-being. Sustainable Transformation and Well-being: The Role of Business for Individual and Collective Flourishing. *Cham: Springer Nature Switzerland*, 45-66.
7. Gueneegues, P. (2021). Surimi market update. 16th Surimi Industry Forum Webinar (Nov 30), Jae Park Surimi School.
8. Bashir, K.M.I., Kim, J.S., An, J.H., Sohn, J.H. & Choi, J.S. (2017). Natural food additives and preservatives for fish-paste products: A review of the past, present, and future states of research. *J. Food Qual.* 9675469.
9. Park, J.W. (2005). Surimi seafood: products, market, and manufacturing. In Park, J.W. (Ed). *Surimi and Surimi Seafood*, p. 375-433. Boca Raton: CRC Press.

10. Martín Sánchez, A. M., et al. (2009). Alternatives for efficient and sustainable production of surimi: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 8(4), 359-374.
11. Yingchutrakul, Manatsada, et al. (2022). Asian carp, an alternative material for surimi production: Progress and future. *Foods*. 11(9), 1318. [j.1541-4337.2009.00087.x20220411-1-v09mt4-libre.pdf \(d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net\)](https://doi.org/10.3390/foods11091318).
12. Navarro, C. (2007). Tecnología de los productos gelificados. In: Perez Alvarez JA, Fernández L, Lopez J, Sayas Barberá E, editors. *Industrialización de productos de origen animal*. 3rd ed. Alicante, Spain: Univ. Miguel Hernández. p 139–159.
13. Chakma, S. (2025). *Evaluation of Quality and Shelf Life of Tigertooth Croaker (Otolithes ruber) Fish Balls During Refrigerated Storage Condition* (Doctoral dissertation, Faculty of Fisheries, Chattogram Veterinary and Animal Sciences University, Khulshi, Chattogram-4225, Bangladesh). Black binding - Suchita.pdf (cvasu.ac.bd)
14. Pambuk, S. (2007). *Rozrobka malovidkhodnoyi tekhnolohiyi pererobki aterini chornomors'koyi* [Dis. na zdobuttya stupenya kand. tekhn. nauk, ONAKhT]. ONAKhT.
15. Slobodianiuk, N. M., et al. (2019). Vplyv medu naturalnoho na pokaznyky bezpechnosti rybnikh preserviv i past // *Scientific Journal Animal Science & Food Technologies*. 10(1), 40-47.
16. Babji, A.S., Mukhlis, I., Gna, S.K., Seri Chempaka, M.Y., Norhaliza, M. and Eraou, B. (1995). Processing efficiency and physico-chemical properties of surimi type materials. *Malaysian Journal of Animal Science* 1, 52-58.
17. Guenneugues, P. and Morrissey, M.T. (2005). Surimi resources. In Park, J.W. (Ed). *Surimi and Surimi Seafood* 2nd edn, p. 375-433. Boca Raton, FL: CRC Press
18. Antonomanolaki, R.E., Vareltzis, K. P., Georgakis, S.A. and Kaldrymidou, E. (1999). Thermal gelation properties of surimi like material made from sheep meat. *Journal of Meat Science* 52, 429-435.
19. Kenny, T, Desmond, E. and Ward, P. (1999). Up-grading of low-value meats and by-products for use in consumer foods, *Dublin, Ireland: The National Food Centre*. 1-26.
20. Tina, N., Nurul, H., Ruzita, A. (2010). Surimi-like material: Challenges and prospects. *International Food Research Journal*, 17(3), 509–517.
21. Park, S., Brewer, M.S., Novakofski, J., Bechtel, P.J. and McKeith, F., K. (1996). Salt, cryoprotectants and preheating temperature effects on surimi-like material from beef or pork. *Journal of Food Science* 61, 422.
22. Campo-Deano, L.C., Tovar, C.A., Pombo, M.J., Solas, M.T. and Borderias, A.J. (2009). Rheological study of giant squid surimi (*Dosicus gigas*) made by two methods with different cryoprotectants added. *Journal of Food Engineering* 94, 26-33.
23. Yang, T.S., and Froning, G.W. (1992). Selected washing processes affect thermal gelation properties and microstructure of mechanically deboned chicken meat. *Journal of Food Science* 57, 325-329.
24. Nowсанд, A.A.K.M., Kanoh, S. and Niwa, E. (2000). Thermal gelation characteristics of breast and thigh muscles of spent hen and broiler and their surimi. *Journal of Meat Science* 54, 169-175.
25. Jin, S. K., Kim, I.S., Choi, Y.J., Kim, B.G. and Hur, S.J. (2009). The development of imitation crab stick containing chicken breast surimi. *Journal of Food Science and Technology* 42, 150-156.
26. Martín Sánchez, A. M., et al. (2009). Alternatives for efficient and sustainable production of surimi: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 8.4, 359-374.
27. Vilhelmsson O. (1997). The state of enzyme biotechnology in the fish processing industry. *Trends Food Sci Technol* 8(8), 266–70.
28. Carvajal PA, Lanier TC, MacDonald GA. (2005). Stabilization of proteins in surimi. In: Park JW, editor. *Surimi and surimi seafood*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis Group. p 163–225.
29. Hultin HO, Riley C, inventors. (2007). Apr 26. Systems and methods for separating proteins from connective tissue. Patent WO/2007/046891.
30. Priyadarshini, B.; Xavier, K.M.; Nayak, B.B.; Dhanapal, K.; Balange, A.K. (2017). Instrumental quality attributes of single washed surimi gels of tilapia: Effect of different washing media. *LWT* 86, 385–392.
31. Somjid, P., Panpipat, W. and Chaijan, M. (2017). Carbonated water as a novel washing medium for mackerel (*Auxis thazard*) surimi production. *Journal of Food Science and Technology*, 54(12), 3979–3988. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2862-7>
32. Endoma, L. F., Gabo, J. H. C., Sargadillos, R. M., Condrellon, C. G., Francisco, W. A., Daet, I. P., ... & Muegue, M. F. S. (2022). Physico-chemical properties and sensory quality of surimi from bigtooth pomfret (*Brama orcini*) at different washing cycles. *Food Res*, 6, 266-274.
33. Chen, H.H.; Chiu, E.M.; Huang, J.R. (1997). Color and gel-forming properties of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) as related to washing conditions. *J. Food Sci.* 62, 985–991.
34. Somjid, P., Panpipat, W., Cheong, L. Z., & Chaijan, M. (2021). Reduced washing cycle for sustainable mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) surimi production: Evaluation of bio-physico-chemical, rheological, and gel-forming properties. *Foods*, 10(11), 2717.
35. Carvajal PA, Lanier TC, MacDonald GA. (2005). Stabilization of proteins in surimi. In: Park JW, editor. *Surimi and surimi seafood*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis Group. 163–225.
36. Park JW, Lin TM. (1996). Extraction of proteins from Pacific whiting mince at various washing conditions. *J Food Sci* 61(2):432–38.
37. Lin TM, Park JW. (1997). Effective washing conditions reduce water usage for surimi processing. *J Aqua Food Prod Technol* 6(2):65–79.
38. Wu J, Li CY, Ho ML, Jiang ST. (2000). Quality improvement of mackerel surimi with NADPH- sulfite reductase from *Escherichia coli*. *J Food Sci* 65(8):1400–3.
39. Meacock G, Taylor KDA, Knowles MJ, Himonides A. (1997). The improved whitening of minced cod flesh using dispersed titanium dioxide. *J Sci Food Agric* 73(2):221–5.
40. Marchetti, Marion Daniela, et al. (2025). Multi-Method Evaluation of Surimi Quality from a Bycatch Species (*Trachurus lathami*): Physicochemical, Textural, Sensory, and Thermal Responses to Washing Conditions. *Food and Bioprocess Processing* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308525001348>.

41. Amiza, M. A., & Nur Ain, K. (2012). Effect of Washing Cycle and Salt Addition on the Properties of Gel from Silver Catfish (*Pangasius* Sp.) Surimi. *Y UMT 11th International Annual Symposium on Sustainability Science and Management* (c. 485–490).
42. Il-Suk Kima, Su-Jung Kim, Ki-Jong Jeonga, Yeung-Joon Choi, Sun-Jin Hur, Sang-Keun Jin (2007). Effect of muscle type and washing times on physico-chemical characteristics and qualities of surimi. *Journal of Food Engineering*. 81(3.), 618–623. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877407000295>
43. Afsaneh Asgharzadeh, Bahareh Shabanpour, Santiago P. Aubourg, Hedayat Hosseini (2010). Chemical changes in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) minced muscle during frozen storage: Effect of a previous washing process. *Grasas y Aceites*. 61(1), 95–101.
44. Khozaghi S. Jafarpour, (2008). Quality characteristics of common carp (*Cyprinus carpio*) surimi and kamaboko and the role of sarcooplasmic proteins. *RMIT University School of Applied Sciences*. 216 p.
45. Vinnov, O. S., & Maievskaya, T. (2013). Elektroaktyvovana voda v tekhnologii promytkh rybnykh farshiv. Voda v kharchovykh produktakh i dlia kharchovykh produktiv. *Y Vseukr. nauk.-prakt. konf., m. Kharkiv, 16-17 trav* (c. 5–6). KhDUKhT.
46. Sun, X. D., & Holley, R. A. (2011). Factors influencing gel formation by myofibrillar proteins in muscle foods. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 10(1), 33–51.
47. Zou, Hao, et al. (2025). Processing suitability of three tilapia species for alternative freshwater surimi: A comprehensive evaluation from muscle physicochemical to gelling properties. *Food Chemistry*: 145540. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814625027918>
48. Yang, Ruizhi, et al. (2025) Factors influencing surimi gelling properties and natural additive-based gel fortification strategies: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 24(1): e70067. <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1541-4337.70067>.
49. Jin, S.K., Kim, I.S., Kim, S. J., Jeong, K. J., Choi, Y.J. and Hur, S. J. (2007). Effects of muscle type and washing times on physicochemical characteristics and qualities of surimi. *Journal of Food Engineering* 81, 618–623.]
50. Trondsen, T. (1998). Blue whiting surimi: new perspectives on the market value. *Journal of Fisheries Research* 34, 1–15
51. Phatcharat, S., Benjakul, S., Visessanguan, W. (2006). Effects of washing with oxidising agents on the gelforming ability and physicochemical properties of surimi produced from bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*). *Journal of Food Chemistry* 98, 431–439.
52. Catarci, C. (2007). Surimi market report, December 2007. FAO Globefish. Accessed March 9, 2009: <http://www.globefish.org/dynamisk.php?id=4356>.
53. Diao, Dieynabou, et al. (2025). Development and future prospects of 3D printed surimi products: A review. *Applied Food Research*: 100757. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772502225000678>
54. Xiong, Yin, et al. (2025). A novel method for high-temperature microwave 3d printing of golden thread surimi: Combination of thermally reversible gelatin and κ -carrageenan. *Food Hydrocolloids* 16,1 110856. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X24011305>.
55. Kebede, B. (2019). The Preservative Efficacy of Antimicrobial Proteins and Metabolites from Microorganisms, Animals and Plants as Potential Alternative to Chemical Food Preservation: A Review. *Food Sci. Qual. Manag.*, 87, 34–54. 49349-libre.pdf (d1wqtstx1xle7.cloudfront.net)
56. Bezusov, A. T., Manoli, T. A., Nikitchina, T. I., & Barysheva, Ya. O. (2018). Shchodo pytannia pro utvorennia biohennykh aminiv v kharchovykh produktakh. *Naukovi pratsi* [Odesskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnologii], (82, Vyp. 2), 40–46.
57. WHO (2022). Food safety fact sheet. World Health Organization. Retrieved November 01 from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>
58. Njoagwuani EI, Onyeaka H, Mazi IM, Akegbe H, Oladunjoye IO, Ochulor CE, Omotosho AD, Odeyemi OA, Nwaiwu O, Tamasiga P (2023). Food safety in vulnerable populations: a perspective on the challenges and solutions. *FASEB J* 37(5):e22872. <https://doi.org/10.1096/fj.202201713R>
59. Leistner, L., & Gould, G. W. (2002). *Hurdle Technologies: Combination Treatments for Food Stability, Safety and Quality: Combination Treatments for Food Stability, Safety, and Quality*. Kluwer Academic.
60. Turgis, M., Stotz, V., Dupont, C., Salmieri, S., Khan, R., A. & Lacroix, M. (2012), Elimination of *Listeria monocytogenes* in Sausage Meat by Combination Treatment: Radiation and Radiation Resistant Bacteriocins. *Radiation Physics and Chemistry*. 81, 1185–118.
61. Manoli, T., Nikitchina, T., & Barysheva, Y. (2018). Vykorystannia priano-aromatychnykh ekstraktiv v tekhnologii rybnykh preserviv z metoiu posylennia konservuiuchoho efektu pry zberihanni v umovakh pomirnykh pozytyvnykh temperaturakh. *Y 77-yi nauk. konf. naukovy-vykkladatskoho skladu akademii* (c. 221). ONTU.. <https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/db962ae6-7dc2-437d-a192-01d08886c623/content>
62. Huq, T., Vu, K., D., Riedl, B., Bouchar, J. & Lacroix, M. (2015), Synergistic Effect of Gamma(γ) Radiation and Microencapsulated Antimicrobial Against *Listeria monocytogenes* on Ready-To-Eat (RTE) Meat. *Food Microbiology*, 46, 507–514.
63. Gao X, Zhang H, Liu L, Jia M, Li X, Li J (2024). Nano-biosensor based on manganese dioxide nanosheets and carbon dots for dual-mode determination of *staphylococcus aureus*. *Food Chem* 432, 137144. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137144>
64. Zhao D, Zhang Z, Liu X, Zhang R, Xiao X (2021a) Rapid and low-temperature synthesis of n, p co-doped yellow emitting carbon dots and their applications as antibacterial agent and detection probe to sudan red I. *Mater Sci Eng C* 119,111468. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111468>
65. Ezati P, Rhim J-W, Molaei R, Rezaei Z (2022). Carbon quantum dots-based antifungal coating film for active packaging application of avocado. *Food Packag Shelf Life* 33, 100878. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100878>.

66. Hoang NM, Ngoc NTB, Huong PTL, Huyen PTT, Duy DQ, Dao V-D, Tu LT (2023). Dual emission carbon dots for simultaneous detections of Pb²⁺ and Fe³⁺ ions in water via distinct sensing mechanisms. *J Fluoresc* 33(4),1359–1366. <https://doi.org/10.1007/s10895-022-03139-2>
67. Pajewska-Szmyt M, Buszewski B, Gadzała-Kopeciuch R (2020). Carbon dots as rapid assays for detection of mercury (II) ions based on turn-off mode and breast milk. *Spectrochim Acta A* 236,118320. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118320>.
68. Cui, Z., Manoli, T., Nikitchina, T., & Mo, H. (2020). Trends in the manufacture of processed squid products. *Food Science and Technology*, 14(1), 89-97. <https://doi.org/10.15673/fst.v14i1.1650>
69. Ramroop P., Neetoo H. (2018). Antilisterial activity of Cymbopogon citratus on crabsticks. *AIMS microbiology*. (4)1, 67-84.
70. Finani, N. I., & Rosida, D. F. (2025). Effect of Proportion of Jack bean Flour, Tapioca Flour, and Corn Starch on the Nutrition of Instant Milkfish Crabstick. *AJARCDE (Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment)*, 9(1), 154-157.
71. Rasco, B & Bledsoe, G. (2006). *Surimi and Surimi Analog Products*. In Hui, Y. H. CRC Taylor & Francis (eds) Handbook of Food Science, Technology and Engineering. Boca Raton, London, New York
72. Zhang, F., Fang, L., Wang, C., Shi, L., Chang, T., Yang, H., & Cui, M. (2013). Effects of starches on the textural, rheological, and color properties of surimi-beef gels with microbial transglutaminase. *Meat Science*, 93(3), 533–537.
73. Rosida, Dedin F (2021). Buku Ajar Pati Termodifikasi dari Umbi-umbian Lokal dan Aplikasinya untuk Produk Pangan. CV. Putra Media Nusantara, Surabaya.
74. Lin, J.-H., Singh, H., Chang, Y.-T., & Chang, Y.-H. (2011). Factor analysis of the functional properties of rice flours from mutant genotypes. *Food Chemistry*, 126(3), 1108–1114.
75. Kusnandar, F., Winati, P., Abdullah, M., & Umar, S. (2020). Perspektif Global Ilmu dan Teknologi Pangan (Jilid 1) PATPI. Bogor: PT. Penerbit IPB Press.
76. Rahmawati, I., Liviawaty, E., Pratama, R. I., & Junianto. (2023). Carrageenan in Seaweed (*Eucheuma* sp.) and Use of Carrageenan in Fishery Food Products: A Review. *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 23(6), 1–10. <https://doi.org/10.9734/ajfar/2023/v23i6617>.
77. Gómez-Guillén, M.C. & Montero, M.P. (2007): Polyphenol uses in seafood conservation. *American Journal of Food Technology*, 2(7): 593-601.
78. Ucar, Y., Durmus, M., & Özogul, Y. (2025). Natural preservatives for fish and seafood. In *Natural Preservatives for Food* (pp. 193-220). Academic Press
79. Smaoui, S., Chaari, M., Agriopoulou, S., & Varzakas, T. (2025). Green active films/coatings based on seafood by-products (chitosan and gelatin): a powerful tool in food packaging. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(6), 8331-8350.
80. Siracusa, V. (2025). Packaging material in the food industry. In *Antimicrobial food packaging* (pp. 111-126). Academic Press.
81. Quintavalla, S., Vicini, L. (2002): Antimicrobial food packaging in meat industry. *Meat Science*, 62: 373-380.

SCIENTIFIC ASPECTS OF THE PRODUCTION OF IMITATED FISH PRODUCTS

Manoli T., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Sukhanov A., postgraduate student, Myroshnichenko O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Barysheva Y., Ph.D, assistant Odesa National University of Technology

Abstract. The article highlights current aspects of the production, quality control and safety of crab sticks, a popular surimi product on the Ukrainian and global markets. The article presents the main historical moments and reasons for the emergence of such an assortment as imitation products. The article focuses on the ingredients of crab sticks. It shows that the basis of imitation products is washed fish mince, which is mainly obtained from the muscle tissue of fish with white musculature. The technological process of manufacturing surimi, which is concentrated fish protein, and its transformation into an imitation product is described. The article focuses on the main problems of imitation product production related to the lack of traditional raw material sources for surimi production and the need to develop technologies for processing domestic raw materials into surimi. The article highlights issues related to the processing of fish with dark muscles, which include high fat content, colouring pigments, and low molecular weight compounds, etc. The key stages of the technology are analyzed, including the selection of raw materials (fish and non-fish), the improvement of recipes and processing methods to improve the gel-forming ability and sensory characteristics of the product. Particular attention is paid to the environmental aspects of production, in particular, the search for ways to reduce water consumption during minced meat washing, which is important for the sustainable development of the industry. Food safety issues are considered, in particular the use of 'barrier technologies' and biopreservatives to increase shelf life and prevent the growth of pathogenic microorganisms such as *Listeria monocytogenes*. It is shown that the use of natural preservatives will increase in the future, driven by growing consumer demand for organic, fresh and long-life food products. Examples of innovative solutions are given.

Keywords: crab sticks, technology, surimi, safety, quality, proteins, gel-forming ability, sensory analysis.

Список використаної літератури

1. Устенко І. А., Мардар М. Р., Памбук С. А. Маркетингові дослідження ринку продукції з сурімі // Агросвіт . 2015. № 9. С. 37-43. http://www.agrosvit.info/pdf/9_2015/9.pdf.

2. Андрощук О., Голембовська Н. Аналіз сучасного стану рибного ринку України // Здоров'я людини і нації. 2025. № 3(1). С. 21-36.
3. Marques, António, et al. Chemical composition of Atlantic spider crab *Maja brachydactyla*: Human health implications. // Journal of Food Composition and Analysis 2010. №23.3. P. 230-237.
4. Omotoso, O. T. Chemical composition and nutritive significance of the land crab, *Cardisoma armatum* (Decapoda) // African Journal of Applied Zoology and Environmental Biology. 2005. №7. P. 68-72.
5. Spindler-Barth, Margarethe. Changes in the chemical composition of the common shore crab, *Carcinus maenas*, during the molting cycle // Journal of comparative Physiology. 1976. № 105.2. P: 197-205.
6. Sato, Maki. Centennial companies in Japan: Ethical strategies for sustainability and well-being. Sustainable Transformation and Well-being: The Role of Business for Individual and Collective Flourishing. // Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. P. 45-66.
7. Gueneeugues, P. «Surimi market update.» 16th Surimi Industry Forum Webinar (Nov 30), Jae Park Surimi School. 2021.
8. Bashir, K.M.I.; Kim, J.S.; An, J.H.; Sohn, J.H.; Choi, J.S. Natural food additives and preservatives for fish-paste products: A review of the past, present, and future states of research. J. Food Qual. 2017. P. 9675469..
9. Park, J.W. 2005. Surimi seafood: products, market, and manufacturing. In Park, J.W. (Ed). Surimi and Surimi Seafood, p. 375-433. Boca Raton: CRC Press.
10. Martín□ Sánchez, A. M., et al. Alternatives for efficient and sustainable production of surimi: A review.// Comprehensive reviews in food science and food safety. 2009. 8.4 P. 359-374.
11. Yingchutrakul, Manatsada, et al. Asian carp, an alternative material for surimi production: Progress and future.// Foods. 2022. 11.9 P. 1318.]. j.1541-4337.2009.00087.x20220411-1-v09mt4-libre.pdf (d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net).
12. Navarro C. Tecnología de los productos gelificados. In: Perez Alvarez JA, Fernández L'opez J, Sayas Barber' a E, editors. // Industrialización de productos de origen animal. 3rd ed. Alicante, Spain: Univ. Miguel Hernández. 2007. p 139–59.
13. Chakma, S.. Evaluation of Quality and Shelf Life of Tigertooth Croaker (*Otolithes ruber*) Fish Balls During Refrigerated Storage Condition (2025) (Doctoral dissertation, Faculty of Fisheries, Chattogram Veterinary and Animal Sciences University, Khulshi, Chattogram-4225, Bangladesh). Black binding - Suchita.pdf (cvasu.ac.bd)
14. Памбук С. А. Розробка маловідходної технології переробки атерини чорноморської : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : УДК 664.959.2 – 027.33 : захист 30.10.2007 / наук. кер. Манолі Т.А. Одеса: ОНАХТ, 2007. 197 с.
15. Слободянюк, Н. М., et al. Вплив меду натурального на показники безпеки рибних пресервів і паст // Scientific Journal'Animal Science & Food Technologies. 2019. № 10.1 С.40-47.
16. Babji, A.S., Mukhlis, I., Gna, S.K., Seri Chempaka, M.Y., Norhaliza, M. and Eraou, B. Processing efficiency and physico-chemical properties of surimi type materials. // Malaysian Journal of Animal Science. 1995. № 1. P. 52-58.
17. Guenneugues, P. and Morrissey, M.T. Surimi resources. In Park, J.W. (Ed). Surimi and Surimi Seafood. 2005. 2nd edn, p. 375-433. Boca Raton, FL: CRC Press
18. Antonomanolaki, R.E., Vareltsis, K. P., Georgakis, S.A. and Kaldrymidou, E. Thermal gelation properties of surimi like material made from sheep meat. // Journal of Meat Science 1999. № 52. P. 429-435.
19. Kenny, T, Desmond, E. and Ward, P. Up-grading of low-value meats and by-products for use in consumer foods. 1999. p. 1-26. Dublin, Ireland: The National Food Centre.
20. Tina, N., Nurul, H., Ruzita, A.. Surimi□like material: Challenges and prospects. // International Food Research Journal, 2010. № 17(3), p. 509–517..
21. Park, S., Brewer, M.S., Novakofski, J., Bechtel, P.J. and McKeith, F., K. Salt, cryoprotectants and preheating temperature effects on surimi-like material from beef or pork. // Journal of Food Science 1996. P. 61: 422.
22. Campo-Deano, L.C., Tovar, C.A., Pombo, M.J., Solas, M.T. and Borderias, A.J. Rheological study of giant squid surimi (*Dosicus gigas*) made by two methods with different cryoprotectants added. // Journal of Food Engineering 2009. №94 p. 26-33.
23. Yang, T.S., and Froning, G.W. Selected washing processes affect thermal gelation properties and microstructure of mechanically deboned chicken meat. // Journal of Food Science 1992. № 57. P. 325-329.
24. Nowsand, A.A.K.M., Kanoh, S. and Niwa, E. Thermal gelation characteristics of breast and thigh muscles of spent hen and broiler and their surimi. Journal of Meat Science 2000. №54.p. 169-175.
25. Jin, S. K., Kim, I.S., Choi, Y.J., Kim, B.G. and Hur, S.J. The development of imitation crab stick containing chicken breast surimi. // Journal of Food Science and Technology 2009. № 42. P. 150-156.
26. Martín□ Sánchez, A. M., et al. Alternatives for efficient and sustainable production of surimi: A review // Comprehensive reviews in food science and food safety 2009. № 8.4 p. 359-374.
27. Vilhelmsson O. The state of enzyme biotechnology in the fish processing industry. // Trends Food Sci Technol 1997. № 8(8):p.266–70.
28. Carvajal PA, Lanier TC, MacDonald GA. Stabilization of proteins in surimi. In: Park JW, editor. Surimi and surimi seafood. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis Group. 2005. p 163–225.
29. Hultin HO, Riley C, inventors. Systems and methods for separating proteins from connective tissue. 2007 Apr 26. Patent WO/2007/046891.
30. Priyadarshini, B.; Xavier, K.M.; Nayak, B.B.; Dhanapal, K.; Balange, A.K. Instrumental quality attributes of single washed surimi gels of tilapia: Effect of different washing media. LWT 2017, 86, 385–392.
31. Somjid, P., Panpipat, W. and Chaijan, M. Carbonated water as a novel washing medium for mackerel (*Auxis thazard*) surimi production. // Journal of Food Science and Technology, 2017. № 54(12), p.3979– 3988. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2862-7>
32. Endoma, L. F., Gabo, J. H. C., Sargadillos, R. M., Condrellon, C. G., Francisco, W. A., Daet, I. P., ... & Muegue, M. F.

- SPhysico-chemical properties and sensory quality of surimi from bigtooth pomfret (*Brama orcini*) at different washing cycles. *Food Res*, 2022. № 6, p.266-274. Physico-chemical properties and sensory quality of surimi from bigtooth pomfret (*Brama orcini*) at different washing cycles (researchgate.net)
33. Chen, H.H.; Chiu, E.M.; Huang, J.R. Color and gel-forming properties of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) as related to washing conditions. *J. Food Sci.* 1997, 62, 985–991.
 34. Somjid, P., Panpipat, W., Cheong, L. Z., & Chaijan, M. Reduced washing cycle for sustainable mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) surimi production: Evaluation of bio-physico-chemical, rheological, and gel-forming properties. *Foods*, 2021. № 10(11), p.2717.
 35. Carvajal PA, Lanier TC, MacDonald GA. Stabilization of proteins in surimi. In: Park JW, editor. *Surimi and surimi seafood*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis Group. 2005. p 163–225.
 36. Park JW, Lin TM. Extraction of proteins from Pacific whiting mince at various washing conditions. // *J Food Sci* 1996. №61(2). P.432–38.
 37. Lin TM, Park JW. Effective washing conditions reduce water usage for surimi processing. // *J Aqua Food Prod Technol* 1997. № 6(2).p.65–79.
 38. Wu J, Li CY, Ho ML, Jiang ST. Quality improvement of mackerel surimi with NADPH- sulfite reductase from *Escherichia coli*. // *J Food Sci* 2000. №65(8). P.1400–3.
 39. Meacock G, Taylor KDA, Knowles MJ, Himonides A. The improved whitening of minced cod flesh using dispersed titanium dioxide. // *J Sci Food Agric* 1997. №73(2). P.221–5.
 40. Marchetti, Marion Daniela, et al. «Multi-Method Evaluation of Surimi Quality from a Bycatch Species (*Trachurus lathami*): Physicochemical, Textural, Sensory, and Thermal Responses to Washing Conditions.» *Food and Bioprocess Processing* (2025) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308525001348>.
 41. Amiza M. A. Effect of Washing Cycle and Salt Addition on the Properties of Gel from Silver Catfish (*Pangasius Sp.*) Surimi / M. A. Amiza and K. Nur Ain // UMT 11th International Annual Symposium on Sustainability Science and Management, 09th–11th July 2012, Terengganu, Malaysia. — 2012. — P. 485—490.
 42. Effect of muscle type and washing times on physico-chemical characteristics and qualities of surimi / Sang-Keun Jin <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877407000295> — affl, Il-Suk Kima, Su-Jung Kim, Ki-Jong Jeonga, Yeung-Joon Choi, Sun-Jin Hur // *Journal of Food Engineering*. — 2007. — Vol. 81, N 3. — P. 618—623.
 43. Chemical changes in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) minced muscle during frozen storage: Effect of a previous washing process / Afsaneh Asgharzadeh, Bahareh Shabanpour, Santiago P. Aubourg, Hedayat Hosseini // *Grasas y Aceites*. — 2010. — Vol. 61, N 1. — P. 95—101.
 44. Quality characteristics of common carp (*Cyprinus carpio*) surimi and kamaboko and the role of sarcooplasmic proteins / Khozaghi S. Jafarpour // RMIT University School of Applied Sciences. — 2008. — 216 p.
 45. Віннов О. С., Маєвська Т. М. Електроактивована вода в технології промитих рибних фаршів. Вода в харчових продуктах і для харчових продуктів : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, 16-17 трав. 2013 р. Харків : ХДУХТ, 2013. С. 5-6. <https://repo.btu.kharkiv.ua/bitstreams/f6770e46-f64b-4714-a29b-1304c3a025a6/download>
 46. Sun, X. D., & Holley, R. A.. Factors influencing gel formation by myofibrillar proteins in muscle foods. // *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 2011. № 10(1).p. 33-51.
 47. Zou, Hao, et al. «Processing suitability of three tilapia species for alternative freshwater surimi: A comprehensive evaluation from muscle physicochemical to gelling properties.» *Food Chemistry* (2025): 145540. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814625027918>
 48. Yang, Ruizhi, et al. «Factors influencing surimi gelling properties and natural additive-based gel fortification strategies: A review.» *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 24.1 (2025): e70067. <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1541-4337.70067>.
 49. Jin, S.K., Kim, I.S., Kim, S. J., Jeong, K. J., Choi, Y.J. and Hur, S. J. 2007. Effects of muscle type and washing times on physicochemical characteristic and qualities of surimi. *Journal of Food Engineering* 81: 618-623.].
 50. Trondsen, T. Blue whiting surimi: new perspectives on the market value. *Journal of Fisheries Research* 1998. №34. p. 1-15
 51. Phatcharat, S., Benjakul, S., Visessanguan, W. Effects of washing with oxidising agents on the gelforming ability and physicochemical properties of surimi produced from bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*). *Journal of Food Chemistry* 2006. №98. P. 431-439.
 52. Catarci, C 2007. Surimi market report - December 2007. Downloaded from <http://www.globefish.org/dynamisk.php?id=4356> on 18/10/2009.
 53. Diao, Dieynabou, et al. «Development and future prospects of 3D printed surimi products: A review.» *Applied Food Research* (2025): 100757. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772502225000678>
 54. Xiong, Yin, et al. «A novel method for high-temperature microwave 3d printing of golden thread surimi: Combination of thermally reversible gelatin and κ-carrageenan.» *Food Hydrocolloids* 161 (2025): 110856. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X24011305>.
 55. Kebede, B.. The Preservative Efficacy of Antimicrobial Proteins and Metabolites from Microorganisms, Animals and Plants as Potential Alternative to Chemical Food Preservation: A Review. *Food Sci. Qual. Manag.*, 2019. № 87, 34-54. [49349-libre.pdf \(d1wqtxs1xzle7.cloudfront.net\)](https://doi.org/10.1016/j.fsqm.2019.04.007)
 56. Безусов, А. Т., Манолі, Т. А., Нікітчина, Т. І., & Баришева, Я. О. Щодо питання про утворення біогенних амінів в харчових продуктах. *Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]*, 2018. 82, Вип. 2, С.40-46.
 57. WHO (2022, 2022/05/19/) Food safety fact sheet. World Health Organization. Retrieved November 01 from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>
 58. Njoagwuani EI, Onyeaka H, Mazi IM, Akegbe H, Oladunjoye IO, Ochulor CE, Omotosho AD, Odeyemi OA, Nwaiwu O,

- Tamasiga P Food safety in vulnerable populations: a perspective on the challenges and solutions. *FASEB J* 2023. № 37(5):e22872. <https://doi.org/10.1096/fj.202201713R>
59. Leistner L., Gould G.W. *Hurdle technologies*. Kluwer Academic. Plenum Publishers, New York, 2002. 194 p.
 60. Turgis, M., Stotz, V., Dupont, C., Salmieri, S., Khan, R., A. & Lacroix, M., “Elimination of *Listeria monocytogenes* in Sausage Meat by Combination Treatment: Radiation and Radiation Resistant Bacteriocins” *Radiation Physics and Chemistry*, 2012. № 81, p. 1185–118.
 61. Манолі, Т. А., Нікітчина Т.І., Баришева Я.О. Використання пряно-ароматичних екстрактів в технології рибних консервів з метою посилення консервуючого ефекту при зберіганні в умовах помірних позитивних температурах. Збірник праць 77-ї наук. конф. науково-викладацького складу академії. ОНТУ: Одеса, 2018. С.221 <https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/db962ae6-7dc2-437d-a192-01d08886c623/content>.
 62. Huq, T., Vu, K., D., Riedl, B., Bouchar, J. & Lacroix, M. “Synergistic Effect of Gamma(γ) Radiation and Microencapsulated Antimicrobial Against *Listeria monocytogenes* on Ready-To-Eat (RTE) Meat”, *Food Microbiology*, 2015. № 46, p. 507-514.
 63. Gao X, Zhang H, Liu L, Jia M, Li X, Li J Nano-biosensor based on manganese dioxide nanosheets and carbon dots for dual-mode determination of staphylococcus aureus. // *Food Chem* 2024. 432:137144. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137144>
 64. Zhao D, Zhang Z, Liu X, Zhang R, Xiao X) Rapid and low-temperature synthesis of n, p co-doped yellow emitting carbon dots and their applications as antibacterial agent and detection probe to sudan red I. *Mater Sci Eng.* 2021. P. 119:111468. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111468>
 65. Ezati P, Rhim J-W, Molaei R, Rezaei Z Carbon quantum dots-based antifungal coating film for active packaging application of avocado. // *Food Packag Shelf Life* 2022. № 33. P.100878. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100878>.
 66. Hoang NM, Ngoc NTB, Huong PTL, Huyen PTT, Duy DQ, Dao V-D, Tu LT (2023) Dual emission carbon dots for simultaneous detections of Pb²⁺ and Fe³⁺ ions in water via distinct sensing mechanisms. *J Fluoresc* 33(4):1359–1366. <https://doi.org/10.1007/s10895-022-03139-2>
 67. Pajewska-Szmyt M, Buszewski B, Gadzała-Kopciuch R Carbon dots as rapid assays for detection of mercury (II) ions based on turn-off mode and breast milk. *Spectrochim Acta A* 2020. 236:118320. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118320>.
 68. Cui, Z., Manoli, T., Nikitchina, T., & Mo, H. Trends in the manufacture of processed squid products. // *Food Science and Technology*, 2020. № 14(1). P. 89-97. <https://doi.org/10.15673/fst.v14i1.1650>
 69. Ramroop P., Neetoo H. Antilisterial activity of *Cymbopogon citratus* on crabsticks // *AIMS microbiology*. – 2018. – T. 4. – №. 1. – C. 67-84.
 70. Finani, N. I., & Rosida, D. F. Effect of Proportion of Jack bean Flour, Tapioca Flour, and Corn Starch on the Nutrition of Instant Milkfish Crabstick. *AJARCADE (Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment)*, 2025. № 9(1), p. 154-157.
 71. Rasco, B & Bledsoe, G. *Surimi and Surimi Analog Products*. In Hui, Y. H. CRC Taylor & Francis (eds) *Handbook of Food Science, Technology and Engineering*. Boca Raton, London, New York. 2006.
 72. Zhang, F., Fang, L., Wang, C., Shi, L., Chang, T., Yang, H., & Cui, M. Effects of starches on the textural, rheological, and color properties of surimi-beef gels with microbial transglutaminase. *Meat Science*, 2013. № 93(3), p. 533–537.
 73. Rosida, Dedin F *Buku Ajar Pati Termodifikasi dari Umbi-umbian Lokal dan Aplikasinya untuk Produk Pangan*. CV. Putra Media Nusantara, Surabaya. 2021.
 74. Lin, J.-H., Singh, H., Chang, Y.-T., & Chang, Y.-H. Factor analysis of the functional properties of rice flours from mutant genotypes. *Food Chemistry*, 2011. № 126(3), p. 1108–1114.
 75. Kusnandar, F., Winiati, P., Abdullah, M., & Umar, S. *Perspektif Global Ilmu dan Teknologi Pangan (Jilid 1)* PATPI. Bogor: PT. Penerbit IPB Press. 2020.
 76. Rahmawati, I., Liviawaty, E., Pratama, R. I., & Junianto. Carrageenan in Seaweed (*Eucheuma* sp.) and Use of Carrageenan in Fishery Food Products: A Review. // *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 2023. № 23(6), p. 1–10. <https://doi.org/10.9734/ajfar/2023/v23i6617>.
 77. Gómez-Guillén, M.C. & Montero, M.P. Polyphenol uses in seafood conservation. // *American Journal of Food Technology*, 2007. № 2(7). P. 593-601.
 78. Ucar, Y., Durmus, M., & Özogul, Y. Natural preservatives for fish and seafood. // *In Natural Preservatives for Food* 2025. pp. 193-220. Academic Press
 79. Smaoui, S., Chaari, M., Agriopoulou, S., & Varzakas, T. Green active films/coatings based on seafood by-products (chitosan and gelatin): a powerful tool in food packaging. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2025. № 15(6), p. 8331-8350.
 80. Siracusa, V. Packaging material in the food industry. // *In Antimicrobial food packaging* 2025. pp. 111-126. Academic Press.
 81. Quintavalla, S., Vicini, L. Antimicrobial food packaging in meat industry. // *Meat Science*, 2002. № 62: 373-380.

Отримано в редакцію 04.07.2025

Received 04.07.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Approved 02.09.2025

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ВОЛОГИ В БАГАТОЗОННИХ МІКРОХВИЛЬОВИХ СТРІЧКОВИХ СУШАРКАХ

Яровий І.І., к.т.н., доцент, Коцур І.О., аспірант, Анцефоров В.О. магістр,
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Показано актуальність процесів сушіння для сучасної промисловості та перспективність мікрохвильового способу сушіння та комбінованих способів на його основі. Наведено приклади реалізації технологій мікрохвильової обробки сировини (сушіння як базова технологія) зарубіжними виробниками, та приведено узагальнену оцінку найбільш суттєвих переваг мікрохвильової обробки вологих матеріалів. Надано обґрунтування вибору модульної конструкції для стрічкового універсального мікрохвильового сушильного апарата з широким спектром режимів обробки вологих сипучих матеріалів рослинного походження. Розглянута можливість використання експериментального способу параметризації процесу сушіння шляхом моделювання в багатозонних стрічкових мікрохвильових установках шляхом моделювання кінетики процесу сушіння в тестовому стенді з періодичною обробкою сировини (вологого матеріалу) в камері мікрохвильового впливу з заданою кількістю ітерацій. Перевірено дослідним шляхом можливість інтенсифікації процесу вологовідведення ініціацією механодифузійного режиму вологоперенесення на початковому етапі сушіння, визначено необхідні умови та обмежуючі фактори для утворення та повторення такого режиму видалення вологи в кожній наступній ітерації. Запропоновано обґрунтування для використання такої комбінації технологій видалення вологи та впливу механодифузійного ефекту і фільтраційного способу видалення вологи на кінцеву продуктивність такого комбінованого способу сушіння. Експериментально доведено для одного з типових видів сировини (гороху) можливість реалізації комбінованого мікрохвильового сушіння поєднаного з фільтраційним сушінням. Встановлено, що для сировини дослідженого виду ефективність комбінованого способу сушіння має типові залежності і пропорційна тривалості та потужності мікрохвильового періоду сушіння і мало залежить від тривалості циклу фільтраційного сушіння. Описано загальні принципи конструкції стрічкової, модульної сушильної установки з комбінованим способом сушіння сипкої рослинної сировини. Запропоновано конструкцію промислового зразка мікрохвильової стрічкової сушильної установки з модульним дизайном та можливістю реалізації комбінованого способу сушіння.

Ключові слова: мікрохвильове сушіння, комбіноване сушіння, фільтраційне сушіння, сушіння гороху, механодифузія.

Вступ. Процеси сушіння є невід'ємною та фундаментальною складовою технологічних циклів у харчовій та переробній промисловості. Ключова роль сушіння визначається не лише можливістю значно збільшити термін зберігання вологої сировини, що є критично важливим для мінімізації непродуктивних втрат та забезпечення харчової безпеки готової продукції, але й суттєвим економічним ефектом. Для окремих видів сировини, шляхом видалення вологи, яка може становити до 90% від загальної маси сировини, використання сушіння на ранніх етапах її переробки дозволяє знизити вагу та об'єм, що в свою чергу значно оптимізує логістичні витрати та спрощує транспортування. Зниження вологості сировини до технологічних норм, що мінімізують або унеможливають біохімічні та мікробіологічні процеси в сировині є основним способом її консервування для довготривалого зберігання, що дозволяє ефективно розподіляти та планувати подальшу переробку сировини, оптимізувати навантаження та режими технологічних ділянок переробних підприємств.

Актуальність. За різними оцінками, енерговитрати на сушіння харчової сировини можуть становити від 15% до 25% загального енергоспоживання переробного підприємства. У зв'язку з цим, пошук, розробка та впровадження більш ефективних, енергозберігаючих та ресурсощадних методів сушіння є пріоритетним напрямом досліджень для багатьох наукових колективів, університетів та інженерних компаній по всьому світу. Метою більшості таких досліджень є не тільки зниження енергетичних витрат процесу видалення вологи, а й підвищення якості готового (висушеного) продукту, що відповідає зростаючим вимогам технологів щодо збереження в готовому продукті максимальної кількості первинних корисних компонентів сировини, її смаку, кольору та аромату.

Традиційні методи сушіння. Незважаючи на постійний прогрес у галузевій інженерії, матеріалознавстві та технологічних науках, сушіння продовжує залишатися одним із найбільш енергоємних процесів в промисловості. Найбільш поширеним методом є конвективне сушіння. Конвективний метод використовує для передачі тепла від його джерела до поверхні сировини гаряче повітря - сушильний агент. Цей спосіб теплопередачі має свої переваги, він просто реалізується з величезною кількістю конструкцій адаптованих під різні види сировини, реалізується відносно простим і відповідно недорогим обладнанням, може достатньо просто масштабуватись для обробки великих потоків сировини. Ці переваги дозволяють конвективному

сушінню залишатись актуальним способом в багатьох галузях, зокрема в тих де відсутні альтернативи, а його недоліки менш виражені.

Недоліків конвективних технологій сушіння, тобто реалізованих за принципом конвективної теплопередачі, не менше ніж переваг: низька енергоефективність та висока ціна як наслідок використання цінного палива (природного газу), значна тривалість процесу сушіння, особливо при використанні “м'яких” режимів обробки, значні ризики перегріву поверхні продукту, що призводить до небажаних і суттєвих втрат корисних компонентів сировини, зміни кольору, смаку та зовнішнього вигляду готового продукту. Ці недоліки в різній мірі присутні у всіх реалізаціях конвективних сушильних технологій, і в залежності від ступеню їх прояву, виробники та споживачі сушильного обладнання не лише продовжують удосконалювати існуюче сушильне обладнання а й ведуть активний пошук нових способів сушіння.

З вищезгаданих недоліків найбільш суттєвим є невисока енергетична ефективність самого процесу конвективної передачі, цей недолік неможливо компенсувати або мінімізувати без зміни фізики процесу та без зменшення кількості конверсій видів енергії від енергії палива до тепла вологи у внутрішньому об'ємі частинок сировини, що висушується [1]. В умовній конвективній сушарці енергія проходить п'ять етапів перетворень та зміни потенціальних рівнів: хімічна енергія палива перетворюється в тепло продуктів його згоряння, змішуванням з атмосферним повітрям зменшується потенціал продуктів згоряння до необхідного для сушильного агента, далі цей потік транспортується до вологого матеріалу і шляхом змішування (продування) сушильного агента з частинками цього матеріалу створюються умови для тепломасообмінного процесу між потоком сушильного агента та поверхнею частинок вологого матеріалу і лише як результат такого тривалого ланцюга перетворень, тепло від поверхні частинок передається внутрішнім їх шарам одночасно з ними нагріваючи цільовий компонент - вологу, що в них знаходиться. Загальна кінетика такого процесу визначається кількома параметрами на кожному етапі, тож не дивно, що сушіння залишається одним з найскладніших серед технологічних процесів харчової галузі.

Висока питома теплота пароутворення води вимагає значних витрат енергії для її переведення з рідкого стану в газоподібний, що практично не залишає шансів для винайдення способів зниження вологи матеріалу з енерговитратами нижчими ніж теоретичний мінімум в 0,63 кВт/год (2260 кДж/кг), необхідний для її випарювання. В реальних процесах, коли нагріванню піддається не лише волога а й сам матеріал сировини, матеріал конструкції сушарки та тепловий агент, то разом з непродуктивними тепловими втратами тепла в навколишнє середовище (з відпрацьованим агентом та нагрітими поверхнями конструкцій) енергетичні витрати на випаровування 1 кг вологи для кращих зразків зерносушарок з рекуперацією тепла сушильного агента складають 3,8 - 4,0 МДж/кг і можуть досягати 7,0 МДж/кг і більше для таких видів сушильної техніки як барабанні та стрічкові сушарки (в залежності від режимів обробки та характеристик сировини).

Зменшити енергетичні витрати в процесах сушіння можливо лише ситуативно, на окремих етапах або в окремих режимах. Усунути загальний для конвективних способів сушіння недолік - неефективну передачу тепла від його джерела до вологи в матеріалі можливо лише відмовившись від функції сушильного агента та змінивши спосіб теплопередачі [2].

Інші традиційні методи сушіння займають невелику за обсягом долю серед технологічних процесів галузі і не є прямими конкурентами конвективному сушінню. Наприклад, вакуумне сушіння, процес якого відбувається при зниженому тиску і відповідно з меншою ніж 100 °C температурі кипіння води. Метод ідеально підходить для термолабільної сировини, але є більш витратним і технічно складним внаслідок використання вакууму. Ще один приклад - сублімаційне сушіння, процес видалення вологи відбувається шляхом прямого переходу льоду в пару (сублімації) в умовах глибокого вакууму. Процес дозволяє максимально зберегти структуру, колір та корисні властивості продукту, однак є одним найдорожчих способів, що значно обмежує його застосування.

Інноваційні методи сушіння. Один з найбільш перспективних напрямів у пошуку нових способів сушіння, які будуть вільні від недоліків традиційних технологій, базується на використанні електромагнітної енергії. Основним з таких способів є мікрохвильове (МХ) сушіння [3]. Основною відмінністю мікрохвильового сушіння від традиційних способів є принцип нагрівання вологи в матеріалі. Мікрохвилі проникаючи всередину матеріалу, взаємодіють з молекулами води по всьому об'єму вологих частинок матеріалу, що забезпечує майже миттєвий початок процесу розігрівання вологи та її рівномірне подальше видалення. Висока швидкість процесу нагрівання вологого матеріалу при “адресному” підведенні енергії безпосередньо до молекул води визначає високу продуктивність МХ сушіння, забезпечує високу контрольованість процесу нагрівання, його самовирівнювання, відсутність перегріву поверхневостей частинок та нижчі температури процесу, і як наслідок - кращі показники збереження якісних показників продукту. До переваг МХ сушіння також відносять високу екологічність, так як відсутні будь які викиди в навколишнє середовище а для нагрівання використовується лише електрична енергія, універсальність технології - можливість використання МХ установок як для сушіння різних видів сипучої сировини (боби, зерна, трави, деталі, тощо.) так і для стерилізації сировини і готової (навіть упакованої) продукції, біоактивації насіння та досушування або попереднього нагріву матеріалу в тандемі з традиційними видами сушіння.

Як недоліки, у МХ сушіння визначають наявність ризику нерівномірного нагріву внутрішньої структури частинок вологого матеріалу, який зростає при інтенсивних режимах сушіння, недостатньо високий к.п.д.

перетворення електричної потужності в електромагнітне МХ поле, відносно невелику продуктивність МХ сушарок, якої недостатньо для обробки великих потоків сировини на зразок пшениці. До недоліків також відносять високу вартість як капітальних так і експлуатаційних витрат на спеціалізоване обладнання для створення МХ випромінювання необхідної потужності.

Зважаючи на таку комбінацію переваг та недоліків, технології МХ сушіння все ще залишаються спеціалізованим продуктом, розвиваючись в тих галузях де такі їх переваги як: швидкісне сушіння, об'ємний нагрів, багаторежимність і керованість та можливість супутньої стерилізації сировини чи продукту є визначальними. Узагальнений огляд МХ обладнання представленого на азійському ринку дозволяє зробити висновки про типи МХ обладнання, що пропонується та моделі його використання в технологічних процесах. Пропозицій МХ обладнання на відомому китайському сайті не просто багато, запит за ключовими словами "microwave drying machine" видає понад сотню сторінок і близько трьох тисяч позицій. Видача має багато дублювань, проте наявність навіть третини чи десятої частини оригінальних пропозицій дозволяє зробити висновок про обсяг ринку МХ сушіння [4].

Серед пропозицій мають місце: тунельні (стрічкові, безперервні) сушарки, камерні (періодичної дії) - атмосферні та вакуумні, лабораторні установки, апарати для прискорення хімічних реакцій та інше МХ обладнання. Вартість рішень коливається в широких межах, стартуючи від ~ 3 - 10 тисяч USD і до 30 тисяч USD (в середньому) за один комплекс. За своїм призначенням МХ обладнання позиціонується як багатопрофільне пропонуючи режими обробки для різних матеріалів від типової сировини: фруктів, бобових, кавових зерен, спецій, чаю та трав до сушіння комах, м'яса, стерилізації органічних матеріалів, полімеризації пластиків та обробки деталей з дерева. Характерним показником МХ обладнання є споживана електрична потужність, в доступних специфікаціях МХ обладнання фігурують цифри від 10 кВт до сотні і навіть більше на одну установку. При цьому більшість виробників ведуть гнучку політику пропонуючи масштабуємі рішення з різними продуктивністю, потужністю та габаритами, а відповідно і ціною, пристосовуючись таким чином до потреб споживача. Загальний вид конструкцій саме стрічкових МХ сушарок дає можливість зробити висновок про те, що типовий дизайн та технічні рішення для такого обладнання вже визначено і відпрацьовано виробниками, а МХ сушіння поступово переходить з категорії інноваційних технологій до виробничих. Тож наступним етапом розвитку сушильних МХ технологій має бути їх удосконалення, пошук можливостей для підсилення переваг МХ сушіння та компенсування чи мінімізації недоліків а також адаптація типових технічних рішень до конкретних умов, регламентів та ділянок харчових виробництв.

Обґрунтування напрямку дослідження. Як наступний етап розвитку технології МХ сушіння розглядається можливість комбінування МХ сушіння з іншими технологіями [5-9]. Наприклад, комбінація мікрохвильового і конвективного сушіння дозволяє мінімізувати недоліки кожної з технологій і забезпечити високу ефективність процесу при максимальному збереженні вихідної якості висушеного продукту. Пошук оптимальних варіантів серед комбінованих технологій сушіння є актуальною тематикою досліджень і для модернізації сушильного обладнання. Серед найбільш перспективних комбінованих з МХ способів сушіння можна назвати комбіноване з інфрачервоним сушінням, з вакуумним, з конвективним в декількох варіантах. Якщо аналізувати такі комбіновані варіанти з позиції енергоефективності, то однозначних висновків про їх економічність зробити не можна, енергетичні витрати при таких комбінованих варіантах будуть суттєво збільшуватись порівняно з чистим МХ сушінням.

Серед традиційних способів, що претендують успішно на комбінування з мікрохвильовим сушінням можна розглянути механічне відведення вологи як найбільш енергоефективне [10]. Питанням залишається спосіб виділення вологи з частинок матеріалу при якому може утворюватись поверхнева волога яку в подальшому можливо відділити від потоку матеріалу механічним способом.

Визначення мети та завдань дослідження. Якщо розглянути можливість ініціалізувати в процесі МХ сушіння механодифузійний режим [11] для виведення вологи на поверхню частинок, а в якості процесу для механічного розділення потоку матеріалу і виведеної на поверхню вологи використати принципи фільтраційного сушіння, то виникає можливість створити комбінований спосіб з високою енергоефективністю, теоретично - з енерговитратами меншими від енергетичного мінімуму в 2260 кДж/кг по відведеній волозі. Для реалізації цієї мети слід вирішити наступну послідовність задач: визначити умови та обмеження для утворення стійкого механодифузійного режиму вологовидалення з утворенням на поверхні частинок шару вільної вологи достатнього для механічного видалення; визначити достатні параметри повітряного потоку для процесу фільтраційного вологовидалення з потоку тонкого шару обробленої МХ полем сировини; розробити та реалізувати методику дослідження запропонованого комбінованого способу сушіння.

Теоретичні основи процесу. Фізичні принципи нагрівання вологого матеріалу в електромагнітному мікрохвильовому полі достатньо добре вивчені та описані в багатьох роботах, наприклад [12-14]. Основною рушійною силою процесу нагрівання вологи є потужність електромагнітного МХ поля, яка і визначає інтенсивність "молекулярного тремтіння" молекул води в матеріалі і відповідно кількість тепла яке виділяється при такій взаємодії. Особливістю МХ нагрівання є також співнаправленість градієнтів вологості, температури і тиску, що виникають внаслідок МХ впливу, всі вони однаково направлені, від центру кожної частинки матеріалу до її поверхні. При достатній кількості вільної вологи в частинках матеріалу, при інтенсивному МХ нагріванні, у внутрішніх, найбільш вологих шарах частинок, зокрема в капілярах, мають виникати обла-

сті з високою температурою та тиском, які створюватимуть між внутрішніми шарами та поверхнею частинок інтенсивні потоки вологи, у вигляді випареної та вільної води. Вільна волога “виштовхнута” паровими пухирями з капілярів об’єму частинок на її поверхню може залишитись не випареною, внаслідок недостатньо високої температури поверхні частинок. Такий фізичний ефект описаний як “механодифузія” більш детально розглянуто в роботі [15]. Наступним етапом має бути фільтраційне сушіння, яке в даному варіанті процесу полягатиме в інтенсивному продуванні шару матеріалу атмосферним повітрям з швидкістю потоку достатньою для “зривання” шару вологи з поверхні частинок матеріалу і виведенням її у вигляді капель за межі сушильної зони, без витрат енергії на її випарювання.

Для реалізації описаного способу сушіння необхідно виконати декілька умов: висушуваний матеріал повинен мати частинки з достатньою кількістю вологи, тоді інтенсивне МХ нагрівання високовологого матеріалу буде мати невеликий вплив на його первинні якісні характеристики, шар матеріалу має бути достатньо тонкий та повітрепроникний для ефективного продування шару повітрям. По мірі зменшення кількості вологи в матеріалі ефективність комбінованого режиму буде падати. Контролюючи кількість видаленої продувом вологи слід визначити момент завершення етапу комбінованого сушіння і перейти до простого МХ сушіння знизивши при цьому інтенсивність МХ нагрівання не припиняючи при цьому «вентилювання» шару матеріалу.

Матеріали та методи дослідження: Об’єктом дослідження процесу зневоднення рослинної сировини з використанням технологій мікрохвильового та фільтраційного сушіння. Предметом даного дослідження є кінетика видалення вологи з тонкого, рухомого шару рослинної сировини під впливом комбінації циклічної дії МХ поля та продувки повітрям.

Виходячи з типового для стрічкових МХ сушарок конструктиву у вигляді послідовного розташування МХ камер об’єднаних спільним тунелем для проходження конвеєрної стрічки з плоским шаром матеріалу,



Рис. 1 – Загальний вигляд дослідного стенду: зліва – вентилятор продувки, справа – МХ камера (мікрохвильова піч) з фрагментами транспортних тунелів, всередині камери – касета з матеріалом.

що обробляється, для експериментального моделювання даного процесу було виготовлено дослідний стенд у вигляді однієї МХ камери з фрагментом транспортного тунелю. Стрічка конвеєра моделюється плоскою прямокутною касетою на якій розміщується зразок у вигляді плоского шару частинок матеріалу, конструкція стенду має привід для переміщення касети через МХ камеру з заданою швидкістю, моделюючи таким чином рух транспортної стрічки. Дно касети виготовлено сітчастим для можливості продувки шару матеріалу потоком повітря,

для створення потоку повітря достатньої швидкості в тунелі, на виході МХ камери прорізано щілеподібний отвір, через який окремо встановлений вентилятор втягує повітря через шар матеріалу, що проходить над ним. Таким чином моделюється фільт-

раційна складова процесу вологовидалення після проходження касети з шаром матеріалу етапу нагрівання в МХ камері. Загальний вигляд стенду та схема його будови приведено на рис. 1 та 2.

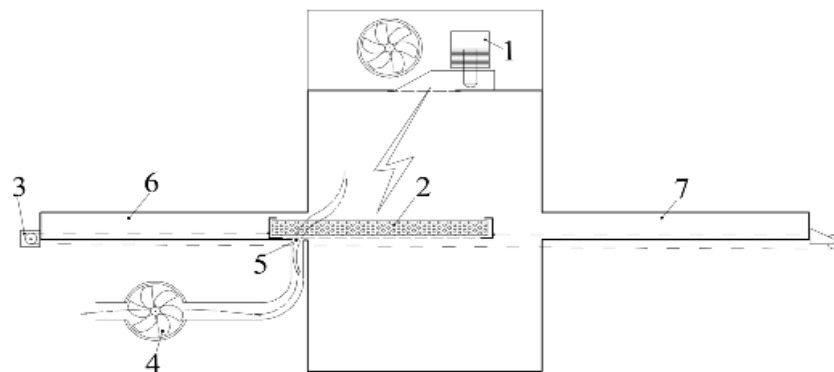


Рис. 2 – Схема дослідного стенду для експериментального моделювання процесу комбінованого сушіння

Основна ідея експерименту полягала в тому, щоб фізично змодельовати процес впливу МХ та фільтраційного способів сушіння на зразок матеріалу (вага, вологість, зовнішній вигляд, структура шару) розміщений на фрагменті транспортної стрічки конвеєра. Послідовно переміщаючи касету із зразком спочатку через МХ камеру а потім над вікном фільтраційного сушіння на зразок здійснювався вплив еквівалентний проходженню ним одного сушильного модуля сушарки. Далі касета із зразком зважувалась і фотографувалась для оцінки змін. Повторними циклами моделювався вплив наступних сушильних камер, дослід імітував роботу умовної дванадцятизонної сушарки, тому продовжувався відповідну кількість циклів або зупинявся при появі ознак термічного пошкодження матеріалу.

В якості МХ камери в стенді використано мікрохвильову піч з типовим для таких застосувань магнетроном Witol 2M217J потужністю 0,6 кВт, розміри касети (моделі фрагменту стрічки) склали 18 на 19 см., швидкість руху касети встановлювалась в діапазоні від 11 мм/с до 1,67 мм/с., продування шару матеріалу при фільтраційному етапі сушіння здійснювалось атмосферним повітрям при температурі 18-20 °С та вологості 55-60%. В якості матеріалу для сушіння обрано горох з початковою вологістю 35-36% виміряної вологоміром «Wille-66», боби гороху, з гладкою сферичною поверхнею розміщувались в межах касети щільним шаром в ~1,5 боба, маса зразка складала 200-220 гр. в різних дослідях. Процес досліджувався на п'яти різних швидкостях переміщення касети. Максимальна швидкість відповідала найбільш короткочасному впливу, тобто «м'якому» режиму обробки, найменша швидкість – відповідно найбільш «жорсткому» режиму обробки. Вимірювання ваги касети здійснювалось після кожного циклу обробки лабораторними вагами з роздільною здатністю 0,1 гр. та діапазоном вимірювання до 6000 гр.. Вимірювання температури поверхні шару матеріалу в касеті проводилось за допомогою інфрачервоного безконтактного термометра, що забезпечує роздільну здатність 0,1 °С.

Результати експериментів та їх обговорення.

В ході серії експериментів встановлено наступні залежності. Як і в попередніх дослідженнях, підтверджено, що кількість видаленої вологи прямо пропорційна тривалості впливу та має близьку до лінійної залежність від потужності МХ впливу. Графіки на рис. 3. ілюструють зростання кількості видаленої вологи в залежності від кількості проходів через сушильну камеру та зворотною залежність від швидкості стрічки (касети зі зразком), тобто пряму залежність від експозиції (тривалості) сушіння і відповідно від кількості підведеної до зразка енергії.

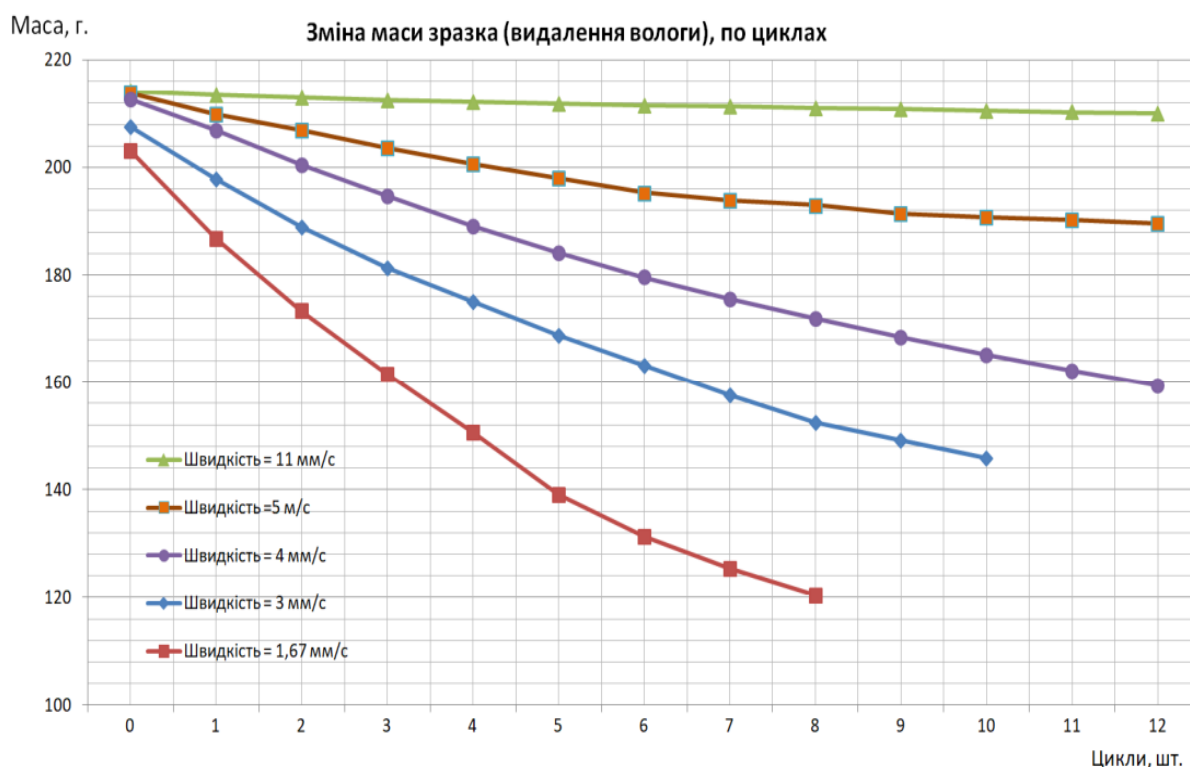


Рис. 3 – Графіки залежності кількості видаленої вологи від кількості циклів сушіння

Як і очікувалось, швидкість видалення вологи в перших циклах сушіння була високою і зменшувалась в наступних, відповідно до зменшення кількості вільної вологи в матеріалі.

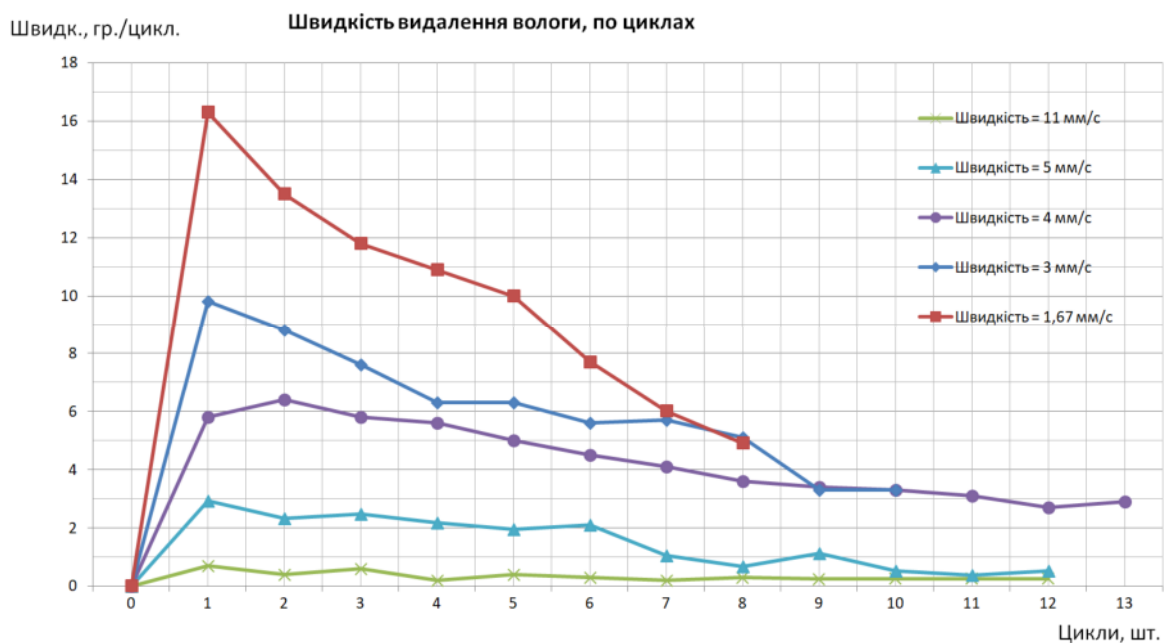


Рис. 4 – Графіки залежності швидкості видалення маси води з матеріалу в залежності від кількості циклів сушіння

Вимірювання температури поверхні шару матеріалу проводилось по закінченню кожного циклу, отримані лінії росту температур в залежності від кількості циклів обробки показано на рис. 5. Так як температура всередині частинок є вищою за температуру їх поверхні, для жорстких режимів сушіння вона досягатиме 100 °С і більше. Через складність технічної реалізації, вимірювання температури внутрішніх шарів частинок матеріалу не проводилось, візуальний контроль зовнішнього стану зразка дозволив встановити, що на швидкості 3 мм/с, на сьомому циклі обробки проявляється інтенсивне розтріскування зовнішньої оболонки бобів а на мінімальній дослідженій швидкості розтріскування проявляється вже на третьому циклі а на восьмому вже проявляються сліди обвуглювання матеріалу.

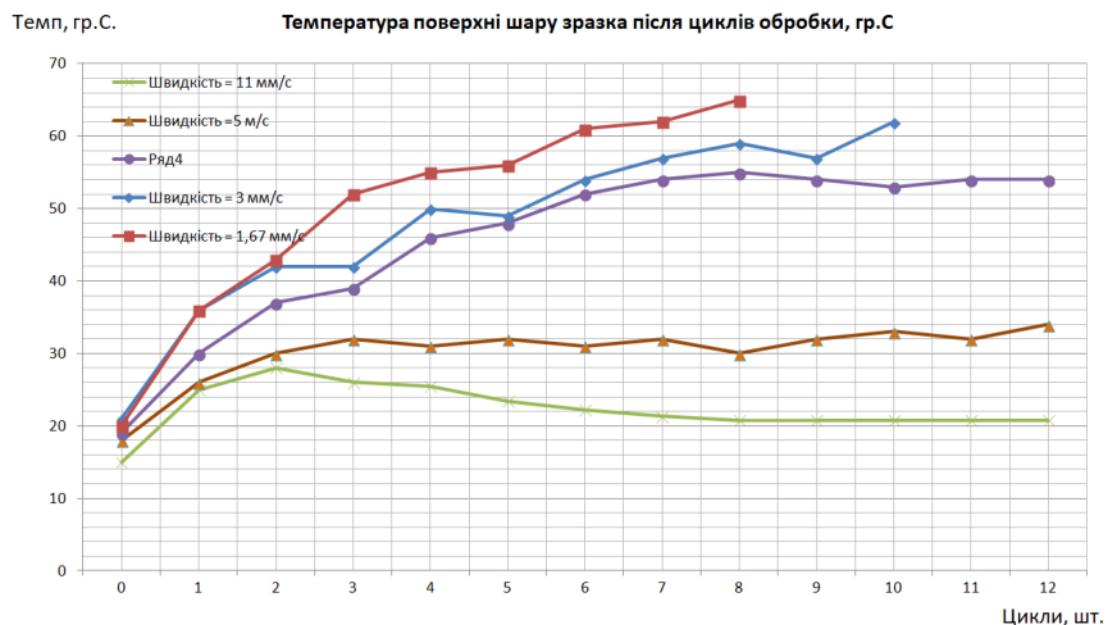


Рис. 5 – Графіки зміни температури поверхні зразка в залежності від кількості циклів сушіння

Зважаючи на те, що тривалість циклів сушіння є різною в залежності від швидкості стрічки (касети) досліджені залежності представлені також в часовому вимірі. На рис. 6 відображено залежність кількості видаленої води від тривалості обробки матеріалу. Для кожної швидкості (експозиції) сушіння зберігається пропорційна залежність як від тривалості процесу так і від підведеної потужності.

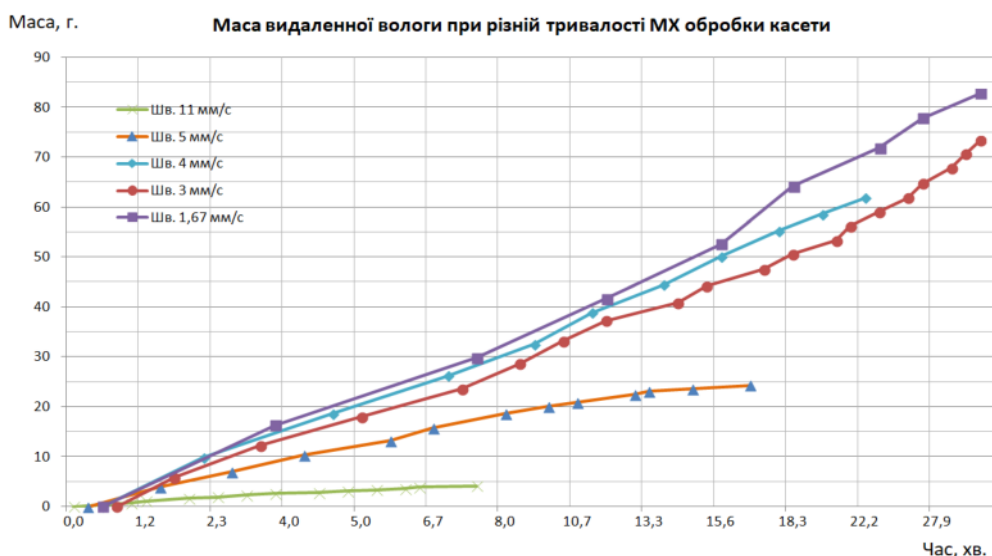


Рис. 6 – Залежності кількості видаленої зі зразка вологи від тривалості обробки

Швидкість видалення вологи зі зразка має найбільше значення на початку процесу обробки та досягає 4 %/хв. для жорстких режимів обробки, слід відмітити, що падіння швидкості вологовидалення відносно плавне і при завершенні процесу все ще складає близько 2 %/хв..

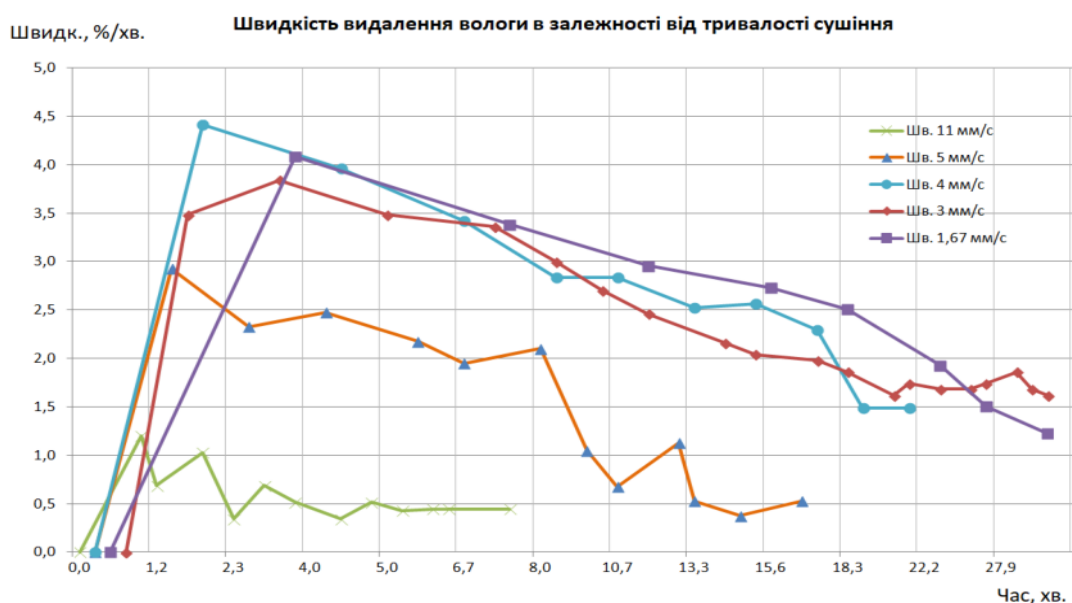


Рис. 7 – Залежності зміни швидкості видалення вологи від тривалості обробки

Питома потужність, що підводилась до зразка складала постійне значення (магнетрон працював у штатному режимі без переривань) і при початковій «netto» вазі матеріалу зразка 200-210 гр. складала 2,85 кВт/кг. вологого продукту.

Додатково до описаних вище дослідів проведено серію експериментів з дослідженням впливу тривалості фази фільтраційного сушіння на сумарний результат вологовидалення комбінованим способом. Для встановлення такої залежності фізично змінювались розміри прямокутного вікна (позначене як 5 на рис. 2) розташованого по всій ширині транспортного тунелю на виході МХ камери. Максимальна ширина вікна складає 20 мм., для уникнення витoku випромінювання простір вікна перекритий металевою сіткою. Ширина вікна в досліді змінювалась в межах 20, 15, 10 та 5 мм., швидкість потоку повітря при цьому регулювалась частковим перекриттям повітрепроводу таким чином, щоб потік повітря над вікном в тунелі залишався в межах 7-8 м/с. Інші параметри процесу (матеріал, потужність енергопідведення, швидкість переміщення касети) не змінювались. В результаті серії дослідів встановлено, що на середніх швидкостях (3, 4, 5 мм/с) тривалість етапу фільтраційного сушіння малозначимо впливає на результуючу кількість видаленої вологи, проте відсутність етапу продування шару матеріалу приводить до появи шару вологи на поверхні частинок після проходження зразком МХ камери.

Висновки та перспективи. За результатами проведеного дослідження визначено параметри доцільного режиму обробки для такої сировини як боби гороху. Виходячи з отриманих результатів можна запропонувати наступний комплекс характеристик для вибору або розробки стрічкової МХ сушарки з комбінованим способом сушіння для впровадження в технологічні процеси з таким рослинним матеріалом як горох. В якості типового режиму для розрахунку продуктивності та вибору конструктивних параметрів сушарки доцільно прийняти товщину шару гороху в 1-2 боби з початковим навантаженням стрічки близько 6 кг/м^2 . При типовій швидкості стрічки 4 мм/с та величині питомого енергопідведення $2,5 - 3 \text{ кВт/кг}$, при наявності 12 сушильних модулів, продуктивність сушарки з стрічкою шириною 1 м. складе близько 86 кг/год по вологому продукту, або 43 кг/год для більш раціональної за конструкцією сушарки з шириною стрічки $0,5 \text{ м}$. При зазначених параметрах процесу і конструктивних параметрах сушарки можливо розраховувати на типове зменшення вологості гороху на $\sim 3\%$ після проходу кожної з перших 6 сушильних камер і подальшого зниження вологості на $2,0 - 1,0 \%$ після проходу кожної наступної сушильної МХ камери.

Очевидно, що такий експериментальний спосіб визначення параметрів доцільного режиму обробки цільового матеріалу та кількості циклів сушіння для досягнення бажаного, кінцевого значення вологості готового продукту є недосконалим. Проте альтернативний варіант з аналітичним моделюванням є апіорі складно реалізуємим через велику кількість змінних факторів [16, 17].

Визначивши експериментально доцільну тривалість процесу, кількість сушильних модулів та розрахувавши можливі рівні продуктивності, провівши дослідження кінетики процесу в діапазоні допустимих швидкостей стрічки можливо визначити достатні параметри МХ обладнання: потужність сушильних модулів, діапазон регулювання швидкості стрічки та інтенсивність продувки шару матеріалу. При необхідності, також можливо, експериментально визначити доцільні розміри частинок (наприклад для різаних фруктів, овочів) та спосіб їх розміщення на стрічці. Далі орієнтуючись на необхідну питому потужність з розрахунку на вагу матеріалу, що одномоментно знаходиться в МХ камері, слід визначити загальну електричну споживану потужність МХ сушарки (або одного її модуля) необхідну для обробки цільового матеріалу з заданою продуктивністю та в межах заданих технологічних параметрів.

Подальшими кроками у проведенні дослідження можливостей комбінованого способу сушіння є розробка деталізованого варіанту конструкції МХ установки для сушіння гороху та схожих на нього за будовою і властивостями матеріалів.

References

1. Burdo, O. G. (2010). *Evolution of drying installations* [Monograph]. Odesa: Poligraf.
2. Burdo, O. G., Trishin, F. A., & Gavrillov, A. V. (2021). Electrodynamics processes as an effective solution of food industry problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 57(3), 330–340. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
3. Burdo, O. G., et al. (2016). Electrodynamics processes as an effective solution of food industry problems. *International Journal of Engineering Research and Application*, 6(3, Part 4), 144–150.
4. Alibaba.com. (n.d.). *Microwave drying machine*. <https://www.alibaba.com/showroom/microwave-drying-machine.html>
5. Kumar, C., & Karim, M. A. (2019). Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(3), 379–394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
6. Szadzińska, J., & Mierzwa, D. (2021). The influence of hybrid drying (microwave-convective) on drying kinetics and quality of white mushrooms. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 167, 108532. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108532>
7. Kumar, C., Joardder, M. U. H., Farrell, T. W., & Karim, M. A. (2017). Investigation of intermittent microwave convective drying (IMCD) of food materials by a coupled 3D electromagnetics and multiphase model. *Drying Technology*, 36(6), 736–750. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1354874>
8. Zhang, L., & Wang, W. (2020). Optimization of hot-air microwave combined drying control system based on potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.ijfst.2020.110638>
9. Brown, M., et al. (2023). Recent developments in the hybridization of the freeze-drying technique in food dehydration. *Foods*, 12. <https://doi.org/10.3390/foods12183437>
10. Kotsur, I. (2024). Study of corn dehydration processes under combined electromagnetic and centrifugal fields. *Scientific Works*, 88(1), 84–89. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2965>
11. Yarovy, I. I., & Ali, V. P. (2020). Initiation of mechano-diffusion moisture removal regime in plant material drying processes. In *Energy. Business. Comfort: Proceedings of the Scientific and Practical Conference* (pp. 12–77). Odesa: ONAFT. <https://www.onaft.edu.ua/download/konfi/2020/Collection-of-abstracts-EBC2020.pdf>
12. Burdo, O. G., Terziev, S. G., & Ruzhytska, N. V. (2013). Generalization of experimental studies of coffee sludge extraction. *Scientific Works of Odesa National Academy of Food Technologies*, 44(2), 334–337. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2013_44%282%29_82
13. Smith, J., & Johnson, M. (2019). Combined microwave vacuum drying. *Food Science and Technology International*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.foodsci.2019.110638>

14. An, N. N., Li, D., Wang, L. J., & Wang, Y. (2022). Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: An updated understanding. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(9), 2618–2633. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2124947>
15. Burdo, O. G., et al. (2020). System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials. *Problemy Regionalnoy Energetiki*, 46(1), 92–104. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
16. Sharma, G. P., & Prasad, S. (2001). Mathematical modeling of microwave drying of beans (*Vicia faba* L.), peas (*Pisum sativum*), and tomatoes (*Rio grande*) in thin layer. *Journal of Food Engineering*, 48(3), 209–216. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00133-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00133-2)
17. Gavrilov, A., Bezbakh, I., Mordynskyi, V., & Burdo, O. (2018). Study of energy technologies of plant raw material dehydration processes. *Scientific Works*, 82(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1023>

EXPERIMENTAL MODELING OF THE KINETICS OF MOISTURE REMOVAL PROCESS IN MULTIZONE MICROWAVE BELT DRYERS

Yarovi I.I., Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Kotsur I.O., Postgraduate Student,
Antseforov V. O., Master's Student
Odesa National Technological University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The relevance of drying processes for modern industry and the prospects of microwave drying and combined methods based on it are demonstrated.*

Examples of technologies for microwave processing of raw materials (with drying as the basic technology) implemented by foreign manufacturers are provided, and a generalized assessment of the most significant advantages of microwave processing of wet materials is presented. The rationale for choosing a modular design for a universal conveyor-belt microwave dryer with a wide range of processing modes for wet bulk materials of plant origin is given. The possibility of using an experimental method for parameterizing the drying process by simulating it in multi-zone conveyor-belt microwave installations is considered. This is done by modeling the drying process kinetics in a test bench with periodic processing of the raw material (wet material) in a microwave exposure chamber with a set number of iterations.

The possibility of intensifying the moisture removal process by initiating a mechano-diffusion moisture transfer regime at the initial drying stage was experimentally verified. The necessary conditions and limiting factors for the formation and repeatability of such a moisture removal regime in each subsequent iteration were determined. A justification for using this combination of moisture removal technologies and the impact of the mechano-diffusion effect and the filtration drying method on the final productivity of such a combined drying method is proposed.

The feasibility of implementing combined microwave drying paired with filtration drying was experimentally proven for one typical type of raw material (peas). It was established that for the investigated type of raw material, the efficiency of the combined drying method has typical dependencies: it is proportional to the duration and power of the microwave drying period and is less dependent on the duration of the filtration drying cycle.

The general principles of the design of a conveyor-belt, modular drying unit with a combined drying method for bulk plant raw materials are described. A design for an industrial prototype of a microwave conveyor-belt drying unit with a modular design and the possibility of implementing the combined drying method is proposed.

Keywords: microwave drying, combined drying, filtration drying, pea drying, mechano-diffusion.

Список використаної літератури

1. Бурдо, О. Г. Эволюция сушильных установок [Текст] : монография / Бурдо О. Г.. - Одеса : Поліграф, 2010. - 368 с. : табл., рис. - Бібліогр.: 122 назв. - ISBN 978-966-8788-98-7.
2. Бурдо О. Г., Трішін Ф. А., Гаврилов А. В. та ін. Electrodynamic processes as an effective solution of food industry problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. Vol. 57. No. 3. P. 330–340. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
3. O.G. Burdo. et.al. *Int. Journal of Engineering Research and Application* www.ijera.com ISSN : 2248-9622, Vol. 6, Issue 3, (Part -4) March 2016, pp.144-150
4. Microwave Drying Machine. <https://www.google.com/search?q=Alibaba.com> : сайт. URL: <https://www.alibaba.com/showroom/microwave-drying-machine.html> (дата звернення: 10.09.2025).
5. Kumar, C. and Karim, M. A. (2019) Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (3). pp. 379-394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
6. Szadzińska J., Mierzwa D. The influence of hybrid drying (microwave-convective) on drying kinetics and quality of white mushrooms. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2021. Volume 167. P. 108532. ISSN 0255-2701. DOI: 10.1016/j.cep.2021.108532.
7. Kumar, C., Joardder, M. U. H., Farrell, T. W., & Karim, M. A. (2017). Investigation of intermittent microwave convective drying (IMCD) of food materials by a coupled 3D electromagnetics and multiphase model. *Drying Technology*, 36(6), 736–750. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1354874>

8. Li Zhang, Wei Wang. (2020). Optimization of hot-air microwave combined drying control system based on potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*, 55. DOI 10.1016/j.ijfst.2020.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
9. Michael Brown, et al. (2023). Recent Developments in the Hybridization of the Freeze-Drying Technique in Food Dehydration. *Foods* (MDPI), 12. DOI 10.3390/foods12183437. [MDPI] <https://doi.org/10.3390/foods12183437>
10. Коцур, І. (2024). ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ КУКУРУДЗИ В УМОВАХ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ВІДЦЕНТРОВИХ ПОЛІВ. *Scientific Works*, 88(1), 84-89. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2965>
11. Яровий І.І., Алі В.П., Ініціювання механодифузійного режиму видалення вологи в процесах сушіння рослинної сировини // *Енергія. Бізнес. Комфорт: матеріали науково-практичної конференції* (26 листопада 2020р.). – Одеса : ОНАХТ, 2020. С. 12-77. - Режим доступу: <https://www.onaft.edu.ua/download/konfi/2020/Collection-of-abstracts-EBC2020.pdf>
12. Бурдо О. Г., Узагальнення експериментальних досліджень екстрагування шламу кави / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзієв, Н. В. Ружицька // *Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]*. - 2013. - Вип. 44(2). - С. 334-337. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2013_44%282%29_82
13. John Smith, Maria Johnson. (2019). Combined Microwave Vacuum Drying. *Food Science and Technology International*, 25. DOI 10.1016/j.foodsci.2019.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
14. An, N. nan, Li, D., Wang, L. jun, & Wang, Y. (2022). Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: an updated understanding. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(9), 2618–2633. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2124947>
15. System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials / Burdo O. G. et al. *Problemy Region. Energ.* 2020. Vol. 46, No. 1. P. 92–104. DOI: 10.5281/zenodo.3898317.
16. Sharma G. P., Prasad S. Mathematical Modeling of Microwave Drying of Beans (*Vicia faba* L.), Peas (*Pisum sativum*) and Tomatoes (*Rio grande*) in Thin Layer. *Journal of Food Engineering*. 2001. Vol. 48, No. 3. P. 209–216. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00133-2.
17. Гаврилов, А., Безбах, І., Мординський, В., & Бурдо, О. (2018). Дослідження енерготехнологій процесів зневоднення рослинної сировини. *Scientific Works*, 82(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1023>

Отримано в редакцію 11.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 11.06.2025
Approved 02.09.2025

ДЕРИВАТОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРНА СОРГО ДЛЯ ПОППІНГУ

Жигунов Д.О., проф., д-р техн. наук, Тимчак Д.О., здобувач ОНС «Доктор філософії»
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. У статті розглянуто особливості процесу отримання повітряного зерна сорго за допомогою НВЧ-обробки з урахуванням впливу початкової вологості зерна на показники виходу та якості готового продукту. Встановлено, що під час виробництва поп-сорго вирішальну роль відіграють поп-властивості сировини, серед яких найбільш важливими є вихід готового продукту, а також його органолептичні та товарні характеристики, зокрема зовнішній вигляд, запах і смак.

Для підтвердження отриманих результатів було проведено дериватографічний аналіз, який дозволив простежити залежність процесів теплової деструкції та структурних змін у зерні від рівня вологості перед обробкою. Отримані результати дослідження підтвердили важливість оптимального режиму зволоження для забезпечення ефективного попінгу зерна сорго.

Експериментальні дані показали, що найбільший вихід повітряного зерна можливо отримати при вологості 15,0 %, що забезпечило показник на рівні 91,6 %. При зниженні вологості до 13,0 % вихід становив 87,9 %, тоді як збільшення вологості зерна перед обробкою мало негативний вплив на ефективність процесу: при 17,0 % показник зменшився до 70,6 % (зниження на 23 %), а при 19,0 % – до 50,1 % (зменшення на 46 %). Це може пояснюватися тим, що за надлишкової вологи частина енергії витрачається на випаровування, а процеси утворення внутрішнього тиску та розриву оболонки зернини відбуваються менш інтенсивно.

Органолептична оцінка підтвердила, що зерно з початковою вологістю 15,0 % забезпечувало найкращі споживні властивості готового продукту – рівномірність розкриття, приємний смак і запах. При цьому, зразки, отримані при вологості 17,0 та 19,0 %, характеризувалися наявністю підгорілих частинок, що погіршувало товарні властивості, збільшувало кількість відходів і створювало потенційну небезпеку для здоров'я споживачів через можливе утворення канцерогенних сполук, зокрема акриламід.

Таким чином, результати досліджень свідчать, що оптимальним для НВЧ-обробки сорго з метою отримання якісного повітряного продукту є рівень початкової вологості зерна 15,0 %, що забезпечує не лише максимальний вихід, а й високі товарні характеристики готової продукції.

Ключові слова: дериватографія, зерно сорго, повітряне зерно, попінг, поп-сорго, надвисокочастотна обробка, технологія виробництва повітряного сорго

Вступ. Упродовж останніх років на світовому ринку спостерігається стійка тенденція до зростання попиту на харчову продукцію, виготовлену із застосуванням технології попінгу зернової сировини. Показовим прикладом є виробництво попкорну, обсяги якого у 2011–2016 роках зросли приблизно на 20 % [1]. Сучасний темп зростання ринку зернових продуктів, отриманих в результаті попінгу, становить від 5,6 % до 7,5 % на рік [2]. Цей стійкий ріст може бути обумовлений кількома факторами.

По-перше, спостерігається зростання попиту на зручні та готові до вживання закуски, що відповідають сучасним тенденціям здорового харчування. По-друге, технологія попінгу дозволяє зберігати поживні властивості зерна, зокрема високий вміст клітковини та низький вміст жиру, що робить такі продукти привабливими для споживачів, які прагнуть до здорового способу життя.

Загалом, технологія попінгу зернової сировини сьогодні розглядається як перспективний напрямок у виробництві здорових та функціональних харчових продуктів. Попінг забезпечує поліпшення засвоюваності крохмалю, підвищує органолептичні властивості готового продукту та сприяє зменшенню вмісту патогенних мікроорганізмів завдяки термічній обробці [3].

Водночас, для успішного впровадження технології у виробництво необхідне детальне вивчення фізико-хімічних та термічних характеристик зернової сировини. Це дозволяє не лише оптимізувати параметри процесу попінгу, а й розробити якісні продукти із заданими споживчими властивостями, що відповідають сучасним вимогам ринку та споживачів.

Літературний огляд. Попінг являє собою інтенсивний короткотривалий термічний процес, що поєднує явища клейстеризації крохмалю та його структурного розширення під дією високотемпературного впливу [4]. Механізм цього процесу полягає у швидкому випаровуванні води, що міститься в ендоспермі, з утворенням насиченої пари, яка створює надлишковий тиск усередині зернівки, призводячи до руйнування перикарпії та різкого збільшення об'єму ендосперму. Внаслідок цього формується пориста структура продукту з покращеними органолептичними та функціонально-технологічними характеристиками. Поряд з цим відбувається часткова стерилізація та зменшення мікробіологічного обсіменіння сировини, підвищується біодоступність крохмалю внаслідок його клейстеризації, а також спостерігається часткова деградація харчо-

вих волокон [5].

Отримане в результаті попінгу повітряне зерно є готовим та самостійним продуктом, але може застосовуватися також в якості сировини у виробництві закусок, спеціалізованих харчових продуктів, а також як основа для створення функціональних та дієтичних харчових систем. Водночас здатність зернової сировини до попінгу обумовлена сукупністю морфологічних та фізико-хімічних параметрів, і притаманна вона не всім видам зернових культур. Традиційно для отримання повітряного зерна використовують кукурудзу та рис [3]. Дослідження щодо застосування інших культур, зокрема сорго, представлені нечисленними науковими повідомленнями [3, 4, 6].

Сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) належить до провідних зернових культур світу, поступаючись за масштабами вирощування та виробництвом кукурудзі, пшениці, рису та ячменю [7]. У ряді країн Африки, Азії та Індії зерно сорго є базовою продовольчою культурою, тоді як в Україні останніми роками демонструє зростаючу динаміку посівних площ, переважно в умовах степової зони. Найбільші площі зосереджені у посушливих регіонах – Миколаївській, Херсонській, Одеській та Дніпропетровській областях [8]. Встановлена здатність зерна сорго до попінгу визначає доцільність подальших досліджень щодо оптимізації технологічних параметрів цього процесу [4, 6, 9].

Серед технологічних методів отримання повітряного зерна застосовують традиційне «сухе» нагрівання, обробку розігрітою сіллю, термообробку у псевдозрізженому шарі гарячого повітря, обсмаження в олії та вплив електромагнітного випромінювання надвисокої частоти (НВЧ) [3]. Останній метод набуває дедалі більшого поширення завдяки скороченню тривалості обробки, збереженню поживних речовин та рівномірності прогрівання об'єму продукту [10, 11].

НВЧ-обробка широко використовується для термічної підготовки, розморожування, сушіння, знезараження [12, 13] та попінгу зернових культур, зокрема кукурудзи, рису, сорго, гречки та амаранту [3, 5, 6, 14-16]. Її переваги зумовлені об'ємним нагріванням продукту внаслідок поглинання енергії електромагнітних хвиль із частотою 300 МГц – 300 ГГц, що забезпечує високу рівномірність температурного поля та мінімізує термічну деградацію біологічно цінних компонентів.

Дослідження термічних перетворень у процесі попінгу зерна сорго потребує використання інструментальних методів, здатних фіксувати комплексні масові та теплові зміни у функції температури та часу. Дериватографічний аналіз, який поєднує термогравіметричні (TG), диференційно-термічні (DTA) та диференційно-температурно-гравіметричні (DTG) вимірювання, є ефективним методом для оцінювання фізико-хімічних характеристик та кінетики термічних процесів у зерновій сировині [17]. Його застосування у дослідженні повітряного зерна сорго дозволяє встановити критичні температури фазових переходів, визначити етапи термічного розкладання та сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації параметрів технології попінгу.

Метою роботи є встановлення термічних характеристик зерна сорго, придатного для виробництва повітряного зерна, за допомогою дериватографічного аналізу з метою оптимізації параметрів процесу попінгу та підвищення якості готового продукту.

Матеріали і методи досліджень. Для проведення досліджень було використано зерно сорго сорту «Фулгус» з різною вологістю 13,0; 15,0; 17,0; 19,0 %, об'ємною масою 870 г/л та масою 1000 зерен 32 г. За органолептичними показниками якість досліджуваного зерна відповідала вимогам чинної нормативної документації — ДСТУ 4962:2008 «Сорго. Технічні умови». Усереднений хімічний склад зерна характеризувався вмістом 73 % крохмалю, 8 % сирого протеїну та 2 % сирі клітковини.

Дослідження форм зв'язку вологи у зернівці сорго виконували методом диференціально-термічного аналізу (DTA) на дериватографі «Паулік-Паулік-Ердей» моделі Q-1500D. Для аналізу використовували кварцеві тиглі з вагою зразка близько 1 г. В якості еталонного матеріалу застосовували попередньо прожарений при температурі 1800 °C оксид алюмінію (Al₂O₃). Температурний режим нагріву передбачав лінійне збільшення температури зі швидкістю 2,5 °C/хв до максимальної межі 250 °C.

Під час досліджень реєстрували термоаналітичні криві, що відображали зміну температури (T), втрату маси зразка (TG), диференційно-термічний сигнал (DTA), а також швидкість зміни маси (DTG). Такий підхід дозволяє визначити кінетичні параметри процесу, а також характер і температурні інтервали формування зв'язку вологи з компонентами зерна.

Отримані дані використовували для оцінки термічної стабільності зерна сорго, визначення критичних температурних меж клейстеризації та деградації, що є необхідними для оптимізації технології попінгу та покращення якості повітряного зерна.

Обробку НВЧ-опроміненням здійснювали у мікрохвильовій печі Samsung (Корея) із робочою частотою 2450 МГц при потужності 700 Вт за тривалості процесу 150 с. Після проведення процесу попінгу, повітряні зерна були відділені від «не зірваних» зерен. Зерна вважалися повністю «зірваними», якщо при візуальному огляді не було виявлено «не зірваного» ендосперму. Вихід повітряного зерна визначали за методикою [16].

Визначення органолептичних показників якості повітряних зерен проводили відповідно чинної нормативної документації (ДСТУ 2903:2005 Концентрати харчові. Сніданки сухі. Загальні технічні умови).

Результати досліджень та їх обговорення. Застосування термогравіметричного аналізу та суміжних методів для дослідження змін характеристик зерна сорго, призначеного для попінгу, є ключовим етапом у

комплексних дослідженнях фізико-хімічних та біологічних властивостей цього продукту. Такі дослідження мають важливе значення як для розширення фундаментальних знань про харчові продукти, що забезпечують життєдіяльність людини, так і для розробки оптимальних технологічних режимів виробництва високоякісної харчової продукції. У рамках роботи було проведено чотири контрольні експерименти, результати яких наведені на рис. 1-4.

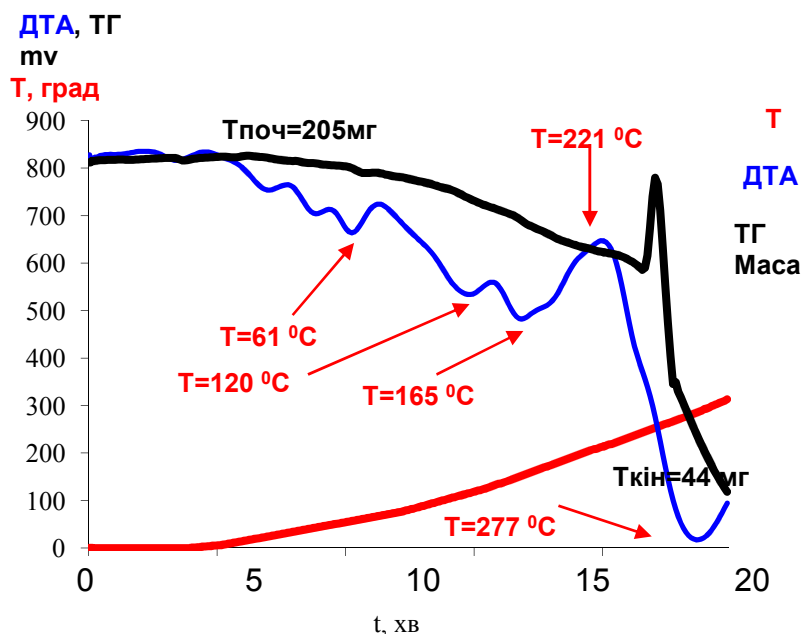


Рис. 1 – Дериватограма зразку зерна сорго з початковою вологістю 13,0 %

При використанні наважки зерна сорго масою 205 мг і вологості 13,0 %, під час нагріву в межах заданих температур спостерігаються три ендотермічні піки на диференціально-термічних кривих (ДТА) при температурах 61°C, 120°C і 165°C. Ці піки відображають додаткове поглинання теплової енергії зв'язаною вологою, процес спучування та підготовки зерна до явища попінгу, що відбувається при температурі близько 221°C із формуванням повітряного зерна. Подальше розтріскування зерна супроводжується викидом частинок за межі платинового тигля та зміною маси зразка, що фіксується термогравіметрично (ТГ) (рис. 1). Після завершення процесу залишається близько 44 мг сухого залишку, що відповідає ступеню перетворення натищеного зерна сорго на повітряне зерно у 78,5 % від початкової маси при заданій вологості.

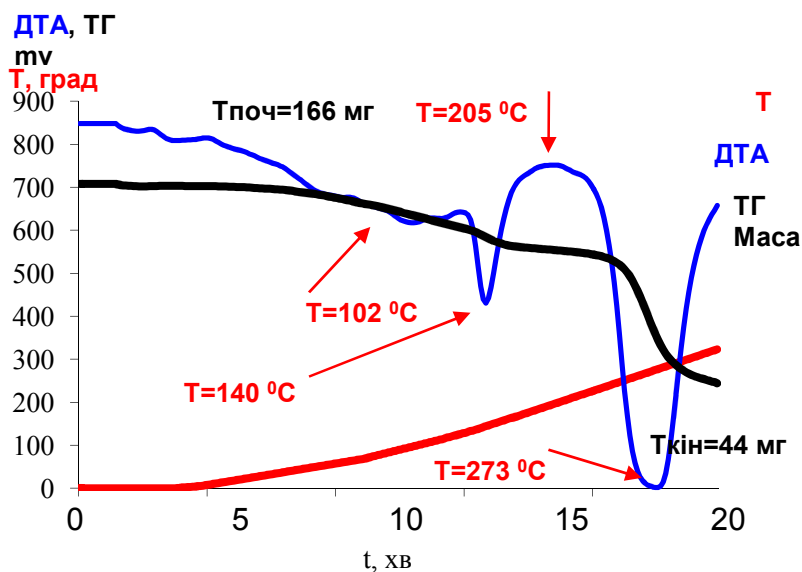


Рис. 2 – Дериватограма зразку зерна сорго з початковою вологістю 15,0 %

При збільшенні вихідної вологості зерна до 15,0 % (рис. 2) спостерігається подібна термічна поведінка, однак температура явища попінгу зміщується у бік зниження до приблизно 205°C. Це, на нашу думку,

пов'язано з підвищенням парової фази в зерні, що підтверджується появою більш низькотемпературних ендотермічних піків при 102°C та 140°C. Даний факт сприяє зниженню енергетичних витрат у процесі виробництва повітряного зерна із зерна сорго. Ступінь перетворення у цьому випадку становить 73,5 % маси.

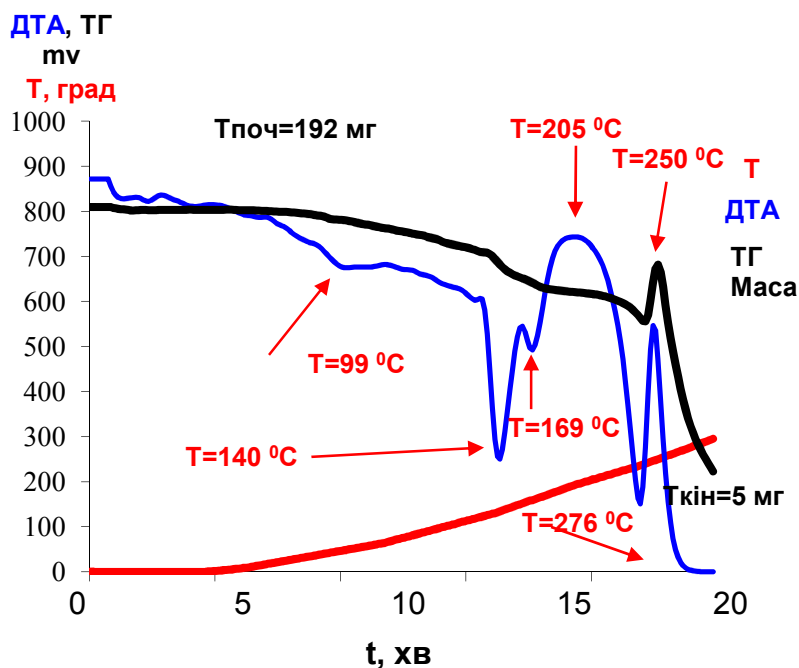


Рис. 3 – Дериватограма зразку зерна сорго з початковою вологістю 17,0 %

При подальшому збільшенні вологості зерна до 17,0 % (рис. 3) термічні процеси залишаються майже аналогічними до випадку 15,0 % вологості, однак додатково фіксується ще один ендотермічний ефект при температурі 169°C, який інтерпретується як нагрів капілярно зв'язаної води із залученням її до термофізичних процесів. Ця особливість сприяє суттєвому підвищенню ступеня перетворення зерна сорго на попінг – до 97,45 % маси.

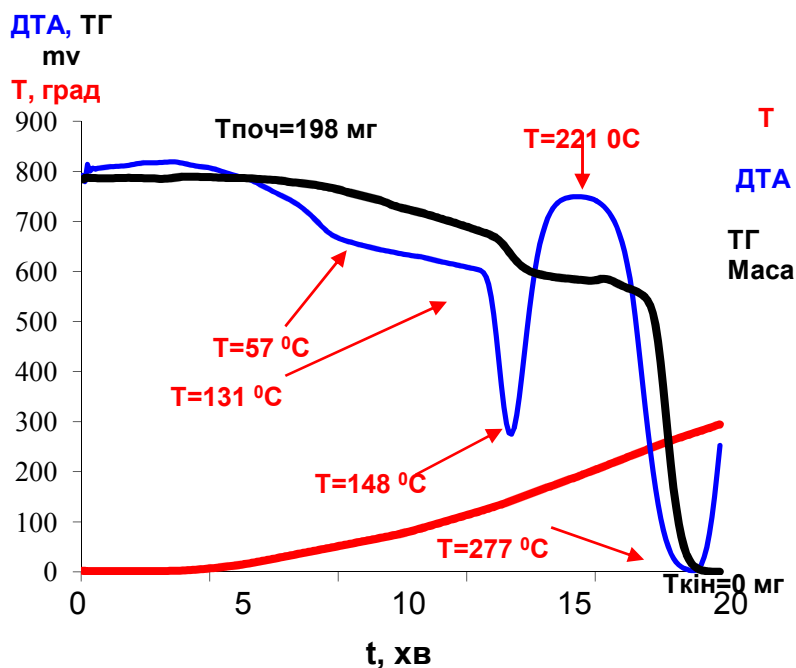


Рис. 4 – Дериватограма зразку зерна сорго з початковою вологістю 19,0 %

Оптимальними умовами за даного дослідження для формування повітряного зерна сорго вважається вологість на рівні 19,0 %, температура явища попінгу 221°C, а також наявність значущих ендотермічних ефектів при 57°C, 131°C і 148°C (рис. 4). При цих параметрах досягається максимальний ступінь перетворення –

100 %. Подальше підвищення температури призводить до виникнення процесів згоряння отриманого повітряного продукту, що підтверджується даними термогравіметричного аналізу (ТГ).

При виробництві повітряного зерна велику роль грають так звані поп-властивості зерна, зокрема вихід повітряного зерна, та товарні властивості готового продукту, тобто зовнішній вигляд, смак і запах повітряного зерна. Для підтвердження отриманих даних дериватографії було проведено дослідження процесу поп-пінгу зерна сорго при тих самих рівнях вологості. Отриманий повітряний продукт було оцінено за показником виходу повітряного зерна (рис. 5) та органолептичними властивостями.

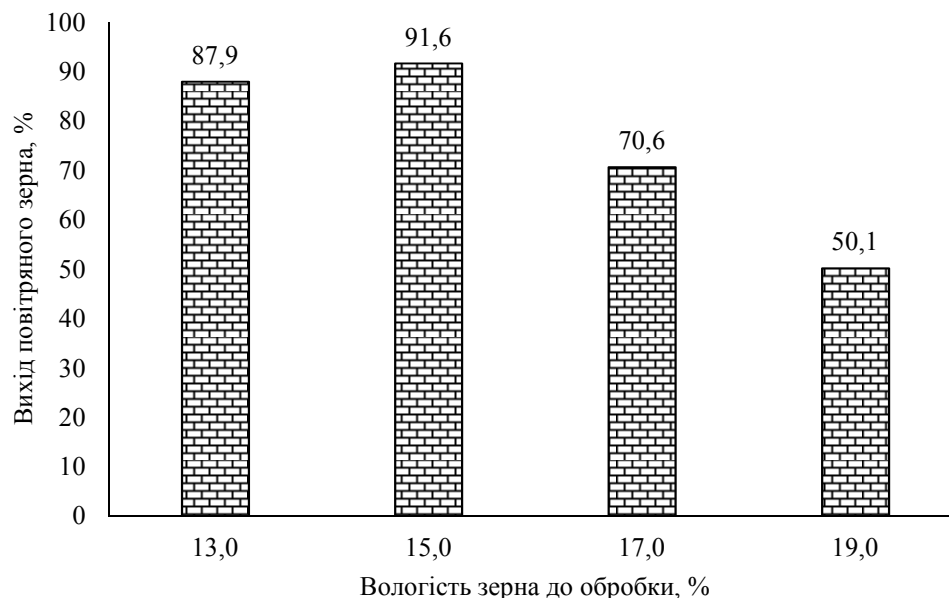


Рис. 5 – Вихід повітряного зерна при НВЧ-обробці

Як видно з даних на рис. 5, найбільшого виходу повітряного продукту вдалося досягти при вологості зерна сорго до НВЧ-обробки на рівні 15,0 %. Подальше збільшення вологості до 17,0 та 19,0 % перед обробкою призводило до різкого зниження показника на 23 та 46 % відповідно, що вказує на негативний вплив надлишкової кількості вологи. Це пояснюється тим, що у більш вологому зерні процеси утворення внутрішнього тиску та розриву оболонки відбуваються менш інтенсивно, а частина енергії витрачається на випаровування надлишкової вологи.

При цьому зерно сорго з початковою вологістю 15,0 % забезпечує не лише максимальний вихід, але й кращі товарні характеристики повітряного продукту – рівномірність розкриття, приємний смак і запах, що робить його більш конкурентоспроможним у порівнянні з продуктом, отриманим із зерна з нижчою або вищою вологістю. Зразки поп-сорго, які отримані з зерна з вологістю 17,0 та 19,0 % мали різну ступінь підгорілого продукту, що негативно впливає на товарні властивості, збільшує кількість відходів та несе потенційну небезпеку для здоров'я споживачів через утворення канцерогенних речовин, зокрема акриламід [18].

Встановлений раціональний рівень вологості в 15,0 % можна рекомендувати як контрольний параметр при промисловій підготовці зерна сорго до обробки НВЧ-енергією. Це дозволяє досягати максимального виходу готової продукції та стабільних органолептичних властивостей, що важливо для масштабування технології у харчовій промисловості.

Висновки. Проведені дослідження підтвердили ефективність застосування дериватографічного аналізу для комплексної оцінки термічних властивостей зерна сорго, що є ключовим етапом у розробці оптимальних параметрів технології попінгу. Встановлено, що вологість зерна суттєво впливає на температуру та характер фазових переходів, що визначають успішність процесу формування повітряного зерна. Зі збільшенням вологості спостерігається зниження температури явища попінгу, що свідчить про зміну термофізичних властивостей зерна і дозволяє оптимізувати енергетичні витрати при обробці.

Дослідження показали, що при вологості зерна близько 19,0 % досягається максимальний ступінь перетворення в нативного зерна в повітряне зерно (100 %), що є важливим показником для промислового застосування технології попінгу при кондуктивному нагріванні. Виявлення додаткових ендотермічних ефектів у процесі нагріву свідчить про складну взаємодію води з компонентами зерна, що впливає на кінетику термічних перетворень.

Оптимальна початкова вологість зерна сорго перед НВЧ-обробкою становить 15,0 %, що забезпечує максимальний вихід повітряного продукту. Збільшення вологості до 17,0 % і 19,0 % знижує цей показник на

23 % та 46 % відповідно, а також погіршує товарні властивості через нерівномірне розкриття і появу підгорілих зерен.

Зіставлення даних дериватографії та експериментів з НВЧ-поппінгу демонструє тісний взаємозв'язок між термічними характеристиками зерна та його поп-властивостями. Оптимальна вологість забезпечує найбільш сприятливий режим руйнування крохмальних і білкових структур, що сприяє формуванню якісного готового продукту.

Отримані результати дозволяють сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо регулювання вологості зерна сорго перед поппінгом, що сприятиме підвищенню якості та стабільності кінцевого продукту. Крім того, застосування НВЧ-обробки та подальший контроль термодинамічних параметрів процесу можуть стати перспективними напрямками для вдосконалення виробництва повітряного зерна сорго з покращеними функціональними характеристиками.

Таким чином, дослідження сприяють розширенню наукової бази щодо термічних перетворень зерна сорго та закладають фундамент для подальшої розробки інноваційних технологій у харчовій промисловості, орієнтованих на виробництво високоякісних і здорових зернових продуктів.

References

1. Bischof T. From grains and nuts to convenient snack bars. Diagram. The Buhler magazine. 2017. №175. P. 34–35.
2. United States Popcorn Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/united-states-popcorn-market>
3. Mishra, G., Joshi, D. C., & Panda, B. K. (2014). Popping and puffing of cereal grains: a review. *Journal of grain processing and storage*, 1(2), 34-46.
4. Nathakattur Saravanabavan, S., Manchanahally Shivanna, M., & Bhattacharya, S. (2013). Effect of popping on sorghum starch digestibility and predicted glycemic index. *Journal of food science and technology*, 50(2), 387-392.
5. Kuyanov Yu. Yu., Mykolenko S. Yu. Tekhnolohichni aspekty otrymannia «zirvanykh» zeren NVCh vyprominiuvanniam // Kharchova promyslovist. 2017. №22. S. 40–48.
6. Mishra, G., Joshi, D. C., & Mohapatra, D. (2015). Optimization of pretreatments and process parameters for sorghum popping in microwave oven using response surface methodology. *Journal of food science and technology*, 52(12), 7839-7849.
7. Hossain, M. S., Islam, M. N., Rahman, M. M., Mostofa, M. G., & Khan, M. A. R. (2022). Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8, 100300.
8. Bazaluk, O., Havrysh, V., Fedorchuk, M., & Nitsenko, V. (2021). Energy assessment of sorghum cultivation in Southern Ukraine. *Agriculture*, 11(8), 695.
9. Mishra, G., Joshi, D. C., Mohapatra, D., & Babu, V. B. (2015). Varietal influence on the microwave popping characteristics of sorghum. *Journal of cereal science*, 65, 19-24.
10. Swarnakar, A. K., Mohapatra, M., & Das, S. K. (2022). A review on processes, mechanisms, and quality influencing parameters for puffing and popping of grains. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), e16891.
11. Schambri, P., Brunet, S., Bailly, J. D., Kleiber, D., & Levasseur-Garcia, C. (2021). Effect of popcorn (*Zea mays* var. *evarta*) popping mode (microwave, hot oil, and hot air) on fumonisins and deoxynivalenol contamination levels. *Toxins*, 13(7), 486.
12. Buffler, Charles R. Microwave Cooking and Processing : Engineering Fundamentals for the Food Scientist. Van Nostrand Reinhold, 1993.
13. Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., Han, Z., & Cheng, J. H. (2017). Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 58-69.
14. Furmanova Yu. P. Tekhnolohiia kharchovoho produktu iz zerna hrechky: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: spets. 05.18.02 «Tekhnolohiia zernovykh, bobovykh, krupianykh produktiv i kombikormiv, oliinykh i lubianykh kultur». Kyiv: NUKhT. 2012. 20 s.
15. Lara, N., & Ruales, J. (2002). Popping of amaranth grain (*Amaranthus caudatus*) and its effect on the functional, nutritional and sensory properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(8), 797-805.
16. Tymchak, D. O., Kuianov, Y. Y., & Mykolenko, S. Y. (2018). Production of popped Sorghum with using microwave treatment. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 18(2).
17. Sadaka, S., & Atungulu, G. (2018). Grain sorghum drying kinetics under isothermal conditions using thermogravimetric analyzer. *Bioresources*, 13(1), 1534-1547.
18. Bocharova O. V., Yehorova A. V., Herko A. Otsiniuvannia bezpechnosti popkornu // Zernovi produkty i kombikormy. 2012. № 4. S. 34–36.

DERIVATIVE ANALYSIS OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SORGHUM GRAIN FOR POPPING

Zhygunov D., Dr. of Technical Sciences, Professor, Tymchak D., postgraduate
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. The article examines the peculiarities of obtaining popped sorghum grains by means of microwave (MW) treatment, with special attention to the influence of the initial grain moisture content on yield indicators and the quality of the final product. It was established that in the production of popped sorghum, the popping properties of the raw material play a decisive role. Among these, the most important are the yield of the finished product, as well as its organoleptic and commercial characteristics, in particular appearance, aroma, and taste.

To verify the obtained results, derivatographic analysis was carried out. This made it possible to trace the relationship between the processes of thermal destruction and structural transformations in the grain and the moisture level prior to treatment. The research findings confirmed the crucial role of an optimal pre-moistening regime for ensuring efficient sorghum popping.

Experimental data demonstrated that the highest yield of popped sorghum was achieved at a moisture content of 15.0 %, resulting in a yield of 91.6 %. When the moisture was reduced to 13.0 %, the yield decreased to 87.9 %. On the other hand, increasing the grain moisture before MW treatment had a negative impact on process efficiency: at 17.0 %, the yield dropped to 70.6 % (a 23 % reduction), while at 19.0 % it further decreased to 50.1 % (a 46 % reduction). This can be explained by the fact that under conditions of excessive moisture, part of the absorbed microwave energy is consumed by water evaporation. As a result, the processes of building internal pressure and rupturing the pericarp of the grain become less intensive, thus reducing the degree of expansion.

The organoleptic evaluation confirmed that sorghum with an initial moisture content of 15.0 % provided the best consumer properties of the final product, namely uniform grain popping, pleasant taste, and aroma. In contrast, samples obtained at moisture levels of 17.0 % and 19.0 % were characterized by the presence of burnt particles. This not only worsened the commercial properties of the product and increased the proportion of waste, but also posed a potential health risk for consumers due to the possible formation of carcinogenic compounds, including acrylamide.

Thus, the conducted research indicates that the optimal initial moisture level of sorghum grain for microwave treatment is 15.0 %. This regime ensures not only the maximum yield of popped grains, but also provides high commercial and consumer quality characteristics of the finished product. The combined use of experimental yield assessment, organoleptic evaluation, and derivatographic analysis confirms that maintaining the correct moisture level is a key factor in obtaining a safe, high-quality popped sorghum product suitable for further food use.

Keywords: derivatographic analysis, sorghum grain, popped grain, popping, pop-sorghum, microwave processing, technology of popped sorghum production

Список використаної літератури

1. Bischof T. From grains and nuts to convenient snack bars. Diagram. The Buhler magazine. 2017. №175. P. 34–35.
2. United States Popcorn Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/united-states-popcorn-market>
3. Mishra, G., Joshi, D. C., & Panda, B. K. (2014). Popping and puffing of cereal grains: a review. *Journal of grain processing and storage*, 1(2), 34-46.
4. Nathakattur Saravanabavan, S., Manchanahally Shivanna, M., & Bhattacharya, S. (2013). Effect of popping on sorghum starch digestibility and predicted glycemic index. *Journal of food science and technology*, 50(2), 387-392.
5. Куянов Ю. Ю., Миколенко С.Ю. Технологічні аспекти отримання «зірваних» зерен НВЧ випромінюванням // Харчова промисловість. 2017. №22. С. 40–48.
6. Mishra, G., Joshi, D. C., & Mohapatra, D. (2015). Optimization of pretreatments and process parameters for sorghum popping in microwave oven using response surface methodology. *Journal of food science and technology*, 52(12), 7839-7849.
7. Hossain, M. S., Islam, M. N., Rahman, M. M., Mostofa, M. G., & Khan, M. A. R. (2022). Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8, 100300.
8. Bazaluk, O., Havrysh, V., Fedorchuk, M., & Nitsenko, V. (2021). Energy assessment of sorghum cultivation in Southern Ukraine. *Agriculture*, 11(8), 695.
9. Mishra, G., Joshi, D. C., Mohapatra, D., & Babu, V. B. (2015). Varietal influence on the microwave popping characteristics of sorghum. *Journal of cereal science*, 65, 19-24.

10. Swarnakar, A. K., Mohapatra, M., & Das, S. K. (2022). A review on processes, mechanisms, and quality influencing parameters for puffing and popping of grains. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), e16891.
11. Schambri, P., Brunet, S., Bailly, J. D., Kleiber, D., & Levasseur-Garcia, C. (2021). Effect of popcorn (*Zea mays* var. *everta*) popping mode (microwave, hot oil, and hot air) on fumonisins and deoxynivalenol contamination levels. *Toxins*, 13(7), 486.
12. Buffler, Charles R. *Microwave Cooking and Processing: Engineering Fundamentals for the Food Scientist*. Van Nostrand Reinhold, 1993.
13. Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., Han, Z., & Cheng, J. H. (2017). Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 58-69.
14. Фурманова Ю.П. Технологія харчового продукту із зерна гречки: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.18.02 «Технологія зернових, бобових, круп'яних продуктів и комбікормів, олійних и луб'яних культур». Київ: НУХТ. 2012. 20 с.
15. Lara, N., & Ruales, J. (2002). Popping of amaranth grain (*Amaranthus caudatus*) and its effect on the functional, nutritional and sensory properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(8), 797-805.
16. Tymchak, D. O., Kuianov, Y. Y., & Mykolenko, S. Y. (2018). Production of popped Sorghum with using microwave treatment. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 18(2).
17. Sadaka, S., & Atungulu, G. (2018). Grain sorghum drying kinetics under isothermal conditions using thermogravimetric analyzer. *Bioresources*, 13(1), 1534-1547.
18. Бочарова О. В., Єгорова А.В., Герко А. Оцінювання безпечності попкорну // Зернові продукти і комбікорми. 2012. № 4. С. 34-36.

Отримано в редакцію 06.07.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 06.07.2025
Approved 02.09.2025

СУХА ПШЕНИЧНА КЛЕЙКОВИНА ЯК КОМПОНЕНТ РЕЦЕПТУРИ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ З ВИСОКОЮ ГІДРАТАЦІЄЮ ТІСТА

Жигунов Д.О., проф., д.т.н., Єнгібарян В.Г., здобувач освіти PhD, Мельник І.В., доц., к.т.н.
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. У статті розглянуто роль сухої пшеничної клейковини (СПК) як ключового функціонального інгредієнта у виробництві хлібобулочних виробів з високою гідратацією тіста, що поєднує ремісничі традиції з сучасними технологіями харчової науки. Детально проаналізовано фізико-хімічні властивості СПК, її білковий склад, зокрема співвідношення гліадинів та глютенінів, вплив на водопоглинання, еластичність та формування тривимірного білкового каркаса. Описано механізми, за якими СПК підсилює газоутримувальну здатність тіста, підвищує його стійкість до механічних та ферментаційних навантажень, а також сприяє рівномірному формуванню пористої структури м'якуша. Узагальнено дані експериментів, які підтверджують, що внесення СПК у кількості 3–5% до маси борошна забезпечує оптимальний баланс між об'ємом, структурою та органолептичними властивостями хліба, особливо при використанні борошна з низьким вмістом сирової клейковини або додаванням волокнистих інгредієнтів. Розглянуто вплив різних методів виробництва та сушіння СПК на її функціональні характеристики, зокрема роль температурно-вологісного режиму у збереженні розтяжності та міцності білкової сітки. Проаналізовано приклади сумісного застосування СПК з ферментними препаратами (амілази, ксиланази, глюकोзооксидаза, трансглютаміназа), окисниками (L-аскорбінова кислота) та відновниками (L-цистеїн), а також з молочними та рослинними білками й дієтичними волокнами для досягнення синергетичного ефекту. Особливу увагу приділено впливу СПК на харчову цінність хліба, підвищення вмісту білка та зміну амінокислотного профілю, а також аспектам безпечності для споживачів з непереносимістю глютену. Наведено перспективи використання СПК у класичних та інноваційних рецептурах, включаючи безглютенові аналоги, продукти з підвищеною функціональною цінністю та спеціалізовані дієтичні вироби.

Ключові слова: суха пшенична клейковина, високогідратоване тісто, реологічні властивості, об'єм хліба, структура м'якуша.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виробництво хлібобулочних виробів з високою гідратацією тіста сьогодні є одним із найдинамічніших напрямів у хлібопекарській промисловості, адже поєднує ремісничі традиції з інноваційними технологіями харчової науки. Рецептури, в яких вміст води перевищує 75 % від маси борошна (а іноді сягає 90 %), формують характеристики виробів — тонку хрустку скоринку, відкрити пористу структуру м'якуша, насичений аромат і триваліший термін свіжості. Підвищена гідратація інтенсифікує активність дріжджів, стимулює утворення газу та збільшує питомий об'єм, однак робить тісто рідкішим, менш пружним і більш вразливим до деформацій під час вистоювання та випікання, особливо коли потрібно зберегти форму. Ці фактори актуалізують потребу в ретельній оптимізації білково-клейковинного каркасу та розподілу вологи [1].

Сучасні дослідження підкреслюють, що оптимальна структура клейковинної мережі, яка зберігає цілісність при високій гідратації, досягається комбінацією часу для автолізу, м'якого механічного впливу, контролю ферментації та складних рецептурних змін. Серед інгредієнтів, які покращують водопоглинання та стабільність тіста, виділяють білки бобових, модифіковані крохмалі і β -глюкани, що підсилюють утримання газу, сприяють формуванню текстури і знижують темпи черствіння [2], [3].

В Україні впровадження технологій виробництва високогідратованого хліба стикається з додатковими викликами через непостійність якості пшеничного борошна: частка сирової клейковини зазвичай не перевищує 22–24 %, що недостатньо для формування стабільного тіста [4]. Причому в період 2023–2024 років спостерігалось збільшення частки фуражної пшениці через дощі перед збором врожаю, що погіршило експортні позиції України і зменшило доступність якісного зерна для помелу [5].

Це явище має декілька причин. По-перше, зміни агрокліматичних умов і логістики спричинили зростання частки пшениці з північних і західних регіонів, де вона має менший вміст білка. По-друге, економічні фактори (логістика в першу чергу) ускладнюють ефективне формування помельних партій зерна для стабілізації показників клейковини. По-третє, зосередження селекції на врожайності замість якості знизило технологічні властивості сучасних сортів [6]. В таких умовах суха пшенична клейковина стає стратегічним інгредієнтом: вона підвищує в'язкоеластичність тіста, стабілізує структуру, покращує газоутримання і дає змогу працювати з вітчизняною сировиною без залежності від дорогих імпортованих замінників.

Метою даної статті є аналіз та узагальнення літературних даних щодо використання сухої пшеничної клейковини як коректора технологічних властивостей борошна при виробництві хлібобулочних виробів, а саме виробів з високою гідратацією тіста. Для цього поставлено наступні завдання: проаналізувати хімічний склад сухої пшеничної клейковини, вивчити особливості виробництва сухої пшеничної клейковини; дослідити роль сухої пшеничної клейковини у формуванні структури тіста з високою гідратацією; проаналізувати

дозування та сумісний вплив СПК та різних технологічних добавок; вивчити вплив сухої пшеничної клейковини на поживну цінність і безпечність готової продукції

Виклад основного матеріалу дослідження. Суха пшенична клейковина (СПК) є продуктом, який концентрує основні білкові фракції ендосперму пшениці та являє собою високоцінний функціональний інгредієнт у хлібопекарській промисловості. Її отримують шляхом механічного відмивання крохмалю, водорозчинних цукрів, мінеральних речовин та небілкових компонентів з тіста, після чого вологу клейковину масу зневоднюють і сушать. У порівнянні зі звичайним пшеничним борошном суха клейковина має значно вищу концентрацію білка — як правило, 75–85 %, тоді як у борошні вищого ґатунку цей показник становить 10–14 % [7]. Така концентрація білків забезпечує їй унікальні фізико-хімічні властивості, завдяки яким вона ефективно використовується для корекції якості борошна, стабілізації тіста з високою гідратацією та підвищення харчової цінності продуктів.

Хімічний склад сухої пшеничної клейковини визначається наявністю двох основних класів запасних білків — гліадинів та глютенінів. Гліадини є одно- або низькополімерними білками з молекулярною масою приблизно від 30 до 80 кДа, які переважно розчинні у 70%-му етанолі. Вони надають тісту пластичності та розтяжності, але при надлишковій кількості можуть зменшувати його пружність. Глутеніни є високомолекулярними білками (>100 кДа), які утворюють полімерні агрегати, зшиті дисульфідними містками між цистеїновими залишками, та відповідають за еластичність, міцність і пружність тіста [8]. Співвідношення гліадинів і глютенінів в середньому становить близько 1:1, але воно варіює залежно від сорту пшениці, умов вирощування та технології виробництва СПК.

Амінокислотний склад сухої пшеничної клейковини є характерним для запасних білків злакових культур. Високий вміст глутамінової кислоти (до 35–40 % від загальної кількості амінокислот) та проліну (близько 10 %) зумовлює специфічну здатність білків глютенового комплексу до утворення β -спіральних та випадкових клубків, що робить структуру менш кристалічною та більш гнучкою [9]. Значна частка цистину (похідної цистеїну) забезпечує формування дисульфідних зв'язків, які є критичними для формування міцної тривимірної білкової мережі у тісті. Наявність фенілаланіну, тирозину та триптофану сприяє гідрофобним взаємодіям, що додатково стабілізують білкову структуру.

Фізико-хімічні властивості сухої пшеничної клейковини пояснюють її ключову роль у технології хлібопечення. Вона має високу еластичність, що забезпечує можливість утримувати газ, які утворюються під час бродіння, без розриву клейковинної сітки. Її в'язко-пружні властивості дозволяють тісту відновлювати форму після деформації, спричиненої механічним впливом або тиском газів. Водопоглинальна здатність сухої клейковини у середньому становить 150–200 % від її маси, що дає змогу не тільки зв'язувати вільну вологу у тісті, а й контролювати його консистенцію при роботі з борошном низької якості [9]. У виробках з високою гідратацією суха клейковина підвищує об'ємний вихід, сприяє утворенню більш рівномірної та стійкої пористої структури м'якуша, а також зменшує ризик розтікання заготовок.

Таким чином, суха пшенична клейковина – це концентрат запасних білків ендосперму пшениці, представлений фракціями гліадинів і глютенінів, який зазвичай містить (масова частка): білок 70–85%, вуглеводи 4–8%, ліпіди 2–4%, харчові волокна 1–2%, золу 0,5–2% та вологу 8–12%.

Виробництво сухої пшеничної клейковини є складним технологічним процесом, який включає етапи відбору зернової сировини, подрібнення, екстракції клейковинних білків, їх відокремлення від крохмалю та подальшого сушіння. Якість готової клейковини значною мірою залежить як від характеристик початкової пшениці (вміст білка, співвідношення гліадинів і глютенінів, активність ферментів), так і від вибраного технологічного способу (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика різних способів виробництва СПК

Технологічний спосіб	Вихідна сировина	Спосіб виділення клейковини	Спосіб сушки клейковини	Вид клейковини	Вихід клейковини	Технологічна складність
Альсантин	Зерно	Механічний	Конвективна сушка	Близька до нативної	Середній (до 25%)	Низька
Галле	Мука	Механічний	Конвективна сушка	Близька до нативної	Середній (до 30%)	Низька
Баттер	Мука	Механічний	Розпилювальна сушка	Близька до нативної	Високий (30–40%)	Низька
Дімлер	Мука	Механічний	Конвективна сушка	Близька до нативної	Середній (до 30%)	Низька
Тенстар	Мука	Механічний	Розпилювальна сушка	Близька до нативної	Середній (до 30%)	Низька
Фармарко	Мука	Механічний	Роликова сушка	Денатурована	Середній (до 30%)	Низька
Ельзаський	Зерно	Мікробіологічний	Конвективна сушка	Денатурована	Низький (20–30%)	Середня
Альтенбюргер	Зерно	Механічний	Конвективна сушка	Близька до нативної	Середній (до 35%)	Середня
Вечбер-Цвітсеріот	Мука	Механічний	Роликова сушка	Денатурована	Низький (до 20%)	Середня
Мартен	Мука	Механічний	Конвективна сушка	Близька до нативної	Високий (до 40%)	Середня
Феска	Мука	Хімічний	Розпилювальна сушка	Денатурована	Низький (до 25%)	Висока
Філіпс-Салланс	Мука	Хімічний	Ліофілізація	Денатурована	Середній (до 25%)	Висока
Пілсбурі	Мука	Хімічний	Ліофілізація	Денатурована	Середній (до 25%)	Висока
Лонгфорд-Слоттер	Мука	Хімічний	Розпилювальна сушка	Денатурована	Низький (до 20%)	Висока
Вайпро	Мука	Ферментативний	Ліофілізація	Близька до нативної	Середній (25–30%)	Висока
Альфа-Лаваль-Райсіо	Мука	Ферментативний	Розпилювальна сушка	Близька до нативної	Високий (до 45%)	Висока

Існує понад 15 промислових способів одержання пшеничної клейковини, які класифікують за кількома ознаками:

- за видом вихідної сировини — із зерна (Альсантин, Галле, Ельзаський, Лонгфорд-Слоттер, Мартін) та із борошна (Пілсбурі, Феска, Вайпро, Баттер, Тенстар);
- за способом виділення клейковини — механічний (Альсантин, Галле, Баттер, Тенстар, Мартін), хімічний (Пілсбурі, Феска, Лонгфорд-Слоттер, Філіпс-Салланс, Вечбер-Цвітсеріот), ферментативний (Вайпро, Альфа-Лаваль-Райсіо) і мікробіологічний (Ельзаський);
- за способом сушіння — конвективне (Альсантин, Мартен, Тенстар, Баттер, Дімлер), розпилювальне (Пілсбурі, Феска, Вечбер-Цвітсеріот, Філіпс-Салланс, Фармарко), ліофілізація (Філіпс-Салланс, Вайпро, Пілсбурі, Мартен) та роликова сушка (Фармарко, Вечбер-Цвітсеріот, Баттер, Тенстар, Альфа-Лаваль-Райсіо);
- за якістю одержуваної клейковини — нативна (Альсантин, Галле, Баттер, Тенстар, Мартен) і денатурована (Пілсбурі, Феска, Лонгфорд-Слоттер, Вечбер-Цвітсеріот, Фармарко).

Ці класифікації перехресні, тож конкретний технологічний процес визначається поєднанням сировини, методу виділення та режиму сушіння.

Традиційні методи (процес Мартіна, Баттер) передбачають заміс густого тіста або батеру з подальшим відмиванням крохмалю через ситові системи, тоді як сучасні технології (гідроциклон, високошвидкісне диспергування) здійснюють відокремлення за допомогою центрифугування після попереднього часткового розвитку клейковинної сітки [10]. Сушіння є найбільш критичним етапом, оскільки від температурно-вологісних параметрів залежить збереження функціональних властивостей білків. Дослідження показали, що при сушінні за вологості понад 20% та температурі 80 °C протягом 30 хвилин різко знижується розтяжність та максимальний опір тіста на екстенсографі з 480 до 320 BU, а також знижується газоутримувальна здатність тіста [11]. Аналіз SDS-розчинних білкових фракцій вказує на агрегацію високомолекулярних глютенінів, що прямо корелює зі зниженням еластичності, що надмірно високі температури сушіння знижують в'язкоеластичні властивості білка, тоді як оптимізація режимів гарячого повітря або використання сублімаційного сушіння дозволяє зберегти майже всі функціональні властивості та подовжити термін зберігання СПК [12].

Альтернативні методи, як-от зсувна фракціонізація (shear-induced separation), забезпечують більш м'які умови відокремлення білка, що зберігає його реологічні властивості. Порівняння такої клейковини з комерційною показало, що зразки, отримані за зсувною технологією, мають кращі показники розтяжності та стійкості тіста на екстенсографі (збільшення площі кривої на 12%) і забезпечують вищий питомий об'єм хліба [13].

Не менш перспективним є ферментативне модифікування СПК, що дозволяє змінювати її структуру для розширення функціональних властивостей: підвищення пінопідйомної здатності, покращення водо- та жиروزв'язування, створення нових текстур хліба, включаючи м'які та пружні безглютенові аналоги [9].

Якість сухої пшеничної клейковини (СПК) має відповідати вимогам Codex Alimentarius — CXS 163-1987 «Standard for Wheat Protein Products including Wheat Gluten», згідно з яким СПК — це продукт, одержаний шляхом вилучення зі пшеничного борошна крохмалю та водорозчинних фракцій і представлений переважно білками глютенів (гліадини та глютеніни; для «vital» форми — із збереженою здатністю відновлювати в'язкоеластичні властивості після гідратації), і вона повинна містити не менше 80% сирого білка (N×6,25) у перерахунку на суху речовину, мати вологість не більше 10% (m/m), золу — не більше 2,0% (на суху речовину) та сиру клітковину — не більше 1,5% (на суху речовину); використання харчових добавок для такого продукту не допускається.

Оскільки суха пшенична клейковина (СПК) може застосовуватися як технологічна добавка у широкому спектрі харчових продуктів — від ковбас та інших м'ясних виробів до кондитерських і хлібобулочних — з метою надання їм специфічних функціональних властивостей, у ній доцільно визначати такі показники: водозв'язувальна здатність 150–250 %, жирозв'язувальна здатність 100–130 %, жироемульгуюча здатність 50–70 %, стабільність емульсій 80–120 %, піноутворювальна здатність 160–240 % та стабільність піни 55–70 % [14].

У сучасних умовах виробники комбінують традиційні та інноваційні методи, використовуючи контроль процесу сушіння через ІЧ-сенсори вологості, низькотемпературне сушіння під вакуумом або псевдозріджений шар для мінімізації денатурації білків. Експериментальні дані свідчать, що такі підходи дозволяють зберегти показники питомого об'єму хліба на рівні +15% у порівнянні з клейковиною, отриманою за умов високотемпературного сушіння [15].

Таким чином, якість сухої пшеничної клейковини визначається як генетичними характеристиками вихідної сировини, так і технологічними параметрами виробництва. Контроль кожного етапу — від вибору методу відокремлення білків до режимів сушіння — є ключовим для отримання продукту з оптимальними функціональними властивостями, що підтверджується приладовими вимірюваннями та випробуваннями у хлібопеченні.

Формування білкового каркаса у тісті з високим вмістом води є складним багатостадійним процесом, що поєднує механічну активацію білків, їх гідратацію, орієнтацію макромолекул та розвиток тривимірної

сітки за рахунок ковалентних і нековалентних взаємодій. На початковій стадії замісу борошно контактує з великою кількістю води (понад 75–80 % до маси борошна), що призводить до швидкого набухання білків гліадиново-глютенінового комплексу. Гліадини, завдяки відносно компактній структурі, швидко гідратуються, тоді як глютеніни, які є довгими полімерними ланцюгами, вимагають більш тривалого впливу для досягнення повного набухання та розкручування спіралей [16]. При високій гідратації збільшується мобільність білкових макромолекул, що сприяє утворенню більш довгих і рівномірно орієнтованих волокон клейковини. Це покращує пластичність тіста, однак надлишок вологи знижує загальну концентрацію білка в одиниці об'єму, що призводить до зменшення міцності сітки. У таких умовах введення сухої пшеничної клейковини компенсує розбавлення білкового каркаса та підвищує щільність і кількість міжмолекулярних зв'язків. Додаткові полімерні ланцюги глютенінів із сухої клейковини зшиваються дисульфідними містками з білками борошна, утворюючи посилену сітку, яка краще протистоїть розриву та деформації під дією газового тиску [17].

Оцінка технологічної якості клейковини для хлібопекарського використання здійснюється за допомогою низки приладів: альвеограф, екстензограф та фарінограф. При додаванні 2-3 % якісної сухої пшеничної клейковини до борошна середньої якості тісто з високою гідратацією демонструє збільшення показника енергії W на 30-50 10-4 Дж, що відображає зростання здатності тіста протидіяти розриву. Показник P (опір роздуванню) зростає на 15–25 мм, а показник L (довжина роздування, що характеризує розтяжність) зберігається або злегка збільшується, що свідчить про баланс між пружністю та еластичністю сітки. Оптимальне співвідношення P/L після введення якісної сухої пшеничної клейковини у тісто з високою гідратацією наближається до 0,7–1,0, що є бажаним для отримання стабільного об'єму та рівномірної пористості м'якушки. Дані фарінографа Брабендера показують, що додавання сухої пшеничної клейковини збільшує водопоглинальну здатність тіста на 2–4 % та подовжує час розвитку клейковини на 1,5–2,5 хвилини. Це свідчить про більш повільне, але стабільне формування білкової сітки, здатної утримувати велику кількість вологи без втрати структури. Стабільність тіста (*stability*) зростає на 3-5 хв., а ступінь розм'якшення (*softening degree*) зменшується, що вказує на кращу стійкість до механічного навантаження та ферментаційного тиску. Результати екстензографічних випробувань підтверджують, що суха клейковина підвищує як максимальне навантаження при розтягуванні (R_{max}), так і площу під кривою розтягування, що є показником загальної енергії деформації. Це корелює з високими значеннями *strain hardening*, які є ключовими для збереження газових бульбашок під час кінцевої розстойки [18].

Газоутримувальна здатність тіста з високою гідратацією суттєво залежить від безперервності та міцності клейковинної сітки. За відсутності достатньої кількості білка бульбашки газу швидко зливаються, утворюючи великі порожнини, що призводить до нерівномірної структури м'якушки та зменшення загального об'єму виробу. Додавання сухої клейковини забезпечує рівномірний розподіл напружень у стінках бульбашок, зменшує швидкість коалесценції газових клітин і підвищує стабільність піни до моменту коагуляції білків під час випікання [19]. Крім того, з позицій полімерної фізики, при високій гідратації відбувається зниження ефективної концентрації полімеру, але за рахунок збільшення довжини та гнучкості ланцюгів глютенінів виникає більша кількість точок зшивання, якщо є достатньо білка для формування мережі. Суха клейковина відіграє тут роль додаткового «модуючого агента», що підвищує критичну концентрацію утворення гелеподібної фази, збільшує модуль зсуву (G') та зменшує тангенс кута втрат ($\tan \delta$), що вказує на більш еластичний характер тіста.

Таким чином, у тісті з високою гідратацією суха пшенична клейковина виконує подвійну функцію: структуроутворюючу, формуючи міцний, еластичний і пружний каркас, та стабілізуючу, забезпечуючи збереження газової структури до моменту термічної фіксації. Її вплив можна кількісно оцінити за допомогою комплексних реологічних методів (альвеограф, фарінограф, екстензограф), які демонструють істотне підвищення стійкості та газоутримувальної здатності тіста, що безпосередньо корелює з об'ємом, пористістю і якістю готового виробу.

Дозування сухої пшеничної клейковини у рецептурах хлібобулочних виробів з високою гідратацією тіста суттєво впливає на об'єм, форму, структуру та органолептичні характеристики готової продукції. Збільшення вмісту клейковини до оптимальних рівнів дозволяє компенсувати зниження якості клейковинного каркаса, яке виникає при використанні борошна з низьким вмістом сировини або при додаванні висівків та інших високоволокнистих інгредієнтів. Дослідження показують, що внесення сухої пшеничної клейковини на рівні, що перевищує початковий вміст білка у борошні, здатне значно підвищити питомий об'єм хліба, поліпшити рівномірність пористості м'якушки та зменшити його жорсткість упродовж зберігання [20].

Встановлено, що додавання СПК сприяє максимізації об'єму буханця, покращенню газоутримуючої здатності тіста та збереженню еластичності м'якушки після випікання. Так, у дослідженнях на замороженому тісті вміст 4% сухої пшеничної клейковини забезпечив найбільший питомий об'єм та найвищі сенсорні оцінки у дегустаційних тестах [21].

Крім того, в роботах із розробки хліба з нетрадиційною сировиною (ячмінь, цілнозернові суміші, патока) встановлено, що введення сухої клейковини сприяє збільшенню часу стабільності тіста за даними фарінографа, підвищує його розтяжність за альвеографом і знижує ступінь розм'якшення під час бродіння. У

випадку оптимізованих рецептур з додаванням патоки та насіння льону доза сухої клейковини близько 4% забезпечувала питомий об'єм понад 4,5 мл/г та низьку твердість м'якуша (менше 1000 gf) [22].

З точки зору структури м'якуша, додавання сухої клейковини дозволяє формувати більш дрібнопористу та рівномірну комірку структуру, що підтверджується даними комп'ютерного аналізу зображень та вимірюванням числа комірок на одиницю площі. Позитивний ефект особливо виражений у виробках з високою гідратацією (70–85%), де підвищена рухливість води може призводити до розриву клейковинної сітки без білкового підсилення [23] [24]...

Органолептично хліб із додаванням сухої пшеничної клейковини характеризується більш насиченим ароматом, кращою пружністю м'якуша та приємною еластичною текстурою, а колір кірки стає більш інтенсивним завдяки підвищенню вмісту білка і, відповідно, інтенсивності реакцій Майяра під час випікання. Дегустаційні панелі найвищі оцінки давали зразкам із вмістом сухої клейковини на рівні 3–4%, де досягався баланс між об'ємом, текстурою та смаковими властивостями [25].

Таким чином, дозування сухої пшеничної клейковини є критичним інструментом керування якістю хлібобулочних виробів з високою гідратацією тіста. Оптимальний рівень залежить від типу борошна, наявності додаткових інгредієнтів та вимог до кінцевого продукту, проте в більшості випадків ефективний діапазон становить 3–5% до маси борошна, що дозволяє підвищити об'єм, покращити структуру та стабілізувати органолептичні характеристики виробів упродовж зберігання.

Комплексне застосування сухої пшеничної клейковини з технологічними поліпшувачами — ферментними препаратами, окисниками, відновниками, молочними та білковими добавками, дієтичними волокнами — є потужним інструментом регулювання структури тіста та покращення якості хлібобулочних виробів з високою гідратацією (70–85%). Ефективність такого підходу обумовлюється синергетичним впливом різних механізмів: зміцненням клейковинного каркаса, регулюванням в'язкоеластичних властивостей, оптимізацією водопоглинання та контролем газотримувальності здатності тіста.

Добре відомо, що амілази розщеплюють крохмаль до декстринів і мальтози, забезпечуючи дріжджі доступними субстратами та стимулюючи активніше газоутворення. При сумісному додаванні амілаз та СПК суха пшенична клейковина підсилює білковий каркас, що дозволяє ефективніше утримувати збільшені об'єми газу. У роботі [26] використання суміші амілаз і 4% клейковини підвищило питомий об'єм буханця з 3,7 мл/г до 4,6 мл/г, зменшило твердість м'якуша через 24 години зберігання на 18% (TPA), а на альвеографі показник енергії (W) зріс на 26%. Ксиланази гідролізують арабіноксилани клітинних стінок ендосперму, зменшуючи в'язкість водної фази тіста і покращуючи його газотримувальну здатність. При високій гідратації (82%) поєднання ксиланаз із клейковиною збільшувало розтяжність тіста (L) на 12–15% і знижувало P/L з 1,1 до 0,8, що сприяло більш рівномірній пористості м'якуша. Глюкозооксидаза у присутності кисню каталізує окисне зшивання білків, що підвищує міцність клейковинної сітки. Дослідження [27] показало, що у поєднанні з 3% клейковини модуль пружності (G') тіста збільшився на 25%, а стабільність за фаринографом зросла з 9,2 до 11,1 хв. Аналіз C-Cell виявив зростання кількості пор на 14% при зменшенні середнього діаметра з 2,3 мм до 1,7 мм. Трансглютаміназа каталізує утворення ϵ -(γ -глутаміл)-лізинових зв'язків між білковими молекулами, зміцнюючи клейковинний каркас навіть за умов сильно розрідженого тіста. У поєднанні з 2% сухої клейковини вона збільшувала стабільність за екстенсографом на 32% і знижувала втрату об'єму під час випікання на 8–10%.

L-аскорбінова кислота є класичним окисником, що окиснює сульфгідрильні групи до дисульфідних, зміцнюючи клейковину. Дослідження [20] показало, що 4% сухої клейковини з 100 ppm L-аскорбінової кислоти підвищили питомий об'єм хліба на 27%, енергія деформації W за альвеографом зросла із 220×10^{-4} J до 315×10^{-4} J, а P/L знизився до оптимального значення 0,9. L-цистеїн як відновник розриває дисульфідні зв'язки, підвищуючи пластичність тіста. При його застосуванні у мікродозах (20 ppm) разом із 2,5% клейковини вдавалось зменшити час замісу на 15% і підвищити рівномірність пористості за C-Cell на 10%, без втрати об'єму.

Сухе знежирене молоко підвищує харчову цінність, сприяє утворенню реакції Майяра, що формує аромат і колір кірки. При спільному внесенні із 3% сухої клейковини об'єм хліба збільшувався на 15%, твердість м'якуша зменшувалась на 12% через 48 годин зберігання, а колір кірки ставав інтенсивнішим (зниження L* на 3 одиниці, підвищення b* на 2). Сосвий білковий ізолят у комбінації з 2% клейковини сприяв підвищенню пружності м'якуша на 8–9% і покращенню сенсорних оцінок смаку за дегустаційною шкалою на 0,5–0,7 балів. Дієтичні волокна (висівки, пектин, інулін) у поєднанні з клейковиною дають можливість зберегти об'єм і структуру виробу, компенсуючи розрідження тіста волокнистими частинками. У роботі [28] комбінація глюкозооксидази та 3% клейковини у хлібі з кукурудзяними висівками підвищила об'єм на 18%, а стабільність тіста за фаринографом зросла з 7,5 до 9,0 хв.

Додавання сухої пшеничної клейковини до рецептури хлібобулочних виробів є одним із найбільш дієвих методів підвищення вмісту білка у готовому продукті, особливо у випадках використання борошна з пониженим вмістом протеїну або при створенні продуктів з високою гідратацією тіста. За даними [29], внесення 5–8% вітал-глютену до безглютенових сумішей на основі рисового та кукурудзяного борошна збільшувало масову частку білка з 8,6% до 15,4% та покращувало еластичність і пружність м'якуша, що підтверджувалося результатами текстурного аналізу методом подвійного компресійного тесту (TPA), де показник

твердості зменшувався на 14–18%, а пружність зростала на 10–12%. Подібні результати спостерігалися й у роботах, присвячених хлібу з пшеничного борошна, де амінокислотний скор (PDCAAS) для базової рецептури складав лише 0,45–0,55 через обмежений вміст лізину, тоді як використання низькогліадинових сортів пшениці у поєднанні з білковими добавками, такими як сухе знежирене молоко чи соєвий ізолят, підвищує цей показник до 0,65–0,72 [30].

Амінокислотний аналіз, виконаний методом високоефективної рідинної хроматографії з передколонним дериватизуванням, показав, що внесення 7% сухої клейковини збільшувало концентрацію глутамінової кислоти до 40,2 г на 100 г білка та аргініну до 5,4 г на 100 г білка, при цьому вміст лізину знижувався з 2,4% до 1,9% від загального білка. Це свідчить, що, попри значне зростання загальної кількості протеїну, баланс незамінних амінокислот не покращується, а іноді навіть погіршується, що потребує компенсації за рахунок білків із більш сприятливим амінокислотним профілем. Підрахунки вмісту засвоюваного білка (індекс DIAAS) у хлібі з додаванням сухої клейковини підтвердили, що без комбінування з іншими джерелами білка досягти повноцінної біологічної цінності неможливо.

З точки зору безпечності, глютен є складною білковою фракцією, що складається з проламінів (гліадинів) та глютелінів (глютенінів), і здатний викликати цілий спектр негативних реакцій у чутливих осіб. Целіакія є тяжким аутоімунним захворюванням, при якому навіть мікродози глютену викликають атрофію ворсинок тонкого кишечника, мальабсорбцію та системні ускладнення. Поширеність цього захворювання сягає 1–2% серед населення, при цьому значна частка випадків залишається не діагностованою. Алергія на пшеницю є IgE-опосередкованою реакцією негайного типу, що може проявлятися кропив'янкою, бронхоспазмом, набряком Квінке або анафілаксією. Нецеліакійна чутливість до глютену проявляється абдомінальним дискомфортом, головними болями, хронічною втомою та іншими позакишковими симптомами, причому патогенез цього стану досі активно досліджується [31].

Найбільш сильним алергеном у складі глютену вважається ω -5-гліадин, який пов'язують із рідкісним, але небезпечним синдромом анафілаксії, індукованої фізичним навантаженням. Вимірювання вмісту глютену методом імуноферментного аналізу ELISA R5 та імунохроматографії показали, що навіть при додаванні 1% сухої клейковини до безглютенової суміші вміст глютену у готовому хлібі перевищує 2000 ppm, що у 100 разів більше за граничний рівень 20 ppm, встановлений [23] для маркування «без глютену».

Маркування продукції з підвищеним вмістом глютену суворо регламентується міжнародними та національними нормами. У ЄС діє Регламент №1169/2011, який зобов'язує виробника чітко вказувати наявність глютену та джерела його походження у списку інгредієнтів, а також попереджати про ризики для людей з целіакією та алергією на пшеницю. Продукти, у яких вміст глютену перевищує 20 ppm, не можуть маркуватися як «без глютену» або «низькоглютенові». У США діють вимоги FDA, 2013, а в Україні питання регулює Закон «Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів» та санітарні норми, гармонізовані з європейським законодавством.

Приладові методи підтверджують вплив сухої клейковини на поживну цінність і безпечність. Визначення білка за методом К'ельдаля (AOAC 979.09) показало зростання його вмісту з 11,2% до 17,8% на суху речовину при внесенні 8% вітал-глютену. Аналіз амінокислотного складу методом ВЕРХ підтвердив зменшення частки лізину на 0,5 процентних пунктів при збільшенні вмісту глутамінової кислоти та проліну. Дані ELISA R5 вказують на рівень глютену у діапазоні від 10 500 до 15 800 ppm залежно від дози. Розрахунок енергетичної цінності на основі фактичного складу показав збільшення калорійності з 248 до 276 ккал на 100 г за рахунок зростання білкової частки та незначного зменшення вмісту вуглеводів.

Висновки. Використання сухої пшеничної клейковини (СПК) у виробництві хлібобулочних виробів, у т.ч. виробів з високою гідратацією тіста, є одним з найбільш обґрунтованих та ефективних шляхів підвищення якісних характеристик хліба, оскільки вона є концентрованим джерелом білка, що визначає в'язкоеластичні властивості тіста та кінцеві органолептичні характеристики продукції. На відміну від інших білкових добавок (молочних, соєвих), СПК має унікальну здатність формувати тривимірну білкову сітку, яка утримує гази під час бродіння та випікання, що забезпечує більший об'єм та рівномірну пористість м'якушки.

Спосіб виробництва СПК, в-першу чергу спосіб сушіння клейковини, її ферментна модифікація – в значній мірі впливають на її функціональні можливості та характер впливу на параметри тіста. Якісна суха пшенична клейковина підвищує енергію деформації тіста при збереженні оптимального співвідношення між пружністю та розтяжністю P/L, збільшує водопоглинальну здатність, стабільність тіста та зменшує його ступінь пом'якшення.

З технологічної точки зору, властивості СПК значною мірою залежать від її амінокислотного складу та фракційного співвідношення гліадинів і глютенінів. Саме ця структура визначає водоутримувальну, жиросв'язуючу, пінопідйомну здатність, що, у свою чергу, впливає на якість готового хліба.

Таким чином, суха пшенична клейковина є не просто технологічним компонентом для стабілізації якості тіста, а стратегічно важливим інгредієнтом у розвитку сучасних та майбутніх технологій хлібопечення. Її універсальність, функціональність та відносна доступність роблять її одним із ключових інструментів для створення інноваційних, високоякісних та оздоровчих хлібобулочних виробів, що відповідають вимогам сучасного ринку і концепції здорового харчування.

References

1. Mironeasa, S., & Codina, G. G. (2017). The Mixolab rheological properties and dough microstructure of defatted mustard seed-wheat composite flours. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13130.
2. Bravo-Nunez, A., & Gomez, M. (2019). Evaluation of starch-protein interactions as a function of pH. *Foods*, 8(5).
3. Gao, Z. (2024). Psyllium fibre inclusion in gluten-free buckwheat dough. *Foods*, 13(5), 767.
4. Orekhivskiy, O., & Others. (2021). *Grain and Feed Quarterly (UP2021-0017)*. USDA Report.
5. Liulchenko, & Serebriakova. (2025). Ukraine's wheat export geography in 2024–2025. *UkrAgroConsult*.
6. Toporash, I., Chervonis, M., & Voloshenko, O. (2022). The problem of assessing the baking quality of wheat with genetically different alleles of storage proteins. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 22(4), 7–11.
7. Day, L., Augustin, M. A., Batey, I. L., et al. (2006). Wheat gluten: Uses and industry needs. *Cereal Foods World*, 51(1), 29–33.
8. Anjum, F. M., Khan, M. R., Din, A., et al. (2007). Wheat gluten: High molecular weight glutenin subunits—Structure, genetics, and relation to dough elasticity. *Journal of Food Science*, 72(3).
9. Kolpakova, V. V., & Kovalenok, A. N. (2019). Relationship of the functional properties of dry wheat gluten with protein composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Agrarian Series*, 57(2), 165–176.
10. Sayaslan, A., & Seib, P. A. (2010). Properties of starch and vital gluten isolated from wheat flours of different classes and their relationships with bread-making quality. *Journal of Cereal Science*, 51(2), 174–179.
11. Weegels, P. L., Verhoek, J. A., de Groot, A. M. G., et al. (1994). Effects on gluten of heating at different moisture contents. I. Changes in functional properties. *Journal of Cereal Science*, 19(1), 31–38.
12. Food Processing Industry. (2011). Influence of wheat flour dough hydration levels on gas. *Food Processing Industry*, X(4), 79–83.
13. van der Zalm, E. E. J., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2011). Quality of shear-fractionated wheat gluten: Comparison to commercially available vital gluten. *Journal of Cereal Science*, 53(3), 344–350.
14. Deng, L., Wang, Z., Yang, S., et al. (2016). Improvement of functional properties of wheat gluten using acid protease from *Aspergillus usamii*. *PLoS ONE*, 11(7), 1–13.
15. Wehrli, F., Ini, S., Ptaszek, P., et al. (2023). Resilience study of wheat protein networks with large deformations: The impact of dough hydration level. *Food Hydrocolloids*, 135, 108194.
16. Dufour, D., Chaunier, L., Dendievel, R., et al. (2023). Unravelling the relationships between wheat dough structure, hydration, and mechanical behaviour: A multi-scale approach. *Food Hydrocolloids*, 138, 108464.
17. Hu, C., Zhang, W., Wu, X., et al. (2021). Combined effects of wheat gluten and hydrocolloids on the rheological properties of dough and bread quality. *LWT - Food Science and Technology*, 149, 111890.
18. Dobraszczyk, B. J. (2004). The physics of baking—Rheological and polymer molecular structure-function relationships in breadmaking. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 124, 61–69.
19. Kokelaar, J. J., van Vliet, T., & Prins, A. (1996). Strain hardening properties and extensibility of flour and gluten doughs in relation to breadmaking performance. *Journal of Cereal Science*, 24(3), 199–214.
20. Dizlek, H., & Altan, A. (2013). The effects of vital wheat gluten and L-ascorbic acid on some properties of breads made from wheat flours with low protein content. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 5(3), 237–244.
21. Choi, I. S., Lee, S. T., & Park, K. K. (2005). Effect of vital wheat gluten on the quality of frozen dough bread. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 37(2), 202–207.
22. Simurina, O., Filipcev, B., & Jevtic Mucibabic, R. (n.d.). Optimization of the specialty bread formulation containing sugar beet molasses, flax seed and vital wheat gluten. *Flour - Bread (Conference Proceedings)*.
23. Codex Alimentarius Commission. (2008). *Codex standard for foods for special dietary use for persons intolerant to gluten* (CODEX STAN 118–1979, revised 2008).
24. Hermans, M., Janssen, A., & van der Meer, R. (2024). Partial replacement of wheat flour with vital wheat gluten: Effects on bread volume, texture, protein content, and sensory quality. *Journal of Cereal Science*.
25. Chernykh, I., Petrenko, O., & Kovalenko, S. (2024). Influence of vital wheat gluten addition on the organoleptic properties of high-hydration bread. *Ukrainian Food Journal*, 13(1), 45–56.
26. Tebben, L., Chen, G., Tilley, M., et al. (2020). Individual effects of enzymes and vital wheat gluten on whole wheat dough and bread properties. *Journal of Food Science*.
27. Meerts, M., Van Ammel, H., Meeus, Y., et al. (2017). Enhancing the rheological performance of wheat flour dough with glucose oxidase, transglutaminase, or supplementary gluten. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 2188–2198.
28. Gul, H., Ozer, M., & Dizlek, H. (2009). Improvement of the wheat and corn bran bread quality by using glucose oxidase and hexose oxidase. *Journal of Food Quality*, 32, 209–223.
29. Aprodu, I., & Banu, I. (2016). Combined effect of enzymes and gluten on dough rheology and quality of gluten-free breads. *Food Chemistry*, 197, 78–84.
30. Gil-Humanes, J., Piston, F., Rosell, C. M., et al. (2014). Reduced-gliadin wheat bread: An alternative to the gluten-free diet for consumers suffering gluten-related pathologies. *PLoS ONE*, 9(7), e90898.

31. Uhde, M., Ajamian, M., Caio, G., et al. (2016). Intestinal cell damage and systemic immune activation in individuals reporting sensitivity to wheat in the absence of coeliac disease. *BMC Medicine*, 14, 26.

VITAL WHEAT GLUTEN AS A COMPONENT OF THE FORMULATION OF BAKERY PRODUCTS WITH HIGH DOUGH HYDRATION

Zhygunov D., Doctor of Sciences (Dr. Hab.) in Engineering, Professor, Yenhitarian V., postgraduate, Melnik I., Ph.D., Associate Professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. The article comprehensively examines the role of vital wheat gluten (VWG) as a key functional ingredient in the production of bakery products with high dough hydration, combining artisanal traditions with modern food science technologies. The physicochemical properties of VWG, its protein composition—particularly the ratio of gliadins to glutenins—its influence on water absorption, elasticity, and the formation of a three-dimensional protein network are analyzed in detail. The mechanisms by which VWG enhances dough gas retention, increases resistance to mechanical and fermentation stresses, and promotes the uniform formation of crumb porosity are described. Experimental data confirm that the addition of VWG at a level of 2–3% of flour weight provides an optimal balance between loaf volume, structure, and sensory characteristics, especially when using flour with low raw gluten content or when adding fibrous ingredients. The impact of various production and drying methods on VWG's functional characteristics is reviewed, particularly the role of temperature–moisture regimes in preserving protein extensibility and network strength. Examples of the combined use of VWG with enzyme preparations (amylases, xylanases, glucose oxidase, transglutaminase), oxidizing agents (L-ascorbic acid), and reducing agents (L-cysteine), as well as with dairy and plant proteins and dietary fibers to achieve synergistic effects, are presented. Special attention is paid to VWG's impact on bread's nutritional value, increasing protein content and altering the amino acid profile, as well as safety aspects for consumers with gluten intolerance. The article outlines prospects for VWG applications in both classical and innovative formulations, including gluten-free analogues, products with enhanced functional value, and specialized dietary baked goods.

Key words: vital wheat gluten, high-hydration dough, rheological properties, bread volume, crumb structure.

Список використаної літератури

1. Mironeasa, S., Codina, G. G. The Mixolab rheological properties and dough microstructure of defatted mustard seed-wheat composite flours. / *Journal of Food Processing and Preservation*. 2017. 41, 5. C. e13130.
2. Bravo-Nunez, A., Gomez, M. Evaluation of starch-protein interactions as a function of pH. / *Foods*. 2019. 8, 5.
3. Gao, Z. Psyllium Fibre Inclusion in Gluten-Free Buckwheat Dough. / *Foods*. 2024. 13, 5. C. 767.
4. Orekhivskyi, O., Others. Grain and Feed Quarterly (UP2021-0017). / *USDA Report*. 2021.
5. Liulchenko, Serebriakova. Ukraine's wheat export geography in 2024-2025. / *UkrAgroConsult (online news)*. 2025.
6. Toporash, I., Chervonis, M., Voloshenko, O. the Problem of Assessing the Baking Quality of Wheat With Genetically Different Alleles of Storage Proteins. / *Grain Products and Mixed Fodder's*. 2022. 22, 4. C. 7–11.
7. Day, L., Augustin, M. A., Batey, I. L., та ін. Wheat gluten: Uses and industry needs. / *Cereal Foods World*. 2006. 51, 1. C. 29–33.
8. Anjum, F. M., Khan, M. R., Din, A., та ін. Wheat gluten: High molecular weight glutenin subunits - Structure, genetics, and relation to dough elasticity. / *Journal of Food Science*. 2007. 72, 3.
9. Kolpakova, V. V., Kovalenok, A. N. Relationship of the functional properties of dry wheat gluten with protein composition. / *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Agrarian Series*. 2019. 57, 2. C. 165–176.
10. Sayaslan, A., Seib, P. A. Properties of starch and vital gluten isolated from wheat flours of different classes and their relationships with bread-making quality. / *Journal of Cereal Science*. 2010. 51, 2. C. 174–179.
11. Weegels, P. L., Verhoek, J. A., Groot, A. M. G. de, та ін. Effects on gluten of heating at different moisture contents. I. Changes in functional properties. / *Journal of Cereal Science*. 1994. 19, 1. C. 31–38.
12. Industry, F. P. INFLUENCE OF WHEAT FLOUR DOUGH HYDRATION LEVELS ON GAS. 2011. X, 4. C. 79–83.
13. Zalm, E. E. J. van der, Boom, R. M., Goot, A. J. van der. Quality of shear-fractionated wheat gluten. Comparison to commercially available vital gluten. / *Journal of Cereal Science*. 2011. 53, 3. C. 344–350.
14. Deng, L., Wang, Z., Yang, S., та ін. Improvement of functional properties of wheat gluten using acid protease from *Aspergillus usarii*. / *PLoS ONE*. 2016. 11, 7. C. 1–13.
15. Wehrli, F., Ini, S., Ptasek, P., та ін. Resilience study of wheat protein networks with large deformations: The impact of dough hydration level. / *Food Hydrocolloids*. 2023. 135. C. 108194.
16. Dufour, D., Chaunier, L., Dendievel, R., та ін. Unravelling the relationships between wheat dough structure, hydration, and mechanical behaviour: A multi-scale approach. / *Food Hydrocolloids*. 2023. 138. C. 108464.

17. Hu, C., Zhang, W., Wu, X., та ін. Combined effects of wheat gluten and hydrocolloids on the rheological properties of dough and bread quality. / *LWT - Food Science and Technology*. 2021. 149. C. 111890.
18. Dobraszczyk, B. J. The physics of baking - Rheological and polymer molecular structure - function relationships in breadmaking. / *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2004. 124. C. 61–69.
19. Kokelaar, J. J., Vliet, T. van, Prins, A. Strain hardening properties and extensibility of flour and gluten doughs in relation to breadmaking performance. / *Journal of Cereal Science*. 1996. 24, 3. C. 199–214.
20. Dizlek, H., Altan, A. The effects of vital wheat gluten and L-ascorbic acid on some properties of breads made from wheat flours with low protein content. / *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*. 2013. 5, 3. C. 237–244.
21. Choi, I. S., Lee, S. T., Park, K. K. Effect of vital wheat gluten on the quality of frozen dough bread. / *Korean Journal of Food Science and Technology*. 2005. 37, 2. C. 202–207.
22. Simurina, O., Filipcev, B., Jevtic Mucibabic, R. Optimization of the specialty bread formulation containing sugar beet molasses, flax seed and vital wheat gluten: *Flour - Bread (conference proceedings)*, 12.
23. Codex Alimentarius Commission. Codex standard for foods for special dietary use for persons intolerant to gluten (CODEX STAN 118-1979, revised 2008) / 2008.
24. Hermans, M., Janssen, A., Meer, R. van der. Partial replacement of wheat flour with vital wheat gluten: Effects on bread volume, texture, protein content, and sensory quality. / *Journal of Cereal Science*. 2024. XX, X. C. XX–XX.
25. Chernykh, I., Petrenko, O., Kovalenko, S. Influence of vital wheat gluten addition on the organoleptic properties of high-hydration bread. / *Ukrainian Food Journal*. 2024. 13, 1. C. 45–56.
26. Tebben, L., Chen, G., Tilley, M., та ін. Individual effects of enzymes and vital wheat gluten on whole wheat dough and bread properties. / *Journal of Food Science*. 2020.
27. Meerts, M., Ammel, H. Van, Meeus, Y., та ін. Enhancing the Rheological Performance of Wheat Flour Dough with Glucose Oxidase, Transglutaminase or Supplementary Gluten. / *Food and Bioprocess Technology*. 2017. 10. C. 2188–2198.
28. Gul, H., Ozer, M., Dizlek, H. Improvement of the wheat and corn bran bread quality by using glucose oxidase and hexose oxidase. / *Journal of Food Quality*. 2009. 32. C. 209–223.
29. Aprodu, I., Banu, I. Combined effect of enzymes and gluten on dough rheology and quality of gluten-free breads. / *Food Chemistry*. 2016. 197. C. 78–84.
30. Gil-Humanes, J., Piston, F., Rosell, C. M., та ін. Reduced-gliadin wheat bread: An alternative to the gluten-free diet for consumers suffering gluten-related pathologies. / *PLoS ONE*. 2014. 9, 7. C. e90898.
31. Uhde, M., Ajamian, M., Caio, G., та ін. Intestinal cell damage and systemic immune activation in individuals reporting sensitivity to wheat in the absence of coeliac disease. / *BMC Medicine*. 2016. 14. C. 26.

Отримано в редакцію 06.07.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 06.07.2025
Approved 02.09.2025

ВМІСТ АФЛАТОКСИНІВ ТА ОХРАТОКСИНУ А В УКРАЇНСЬКОЇ ПШЕНИЦІ

Жигунов Д.О., проф., д-р техн. наук, Оніщенко О.В., аспірант
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. У статті розглянуто мікотоксикологічні ризики, пов'язані з контамінацією м'якої пшениці (*Triticum aestivum* L.) токсичними метаболітами мікроміцетів, зокрема афлатоксинами (B1, B2, G1, G2) та Охратоксином А. Особливу увагу приділено нормативному регулюванню вмісту зазначених мікотоксинів у харчовій та кормовій продукції відповідно до актів Європейського Союзу – Регламенту (EU) 2023/915, Директиви 2002/32/EC та Рекомендацій 2006/576/EC.

У результаті аналізу 1380 зразків української м'якої пшениці за період 2020–2025 рр. методом рідинної хроматографії з мас-спектрометрією (LC-MS/MS) встановлено, що жоден із досліджених зразків не перевищує допустимих рівнів Афлатоксину B1 та Суми афлатоксинів (B1, B2, G1, G2) згідно з нормами Європейського Союзу. Разом з тим, у 3,9 % випадків протягом торговельних сезонів 2020–2025 років вміст Охратоксину А перевищував граничні значення для продовольчої пшениці, особливо у сезоні 2022–2023 років (у 7,7 % випадків).

Отримані результати вказують на загальну відповідність української м'якої пшениці нормативам Європейського Союзу щодо афлатоксинів, проте свідчать про потребу у посиленому моніторингу Охратоксину А, з огляду на вплив кліматичних факторів, що сприяють зростанню токсигенних грибів. Встановлена закономірність підтверджує необхідність постійного контролю вмісту мікотоксинів з метою гарантування експортної безпеки зерна та виробів з нього.

Ключові слова: мікотоксини, зерно пшениці, афлатоксин B1, охратоксин А, показники безпечності.

Одним з ключових аспектів безпечності злакових культур та продуктів їх переробки є мікотоксикологічна безпека, яка безпосередньо пов'язана з наявністю мікроскопічних грибів (мікроміцетів) та їх токсичних метаболітів — мікотоксинів. На сьогодні науково відомо близько 200 видів мікроміцетів, здатних продукувати понад 400 різних мікотоксинів, і ця кількість продовжує зростати в міру розвитку методів молекулярної діагностики та аналітичної мікотоксикології [1, 2].

М'яка пшениця (*Triticum aestivum* L.) широко використовується у харчовій промисловості та піддається зараженню мікотоксинами – токсичними вторинними метаболітами грибів *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium* та інших. Ці сполуки становлять загрозу здоров'ю людини і тварин, викликаючи канцерогенні, мутагенні, гепатотоксичні та імуносупресивні ефекти.

Серед найбільш поширених мікотоксинів у м'якій пшениці виділяються:

1. Афлатоксини (AFB1, AFB2, AFG1, AFG2) – сильні канцерогени, які виробляються *Aspergillus flavus* та *A. parasiticus* [3].
2. Охратоксин А (OTA) – нефротоксин, пов'язаний із захворюваннями нирок [5].
3. Дезоксиніваленол (ДОН, Vomitoxin) – трихотецен типу В, що спричиняє нудоту, блювання та пригнічення імунної системи [4].
4. Зеараленон (ZON) – мікотоксин з естрогенною активністю, що викликає гормональні порушення [4].
5. Т-2 і HT-2 токсини – трихотецени типу А, що викликають харчові отруєння та імуносупресію [6].

Варто зазначити, що один і той самий гриб може синтезувати кілька видів мікотоксинів, тоді як деякі токсини можуть продукуватися різними родами грибів. Крім того, наявність мікроміцетів не гарантує обов'язкову наявність мікотоксинів, так само як і відсутність візуальних ознак плісняви не виключає токсичної контамінації.

Більшість мікотоксинів є термостабільними сполуками, що зберігають токсичні властивості навіть після впливу температури понад 100°C. Традиційні методи кулінарної обробки, включаючи випікання, варіння та обсмажування, лише частково руйнують ці сполуки [8].

Фактори, що впливають на забруднення мікотоксинами: 1) агротехнічні фактори: попередня культура, спосіб обробки ґрунту та сорт пшениці впливають на ризик зараження *Fusarium spp.*. Мінімальний обробіток ґрунту збільшує ризик зараження [11]; 2) кліматичні умови: волога та тепла погода сприяє росту грибів і синтезу мікотоксинів [7]; 3) методи зберігання: висока вологість і погана вентиляція зерносховищ підвищують ризик зараження *Aspergillus* і *Penicillium* [3].

Процеси біосинтезу мікотоксинів є складними та поліфакторними. До ключових біологічних чинників, які визначають утворення мікотоксинів у злакових культурах, належать: 1) властивості грибів, зокрема генетичні механізми метаболізму вторинних сполук; 2) інтенсивність генерації токсинів, яка може варіювати в межах виду або навіть штаму; 3) таксономічна належність гриба, що визначає спектр потенційно продукованих мікотоксинів; 4) початковий рівень грибкової контамінації, що прямо корелює з концентрацією утворених токсинів [10, 11].

Окрім біологічних факторів, істотну роль відіграють зовнішні умови, зокрема: 1) вологість середовища та активність води (a_w); 2) температура навколишнього середовища; 3) тип і доступність поживного субстрату; 4) склад газової атмосфери (наприклад, низький вміст O_2 чи високий рівень CO_2); 5) ступінь механічного пошкодження зерна.

Крім того, біологічними чинниками, що також мають значення, відносять: 6) зараженість зерна – комахи можуть бути переносниками спор або спричиняти механічні ушкодження зерна, що полегшує проникнення патогенних грибів; 7) конкуренція між мікробними штамами; 8) стан фітосанітарного стресу рослини; а також 9) сортові (генетичні) особливості оболонки зерна [9].

Найбільш небезпечними для здоров'я людини є Афлатоксини та Охратоксин А.

Афлатоксини — це термостійкі мікотоксини, що продукуються грибами *Aspergillus flavus* та *A. parasiticus*. Вони слабо розчинні у воді, частково руйнуються під дією лугів. Найнебезпечнішим є афлатоксин В1 — потужний гепатоканцероген, який був ідентифікований після масової загибелі індиків у Великій Британії в 1960-х роках (так звана «Turkey X disease»). Оптимальні умови для синтезу афлатоксинів: температура – 25–32 °C; вологість зерна – >15 % (оптимально 18–20 %); водна активність – $A_w > 0,85$; а також наявність комах, що значно підвищує ризик контамінації.

Охратоксин А продукується переважно *Aspergillus ochraceus* (у теплому кліматі) та *Penicillium verrucosum* (у холодному кліматі). Найчастіше виявляється у зерні, хлібі, вині, сухофруктах, каві. ОТА є нефротоксином, накопичується в тканинах тварин і часто виявляється в м'ясі, особливо у свиней та птиці. У Данії ОТА був ідентифікований у 50 % зразків сироватки крові людини [9]. Оптимальними умовами росту грибів-продуцентів ОТА: для *Aspergillus ochraceus* – 12–37 °C (оптимум: 28 °C); $A_w \geq 0,77$; для *Penicillium verrucosum* – 0–24 °C (оптимум: 12–24 °C); $A_w \geq 0,80$.

Метою представленої роботи була оцінка рівня контамінації мікотоксинами у зерні пшениці українського походження 2020-2024 років врожаю, а саме Афлатоксинами та Охратоксином А, як найнебезпечніших для здоров'я людини.

Предмет досліджень – зерно м'якої пшениці (1380 зразків), що було вирощено у 2020-2024 роках у різних регіонах України.

Методи та методика досліджень. Досліджені зразки зерна відбирали під час навантаження судових, вагонних, автомобільних та контейнерних партій української м'якої пшениці за Правилами відбору проб Gafta № 124 та з зерносховищ/елеваторів і транспортних засобів за ISO24333:2009 Cereals and cereal products — Sampling. Також аналізувалися зразки, надані представниками різних компаній.

Далі їх розмелювали у відповідності до внутрішньої робочої інструкції Випробувального центру (ВЦ) ІП «СЖС УКРАЇНА» UA-06365 «Процедура підготування зразків для випробувань в лабораторії FSL». Для розмелювання використовували млини FRITSCH Pulverisette 15, Retsch GRINDOMIX GM 200 та GM 300.

Оскільки розподіл заражених грибами зерен у пробі є зазвичай дуже нерівномірним, для отримання якісної проби брали весь наявний об'єм відібраного матеріалу, процес розмелювання комбінували з гомогенізацією, для чого на різних стадіях приготування аналітичної проби використовували щільовий дільник та планетарні міксери GASTROMIX B10C та GOOD FOOD PM 10.

Вміст Афлатоксинів B1, B2, G1, G2 та Охратоксину А відповідно визначали за внутрішніми методами SGS-UA1-0005 «Кількісне визначення афлатоксину B1 та суми афлатоксинів B1, B2, G1, G2. Метод високо-ефективної рідинної хроматографії» та SGS-UA1-0010 «Кількісне визначення охратоксину А. Метод високо-ефективної рідинної хроматографії», які розроблені спеціалістами ВЦ ІП «СЖС УКРАЇНА» та базуються на рекомендаціях Phenomenex application note «Mycotoxins Analysis using QuEChERS, SPE and LC/MS/MS» і Perkin Elmer application note «A Fully Validated Method for Determination of Twelve Mycotoxins in Various Food Matrices».

Сутність методу полягає у екстракції токсинів з подрібненого зразка, очищенні отриманого розчину за допомогою технології твердофазної екстракції та випробуванні отриманої аналітичної проби за допомогою рідинної хроматографії з мас-детектуванням. Особливість методу полягає у використанні ізотопно-мічених стандартів, що підвищує надійність отриманих результатів, враховуючи складність аналізу подібних матриць. Для випробування використовували використовували хромато-мас-спектрометричну систему Waters Aquity H-Class Plus Xevo TQ-XS.

Для забезпечення достовірності випробувань лабораторія регулярно приймає участь у програмах професійного тестування міжнародного провайдера BIPEA (<https://www.bipea.org>).

Слід зазначити, що описаний процес визначення мікотоксинів відповідає критеріям, викладеним у рекомендаціях COMMISSION REGULATION (EU) 2023/2782 (Methods of sampling and analysis for the control of the levels of mycotoxins in food).

Випробувальний центр ІП «СЖС УКРАЇНА» акредитований за стандартом ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Усі зазначені внутрішні робочі інструкції та методи є частиною системи менеджмента якості (СМЯ) ІП «СЖС УКРАЇНА» та контролюються і коригуються відділом якості ІП «СЖС УКРАЇНА».

Результати досліджень. Контроль за рівнем мікотоксинів у харчових і кормових продуктах регламентується низкою нормативних документів Європейського Союзу, що є обов'язковими для імпорту з третіх країн, зокрема України. Встановлення гранично допустимих рівнів мікотоксинів є ключовим інструментом

для зниження ризиків токсикологічного ураження споживачів і тварин, а також для забезпечення безпечної торгівлі зерновою продукцією. Регламент Європейської Комісії (EU) 2023/915 визначає допустимі рівні мікотоксинів у необробленій м'якій пшениці, що призначена для споживання людиною (табл. 1). Ці обмеження розроблені з урахуванням токсикологічної дії кожного мікотоксину та споживчих норм, зокрема для особливо чутливих груп населення (діти, вагітні жінки, хворі на хронічні захворювання).

Для кормових цілей встановлено жорсткі обмеження на Афлатоксин В1, оскільки він належить до речовин із високою біонакопичуваністю та канцерогенною дією, особливо небезпечною для жуйних тварин і птиці. Відповідно до Директиви Європейського Парламенту та Ради 2002/32/EC (консолідована версія від 28.11.2019 р.) максимальний вміст Афлатоксину В1 в кормах: 0,02 мг/кг (або 20 мкг/кг) у перерахунку на корм з вологістю 12 %.

Європейська Комісія також встановила рекомендований граничний рівень Охратоксину А для кормів у Рекомендації 2006/576/EC (консолідована версія від 02.08.2016 р.) – 0,25 мг/кг (або 250 мкг/кг). Це значення також розраховане на вміст води 12 %, що є типовим для умов безпечного зберігання зерна.

Таблиця 1

Граничні рівні мікотоксинів у м'якій пшениці

Мікотоксини	Максимально допустимий вміст (мкг/кг)	
	харчове призначення	кормові цілі
Афлатоксин В1	2,0	20,0
Сума афлатоксинів В1, В2, G1, G2	4,0	—
Охратоксин А	5,0	250,0

Впродовж торговельних сезонів 2020–2025 років вміст Афлатоксину В1 та Суми афлатоксинів (В1, В2, G1, G2) у зразках м'якої пшениці залишався стабільно низьким — мінімальні, середні та медіанні значення були <0,5 мкг/кг, а максимальні – не перевищували цього рівня (табл. 2). Перевищення норм (2,0 мкг/кг для Афлатоксину В1 та 4,0 мкг/кг для Суми афлатоксинів) виявлено не було. Це свідчить про відсутність суттєвої контамінації афлатоксинами у досліджених партіях пшениці, як у полі, так і під час зберігання.

Таблиця 2

Показники вмісту Афлатоксину В1 та Суми афлатоксинів (В1, В2, G1, G2) в м'якій пшениці протягом торговельних сезонів 2020-2025 років

Мікотоксини / Кількість аналізованих зразків	Мін.	Макс.	Середнє	Медіана
Сезон 2020-2021 років				
Афлатоксин В1, мкг/кг / 184 зразки	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Сума афлатоксинів (В1, В2, G1, G2), мкг/кг / 183 зразки	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Сезон 2021-2022 років				
Афлатоксин В1, мкг/кг / 147 зразків	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Сума афлатоксинів (В1, В2, G1, G2), мкг/кг / 138 зразків	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Сезон 2022-2023 років				
Афлатоксин В1, мкг/кг / 393 зразки	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Сума афлатоксинів (В1, В2, G1, G2), мкг/кг / 390 зразків	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Сезон 2023-2024 років				
Афлатоксин В1, мкг/кг / 371 зразок	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Сума афлатоксинів (В1, В2, G1, G2), мкг/кг / 366 зразків	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Сезон 2024-2025 років				
Афлатоксин В1, мкг/кг / 285 зразків	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Сума афлатоксинів (В1, В2, G1, G2), мкг/кг / 282 зразки	< 0,5	0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Узагальнені дані сезонів 2020-2025 років				
Афлатоксин В1, мкг/кг / 1380 зразків	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				
Сума афлатоксинів (В1, В2, G1, G2), мкг/кг / 1359 зразків	< 0,5	0,5	< 0,5	< 0,5
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 0 / 0%, 2* - 0 / 0%				

Примітки:

1*) Перевищення норми вмісту Афлатоксину В1 (2,0 мкг/кг) та Суми афлатоксинів (В1, В2, G1, G2) (4,0 мкг/кг) в необробленій м'якій пшениці для продовольчих цілей у Регламенті Європейської Комісії (EU)

2023/915

2*) Перевищення норми вмісту Афлатоксину В1 (20 мкг/кг) в необробленій м'якій пшениці для кормових цілей у Директиві Європейського Парламенту та Ради 2002/32/ЄС

3) Межа кількісного визначення (LOQ) Афлатоксину В1 та Суми афлатоксинів (В1, В2, G1, G2) – 0,5 мкг/кг

Загалом було проаналізовано 1380 зразків на вміст Афлатоксину В1 і 1359 зразків на Суму афлатоксинів за п'ять сезонів. Така ситуація говорить про ефективний контроль умов вирощування, збору та зберігання зерна. Для експортерів це означає високі шанси відповідати міжнародним вимогам без додаткових витрат на знезараження.

У період з 2020 по 2025 роки вміст Охратоксину А у м'якій пшениці демонстрував значно більшу варіативність, ніж Афлатоксини (табл. 3). Мінімальні значення у всіх сезонах були нижче 1 мкг/кг, але максимальні коливались від 17 до 102 мкг/кг, що у десятки разів перевищує гранично допустимий рівень 5,0 мкг/кг для харчової пшениці. Середні концентрації коливались у межах 1,0–2,2 мкг/кг, медіанні значення у більшості сезонів становили 1 мкг/кг, що свідчить про переважання низького рівня контамінації, але з окремими випадками високих пікових значень.

Перевищення нормативів фіксувалися щороку, і частка таких зразків коливалась від 0,6% (2020–2021) до 7,7% (2022–2023), а в середньому за п'ять сезонів — 3,9% від усіх протестованих 1504 зразків. Найпроблемнішим виявився сезон 2022–2023, коли не лише зафіксовано найбільше перевищень (37 зразків), але й максимальний показник у 102 мкг/кг, що є критично високим для безпечності зерна.

Загалом дані свідчать, що Охратоксин А у пшениці — це більш поширена та мінлива проблема, ніж афлатоксини. Контамінація переважно залишається на безпечному рівні, проте поодинокі випадки високих концентрацій становлять серйозний ризик як для харчового використання, так і для експорту. Це підкреслює необхідність регулярного моніторингу та особливо ретельного контролю умов зберігання, адже Охратоксин А — типовий токсин, що утворюється саме на етапі післязбиральної обробки та зберігання.

Таблиця 3

Показники вмісту Охратоксину А в м'якій пшениці протягом торгівельних сезонів 2020–2025 років

Мікотоксини / Кількість аналізованих зразків	Мін.	Макс.	Середнє	Медіана
Сезон 2020–2021 років				
Охратоксин А, мкг/кг / 167 зразків	1	21	1,1	1
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 1 / 0,6%, 2* - 0 / 0%				
Сезон 2021–2022 років				
Охратоксин А, мкг/кг / 185 зразків	1	32	1,6	1
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 9 / 4,9%, 2* - 0 / 0%				
Сезон 2022–2023 років				
Охратоксин А, мкг/кг / 481 зразок	1	102	2,2	1
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 37 / 7,7%, 2* - 0 / 0%				
Сезон 2023–2024 років				
Охратоксин А, мкг/кг / 382 зразки	1	21	1,4	1
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 8 / 2,1%, 2* - 0 / 0%				
Сезон 2024–2025 років				
Охратоксин А, мкг/кг / 289 зразків	< 1	17	< 1	< 1
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 3 / 1,0%, 2* - 0 / 0%				
Узагальнені дані сезонів 2020–2025 років				
Охратоксин А, мкг/кг / 1504 зразки	< 1	102	1,5	1
Кількість зразків з перевищеннями / відсоток від загальної кількості: 1* - 58 / 3,9%, 2* - 0 / 0%				

Примітки:

1*) Перевищення норми вмісту Охратоксину А (5,0 мкг/кг) в необробленій м'якій пшениці для продовольчих цілей у Регламенті Європейської Комісії (EU) 2023/915

2*) Перевищення рекомендованої норми вмісту Охратоксину А (250 мкг/кг) в необробленій м'якій пшениці для кормових цілей у Рекомендаціях Європейської Комісії 2006/576/ЄС

3) Межа кількісного визначення (LOQ) – 1 мкг/кг

Висновки. За результатами моніторингу 2020–2025 років, Афлатоксин В1 та Сума афлатоксинів у м'якій пшениці виявлялися на стабільно низькому рівні. Це свідчить, що ризик забруднення афлатоксинами у досліджених партіях пшениці мінімальний, і вони не становили суттєвої загрози для безпечності зерна в умовах досліджуваного регіону та періоду.

Натомість Охратоксин А проявив значно більшу варіативність і небезпеку: у середньому 3,9% зразків перевищували допустимий рівень 5,0 мкг/кг, а максимальні значення сягали 102 мкг/кг. Пік проблемності при-

пав на сезон 2022–2023 років, коли перевищення фіксувалися у 7,7% зразків. Через частіші випадки перевищення, значно ширший діапазон концентрацій та походження як токсину зберігання, саме визначення Охратоксину А є більш критичним для контролю якості та безпечності пшениці, ніж афлатоксинів, у сучасних умовах.

References

1. Deligeorgakis, C., Magro, C., Skendi, A., et al. (2023). *Fungal and toxin contaminants in cereal grains and flours: Systematic review and meta-analysis*. *Foods*, 12(23), 1–52.
2. Weidenbörner, M. (2017). *Mycotoxins in plants and plant products*. In *Mycotoxins in plants and plant products* (pp. 717–722).
3. Enespa, & Chandra, P. (2022). *Aflatoxins: Food safety, human health hazards and their prevention*. In *Aflatoxins – Occurrence, detoxification, determination and health risks* (pp. 1–20).
4. Palpacelli, V., Beco, L., & Ciani, M. (2007). *Vomitoxin and zearalenone content of soft wheat flour milled by different methods*. *Journal of Food Protection*, 70(2), 509–513.
5. Khoi, C., Chen, J., Lin, T., et al. (2021). *Ochratoxin A-induced nephrotoxicity: Up-to-date evidence*. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 11237, 1–20.
6. Tolosa, J., Graziani, G., Gaspari, A., et al. (2017). *Multi-mycotoxin analysis in durum wheat pasta by liquid chromatography coupled to quadrupole orbitrap mass spectrometry*. *Toxins*, 9(2).
7. Froment, A., Gautier, P., Nussbaumer, A., et al. (2011). *Forecast of mycotoxins levels in soft wheat, durum wheat and maize before harvesting with Qualimètre®*. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 6(2), 277–281.
8. Kaushik, G. (2015). *Effect of processing on mycotoxin content in grains*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(12), 1672–1683.
9. Jedidi, I., Soldevilla, C., Lahouar, A., et al. (2018). *Mycoflora isolation and molecular characterization of Aspergillus and Fusarium species in Tunisian cereals*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(5), 868–874.
10. Hassan, Z. U., Al-Thani, R. F., Migheli, Q., et al. (2018). *Detection of toxigenic mycobiota and mycotoxins in cereal feed market*. *Food Control*, 84, 389–394.
11. Jedidi, I., Jurado, M., Cruz, A., et al. (2021). *Phylogenetic analysis and growth profiles of Fusarium incarnatum-equiseti species complex strains isolated from Tunisian cereals*. *International Journal of Food Microbiology*, 353 (November 2020).

AFLATOXINS AND OCHRATOXIN A CONTENT IN UKRAINIAN WHEAT

Zhygunov D., Doctor of Sciences (Dr. Hab.) in Engineering, Professor, Onischenko O., postgraduate
Odesa National University of Technology

Abstract. The article deals with mycotoxicological risks associated with contamination of soft wheat (*Triticum aestivum* L.) with toxic metabolites of micromycetes, in particular Aflatoxins (B1, B2, G1, G2) and Ochratoxin A. Particular attention is paid to the regulation of maximum content of these mycotoxins in food and feed products in accordance with the acts of the European Union - Regulation (EU) 2023/915, 2002/32/EC Directive and 2006/576/EC Recommendations.

As a result of the analysis of 1380 samples of Ukrainian common wheat for the period 2020-2025 by liquid chromatography with mass spectrometry (LC-MS/MS), it was established that none of the studied samples exceeded the permissible levels of Aflatoxin B1 and Sum of aflatoxins (B1, B2, G1, G2) according to the norms of the European Union. At the same time, in 3.9% of cases during the trading seasons 2020-2025, the content of Ochratoxin A exceeded the limits for food wheat, especially in the season 2022-2023 (in 7.7% of cases).

The results obtained indicate the overall compliance of Ukrainian common wheat with the European Union requirements for aflatoxins content but indicate the need for enhanced monitoring of Ochratoxin A, given the influence of climatic factors that contribute to the growth of toxigenic fungi. The established regularity confirms the need for constant control of the content of mycotoxins in order to ensure the export safety of grain products.

Key words: mycotoxins, wheat grain, aflatoxin B1, ochratoxin A, safety indicators.

Список використаної літератури

1. Deligeorgakis, C., Magro, C., Skendi, A., та ін. *Fungal and Toxin Contaminants in Cereal Grains and Flours: Systematic Review and Meta-Analysis*. / *Foods*. 2023. 12, 23. С. 1–52.
2. Weidenbörner, M. *Mycotoxins in Plants and Plant Products*. / *Mycotoxins in Plants and Plant Products*. 2017. С. 717–722.
3. Enespa, Chandra, P. *Aflatoxins: Food Safety, Human Health Hazards and Their Prevention*. / *Aflatoxins - Occurrence, Detoxification, Determination and Health Risks*. 2022. С. 1–20.

4. Palpacelli, V., Beco, L., Ciani, M. Vomitoxin and zearalenone content of soft wheat flour milled by different methods. / *Journal of Food Protection*. 2007. 70, 2. С. 509–513.
5. Khoi, C., Chen, J., Lin, T., та ін. Ochratoxin A-Induced Nephrotoxicity : Up-to-Date Evidence. / *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. 22, 11237. С. 1–20.
6. Tolosa, J., Graziani, G., Gaspari, A., та ін. Multi-mycotoxin analysis in durum wheat pasta by liquid chromatography coupled to quadrupole orbitrap mass spectrometry. / *Toxins*. 2017. 9, 2.
7. Froment, A., Gautier, P., Nussbaumer, A., та ін. Forecast of mycotoxins levels in soft wheat, durum wheat and maize before harvesting with Qualimètre®. / *Journal fur Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*. 2011. 6, 2. С. 277–281.
8. Kaushik, G. Effect of Processing on Mycotoxin Content in Grains. / *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2015. 55, 12. С. 1672–1683.
9. Jedidi, I., Soldevilla, C., Lahouar, A., та ін. Mycoflora isolation and molecular characterization of *Aspergillus* and *Fusarium* species in Tunisian cereals. / *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2018. 25, 5. С. 868–874.
10. Hassan, Z. U., Al-Thani, R. F., Migheli, Q., та ін. Detection of toxigenic mycobiota and mycotoxins in cereal feed market. / *Food Control*. 2018. 84. С. 389–394.
11. Jedidi, I., Jurado, M., Cruz, A., та ін. Phylogenetic analysis and growth profiles of *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex strains isolated from Tunisian cereals. / *International Journal of Food Microbiology*. 2021. 353, November 2020.

Отримано в редакцію 06.07.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 06.07.2025
Approved 02.09.2025

ВИКОРИСТАННЯ КОМАХ У КОРМОВИРОБНИЦТВІ: ПРОГНОЗИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Макаринська А.В., д.т.н., доц., Козак О.А., аспірант
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Важливим аспектом у збільшенні обсягів виробництва комбікормів та покращення їх якості є впровадження інноваційних технологій за рахунок розширення асортименту кормових інгредієнтів. Зважаючи на те, що вітчизняне виробництво та балансування повнораціонних комбікормів за протеїном значною мірою залежить від імпортного соєвого шроту, розглядається можливість застосування комах як альтернативного джерела білка. Розвиток даного напрямку може сприяти підвищенню ефективності тваринницької галузі та посиленню продовольчої безпеки України. В матеріалах статті узагальнені результати наукових теоретичних та практичних досліджень світового ринку комах та можливостей розвитку ринку комах та продуктів їх життєдіяльності як перспективної альтернативи традиційним джерелам білка у виробництві повнораціонних комбікормів. Проаналізовані основні гравці ринку комах Nextprotein, Buhler AG, Hexafly, Entofood, Enviroflight, Diptera Nutrition, AgriProtein, існуючі об'єми та перспективи подальшого розширення виробництва. Наведено дані хімічного складу комах Чорної львинки (*Hermetia illucens*), борошняного черв'яка (*Tenebrio molitor*), цвіркуна домашнього (*Acheta domesticus*), їх кормову цінність, екологічні переваги вирощування, технології переробки та вплив на продуктивність тварин. Проаналізовано амінокислотний склад комах Чорної львинки (*Hermetia illucens*) у порівнянні з соєвим шротом. Розглянуто життєвий цикл та особливості вирощування Чорної львинки (*Hermetia illucens*), а також порівняльний аналіз показників продуктивності комбікормів для комах та сільськогосподарських тварин, птиці, риби. Наведено данні з ефективності використання комах та продуктів їх переробки в раціонах сільськогосподарських тварин та птиці. Встановлено, що в личинках комах міститься високий вміст сирого протеїну 38-60 %, незамінних амінокислот, які можуть бути ефективно використані у годівлі сільськогосподарських тварин, птиці, риб в кількості 5-25 %. Проаналізовані нормативні аспекти та економічна доцільність впровадження таких кормів у сільському господарстві.

Ключові слова: комах, Чорна львинка, білкова сировина, амінокислотний склад, комбікорми, інноваційні технології.

Вступ. В умовах глобальних кліматичних змін, стрімкого зростання чисельності населення у світі та збільшення попиту на продукцію тваринництва спостерігається гостра необхідність розробки альтернативних і стійких джерел білка для кормових цілей. У цьому контексті комах набувають статусу перспективного джерела білка для кормових раціонів, адже вони забезпечують тварин усіма необхідними поживними речовинами, підтримуючи їхній здоровий ріст і розвиток [1].

Виробництво білка з комах та продуктів їх переробки є екологічно стійким завдяки значно нижчим потребам у землі, воді та кормах порівняно з традиційним тваринництвом. З огляду на зростання обсягів тваринництва й аквакультури, впровадження кормів на основі комах розглядається як стратегічний шлях до створення стабільного та екологічно збалансованого джерела білка.

Метою даного дослідження є узагальнення статистичних даних ринку комах та проведення аналізу використання комах та продуктів їх переробки у кормовиробництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Світовий ринок комах у 2024 році оцінювався в 1,71 млрд доларів США, у 2025 році – 2,169 млрд доларів США, а до 2035 року, за прогнозами, його обсяг сягне 11,318 млрд доларів. Очікується, що середньорічний темп зростання за період 2025–2035 років становитиме 18,0%. У першій половині 2024 року ринок зростав на 16,3%, а в другій — на 16,9%. У 2025 році передбачається подальше зростання: до 17,4% у першому півріччі та до 19,0% у другому. До 2035 року ринкова вартість компаній із вирощування комах у різних країнах сягатиме: у США — 1 697,7 млн доларів, у Німеччині — 1 131,8, у Китаї — 905,5, в Індії — 565,9, у Японії — 226,4. Північна Америка в 2025 році формуватиме 34% світового попиту на корми з комах, а Південна Азія — до 24% до 2035 року. Основними гравцями ринку є компанії: Nextprotein, Buhler AG, Hexafly, Entofood, Enviroflight, Diptera Nutrition та AgriProtein [2-4].

До лідерів з вирощування комах із річним доходом понад 20 млн доларів США та часткою ринку близько 40–50% належать Protix, AgriProtein і Ynsect, що пояснюється потужною клієнтською базою та інноваційними технологіями, які формують ринкові тренди й підтримують принципи сталого розвитку. Компанії другого рівня: Enterra Feed Corporation, InnovaFeed та Aspire Food Group — мають дохід у межах 5–20 млн доларів, активно використовують локальний попит на білок комах, часто укладають стратегічні партнерства для розширення ринку та вдосконалення технологій. До третьої групи належать малі підприємства з виручкою менше 5 млн доларів. Вони зазвичай діють у межах нішевих сегментів ринку, орієнтуючись на місцеві

потреби. Через обмежені виробничі потужності та невеликий географічний охопит їхній вплив на глобальний ринок є обмеженим [3, 4].

Варто зауважити, що провідні компанії активно інвестують у наукові дослідження та розробки з метою підвищення ефективності виробництва і поліпшення поживних характеристик кормів. Вони створюють стратегічні альянси з аграрними підприємствами та науковими установами, аби об'єднати ресурси та експертизу. Водночас асортимент продукції постійно розширюється, щоб задовольнити зростаючі потреби тваринництва й аквакультури. Особливий акцент робиться на екологічності, що допомагає залучити свідомих до сталого розвитку споживачів.

Компанія Protix спеціалізується на виробництві високоякісного білка з комах Чорної львинки та активно фінансує НДтаДКР з метою вдосконалення технологій і підвищення поживної цінності своєї продукції; приділяє значну увагу екологічності, використовуючи органічні відходи як корм для вирощування комах. Компанія Ynsect фокусується на виробництві борошна з комах для кормів і добрив, розширює виробничі потужності та впроваджує інноваційні технології для підвищення продуктивності, співпрацює з аграрними партнерами для створення індивідуалізованих рішень у сфері кормовиробництва. Компанія Enterra виробляє білок із Чорної львинки, орієнтуючись на потреби тваринництва та аквакультури, активно підтримує принципи сталого розвитку та бере участь у наукових дослідженнях, спрямованих на покращення поживних властивостей кормів [4].

Сьогодні вирощування комах розглядається як екологічно ефективна та інноваційна технологія, оскільки дозволяє утилізувати органічні відходи та побічні продукти, сприяючи розвитку циркулярної економіки з мінімальним утворенням відходів і зниженням споживання ресурсів. Ця тенденція особливо актуальна у свинарстві та птахівництві, де фермери дедалі активніше шукають альтернативи традиційним джерелам білка. Білок з комах, багатий на незамінні амінокислоти, вітаміни та мінерали, покращує поживну цінність комбікормів і сприяє зміцненню здоров'я тварин та їхньому активному росту. Використання інгредієнтів із комах у годівлі свиней і птиці дозволяє виробникам забезпечувати належний рівень протеїну, зменшити вуглецевий слід і підвищити екологічну стійкість свого господарства [5, 6].

Найбільш вивченими видами є личинки Чорної львинки (*Hermetia illucens*), борошняний черв'як (*Tenebrio molitor*) та домашній цвіркун (*Acheta domestica*) (рис. 1) [7]. Ці комахи характеризуються високим вмістом сирого білка (до 70% у сухій речовині), жирів, вітамінів та мінеральних речовин. У таблиці 1 наведено дані хімічного складу комах.



Рис. 1 – Комахи, як харчові та кормові компоненти

Таблиця 1

Хімічний склад комах, %

Вид комах	Волога	Білок	Жир	Вуглеводи	Зола
Борошняний черв'як (<i>Tenebrio molitor</i>)	14,0	50,0	30,0	6,0	2,0
Чорна львинка (<i>Hermetia illucens</i>)	5,0	39,0	38,0	9,0	9,0
Цвіркун домашній (<i>Acheta domestica</i>)	8,7	60,0	20,0	6,0	5,3

Аналіз даних табл. 1 дозволяє зробити висновок, що комахи є білково-жировою кормовою сировиною. Біомаса комах містить близько 45-60 % сирого протеїну, 20-35 % сирого жиру, а також інші корисні елементи, що робить їх цінними в годівлі свиней, птиці та риби. Комахи є джерелом хітину, лауринової кислоти та антимікробних пептидів, які чинять позитивний вплив на здоров'я та розвиток тварин. Хітин сприяє підвищенню імунітету, гальмує ріст патогенних мікроорганізмів, а також проявляє гіполіпідемічні та гіпохолестеролемічні властивості. Жир Чорної львинки завдяки високому вмісту лауринової кислоти має виражену антибактеріальну та антимікробну дію. Антимікробні пептиди покращують приріст живої маси тварин, підвищують засвоюваність поживних речовин, підтримують здоров'я шлунково-кишкового тракту, оптимізують склад мікробіоти, зміцнюють імунну систему та можуть розглядатися як альтернатива антибіотикам [5-7].

Таблиця 2

Порівняльні показники
продуктивної дії комбікормів

Призначення комбікорму	Термін відгодівлі, діб	Коефіцієнт конверсії корму
	36-42	1,5-1,7
	160-240	2,45-3,1
	300-350	1,0-1,5
	180-730	1,2-2,0
	5-8	1,7
	5-8	1,7

Рис. 2 – Життєвий цикл Чорної львинки (*Hermetia illucens*)

Комахи мають короткий життєвий цикл і швидко розмножуються (рис. 2), що дозволяє в короткі терміни виробляти значні обсяги білкової біомаси. У порівнянні з вирощуванням сільськогосподарських тварин, комахи потребують значно менше ресурсів, наприклад витрати для виробництва 1 кг білка з комах у порівнянні з виробництвом 1 кг яловичого білка витрачається води у 500 разів менше, землі у 10 разів та кормів у 12 разів [8].

Показники продуктивної дії комбікормів для комах у порівнянні з іншими сільськогосподарськими тваринами, птицею та рибою наведені у табл. 2. Комахи не вибагливі до субстрату, а його склад впливає на хімічний склад готової біомаси комах. Промислово личинки комах вирощують на субстраті з харчових відходів, пташиному посліді, що дозволяє раціонально та ефективно використовувати різні категорії відходів та забезпечити можливість одержання цінного тваринного білка без вкладання значних фінансових вкладень. В перспективі вирощування комах може стати одним з напрямків циркулярної економіки, яка базується на замкнутому циклі використання ресурсів (харчових відходів) для харчування личинок. Отже, такий підхід робить личинок комах чудовою альтернативою традиційним джерелам білка, таким як соя або риба. Крім того, вони здатні переробляти органічні відходи, включаючи харчові та агропромислові залишки, на високо цінний білковий продукт, що сприяє економіці замкнутого циклу [9], економії ресурсів, мінімізації відходів і утриманні продуктів і матеріалів в обігу якомога довше.

Використання місцевих кормових ресурсів, включаючи органічні відходи, сприяє зниженню витрат на комбікорми та зменшує залежність від зовнішніх ринків. Зниження витрат на кормову сировину та можливість локального виробництва роблять комах вигідною альтернативою. З урахуванням масштабованості та низької собівартості комах можуть стати стратегічним ресурсом в аграрному секторі.

Технологічний процес виробництва включає кілька етапів:

А) Селекція та розведення комах у контрольованих умовах із заданою температурою, вологістю та освітленням.

Б) Годування органічними залишками, такими як харчові відходи, побічні продукти переробки сільгоспродукції.

В) Збір та переробка личинок шляхом сушіння, подрібнення та термічної обробки.

Г) Додавання до комбікорму у вигляді порошку, гранул або екстрактів у складі збалансованих раціонів.

Практичні дослідження використання комах та продуктів їх переробки у тваринництві підтверджують, що вони позитивно впливають на ріст, імунітет та травлення у тварин. Наприклад, личинки Чорної львинки мають амінокислотний профіль, співставний із соєвими бобами, що дозволяє розглядати їх біомасу як придатний компонент повнораціонних комбікормів для свинарства, птиківництва та рибицтва. Експериментальні дослідження показали, що рівень включення комах до раціону може становити від 5 до 25%, залежно від виду тварин і цілей годівлі. В результаті використання комах у раціонах сільськогосподарської птиці спостерігалось покращення конверсії корму та зниження смертності курчат [10], у свиней: збільшення середньодобового приросту маси і підвищення засвоюваності білка [11, 12], у риб: ефективна заміна рибного борошна за збереження темпів зростання [13]. Крім того спостерігалось підвищення стійкості тварин до захворювань завдяки вмісту хітину та антимікробних пептидів. Введення комах та продуктів їх переробки не впливає на смакові якості тваринницької продукції (м'ясо, яйця, молоко) [14, 15].

Дослідження, проведені різними незалежними інститутами, підтверджують, що білок із комахового борошна позитивно впливає на вирощування сільськогосподарських тварин, зокрема свиней, птиці, та більш раціональне використання дорогих білкових кормових компонентів. Так, у 2018 році вченими, професором д-р Франком Лібертом та магістром природничих наук Сюзанною Фельтен із Геттінгенського університету імені Георга-Августа доведено, що борошно з личинок Чорної львинки, завдяки своїй поживній цінності та відповідності специфічним потребам тварин, здатне частково замінювати соєвий шрот у кормах для свиней і птиці.

У таблиці 3 наведено порівняльний склад вмісту амінокислот у соєвому шроті та борошні з біомаси комах. Порівняльні дослідження показують, що борошно з личинок комах має недостатній вміст окремих амінокислот (цистеїну та аргініну), однак цей недолік легко усунути шляхом використання синтетичних добавок амінокислот. Уміст таких ключових амінокислот, як метіонін і лізин, залишається на рівні, близькому до показників соєвого шроту. Оскільки лізин є критично важливим для росту тканин і формування м'язових білків, його обов'язкове додавання у корми є стандартною практикою, яка не викликає ускладнень у виробників комбікормів. [14]. Перетравність більшості амінокислот становить понад 90 % [15].

Таблиця 3

Хімічний склад та амінокислотний профіль соєвого шроту та борошна з комах

Показник	Соевий шрот	Борошно з комах		
		Чорна львинка (Hermetia illucens)	Борошняний черв'як (Tenebrio molitor)	Цвіркун домашній (Acheta domesticus)
Вміст поживних речовин, %				
Суша речовина	89,5	94,5	86,3	90,8
Сирий протеїн	48,1	60,8	59,0	60,6
Сирий жир	21,0	14,1	27,6	17,7
Клітковина	9,3	10,9	-	13,5
Вміст амінокислот (всього АК/16 г азоту):				
Лізин	6,07	5,42	5,10	5,80
Метіонін	1,28	1,24	1,40	1,60
Треонін	3,78	3,57	2,69	3,60
Цистеїн	1,46	0,80	0,90	0,98
Аргінін	7,19	4,12	4,60	5,70
Валін	4,37	5,36	6,30	5,70
Лейцин	7,32	6,24	7,30	6,60
Ізолейцин	4,34	3,86	4,60	4,00
Гістидин	2,53	2,73	5,10	3,40
Фенілаланін	5,20	3,10	3,40	3,20

У 2021 році, за результатами досліджень Вагенінгенського університету у напрямку з вивчення питань функціонування та підтримки здорової мікрофлори кишківника, вивчали використання борошна з личинок комах до комбікорму дорослих свиней на відгодівлі. Встановлено, що включення такого борошна впливає на збільшення бактеріальної різноманітності мікрофлори у кишківнику свиней та покращує стан шлунку тварин. Дослідження, які були проведені у 2020 році у Гуельфському інституті при відгодівлі свиней, показали, що засвоюваність амінокислот білка борошна з біомаси личинок комах знаходиться практично на одному рівні у порівнянні з амінокислотами соєвого шроту, а за деякими навіть переважають їх [16].

Дослідження Мішель ван Спанкерен та компанії Protix у 2024 році показали, що додавання 18% борошна з личинок комах до раціону курей забезпечило високі показники обмінної енергії та загальних коефіцієнтів засвоюваності поживних речовин у травному тракті. Розраховані стандартизовані коефіцієнти засвоюваності амінокислот клубової кишки підтверджують, що борошно з комах є перспективною альтернативою соєвому шроту у годівлі птиці [16].

Приватна некомерційна дослідницька організація Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik (DIL) при вивченні продуктів від Protix встановила, що жир комах Чорної львинки використовує на 99,9% менше землі, ніж кокосова олія. Використання борошна з комах ProteinX в раціонах свиней зменшує викиди CO₂ на 71% порівняно з соєвим борошном, а личинки демонструють 0,198 кг CO₂ екв. за кілограм продукту [17].

Для масштабного використання комах та продуктів їх переробки необхідно забезпечити дотримання ветеринарних і санітарних норм та нормативно-правові аспекти переходу комах як кормовий ресурс. У Європі та інших країнах діють суворі регламенти щодо видів комах, допустимих до використання, та методів їх обробки. Важливо уникати накопичення токсинів та важких металів, особливо якщо комахи вирощуються на органічних відходах.

Згідно з Регламентом Комісії ЄС 2021/1372, який вступив в дію з 17.08.2021 року, та змінами до Додатку IV Регламенту (ЄС) № 999/2001, в країнах ЄС надано дозвіл використовувати перероблену білкову тваринну сировину, зокрема перероблені білки тваринного походження (ПБТП) до яких відносять продукти переробки сільськогосподарських комах. У ЄС використання комах як кормової сировини регулюється Регламентом ЄС № 2017/893, який допускає певні види комах за дотримання суворих стандартів безпеки та гігієни. Допустимими є: *Hermetia illucens*, *Tenebrio molitor*, *Acheta domesticus*, та ін. [14, 18].

В Україні та на пострадянському просторі нормативна база поки що перебуває в стадії розробки, проте науковий та промисловий інтерес до цієї теми активно зростає.

Висновки

Використання комах у комбікормовій промисловості є перспективним та інноваційним напрямом, що дозволяє:

- забезпечити високоякісне джерело білка;
- скоротити залежність від дорогої соєвої та рибної сировини;
- знизити навантаження на довкілля;
- підвищити рентабельність сільськогосподарського виробництва.

Незважаючи на певні виклики — правові, технологічні та культурні — цей напрямок демонструє високу перспективність, технологічний та економічний потенціал для впровадження в агропромисловий комплекс. Потрібні подальші дослідження та розробка нормативної та законодавчої бази для широкого впровадження цієї технології в агропромисловий комплекс.

References

1. Van Huis, A., Van Isterbeeck, J., Klunder, H.. (2013). Edible insects: future prospects for food and feed security. FAO Forestry Paper, 171.
2. U sviti prohnouzuyut' burkhlyvyy rist rynku kormovykh komakh (2017). [Website]. URL: <https://kurkul.com/news/8119-u-sviti-prohnouzuyut-burhliviy-ris-rinku-kormovih-komah>
3. Rynok yistivnykh komakh, tendentsiyi 2025. (2025). [Website]. URL: <https://agriradar.news/%D1%97%D1%81%D1%82%D1%96%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D1%85-%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%85/7532/>
4. Analiz rynku kormiv dlya komakh za tyamy komakh, sfer zastosuvannya ta rehioniv do 2035 roku. (2025). [Website]. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/ru/reports/insect-feed-market>
5. New feed ingredients: improving the quality and nutritional value of meat. (2025). ALL ABOUT FEED, [Website]. URL: <https://www.allaboutfeed.net/all-about/new-proteins/novel-feed-ingredients-enhancing-meat-quality-and-nutritional-value/>
6. Marjolein van der Spiegel, Elisa Leune. Insect products as health promoter in poultry and pig feed. (2025). ALL ABOUT FEED, [Website]. URL: <https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-additives/insect-products-as-health-promoter-in-poultry-and-pig-feed/>
7. Makkar, H.P.S., Tran, G., Heuzé, V., Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. Animal Feed Science and Technology, 197, 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008>
8. Oonincx, D.G.A.B., de Boer, I.J.M. (2012). Ekologichnyy vplyv na produktyvnist' syrovyny yak proteínovyy material dlya lyudey – A life cycle assessment. PLOS ONE, 7(12), e51145. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051145>
9. Gasco, L., Biancarosa, I., Liland, N.S. (2020). Z waste to feed: otsinyty protsesy, shcho vyroblyayut' insect protein. Animal Feed Science and Technology, 271, 114377.
10. Bovera, F., Loponte, R., Marono, S., Piccolo, G., Parisi, G., Iaconisi, V., Gasco, L. and Nizza, A. (2016) Use of *Tenebrio molitor* Larvae Meal as a Protein Source in Broiler Diet: Effect on Growth Performance, Nutrient Digestibility, and Carcass and Meat Traits. Journal of Animal Science, 94, 639-647. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9201>
11. Biasato, I., Renna, M., Gai, F. (2018). Black soldier fly and yellow mealworm larvae as protein sources for poultry and swine: a review. Animal Feed Science and Technology, 235, 1-14.
12. Bellezza Oddon S., Biasato I., Imarisio A., Pipan M. (2021). Black soldier fly and yellow mealworm live larvae for broiler chickens: Effects on bird performance and health status, *Anim Physiol a Anim Nutr*, 105, 1(49). DOI: [10.1111/jpn.13567](https://doi.org/10.1111/jpn.13567)
13. Henry, M., Gasco, L., Piccolo, G., Fountoulaki, E. (2015). Review on the use of insects in the diet of farmed fish: Past and future. Animal Feed Science and Technology, 203, 1-22. DOI: [10.1016/j.anifeedsci.2015.03.001](https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.03.001)
14. Velten, S., Neumann, C., Schäfer, J., Liebert, F. (2018) Effects of the Partial Replacement of Soybean Meal by Insect or Algae Meal in Chicken Diets with Graded Amino Acid Supply on Parameters of Gut Microbiology and Dietary Protein Quality. Open Journal of Animal Sciences, 8, 259-279. doi: [10.4236/ojas.2018.83020](https://doi.org/10.4236/ojas.2018.83020)
15. Kharchova tsinnist' inhrediyentiv na osnovi boroshnyanoho khrobaka dlya kotiv ta sobak (2024). [Website]. URL: <https://www.vetfactor.com/ua/news/kharchova-tcinnist-ingredi-ntiv-na-osnovi-boroshnyanogo-khrobaka-dlya-kotiv-ta-sobak/>

16. Emma Khant. Korm dlya domashnikh tvaryn na osnovi komakh: pro shcho kayf? (2021). [Website]. URL: <https://ga-petfoodpartners.co.uk/uk/knowledge-centre/whats-the-buzz-about-insect-based-pet-food/?dynam>
17. Pig and poultry production. Tasty snacks for livestock. Janett Peschel, Big Dutchman. (2023). [Website]. URL: <https://www.bigdutchman.com/uk/novini-ta-notatki/stattja/ptakhivnictvo-ta-svinarstvo-apetitni-zakuski-u-menju-dlja-tvarinc/>
18. Insects: A turnkey solution to feed sustainability. Michel van Spankeren. (2024). Poultry World, [Website]. URL: <https://www.poultryworld.net/specials/insects-a-turnkey-solution-to-feed-sustainability>
19. Commission Regulation (EU) 2017/893 (2017). Official Journal of the European Union of 24 May 2017 Amending Annex I and IV to Regulation (EC) No 999/2001 of the European Parliament and of the Council and Annexes X, XIV and XV to Commission Regulation (EU) No 142/2011 as Regards the Provisions on Processed Animal Protein. L 138, 92-116.

USE OF INSECTS IN FEED PRODUCTION: FORECASTS AND PROSPECTS

**Makarynska A.V., Doctor of Technical Sciences, Ass. Prof., Kozak O.A., Postgraduate Student
Odesa National University of Technology, Odesa**

Abstract. *An important aspect in increasing the production of compound feeds and improving their quality is the introduction of innovative technologies by expanding the range of feed ingredients. Given that domestic production and balancing of complete compound feeds in terms of protein largely depends on imported soybean meal, the possibility of using insects as an alternative source of protein is being considered. The development of this area can contribute to increasing the efficiency of the livestock industry and strengthening the food security of Ukraine. The article summarizes the results of scientific theoretical and practical research on the global insect market and the possibilities of developing the market of insects and their vital products as a promising alternative to traditional sources of protein in the production of complete compound feeds. The main players of the insect market Nextprotein, Buhler AG, Hexafly, Entofood, Enviroflight, Diptera Nutrition, AgriProtein, existing volumes and prospects for further expansion of production are analyzed. The data on the chemical composition of the insects Black lionfish (*Hermetia illucens*), mealworm (*Tenebrio molitor*), house cricket (*Acheta domesticus*), their feed value, environmental benefits of cultivation, processing technologies and impact on animal productivity are presented. The amino acid composition of the insects Black lionfish (*Hermetia illucens*) is analyzed in comparison with soybean meal. The life cycle and features of the cultivation of Black lionfish (*Hermetia illucens*) are considered, as well as a comparative analysis of the performance indicators of compound feeds for insects and farm animals, poultry, and fish. Data on the effectiveness of the use of insects and their processing products in the diets of farm animals and poultry are presented. It was established that insect larvae contain a high content of crude protein 38-60%, essential amino acids, which can be effectively used in the feeding of farm animals, poultry, and fish in an amount of 5-25%. The regulatory aspects and economic feasibility of introducing such feeds in agriculture are analyzed.*

Keywords: insects, Black lionfish, protein raw materials, amino acid composition, compound feeds, innovative technologies.

Список використаної літератури

1. Van Huis, A., Van Isterbeeck, J., Klunder, H. (2013). Edible insects: future prospects for food and feed security. FAO Forestry, 171.
2. У світі прогнозують бурхливий ріст ринку кормових комах (2017). Електронний ресурс. Режим доступу: <https://kurkul.com/news/8119-u-sviti-prognozuuyut-burhliviy-rist-rinku-kormovih-komah>
3. Ринок їстівних комах, тенденції 2025. (2025). Електронний ресурс. Режим доступу: <https://agriradar.news/%D1%97%D1%81%D1%82%D1%96%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D1%85-%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%85/7532/>
4. Аналіз ринку кормів для комах за типами комах, сфер застосування та регіонів до 2035 року. (2025). Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.futuremarketinsights.com/ru/reports/insect-feed-market>
5. New feed ingredients: improving the quality and nutritional value of meat. (2025). ALL ABOUT FEED, Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.allaboutfeed.net/all-about/new-proteins/novel-feed-ingredients-enhancing-meat-quality-and-nutritional-value/>
6. Marjolein van der Spiegel, Elisa Leune. Insect products as health promoter in poultry and pig feed. (2025). ALL ABOUT FEED, Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-additives/insect-products-as-health-promoter-in-poultry-and-pig-feed/>
7. Makkar, H.P.S., Tran, G., Heuzé, V., Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. Animal Feed Science and Technology, 197, 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008>

8. Oonincx, D.G.A.B., de Boer, I.J.M. (2012). Ekolohichnyy vplyv na produktyvnist' syrovyny yak proteínovyy material dlya lyudey – A life cycle assessment. PLOS ONE, 7(12), e51145. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051145>
9. Gasco, L., Biancarosa, I., Liland, N.S. (2020). Z waste to feed: otsynyty protsesy, shcho vyroblyayut' insect protein. Animal Feed Science and Technology, 271, 114377.
10. Bovera, F., Loponte, R., Marono, S., Piccolo, G., Parisi, G., Iaconisi, V., Gasco, L. and Nizza, A. (2016) Use of Tenebrio molitor Larvae Meal as a Protein Source in Broiler Diet: Effect on Growth Performance, Nutrient Digestibility, and Carcass and Meat Traits. Journal of Animal Science, 94, 639-647. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9201>
11. Biasato, I., Renna, M., Gai, F., et al. (2018). Black soldier fly and yellow mealworm larvae as protein sources for poultry and swine: a review. Animal Feed Science and Technology, 235, 1-14.
12. Bellezza Oddon S., Biasato I., Imarisio A., Pipan M. (2021). Black soldier fly and yellow mealworm live larvae for broiler chickens: Effects on bird performance and health status, Anim Physiol a Anim Nutr, 105, 1(49). DOI: [10.1111/jpn.13567](https://doi.org/10.1111/jpn.13567)
13. Henry, M., Gasco, L., Piccolo, G., Fountoulaki, E. (2015). Review on the use of insects in the diet of farmed fish: Past and future. Animal Feed Science and Technology, 203, 1-22. DOI: [10.1016/j.anifeedsci.2015.03.001](https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.03.001)
14. Velten, S., Neumann, C., Schäfer, J., Liebert, F. (2018) Effects of the Partial Replacement of Soybean Meal by Insect or Algae Meal in Chicken Diets with Graded Amino Acid Supply on Parameters of Gut Microbiology and Dietary Protein Quality. Open Journal of Animal Sciences, 8, 259-279. doi: [10.4236/ojas.2018.83020](https://doi.org/10.4236/ojas.2018.83020).
15. Харчова цінність інгредієнтів на основі борошняного хробака для котів та собак (2024). [Website]. URL: <https://www.vetfactor.com/ua/news/kharchova-tcinnist-ingredi-ntiv-na-osnovi-boroshnyanogo-khrobaka-dlya-kotiv-ta-sobak/>
16. Емма Хант. Корм для домашніх тварин на основі комах: про що кайф? (2021). Електронний ресурс. Режим доступу: URL: <https://ga-petfoodpartners.co.uk/uk/knowledge-centre/whats-the-buzz-about-insect-based-pet-food/?dynamic>
17. Pig and poultry production. Tasty snacks for livestock. Janett Peschel, Big Dutchman. (2023). Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://www.bigdutchman.com/uk/novini-ta-notatki/statija/ptakhivnictvo-ta-svinarstvo-apetitni-zakuski-u-menju-dlja-tvarin/>
18. Insects: A turnkey solution to feed sustainability. Michel van Spankeren. (2024). Електронний ресурс. Режим доступу: URL: <https://www.poultryworld.net/specials/insects-a-turnkey-solution-to-feed-sustainability/>
19. Commission Regulation (EU) 2017/893 (2017). Official Journal of the European Union of 24 May 2017 Amending Annex I and IV to Regulation (EC) No 999/2001 of the European Parliament and of the Council and Annexes X, XIV and XV to Commission Regulation (EU) No 142/2011 as Regards the Provisions on Processed Animal Protein. L 138, 92-116.

Отримано в редакцію 27.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 27.06.2025
Approved 02.09.2025

АДАПТАЦІЯ ЛОКАЛЬНОЇ СИРОВИНИ У ТЕХНОЛОГІЮ ШВИДКО-ЗАМОРОЖЕНОЇ ЛАЗАНЬ

Тележенко Л.М., д-тор техн. наук, професор, Іваненко Є.В., аспірант
Одеський національний технологічний університет

Анотація. Розширення асортименту заморожених напівфабрикатів швидкого приготування на сьогодні є актуальним і своєчасним. Резервування практично готових страв протягом тривалого часу дозволить оптимізувати роботу закладів ресторанного господарства, підвищити їх конкурентоспроможність, удосконалити різні форми обслуговування споживачів. Показано, що борошняні кулінарні вироби складають найбільшу частку цього сегменту ринку і уведення до асортименту популярної у багатьох країнах світу лазань надасть додаткову перевагу в організації бізнесу. Виробництво борошняних листів, що складають основу багатошарової композиції страви, доцільно здійснювати на основі локальної сировини, що має певні відмінності. Найбільш характерною відмінністю твердих і м'яких сортів пшениці є склоподібність, що визначає направленість білково-крохмальних процесів у подальшій переробці сировини. За кількістю білка борошно з твердих і м'яких сильних сортів пшениці відрізняється не значно, проте якість і взаємодія білкових структур суттєво впливає на технологічні властивості тіста та готових виробів. Скорегувати трансформацію білкових структур можна шляхом зміни рецептурної композиції і удосконаленням режимів механічної обробки тіста в процесі замішування. Показано, що крупинки крохмалю у борошні, отриманому з пшениці м'яких сортів, містять порівняно більше амілози. Остання має лінійну структуру і молекулярну масу до 10^6 , на відміну від амілопектину, що має сферичну форму і молекулярну масу до 10^8 . Уведення в систему мономолекулярних речовин, які приймають участь в структуроутворенні, дозволяє отримати більш стабільні форми крохмалю. Проведено пошук добавок до рецептури тіста і визначено, які з них дозволяють досягти бажаного результату. Процес заморожування розморожування лазань супроводжується фазовим переходом води і її міграцією з центральних шарів до фронту фазового переходу. Здатність систем зв'язувати воду більше залежить від їх структури, що має особливе значення при заморожуванні продуктів, так як в результаті льодоутворення відбуваються структурні зміни та міграція вологості. Ці перетворення належить дослідити в подальшому.

Ключові слова. заморожені напівфабрикати, лазанья, борошно пшениці з твердих і м'яких сортів, білково-крохмальні перетворення у тісті.

Вступ. Одним із основних напрямків розвитку громадського харчування є виробництво кулінарних напівфабрикатів високого ступеня готовності, з яких внаслідок мінімально необхідних технологічних операцій одержують страви або кулінарні вироби [1]. Така організація технологічного процесу в закладах ресторанного господарства є гнучкою, ритмічною та дозволяє зменшити критичний час виготовлення страв. Також заморожені напівфабрикати можуть бути реалізовані через торгівельну мережу і магазини кулінарії. Темп життя сучасної людини залишає їй все менше часу на рутинні домашні справи, в число яких входить і щоденне приготування їжі. Все більше співвітчизників не мають достатньо часу для самостійного приготування, а купують заморожені напівфабрикати і просто доводять їх до готовності протягом декількох хвилин.

Результати моніторингу ринку заморожених напівфабрикатів в Україні свідчать, що його структура формується переважно за видами продукції: 65% припадає на пельмені, вареники та аналогічні вироби; 19% — на м'ясні напівфабрикати; 12% — на млинці, чебуреки та подібну продукцію; 4% становлять сирні вироби. [2]. Аналіз стану сучасного ринку борошняних напівфабрикатів свідчить про зростання питомої ваги різних видів продукції у цій групі [2, 3].

Незважаючи на складну економічну ситуацію, прогнозується, що ринок напівфабрикатів в Україні у середньостроковій перспективі зростатиме в середньому на 4,5% щороку. Повне відновлення до довоєнного рівня, однак, є малоімовірним. Основними детермінантами розвитку виступають чисельність населення і його купівельна спроможність. За умов тривалих кризових явищ можливе збільшення частки дешевших продуктів — зокрема, за курятини або зі зниженим вмістом сиру [2], а також необхідність постійного оновлення асортименту основних груп продукції.

Літературний огляд. У межах Концепції державної політики щодо формування здорового харчування особлива увага приділяється розробленню інноваційних харчових продуктів із чітко визначеним складом та функціональними властивостями. Виробництво швидкозаморожених напівфабрикатів здійснюється на спеціалізованих харчових підприємствах, у заготівельних цехах ресторанних холдингів, а за потреби — безпосередньо у виробничих підрозділах закладів ресторанного господарства, оснащених відповідним технологічним обладнанням. Створення нових видів продукції є необхідною умовою забезпечення конкурентоспроможності підприємств харчування в сучасних ринкових умовах та відповідає тенденціям розвитку індустрії здорового харчування.

Підхід до створення й виробництва нового асортименту швидкозаморожених борошняних напівфабрикатів ґрунтується на визначенні найбільш популярних світових страв, вивченні особливості їх виготовлення при застосуванні локальної сировини та здатності до заморожування продукції високого ступеня готовності. Таке комплексне дослідження включає вивчення властивостей сировини й компонентів продукту, моделювання рецептур і технологічних процесів виробництва, а також розв'язання питання збереження основних властивостей продуктів під час заморожування, зберігання та розморожування.

Розширити асортимент борошняних та м'ясних напівфабрикатів можна шляхом впровадження у виробництво популярної італійської страви лазанья, яка все більше подобається споживачам в Україні. Такий продукт являє собою багатосарову композицію, основу якої складають борошняні листи, між якими розміщують фарш просочений соусом.

Традиційно італійці при виготовленні тіста для пасти і лазанї застосовують борошно твердих сортів пшениці (*durum*), що забезпечує високу якість готового продукту. Враховуючи напрям України на євроінтеграцію, Міністерство аграрної політики проводить роботи з адаптації методів та стандартів визначення якості та класифікації зерна і затвердило оновлений ДСТУ 3768:2019 «Пшениця. Технічні умови». Відповідно, стандарт набуває європейських норм згідно з ДСТУ ISO6322-1, ДСТУ ISO6322-2, ДСТУ ISO6322-3 [4]. Важливими є такі ознаки: клас, скловидність, показник вологості та натури, вміст клейковини та білку, наявність сміттєвих домішок, паразитів тощо. Зерно пшениці розділяють на м'які та тверді сорти.

Зерно твердих і м'яких сортів пшениці всіх класів повинно бути здоровим, неушкодженим і містити мінімальну кількість домішок. Одним із ключових показників якості є запах — він має бути властивим зерну, без сторонніх ароматів, а колір — насиченим, жовтуватим. Вміст клейковини є визначальним критерієм для оцінювання технологічних властивостей пшениці. Зерно, уражене шкідниками або мікрофлорою, характеризується зниженням вмісту білкових сполук, що негативно впливає на формування клейковини. У високоякісному зерні частка білка становить у середньому 14–14,5%. На підвищення рівня білка та клейковини істотно впливає застосування азотних добрив у фазі активного росту та колосіння. Не менш важливим показником є склоподібність зерна, що відображає його консистенцію та визначає інтенсивність білково-крохмальних взаємодій під час переробки. Високий ступінь склоподібності свідчить про більшу механічну міцність зерна. Для твердої пшениці характерна склоподібна структура ендосперму, тоді як м'які сорти відзначаються більш різномірною консистенцією. Обидва види пшениці мають високу харчову цінність, проте різняться за мікронутрієнтним складом: тверда пшениця містить більше білка, тоді як м'яка — більшу кількість жирів, вуглеводів, клітковини, а також підвищений вміст вітамінів і мінералів [4]. Показник натури зерна відображає ступінь його виповненості, що є ознакою завершеності процесів синтезу основних біополімерів — білків, крохмалю та цукрів. Чим більша натура, тим вищий вміст ендосперму, а отже, і запасних поживних речовин, що визначають якість борошна.

Тверді та м'які сорти пшениці мають деякі відмінності у характеристиках (табл. 1 і 2).

Таблиця 1

Деякі характеристики твердої пшениці (за класами)

Показник	Значення за класами				
	1 клас	2 клас	3 клас	4 клас	5 клас
Натура, г/л не менше ніж	750	750	730	710	Без обмежень
Вологість, % не більше ніж	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
Склоподібність, % не менше ніж	70	60	50	40	Без обмежень
Масова частка білка у перерахунку на суху речовину, % не менше ніж	14	13	12	11	Без обмежень

Таблиця 2

Деякі характеристики м'якої пшениці (за класами)

Показник	1 клас	2 клас	3 клас	5 клас
Натура, г/л не менше ніж	775	750	730	Без обмежень
Вологість, % не більше ніж	14	14	14	14
Склоподібність, % не менше ніж	50	40	Без обмежень	Без обмежень
Масова частка білка у перерахунку на суху речовину, % не менше ніж	14	12,5	11	Без обмежень
Масова частка сирогої клейковини, %	28	23	18	Без обмежень

Тверді сорти пшениці відзначаються щільнішою структурою ендосперму та підвищеним умістом білка порівняно з м'якими. Для них характерна також вища вологоємність за сталого рівня сухих речовин. Зерно твердих сортів має більш жорстку консистенцію і містить більшу кількість амілози, що впливає на формування щільнішої структури крохмальних гранул. Крім того, тверда пшениця вирізняється підвищеним умістом ліпідів, вітамінів та мінералів, які визначають її високу харчову цінність.

Натомість м'які сорти пшениці характеризуються меншою кількістю білка і жиру, м'якішою консистенцією зерна та нижчою щільністю. У порівнянні з твердими сортами, вони містять менше вітамінів і мінера-

льних речовин, а також мають нижчий показник вологості при однаковому вмісті сухих речовин. У борошні з твердих сортів багато клейковини, крохмальні крупинки тверді та маленькі. Для замісу тіста потрібно багато води. З такого злаку роблять усі види пасти та крупи. У борошні з м'якого злаку крупинки крохмалю більше і м'якше, менше клейковини, води потрібно мало. Така пшениця підходить для приготування пишно-го тіста.

За врожайністю тверді сорти пшениці поступаються м'яким на 2-5 ц/га, але вони менш схильні до хвороб і шкідників і майже не обсіпаються. Через кліматичні особливості, традиційне культивування тощо в Україні вирощують головним чином м'які сорти пшениці. Тож необхідно визначити наскільки незначні відмінності у хімічному складі та особливості структури пшениці м'яких сортів вплинуть на якість швидко-замороженого напівфабрикату лазаньї.

Таким чином, найбільш характерною відмінністю твердих і м'яких сортів пшениці є склоподібність, що визначає направленість білково-крохмальних процесів у подальшій переробці.

За кількістю білка борошно з твердих і м'яких сильних сортів пшениці відрізняється не значно, проте якість і взаємодія білкових структур суттєво впливає на технологічні властивості тіста та готових виробів. Наприклад, дисульфідні зв'язки в білках пшениці відіграють важливу роль так як вони надають клейковині пружних властивостей. Тому при характеристиці білків локальної сировини (табл. 2) наведено ще й масову частку сирі клейковини.

Сира клейковина містить приблизно 70 % вологи, а її сухі речовини представлені переважно білковими сполуками. У складі сухої речовини клейковини міститься близько 39–45 % гліадину, 34–40 % глютеніну та 3–7 % глобулінів і альбумінів, які зберігаються навіть після багаторазового промивання. Основні фізичні характеристики сирі клейковини — пружність, розтяжність і здатність утримувати газ — мають вирішальне значення для формування структури тіста та якості готових борошняних виробів.

Проте не лише властивості сировини впливають на перетворення білків. При замішуванні тіста відбуваються різні процеси, у тому числі окисні перетворення, що призводить до втрати незамінних амінокислот. Наявність у системі антиоксидантів (наприклад, аскорбінової кислоти) [5,6] може ізолювати вільні –SH групи глютатіону (протекторного пептиду) від участі у сульфгідрільно-дисульфідній взаємодії з білками клейковини, що формуватиме якість продукту.

Технологічний процес приготування тіста також впливає на білкові речовини сировини, що призводить до тих чи інших перетворень (агрегації, деструкції білків тощо), в залежності від міри впливу і способу замішування.

Очевидно, що відмінність у структурі крохмалю зерен різних видів, матиме певний вплив на властивості борошна. Крупинки крохмалю у борошні, отриманому з пшениці м'яких сортів, містять порівняно більше амілози. Остання має лінійну структуру і молекулярну масу до 10^6 , на відміну від амілопектину, що має сферичну форму і молекулярну масу до 10^8 . Характеристика основних властивостей цих фракцій крохмалю наведена в таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняльна характеристика основних властивостей амілози і амілопектину

Показник	Амілоза	Амілопектин
Розчинність у воді	Розчинна у гарячій воді	Набухає у гарячій воді, утворюючи клейстери
Стабільність розчину при зберіганні	Розчини не стабільні здатні до ретро-градації	Залишаються стабільними тривалий час
Будова	Лінійна, молекули утворюють спіралі	Розгалужена, молекули утворюють сфери

Для крохмалів взаємодія з водою залежить від співвідношення у молекулі амілози та амілопектину. Згідно з дослідженнями, проведеними у різні роки [7,8,9] можна стверджувати, що крохмаль з високим вмістом амілози виявляє желуючі властивості. Крохмаль, в якому більше амілопектину характеризується більш високою плинністю. Це необхідно врахувати при адаптації локальної сировини, якою є борошно пшениці м'яких сортів, у технологію лазаньї.

Амілоза крохмалів може утворювати конформації різних видів, що суттєво позначається на структурі гелю [10]. Наявність в системі певних речовин може призводити до утворення більш протягнутої спіралі. В той час як уведення мономолекулярних речовин, які приймають участь в утворенні структури, дозволяє отримати більш стабільні форми крохмалю. Стабілізація відбувається за рахунок водневих містків між сусідніми залишками О-2 та О-3 або іншими елементами структури.

Для того щоб наблизити характеристики тіста з борошна м'яких сортів до характеристик тіста з твердих сортів для виготовлення лазаньї потрібно підвищити міцність клейковинної сітки, відрегулювати крохмальну фазу та вологоутримання.

Виходячи із літературних даних, кукурудзяне борошно містить природні каротиноїдні пігменти (лютеїн, зеаксантин), які забезпечують жовте забарвлення тіста, подібне до продуктів з дуруму. Крім того, більші частинки кукурудзяного борошна надають тілу зернистої текстури, що є характерною для італійських макаронних виробів. Низький вміст білка та відсутність глютену знижують надмірну розтяжність пшеничного тіста, наближаючи його до щільної консистенції, типової для тіста з твердих сортів пшениці.

Для тонкого налаштування співвідношення амілози/амілопектину і в'язко-пружних властивостей крохмальної фази застосовують кукурудзяний крохмаль. Це впливає на набухання, твердість після термообробки та стабільність тіста. Кукурудзяний крохмаль характеризується високим вмістом крохмалю (90–95 %) при мінімальному вмісті білка. Додавання цієї сировини змінює співвідношення крохмалю і білка в пшеничному борошні, зменшуючи надмірну еластичність тіста та підвищуючи його стабільність під час варіння. Таким чином, кукурудзяний крохмаль коригує реологічні показники, зокрема в'язкість та формостійкість, що наближає характеристики тіста до семоліни [15, 16, 17, 18].

Вівсяні висівки містять значну кількість білка (15–17 %) і харчових волокон, особливо бета-глюканів. Вони підвищують водопоглинальну здатність борошна і стабільність тіста, зменшують його розварюваність. Окрім технологічного ефекту, ця добавка підвищує харчову цінність продукту, збагачуючи його білком і харчовими волокнами [19, 20, 21].

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження було визначення можливостей адаптації локальної рослинної сировини (пшеничне борошно м'яких сортів) у технологію швидкозамороженої лазаньї з метою наближення її фізико-хімічних та органолептичних властивостей до виробів із борошна твердих сортів (дурум). Шляхом змішування з додатковими компонентами скоригувати баланс білка, крохмалю та клітковини, а також відтворити характерні реологічні властивості тіста з дуруму (вища пружність, щільність, стабільність при термообробці).

В даній роботі були вирішені наступні завдання:

Провести аналіз сучасного стану ринку заморожених борошняних напівфабрикатів та обґрунтувати актуальність впровадження лазаньї у вітчизняне виробництво.

Дослідити відмінності у фізико-хімічних характеристиках борошна твердих та м'яких сортів пшениці, що впливають на якість тіста.

Визначити вплив додавання сухої пшеничної клейковини, кукурудзяного крохмалю та вівсяних висівок на структуроутворення тіста з пшеничного борошна вищого гатунку.

Розробити кілька рецептур тіста для лазаньї з локальної сировини та визначити їх органолептичні, фізичні та хімічні показники.

Порівняти отримані результати із класичною рецептурою тіста з дуруму та визначити найбільш оптимальні рецептурні композиції для промислового використання

Матеріали і методи досліджень. Для проведення досліджень використовували борошно пшеничне із твердих сортів та борошно пшеничне вищого гатунку з додаванням кукурудзяного крохмалю, кукурудзяного борошна та вівсяних висівок. Дослідження проводились як із сировиною, так і з виготовленими з них зразками тіста для лазаньї.

Методика розробки рецептур. Балансування білково-клейковинного комплексу:

Суша клейковина введена для підвищення вмісту білка і посилення глютенівної сітки, адже пшеничне в/г борошно має слабшу клейковину. Діапазон 2,0–4,0 % підібраний за аналогією з роботами з модифікації м'яких сортів пшениці [22,23,24,].

Корекція вмісту крохмалю:

Кукурудзяний крохмаль додавався у межах 1,3–3,3 %. Його роль — знизити надмірну пластичність тіста і зробити його щільнішим. Верхня межа (3,3 %) обрана експериментально як та, що ще не руйнує структуру, але помітно наближає до реології semolina [25,26,27,28,29,30].

Підвищення водопоглинання та стабільності:

Вівсяні висівки у кількості 1,3–3,2 % вводилися як джерело харчових волокон і білка. Вони абсорбують воду та знижують розварюваність тіста. Діапазон вибрано за результатами вітчизняних досліджень [31,32,33]

Фіксація вологи:

Вода утримувалася на постійному рівні (34 %), щоб ізолювати вплив саме складу сухої частини та виключити фактор різної гідратації при замісі.

Рецептура 1: мінімальні рівні добавок (контрольна суміш).

Рецептура 2: максимальне збагачення сухою клейковиною (для компенсації слабкої глютенівної мережі).

Рецептура 3: підвищена частка кукурудзяного крохмалю (для максимальної щільності).

Рецептура 4: підвищена частка вівсяних висівок (для стабільності та функціональності).

Рецептура 5: збалансований варіант, із середніми рівнями усіх добавок.

Методи дослідження властивостей сировини. Для оцінки якості пшеничного борошна було визначено вологість борошна, вміст сирого протеїну, крохмалю, кислотність борошна та кількість клейковини.

Вологість борошна визначалась за ДСТУ ISO 712:2015 «Зернові та продукти з них. Визначення вмісту вологи. Контрольний метод» (ISO 712:2009).

Вміст сирого протеїну - ДСТУ ISO 20483:2016 «Злакові та бобові культури. Визначання вмісту азоту та сирого протеїну методом К'ельдаля» (ISO 20483:2013, IDT).

Вміст крохмалю - ISO 10520:1997 «Крохмаль нативний. Визначення вмісту крохмалю. Поляриметричний метод Еверса».

Кількість клейковини – ДСТУ ISO 21415-1:2009 «Пшениця і пшеничне борошно. Вміст клейковини. Визначання сирової клейковини ручним способом» (ISO 21415-1:2006, IDT).

Методи дослідження тіста. Вологість тіста та формостійкість тіста визначалась згідно з вимогами ДСТУ 4910:2008 «Хліб, булочки та здобні вироби. Методи визначення фізико-хімічних показників».

Водопоглинання тіста визначалось гравіметричним методом: до навішування борошна поступово додають воду, замішуючи до утворення тіста середньої пластичності (не липне до рук, але не розсипається). Вимірюють кількість доданої води та розраховують у відсотках до маси борошна за формулою

$$W = \frac{m_b}{m_g} \cdot 100$$

W — водопоглинання, %

m_b — маса води, доданої до зразка, г

m_g — маса борошна (або суміші сухих інгредієнтів), г

Втрати при варінні визначались за ISO 7304-1:2016 «Манна крупа з твердих сортів пшениці та харчові макаронні вироби — Оцінка кулінарних якостей харчових макаронних виробів за допомогою сенсорного аналізу».

Показник твердості листів для лазань визначався за допомогою органолептичної оцінки.

Результати та їхнє обговорення. Для оцінки якості та порівняння пшеничного борошна вищого гатунку та борошна із твердих сортів пшениці було визначено основні фізико-хімічні показники (Таблиця 4).

Таблиця 4

Фізико-хімічні показники пшеничного борошна із твердих сортів пшениці та борошна вищого гатунку.

Показник	Durum (тверда пшениця)	Пшеничне борошно вищого гатунку (м'яка пшениця)
Вологість, %	13,8	14,2
Сирий протеїн, %	12,6	11,1
Крохмаль, %	74,5	71,2
Клейковина, %	30,3	25,3

За класичною рецептурою тісто для лазань виготовляється із двох компонентів: борошно та вода у співвідношенні 2:1 [22, 23,24]. Для визначення оптимальної рецептурної композиції для виготовлення тіста для лазань із використанням пшеничного борошна вищого гатунку, яка за своїми властивостями та фізико-хімічними показниками буде наближена до тіста із дуруму, було розроблено 5 зразків із різним співвідношенням компонентів (Таблиця 5).

Таблиця 5

Рецептурні композиції тіста для лазань із пшеничного борошна вищого гатунку

Компонент, %	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3	Рецептура 4	Рецептура 5
Борошно пшеничне в/г	61,4	58,7	58,7	58,3	58,7
Суха клейковина	2,0	4,0	2,7	2,6	3,3
Кукурудзяний крохмаль	1,3	1,3	3,3	1,9	2,0
Вівсяні висівки	1,3	2,0	1,3	3,2	2,0
Вода	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0

В розроблених рецептурних композиціях та в класичній рецептурі листів для лазань було визначено відсоток сирового протеїну та клейковини, водопоглинання та втрати при варінні (Таблиця 3). Твердість визначали органолептичним методом за допомогою сенсорної шкали 0–5 (де 5 = «al dente» для тіста з дуруму) та відносний рейтинг (Рисунок 1).

Таблиця 3

Визначення показників якості розроблених рецептурних композицій

Рецептура	Сирий протеїн, %	Сира клейковина, %	Водопоглинання, %	Втрати при варінні, %
Тісто з дуруму (еталон)	13,9	29	52,8	6,3
Рецептура 1	13,2	27	51,5	7,8
Рецептура 2	13,8	29	53,8	6,7
Рецептура 3	13,0	28	51,5	7,3
Рецептура 4	13,0	26	56,2	7,9
Рецептура 5	13,9	28	53,8	6,2

Тісто з дуруму (еталон): Твердість - 5,0. Листи пружні, добре тримають форму, характерний ефект «al dente»; втрати при варінні: 6,0–6,5%; вважається оптимальним рівнем для високоякісної пасти відповідно до ISO 7304-1:2006.

Рецептура №1: Твердість - 3,0; структура менш міцна, можливе розривання при формуванні; втрати при варінні 7,5–8,0%, що значно перевищує показники твердих сортів пшениці.

Рецептура №2: Твердість - 4,2; завдяки підвищеному вмісту сухої пшеничної клейковини формується щільна білкова сітка; втрати при варінні: 6,5–7,0%, що ближче до рівня зразка з дуруму.

Рецептура №3: Твердість: 3,6. Поліпшення структури відносно базової рецептури, але нижче, ніж у рецептури 2; втрати при варінні: 7,0–7,5%; додавання кукурудзяного крохмалю частково стабілізує структуру, але ефект обмежений.

Рецептура №4: Твердість - 3,1; листи м'якші, менша пружність через наявність висівок; втрати при варінні: 7,5–8,0%; висівки підвищують водопоглинання, але послаблюють глютену сітку.

Рецептура №5: Твердість - 4,5; найбільш наближений показник до durum, листи добре тримають форму та демонструють «al dente» консистенцію; втрати при варінні: 6,2–6,8%, що практично відповідає еталону.

Найближчі до характеристик тіста з борошна дуруму — рецептури 2 та 5. Рецептатура 3 забезпечує компроміс між твердістю та стабільністю структури. Рецептури 1 і 4 характеризуються підвищеними втратами при варінні та нижчою твердістю.

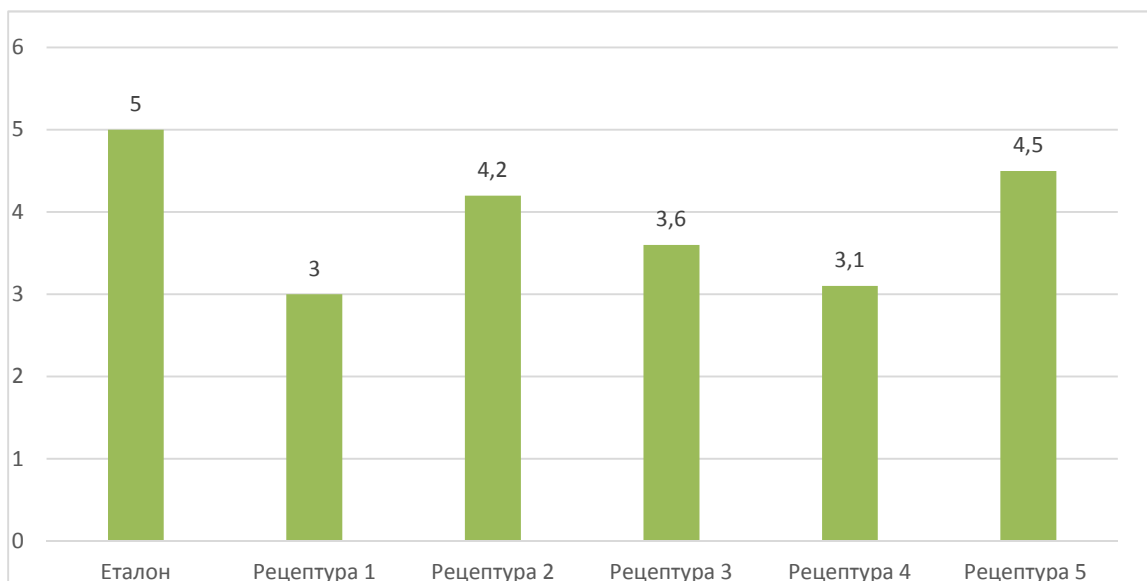


Рис. 1 – Органолептична оцінка твердості листів для лазаньї

Висновки. У ході дослідження підтверджено, що заміна традиційного борошна з твердих сортів пшениці на борошно м'яких сортів у виробництві тіста для лазаньї можлива за умови корекції рецептури. Найбільш суттєвими є відмінності у склоподібності зерна та якісних характеристиках клейковини, що впливають на формостійкість, пружність та кулінарні властивості тіста.

Виходячи із проведених досліджень та досліджень інших авторів встановлено, що введення сухої пшеничної клейковини покращує білковий каркас, підвищує твердість та знижує втрати при варінні. Кукурудзяний крохмаль дозволяє регулювати співвідношення амілози й амілопектину, що забезпечує кращу стабільність тіста після термообробки. Додавання вівсяних висівок сприяє водозв'язуванню та покращує вологоутримувальну здатність тіста, проте у надлишку може знижувати пружність листів.

Порівняльний аналіз показав, що найближчими за показниками до тіста з дуруму є рецептури з підвищеним вмістом сухої клейковини та збалансованою кількістю крохмалю й висівок (рецептури 2 та 5). Вони забезпечили твердість, кулінарні властивості та мінімальні втрати при варінні, максимально наближені до зразка з борошна твердих сортів.

Таким чином, розроблені рецептури на основі локальної сировини можуть бути використані у виробництві швидкозамороженої лазаньї як конкурентоспроможний продукт із покращеними якісними характеристиками, що сприятиме розширенню асортименту українського ринку заморожених напівфабрикатів.

References

1. State Standard of Ukraine. (1999). *Public catering. Terms and definitions (DSTU 3862-99)*. Retrieved from <https://www.tourinfocenter.odessa.ua/dstu-3862-99/#page-content>
2. Pro-Consulting. (n.d.). *Market of semi-finished products in Ukraine: forecasts*. Retrieved from <https://pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-polufabrikatov-v-ukraine-prognozy>
3. Prylipko, T. M., Semenov, O. M., & Kostash, V. B. (2024). *Optimization of the technology of quick-frozen flour semi-finished products*. *Tavriya Scientific Bulletin*, (3), 128–132. <http://188.190.43.194:7980/jspui/bitstream/123456789/13453/1/Стаття.pdf> <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.3.13>
4. GrowHow Ukraine. (n.d.). *New DSTU standard: Wheat. Technical conditions*. Retrieved from

- <https://www.growhow.in.ua/novyy-standart-dstu-pshenytsia-tekhnichni-umovy/>
5. Koehler, P. (2003). Reaction of oxidized glutathione with reactive thiol groups of wheat gluten proteins. *Cereal Chemistry*, 80(3), 259–263. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2003.80.3.259>
 6. Hrušková, M., & Novotná, D. (2003). Effect of wheat flour supplementation with ascorbic acid on rheological properties of dough. *Czech Journal of Food Sciences*, 21(2), 51–57. <https://doi.org/10.17221/5084-CJFS>
 7. Buliaderis, C. G. (1998). Structures and phase starch polymers. In R. H. Walter (Ed.), *Polysaccharide association structures in food* (pp. 57–168). Marcel Dekker.
 8. Barsby, T. L., Donald, A. M., & Frazier, P. I. (2001). *Starch: Advances in structure and function* (pp. 34–37). The Royal Society of Chemistry.
 9. McKenna, B. M. (Ed.). (2003). *Texture in food. Volume 1: Semisolid foods*. Woodhead Publishing.
 10. Banks, W., & Muir, D. (1980). Structure and chemistry of the starch granule. In *The biochemistry of plants* (Vol. 3, pp. 321–324). Academic Press.
 11. Wang, Y. H., Liu, L. L., Bian, K., Sun, B., & Wang, T. L. (2022). Effect of wheat gluten on surface and quality characteristics of ready-to-cook Chinese fresh noodles during storage. *Food Science & Nutrition*, 10(7), 2132–2142. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2801>
 12. Day, L. (2006). Wheat gluten: Production, properties and application. In B. R. Hamaker (Ed.), *Technology of functional cereal products* (pp. 235–263). Woodhead Publishing.
 13. Krawęcka, A., Sobota, A., & Sykut-Domańska, E. (2020). The influence of xanthan gum and vital gluten supplementation on quality of common wheat pasta. *Journal of Food Science and Technology*, 57(7), 2506–2515. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04300-0>
 14. Emire, S. A., Harki, E., & Ding, E. L. (2015). Effect of wheat gluten addition on technological properties of wheat pasta. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(6), 1321–1328. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12774>
 15. Yousif, E. I., Gadallah, M. G. E., & Sorour, A. M. (2012). Physico-chemical and rheological properties of modified corn starches and their effect on noodle quality. *Annals of Agricultural Science*, 57(1), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2012.03.007>
 16. Mojarrad, L. S., Rezaei, K., Hosseini, H., & Mortazavian, A. M. (2018). Effects of high-amylose corn starch on textural and physicochemical properties of canned noodles. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 163–170. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13561>
 17. Xue, Y., Li, C., Zhang, W., & Zhu, F. (2025). Effects of waxy corn starch on the quality of dried fine noodles: Mechanism insights. *Food Hydrocolloids*, 152, 109038. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109038>
 18. Wang, J., Zhao, S., Lu, W., & Sun, B. (2024). Starch structure and noodle quality: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260, 130463. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130463>
 19. Espinosa-Solis, V., Martinez-Bustos, F., Morales-Sanchez, E., & San Martin-Martinez, E. (2019). Cooking quality and physicochemical evaluation of spaghetti enriched with oat bran. *Journal of Food Science and Technology*, 56(2), 864–872. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3513-9>
 20. Padalino, L., Mastromatteo, M., Lecce, L., Spinelli, S., Conte, A., & Del Nobile, M. A. (2011). Optimization of gluten-free spaghetti based on maize flour and oat bran enriched in β -glucans. *Food Science and Technology International*, 17(1), 57–65. <https://doi.org/10.1177/1082013210367042>
 21. Piwińska, M., Woźniak, A., Teterycz, D., Dziuba-Karkowska, A., & Dziki, D. (2023). Effect of ultrafine oat hulls addition on quality and cooking properties of wheat pasta. *Foods*, 12(14), 2690. <https://doi.org/10.3390/foods12142690>
 22. Lucisano, M., Cappa, C., & Fongaro, L. (2021). From semolina to pasta: Influence of raw materials and processing steps on quality. In B. Bhandari, Y. Roos, & A. Ghandi (Eds.), *Chemistry and physics of foods* (pp. 275–296). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71575-2_14
 23. Sissons, M. (2008). Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Foods*, 2(2), 75–90. <https://doi.org/10.3390/foods2020075>
 24. Nilusha, R. A., Jayasinghe, J. M. S., Perera, O. S., Perera, P. I., Jayawardana, B. C., & Liyanage, R. (2019). Development of pasta products with nonconventional ingredients and their effect on selected quality characteristics: A brief overview. *International Journal of Food Science*, 2019, 6750726.
 25. Witczak, M., Korus, J., Ziobro, R., & Juszcak, L. (2012). Rheological and thermal properties of gluten-free dough supplemented with modified starches. *Food Hydrocolloids*, 28(2), 418–424.
 26. Dib, A., Agli, A., Saidi, D., Bourekoua, H., & Rosell, C. M. (2018). Effect of hydrothermal treated corn flour addition on the quality of pasta. *BIO Web of Conferences*, 10, 02003.
 27. Xue, Z., Dai, H., Liu, Y., Chen, Y., & Zhang, H. (2025). Effect of waxy corn starch on the quality of dough and fine dried noodles. *International Journal of Food Science and Technology*, 60(1), vvae065.
 28. Scott, M. P., Ohm, J., Manthey, F., & Simsek, S. (2023). Effect of protein–starch interactions on starch retrogradation in wheat-based systems. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(6), 4921–4942.
 29. Aviles-Simental, A., Lopez-Cortez, M., Lujan-Acosta, J., De la Torre-Gutierrez, M., & Milán-Carrillo, J. (2024). Impact of corn, bean, and semolina flour blends on quality parameters of pasta. *Cereals*, 4(3), 25.

30. Romano, A., Marti, A., & Cecchini, F. (2021). New ingredients and alternatives to durum wheat semolina for pasta making. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 543–553.
31. Pisarets, O., & Holinka, I. (2015). Corn flour: Chemical composition and technological properties, structural and mechanical properties of dough from wheat-corn mixture. *Scientific Works of the National University of Food Technologies*.
32. Yudina, T. (2020). Technological properties of cereal flours. *Innovative Pedagogy*, 25(1), 144–147.
33. Kobayakov, S. M. (2020). Prospects for the use of corn flour in bakery production. *Scientific Works of Kherson State Agrarian and Economic University*.

ADAPTATION OF LOCAL RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF QUICK-FROZEN LASAGNA

**Telezhenko L.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Ivanenko E.V., postgraduate student
Odesa National University of Technology**

Abstract. Expanding the range of frozen convenience foods is relevant and timely today. Long-term storage of practically ready-to-eat meals will optimize the operations of catering establishments, increase their competitiveness, and improve various forms of customer service. It is shown that flour-based culinary products occupy the largest share of this market segment, and the introduction of lasagna, popular in many countries, will provide an additional advantage for business development. The production of flour sheets, which form the basis of the multi-layer composition of the dish, is advisable to use local raw materials, which have certain differences. The most characteristic difference between hard and soft wheat varieties is vitreousness, which determines the direction of protein-starch processes during further processing of the raw materials. Flour from hard and soft wheat varieties does not differ significantly in terms of protein content, but the quality and interaction of protein structures significantly affect the technological properties of dough and finished products. The transformation of protein structures can be controlled by varying the composition of the recipe and improving the mechanical processing modes of the dough during kneading. It is shown that the starch grains of soft wheat flour contain relatively more amylose. The latter has a linear structure and a molecular weight of up to 10^6 , unlike amylopectin, which is spherical and has a molecular weight of up to 10^8 . The introduction of monomolecular substances involved in structure formation into the system allows for the production of more stable forms of starch. A search for additives to the dough recipe was conducted, and which ones achieve the desired result was determined. The process of freezing and thawing lasagna is accompanied by a phase transition of water and its migration from the central layers to the phase transition front. The ability of systems to bind water largely depends on their structure, which is particularly important during freezing, as ice formation results in structural changes and moisture migration. These transformations require further study.

Keywords: frozen semi-finished products, lasagna, durum and soft wheat flour, protein-starch transformations in dough.

Список використаної літератури

1. ДСТУ 3862-99. Громадське харчування. Терміни та визначення [Internet]. Available from: <https://www.tourinfocenter.odessa.ua/dstu-3862-99/#page-content>
2. Pro-Consulting. Ринок напівфабрикатів в Україні: прогнози [Internet]. Available from: <https://pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-polufabrikatov-v-ukraine-prognozy>
3. Приліпко ТМ, Семенов ОМ, Косташ ВБ. Оптимізація технології швидкозаморожених борошняних напівфабрикатів. Таврійський науковий вісник. 2024;(3):128–32. Available from: <http://188.190.43.194:7980/jspui/bitstream/123456789/13453/1/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8F.pdf> doi:10.32782/tnv-tech.2024.3.13
4. Новий стандарт ДСТУ: пшениця. Технічні умови [Internet]. Available from: <https://www.growhow.in.ua/novyuy-standart-dstu-pshenytsia-tekhnichni-umovy/>
5. Koehler P. Reaction of oxidized glutathione with reactive thiol groups of wheat gluten proteins. *Cereal Chem.* 2003;80(3):259–63. doi:10.1094/CCHEM.2003.80.3.259
6. Hrušková M, Novotná D. Effect of wheat flour supplementation with ascorbic acid on rheological properties of dough. *Czech J Food Sci.* 2003;21(2):51–7. doi:10.17221/5084-CJFS
7. Buliaderis CG. Structures and phase starch polymers. In: Walter RH, editor. *Polysaccharide Association Structures in Food*. New York: Marcel Dekker; 1998. p. 57–168.
8. Barsby TL, Donald AM, Frazier PI. *Starch: Advances in Structure and Function*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry; 2001. p. 34–7.
9. McKenna BM, editor. *Texture in food. Volume 1: Semisolid foods*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2003. 472 p.
10. Banks W, Muir D. Structure and chemistry of the starch granule. In: *The biochemistry of plants*. Vol. 3. New York: Academic Press; 1980. p. 321–4.

11. Wang YH, Liu LL, Bian K, Sun B, Wang TL. Effect of wheat gluten on surface and quality characteristics of ready-to-cook Chinese fresh noodles during storage. *Food Sci Nutr.* 2022;10(7):2132–42. doi:10.1002/fsn3.2801
12. Day L. Wheat gluten: Production, properties and application. In: Hamaker BR, editor. *Technology of functional cereal products*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2006. p. 235–63.
13. Krawęcka A, Sobota A, Sykut-Domańska E. The influence of xanthan gum and vital gluten supplementation on quality of common wheat pasta. *J Food Sci Technol.* 2020;57(7):2506–15. doi:10.1007/s13197-020-04300-0
14. Emire SA, Harki E, Ding EL. Effect of wheat gluten addition on technological properties of wheat pasta. *Int J Food Sci Technol.* 2015;50(6):1321–8. doi:10.1111/ijfs.12774
15. Yousif EI, Gadallah MGE, Sorour AM. Physico-chemical and rheological properties of modified corn starches and their effect on noodle quality. *Ann Agric Sci.* 2012;57(1):19–27. doi:10.1016/j.aos.2012.03.007
16. Mojarrad LS, Rezaei K, Hosseini H, Mortazavian AM. Effects of high-amylose corn starch on textural and physicochemical properties of canned noodles. *Int J Food Sci Technol.* 2018;53(1):163–70. doi:10.1111/ijfs.13561
17. Xue Y, Li C, Zhang W, Zhu F. Effects of waxy corn starch on the quality of dried fine noodles: Mechanism insights. *Food Hydrocoll.* 2025;152:109038. doi:10.1016/j.foodhyd.2024.109038
18. Wang J, Zhao S, Lu W, Sun B. Starch structure and noodle quality: A review. *Int J Biol Macromol.* 2024;260:130463. doi:10.1016/j.ijbiomac.2024.130463
19. Espinosa-Solis V, Martinez-Bustos F, Morales-Sanchez E, San Martin-Martinez E. Cooking quality and physicochemical evaluation of spaghetti enriched with oat bran. *J Food Sci Technol.* 2019;56(2):864–72. doi:10.1007/s13197-018-3513-9
20. Padalino L, Mastromatteo M, Lecce L, Spinelli S, Conte A, Del Nobile MA. Optimization of gluten-free spaghetti based on maize flour and oat bran enriched in β -glucans. *Food Sci Technol Int.* 2011;17(1):57–65. doi:10.1177/1082013210367042
21. Piwińska M, Woźniak A, Teterycz D, Dziuba-Karkowska A, Dziki D. Effect of ultrafine oat hulls addition on quality and cooking properties of wheat pasta. *Foods.* 2023;12(14):2690. doi:10.3390/foods12142690
22. Lucisano M, Cappa C, Fongaro L. From semolina to pasta: influence of raw materials and processing steps on quality. In: Bhandari B, Roos Y, Ghandi A, editors. *Chemistry and physics of foods*. Cham: Springer; 2021. p. 275–96. doi:10.1007/978-3-030-71575-2_14
23. Sissons M. Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Foods.* 2008;2(2):75–90. doi:10.3390/foods2020075
24. Nilusha RA, Jayasinghe JMS, Perera OS, Perera PI, Jayawardana BC, Liyanage R. Development of pasta products with nonconventional ingredients and their effect on selected quality characteristics: A brief overview. *Int J Food Sci.* 2019;2019:6750726.
25. Witeczak M, Korus J, Ziobro R, Juszczak L. Rheological and thermal properties of gluten-free dough supplemented with modified starches. *Food Hydrocoll.* 2012;28(2):418–424.
26. Dib A, Agli A, Saidi D, Bourekoua H, Rosell CM. Effect of hydrothermal treated corn flour addition on the quality of pasta. *BIO Web of Conferences.* 2018;10:02003.
27. Xue Z, Dai H, Liu Y, Chen Y, Zhang H. Effect of waxy corn starch on the quality of dough and fine dried noodles. *Int J Food Sci Technol.* 2025;60(1):vva065.
28. Scott MP, Ohm J, Manthey F, Simsek S. Effect of protein–starch interactions on starch retrogradation in wheat-based systems. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2023;22(6):4921–4942.
29. Aviles-Simental A, Lopez-Cortez M, Lujan-Acosta J, De la Torre-Gutierrez M, Milán-Carrillo J. Impact of corn, bean, and semolina flour blends on quality parameters of pasta. *Cereals.* 2024;4(3):25.
30. Romano A, Marti A, Cecchini F. New ingredients and alternatives to durum wheat semolina for pasta making. *Trends Food Sci Technol.* 2021;112:543–553.
31. Писарець О, Голінка І, та ін. Кукурудзяне борошно, його хімічний склад і технологічні властивості, структурно-механічні властивості тіста з пшенично-кукурудзяної суміші. *Наукові праці НУХТ.* 2015.
32. Юдіна Т. Технологічні властивості борошна круп'яних культур. *Інноваційна педагогіка.* 2020;25(1):144–147.
33. Коб'яков СМ. Перспективи використання кукурудзяного борошна у хлібопекарському виробництві. *Збірник наукових праць ХДАЕУ.* 2020

Отримано в редакцію 29.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 29.06.2025

Approved 02.09.2025

ВПЛИВ ВИДУ ДУБОВОЇ АЛЬТЕРНАТИВИ НА СЕНСОРНИЙ ПРОФІЛЬ ЧЕРВОНИХ СУХИХ ВИН З ВИНОГРАДУ СОРТУ ОДЕСЬКИЙ ЧОРНИЙ

Каменева Н.В., д.с.г.н., професор, Мирошніченко О.М., к.т.н., доцент,
Ткаченко Д.П., к.т.н., старший викладач, Баришева Я.О., PhD, асистент,
Камінський Д.С., здобувач СВО «Доктор Філософії»
Одеський національний технологічний університет м. Одеса

Анотація. Одеський чорний, більш відомий під назвою Аліберне, належить до унікальних українських технічних сортів червоного винограду. Його було отримано шляхом гібридизації сортів Алікант Буше та Каберне Совіньйон у Науковому центрі виноградарства та виноробства імені В. Є. Таїрова. У 1972 році сорт офіційно внесли до державного реєстру, що засвідчило його значення для національної виноградарсько-виноробної галузі. На сьогодні Одеський чорний справедливо вважають символом українського виноробства, адже він поєднує в собі витривалість у вирощуванні, адаптивність до ґрунтово-кліматичних умов та високий потенціал для виробництва вин різних стилів.

Особливістю цього сорту є насичений рубіновий колір вина та виразний смаковий профіль з гармонійним поєднанням фруктових і пряних відтінків. Завдяки цим характеристикам він легко вирізняється серед інших червоних сортів винограду. Традиційно виноград Одеський чорний використовували для виготовлення десертних та кріплених вин, а також у купажуванні, де він додавав глибини кольору, насиченості танінів і виразності аромату. Проте в останні десятиліття простежується стійка тенденція до розширення виробництва сухих моносортних вин з цього винограду, що дозволяє краще розкрити його природний потенціал.

Серед відомих вітчизняних виробників, які успішно працюють із сортом Аліберне, варто відзначити «Колоніст», «GIGI winery», «Villa Tinta», «Biologist» та інших. Їхня продукція демонструє широкий спектр можливостей цього винограду та формує уявлення про сучасний стиль українських вин.

З огляду на зростаючу конкуренцію на вітчизняному та міжнародному ринках, актуальним завданням є підвищення якості та конкурентоспроможності вин з Одеського чорного. Одним із перспективних шляхів удосконалення є застосування дубових альтернатив (чіпси, кубики, екстракти), що дозволяють покращити ароматичний та смаковий профіль без значних економічних витрат. Поєднання цих методів із сенсорним аналізом забезпечує можливість цілеспрямованої корекції органолептичних характеристик, що робить вина більш гармонійними, насиченими та привабливими для споживача. Удосконалення технології переробки винограду сорту Одеський чорний у цьому напрямі є важливим кроком для підвищення якості українсько-го виноробства та формування його позитивного іміджу на міжнародному рівні.

Ключові слова: Одеський чорний, виноград, сенсорний аналіз, сорт, технологія, дубова альтернатива

Вступ. Вирощування винограду в Україні сконцентроване переважно в Одеській, Херсонській, Миколаївській та Закарпатській областях [1]. Основними виробниками виступають спеціалізовані агропідприємства, які часто працюють у тісному зв'язку з виноробними заводами. Це пояснюється тим, що виноград доцільно переробляти безпосередньо в місці вирощування.

За останнє десятиліття багато підприємств первинного виноробства почали самостійно випускати готові вина, що в економіці визначається як вертикальна інтеграція. Сировиною для виробництва здебільшого слугують такі сорти винограду, як Ркацтелі, Аліготе, Совіньйон зелений, Каберне-Совіньйон, Фетяска біла, Рислінг рейнський, Сухолиманський білий, Бастардо Магарачський, Мерло, Кокур білий, Одеський чорний, Трамінер рожевий, Сапераві, Шардоне, представники груп Мускат і Піно. Щороку вітчизняний асортимент вин розширюється, а виробники просувають на ринок унікальні продукти, що асоціюються з конкретними виноробними. Загальна кількість виноградних вин в країні складає 7, 2 млн дал, з яких 30% припадає на сухі, а 70% – на міцні. Додатково щороку виготовляють близько 3 млн дал плодово-ягідних вин.

Аналітичний огляд літератури

Аналіз ситуації щодо вин з сорту винограду Аліберне на ринку. Сорт винограду Одеський чорний (Аліберне) є результатом схрещування двох європейських класичних форм – Алікант Буше та Каберне Совіньйон. Його створення відбувалося в Інституті виноградарства і виноробства ім. В. Є. Таїрова і тривало понад два десятиліття. Перші гібриди отримали у 1948 році, а вже у 1960 році сорт офіційно отримав назву «Одеський чорний» і був переданий до державні випробування. З 1971 року цей сорт почали вирощувати в Одеській області, і внесли до Державного реєстру сортів рослин [1].

Довгий час цей виноград вважали технічним і використовували здебільшого як барвник у купажах, що зумовило його репутацію «дешевого» сорту. Однак упродовж останніх десятиліть ситуація змінилася – сьо-

годні цей різновид розглядають як перспективний для виробництва сортових вин. За даними останніх років, понад 37 українських виноробень випускають вина з Аліберне.

Визнанням якості цього сорту став міжнародний конкурс «Best Riedel glass for Odessa Black variety» (2021 р.), на якому перемогло вино «*Aliberne reserve limited edition 2017*» торгової марки «Винний дім Гігієнішвілі» [2].

Глобальний ринок виноробства. Згідно зі статистикою Міжнародної організації винограду і вина (OIV), у 2023 році площа виноградників у світі становила близько 7,2 млн га, що на 0,5% менше, ніж у 2022 році [3-4]. Загальний обсяг виробництва вина (без урахування соку та сусла) оцінювався у 237 млн гектолітрів, що на 9,6% нижче за показники попереднього року.

Світові лідери за обсягами виробництва:

Франція – 48 млн гектолітрів (20% світового ринку) [5-9];

Італія – 38,3 млн гектолітрів (зменшення на 23,2% порівняно з 2022 р.);

Іспанія – 28,3 млн гектолітрів (найнижчий показник з 1995 року, зниження на 20,8%);

США – 24,3 млн гектолітрів (зростання на 8,5%, що відповідає середньому п'ятирічному рівню).

У Південній Америці ситуація була менш стабільною:

Чилі скоротила виробництво на 11,4% через стихійні лиха (лісові пожежі, посухи, повені), до рівня 11 млн гектолітрів;

Аргентина знизилася показники до 8,8 млн гектолітрів (мінус 23% порівняно з 2022 р.), що стало найнижчим рівнем від 1957 року, головним чином через весняні заморозки та град [10-14].

Український контекст. Україна залишається важливою складовою світової продовольчої системи, постачаючи виноробну продукцію на ринки понад 190 країн. Однак кліматичні зміни суттєво впливають на галузь. Традиційні виноградарські зони (Одеська, Херсонська, Миколаївська та Закарпатська області) поступово втрачають здатність забезпечувати стабільні врожаї високої якості. У перспективі очікується зміщення основних виноробних регіонів на північ, що може суттєво змінити географію виробництва вина в Україні.

Огляд нормативної бази щодо органолептичних характеристик вин з Одеського чорного. В Україні контроль за якістю виноградних вин здійснюється відповідно до вимог стандарту ДСТУ 4806:2007 «Вина. Загальні технічні умови». Він визначає основні положення щодо виробництва та оцінювання виноробної продукції.

Сенсорні властивості вина не можна оцінювати лише за допомогою приладів чи хімічного аналізу. Інструментальні методи обов'язково мають поєднуватися з органолептичними, оскільки саме вони дозволяють встановити цілісне уявлення про якість продукту. З цією метою міжнародними експертними організаціями розроблено низку стандартів.

Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) розробила комплекс документів під загальною назвою «Sensory studies» («Дослідження сенсорне»), які регламентують порядок проведення органолептичних випробувань. Вони охоплюють такі аспекти, як: визначення смакових відчуттів; правила відбору зразків; умови проведення тестувань; термінологія та визначення; методики класифікації та ранжування.

В Україні застосовують адаптовану версію міжнародного стандарту ISO 6658:1985 «Sensory analysis. Methodology. General guidance», що встановлює загальні принципи сенсорних досліджень.

Крім того, для забезпечення точності та відтворюваності результатів використовують такі нормативні документи: ISO 2854 – статистичні методи обробки даних, перевірка середніх і дисперсій; ISO 2859 – методи відбору проб для контролю за якістю; ISO 3534 – стандартизована термінологія у статистиці; ISO 3591 – вимоги до дегустаційних келихів; ISO 3951 – вибіркового контролю за змінними ознаками; ISO 3972 – визначення смакової чутливості.

Сенсорний аналіз у виноробстві часто демонструє навіть кращі результати, ніж суто хімічні методи, адже він дозволяє виявити тонкі відмінності у смаку та ароматі, що мають вирішальне значення для споживача. Саме завдяки такому підходу можна оцінити привабливість вина на ринку, чого неможливо досягти лише аналітичними лабораторними вимірюваннями.

Аналіз технології виробництва вин з сорту винограду Одеський Чорний. Червоні столові вина вирізняються значним різноманіттям органолептичних характеристик. Вони можуть бути свіжими та легкими, з вираженим виноградним присмаком, молодими — з наявністю залишкового вуглекислого газу, або ж навпаки — витриманими, зі складним ароматичним букетом. Їхня структура варіюється від делікатних, характерних для північних виноробних зон, до більш насичених і повних, властивих південним регіонам. Таке різноманіття пояснюється не лише технологічними підходами, а й сортовим складом та якістю сировини.

Для виготовлення сухих червоних вин оптимальним вважається виноград із цукристістю на рівні 200–220 г/дм³ та титрованою кислотністю 7–9 г/дм³. Такі показники дають можливість отримати вина з вмістом спирту 12–14%. Напої цього типу зазвичай мають гармонійний смак, високу стійкість до мікробіологічних хвороб, достатній вміст гліцерину та бурштинової кислоти, що забезпечує м'якість та об'ємність смаку.

Класична технологічна схема виробництва сухих червоних вин включає такі етапи (рис.1.).

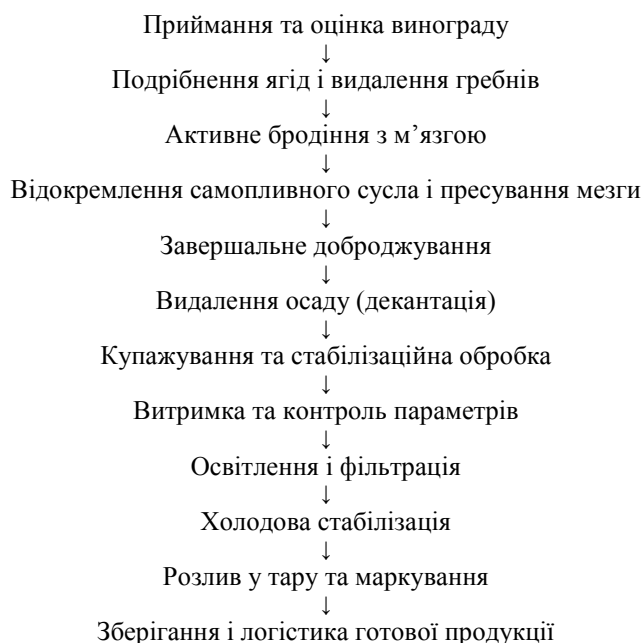


Рис. 1 – Технологічна схема приготування сухих червоних вин

У процесі виробництва червоних вин застосовують низку технологічних прийомів, які забезпечують якісніший екстракт та виразність смаку:

Піжаж — періодичне занурення «шапки» м'язги у сусло під час бродіння, що сприяє кращому контакту з твердими частинами винограду.

Ремонтаж — відбір сусла з нижньої частини ємності та його перекачування на верхню для зрошення «шапки». Це дозволяє:

- підтримувати рівномірну температуру в усьому об'ємі;
- запобігати утворенню небажаних мікробіологічних процесів;
- підвищувати екстрактивність майбутнього вина.

Делестаж — різновид ремонту, коли сусло повністю або частково відбирають в окрему ємність, насичують киснем і знову повертають у ферментатор. Завдяки цьому способу досягається ще активніший контакт із м'язгою, що дозволяє отримати більш виражені смакові характеристики.

Вибір комбінації технологічних операцій залежить від стилю вина, який прагне створити винороб.

Об'єкт, предмет і методи досліджень. Дослідження проводилися в навчально-науковій лабораторії сенсорного аналізу Одеського національного технологічного університету.

Об'єктом дослідження виступали зразки червоних сухих вин із винограду сорту Одеський чорний урожаю 2022 року, вироблені ТМ «GIGI winery» з використанням різних варіантів дубової альтернативи:

1. Barrettes (Кубики) від ТМ "Bousinage", М (середній), 5 г/дм³
2. Barrettes (Кубики) від ТМ "Bousinage", М+ (середній+), 4,58 г/дм³
3. Barrettes (Кубики) від ТМ "Bousinage", F (сильний), 4,72 г/дм³
4. Chapelure (Тріска) від ТМ «Olpol», М+ (середній+), 4 г/дм³
5. Tanins (Екстракт) від ТМ "Bousinage", Mix, 0,01 г/дм³

Виноматеріал, виготовлений із сорту Аліберне, настоювався на дубових препаратах протягом шести тижнів. Дозування було попередньо погоджене з виробником.

Предметом дослідження стали органолептичні характеристики цих виноматеріалів, отриманих з різними видами дубових альтернатив.

Мета роботи полягала у визначенні оптимального варіанта дубової альтернативи, здатного покращити сенсорні властивості червоних сухих вин із сорту Одеський чорний.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання: проаналізувати сучасний стан виробництва вин з цього сорту на національному та світовому ринках; провести огляд нормативної бази та органолептичну характеристику зразків; розглянути методи сенсорного аналізу, вибравши найбільш доречний для даного дослідження; визначити вимоги до дегустаційної панелі, розробити план її формування та підготовки; скласти програму сенсорних випробувань, створити анкети та протоколи оцінювання; здійснити сенсорний аналіз і статистичну обробку отриманих результатів.

У роботі використано методологію, викладену у міжнародному стандарті ISO 13299:2003 «Sensory analysis – Methodology – General guidance for establishing a sensory profile» [16], який описує порядок створення сенсорного профілю харчових і нехарчових продуктів. Формування дегустаційної панелі відбувалося відповідно до ISO 8586:2012 «Sensory analysis – General guidelines for the selection, training and monitoring of

selected assessors and expert sensory assessors» [15].

У даному дослідженні застосовувався підхід до створення так званого умовного сенсорного профілю (conventional sensory profile), що передбачає статистичну обробку даних, отриманих від групи експертів, які оцінювали продукт за однаковим набором дескрипторів [16]. Для побудови сенсорного профілю застосовувався базовий принцип відбору найбільш інформативних дескрипторів. Існує значна кількість міжнародних стандартів, які містять визначення відповідних термінів, що дозволяє здійснити коректний вибір характеристик для аналізу. Після визначення дескрипторів наступним кроком стало встановлення системи градації інтенсивності. Для цього було використано семибальну шкалу, яка дозволяє найбільш об'єктивно відобразити рівень прояву кожної з характеристик сенсорного профілю вина [17].

Результати роботи. Проведено визначення якості виноматеріалу з сорту винограду Аліберне з додаванням дубової альтернативи Barrettes (Кубики) від ТМ "Bousinage", М (середній), 5 г/дм³. Ординарний червоний виноматеріал із сорту Аліберне, витриманий на дубових кубиках середнього обсмаження Barrettes (Кубики) від ТМ "Bousinage", М (середній), 5 г/дм³, продемонстрував показники, які надані у табл. 1 та рисунку 2.

Таблиця 1

Результати дослідження органолептичного профілю для виноматеріалу з сорту винограду Аліберне із застосуванням дубових кубиків М (середній)

Групи ароматів	Оцінка	Групи негативних ароматів	Оцінка
Винні ноти	2,8	Окислений	0,5
Квіткові	2,2	Молочний	0,2
Фруктові	3,5	Дріжджовий	0,6
Спеції	4,9	Землистий	0,6
Відтінки витримки	3,5	Ефірний	0
		Меркаптани	0
Аромат	Оцінка	Смак	Оцінка
Гвоздика	4,6	Інтенсивність	4
Вишня	2,7	Кислотність	4
Перець	3,6	Солодкість	3
Чорнослив	2,2	Типовість	2
		Тривалість	4



Рис 2 – Смако-ароматичний сенсорний профіль виноматеріалу з сорту винограду Аліберне із застосуванням дубових кубиків М (середній)

Після настоювання на дубових кубиках із рівнем обсмаження М (Medium) органолептичні характеристики виноматеріалу істотно не змінилися. У профілі залишилися небажані відтінки, характерні для групи негативних ароматів.

Наступний етап дослідження стосувався зразка червоного сухого столового вина із сорту Аліберне, витриманого з дубовими кубиками від ТМ Bousinage із ступенем обсмаження М+ (Medium+) у концентрації 4,58 г/дм³. Показники сенсорного аналізу для цього варіанта наведено в таблиці 2 та рисунку 3.

Таблиця 2

**Результати дослідження органолептичного профілю для виноматеріалу з сорту винограду
Аліберне із застосуванням дубових кубиків М + (середній+)**

Групи ароматів	Оцінка	Групи негативних ароматів	Оцінка
Винні ноти	4,4	Окислений	0,5
Квіткові	2,1	Молочний	0,2
Фруктові	3,5	Дріжджовий	0,6
Спеції	4,9	Землистий	1,2
Відтінки витримки	3,5	Ефірний	0
		Меркаптани	0
Аромат	Оцінка	Смак	Оцінка
Перець	3,5	Інтенсивність	4
Вишня	2,9	Кислотність	4
Гвоздика	4,7	Солодкість	2
		Типовість	3
		Тривалість	3

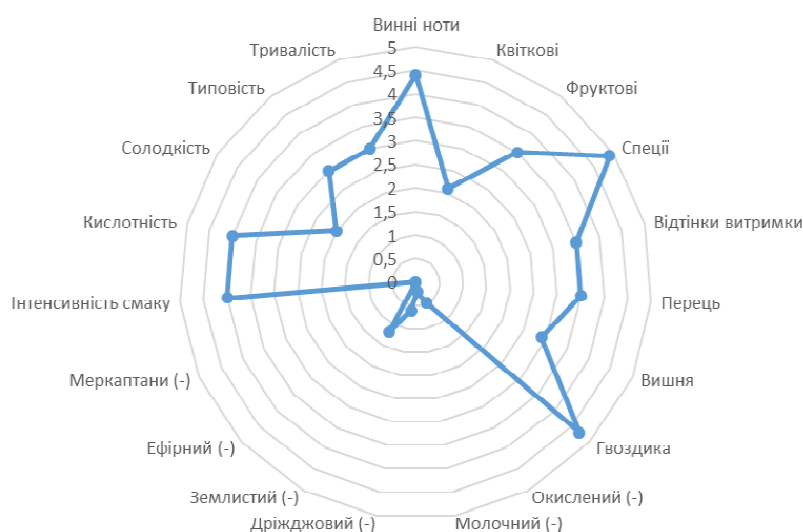


Рис 3 – Смако-ароматичний сенсорний профіль виноматеріалу з сорту винограду Аліберне із застосуванням дубових кубиків М + (середній+)

Виноматеріал після внесення дубової альтернативи, зокрема кубиків М+, не зазнав покращення органолептичних характеристик. У ньому збереглися відтінки, що належать до групи небажаних ароматів.

Дослідження червоного столового сухого виноматеріалу, отриманого з винограду сорту Аліберне, із застосуванням дубової альтернативи типу Barrettes (кубики) виробництва ТМ «Bousinage», F (сильний рівень обсмаження), у дозуванні 4,72 г/дм³, продемонструвало відповідні результати.

Умовний органолептичний профіль цього зразка було сформовано та наведено в табл. 3 та рис 4.

Таблиця 3

Результати дослідження органолептичного профілю для виноматеріалу з сорту винограду Аліберне із застосуванням дубових кубиків F (сильний)

Групи ароматів	Оцінка	Групи негативних ароматів	Оцінка
Винні ноти	3,0	Окислений	0,6
Квіткові	1,9	Молочний	0
Фруктові	3,8	Дріжджовий	0
Спеції	3,0	Землистий	1
Відтінки витримки	2,8	Ефірний	0
		Меркаптани	0
Аромат	Оцінка	Смак	Оцінка
Смородина	3,9	Інтенсивність	4
Чорнослив	2,9	Кислотність	3
Лакриця	3	Солодкість	2
		Типовість	4
		Тривалість	4

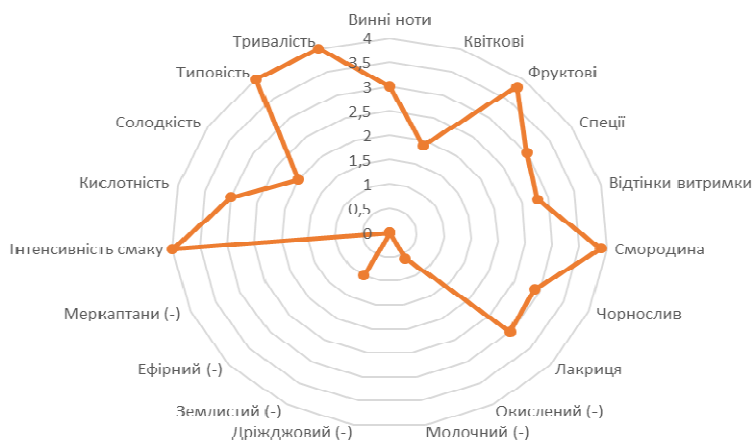


Рис 4 – Смако-ароматичний сенсорний профіль виноматеріалу з сорту винограду Аліберне із застосуванням дубових кубиків F (сильний)

Після внесення дубової альтернативи у вигляді кубиків F виноматеріал зазнав певного покращення органолептичних показників, проте результат не повністю відповідає поставленим завданням. У ньому й надалі збереглися небажані відтінки з групи негативних ароматів, а також з'явився дескриптор лакриці, нетиповий для ординарних вин.

Експериментальні дослідження виноматеріалу з сорту винограду Аліберне проводили із застосуванням дубової альтернативи Chapelure (тріска) від ТМ «Olpol», ступінь обсмаження M+ (середній+), у кількості 4 г/дм³.

Умовний органолептичний профіль цього зразка було побудовано, а його результати відображені у табл. 4 та рис 5.

Таблиця 4

Результати дослідження органолептичного профілю для виноматеріалу з сорту винограду Аліберне із застосуванням дубової тріски M+ (середній+)

Групи ароматів	Оцінка	Групи негативних ароматів	Оцінка
Винні ноти	3,0	Окислений	0,6
Квіткові	1,9	Молочний	0
Фруктові	3,8	Дріжджовий	0
Спеції	3,0	Землистий	1
Відтінки витримки	2,8	Ефірний	0
		Меркаптани	0
Аромат	Оцінка	Смак	Оцінка
Гвоздика	2,80	Інтенсивність	4
Горіх	4,00	Кислотність	3
Лакриця	4,00	Солодкість	2
		Типовість	4
		Тривалість	4

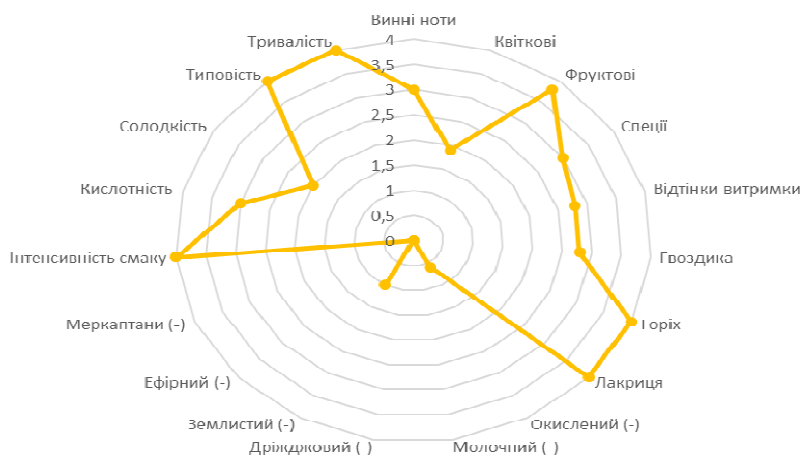


Рис 5 – Смако-ароматичний сенсорний профіль виноматеріалу з сорту винограду Аліберне з додаванням дубової альтернативи Tanins (Екстракт) від ТМ "Bousinage", Mix, 0,01 г/дм³

Після додавання дубової альтернативи у вигляді тріски М+ у виноматеріалі відбулося певне покращення органолептичних характеристик, однак результат все ще не відповідає поставленим завданням. У зразку збереглися незначні небажані аромати з групи негативних, а також проявилися дескриптори лакриці та горіху, що є нетиповими для ординарних вин.

Дослідження червоного столового сухого виноматеріалу з сорту винограду Аліберне проводили із застосуванням дубової альтернативи Tanins (екстракт) від ТМ «Bousinage», Mix, у дозі 0,01 г/дм³.

Отримані результати умовного органолептичного профілю цього зразка наведено в табл. 5 та рис 6.

Таблиця 5

Результати дослідження органолептичного профілю для виноматеріалу з сорту винограду Аліберне із застосуванням дубового екстракту (таніну)

Групи ароматів	Оцінка	Групи негативних ароматів	Оцінка
Винні ноти	4,2	Окислений	0
Квіткові	2,6	Молочний	0
Фруктові	4,0	Дріжджовий	0
Спеції	4,4	Землистий	0,5
Відтінки витримки	2,9	Ефірний	0
		Меркаптани	0
Аромат	Оцінка	Смак	Оцінка
Гвоздика	3,9	Інтенсивність	5
Вишня	2,9	Кислотність	3
Шоколад	3	Солодкість	3
Перець	4	Типовість	5
		Тривалість	5

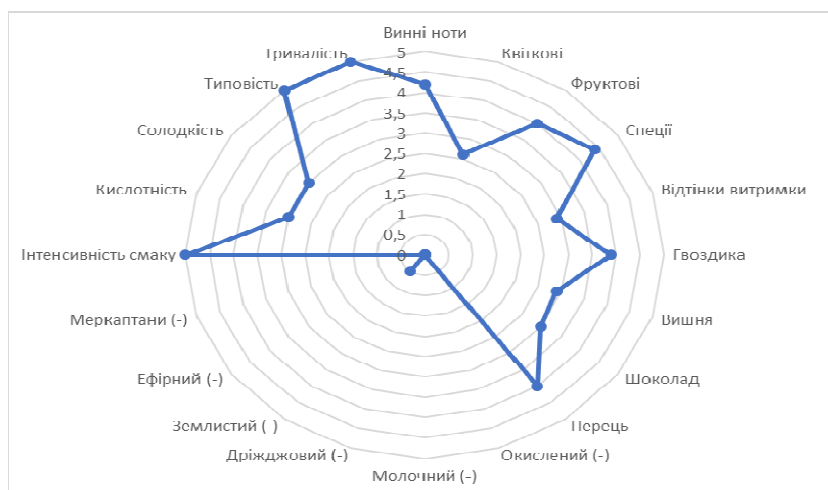


Рис 6 – Смако-ароматичний сенсорний профіль виноматеріалу з сорту винограду Аліберне із застосуванням дубового екстракту (таніну)

Після внесення дубового екстракту органолептичні характеристики виноматеріалу покращилися. Водночас у ароматі збереглися земляні відтінки, що відносяться до групи небажаних. Загалом можна зробити висновок, що використання дубового екстракту є найбільш ефективним методом, оскільки воно краще задовольняє вимоги щодо поліпшення органолептичних і смакових властивостей виноматеріалу порівняно з іншими варіантами обробки.

Висновки

1. На сучасному етапі сорт Аліберне можна вважати національно-регіональним продуктом, що надає йому статус суто українського вина.
2. Вітчизняний ринок виноробної продукції характеризується високим рівнем конкуренції. Попри певний спад останніми роками, українські виробники прагнуть компенсувати втрати шляхом виходу на зовнішні ринки. Існує перспектива, що українські вина здобуватимуть визнання за кордоном, однак ризик зміщення попиту на іноземну продукцію залишається.
3. Регламентування органолептичних показників вин здійснюється відповідно до чинних стандартів ДСТУ та ISO, що визначають якісні вимоги до готової продукції.
4. Дослідження технологічних етапів виробництва вин продемонструвало, що коригування органолептичних властивостей можливе завдяки застосуванню окремих технологічних заходів.
5. Порівняльний аналіз різних форм дубової альтернативи дозволив виокремити оптимальний протокол для вдосконалення характеристик вина Аліберне. Найбільш доцільним є проведення дублення виноматеріалу

лу до стадії обробки. Використання дубового екстракту сприяє збагаченню вина танінами, підвищує його гармонійність і насиченість, а також частково маскує небажані відтінки. Саме цей варіант технологічного втручання виявився найбільш ефективним для одержання якісного виноматеріалу.

References

1. State Statistics Service of Ukraine. (2019). *Official website*. Retrieved March 10, 2024, from <http://ukrstat.gov.ua/>
2. Titlova, O., & Tkachenko, O. (2019). *The place of Ukraine in development of the world vine growing and winemaking industry under the changing climate conditions*. University de Bordeaux – Institutes des Sciences de la Vigne et du Vin.
3. POSTEAT. (2024, May 5). *Boom of sparkling rosé: The end of sexism in the world of wine*. Retrieved from <https://posteat.ua/position/bum-igristogo-rose-konec-seksizma-v-mire-vina/>
4. Nielsen. (2024, May 5). *Wine industry insights*. Retrieved from <https://www.nielsen.com/us/en/news-center/related-tag/wine/>
5. Wines.com. (2024, May 5). *Official website*. Retrieved from <https://www.wines.com/>
6. The Drinks Business. (2020, July). *Italy's Prosecco producers prepare for rosé Christmas*. Retrieved from <https://www.thedrinksbusiness.com/2020/07/italys-prosecco-producers-prepare-for-rose-christmas/>
7. Wine Spectator. (2024, August 6). *Inside the new winery for Brad Pitt and Angelina Jolie: Miraval's record-breaking rosé*. Retrieved from <https://www.winespectator.com/articles/inside-the-new-winery-for-brad-pitt-and-angelina-jolie-miraval-record-breaking-rose-unfiltered>
8. POSTEAT. (2024, August 6). *Kylie Minogue launches her own wine line*. Retrieved from <https://posteat.ua/news/kajli-minoug-zapuskaye-vlasnu-linijku-vin/>
9. National Geographic. (2019, September). *Wine harvest dates are getting earlier due to climate change*. Retrieved from <https://www.nationalgeographic.com/science/2019/09/wine-harvest-dates-earlier-climate-change/>
10. Mintel. (2024, August 6). *Wine consumer tastes are changing*. Retrieved from <https://www.mintel.com/blog/drink-market-news/wine-consumer-tastes-are-changing>
11. Ollat, N., et al. (2016). Climate change impacts and adaptations: New challenges for the wine industry. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 139–149.
12. Schäufler, I., Pashkova, D., & Hamm, U. (2018). Which consumers opt for organic wine and why? An analysis of the attitude-behaviour link. *British Food Journal*, 120(8), 1901–1914.
13. Schäufler, I., & Hamm, U. (2017). Consumers' perceptions, preferences and willingness-to-pay for wine with sustainability characteristics: A review. *Journal of Cleaner Production*, 147, 379–394.
14. Swiegers, J. H., Bartowsky, E. J., Henschke, P. A., & Pretorius, I. S. (2005). Microbial modulation of wine aroma and flavour. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11(2), 139–173. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2005.tb00285.x>
15. Ribéreau-Gayon, P., Dubourdieu, D., Donèche, B., & Lonvaud, A. (2000). *Handbook of Enology, Volume 1: The Microbiology of Wines and Vinification*. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
16. International Organization for Standardization. (2016). *ISO 13299:2016. Sensory analysis — Methodology — General guidance for establishing a sensory profile*. ISO/TC 34/SC 12 Sensory analysis.
17. International Organization for Standardization. (2012). *ISO 8586:2012. Sensory analysis — General guidelines for the selection, training and monitoring of selected assessors and expert sensory assessors*. ISO/TC 34/SC 12 Sensory analysis.

INFLUENCE OF THE TYPE OF OAK ALTERNATIVE ON THE SENSORY PROFILE OF DRY RED WINES FROM THE GRAPE VARIETY OF ODESSA BLACK

Kameneva N.V., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Myroshnichenko O.M., PhD, Associate Professor, Tkachenko D.P., PhD, senior lecturer, Barysheva Ya.O., PhD, Assistant, Kaminskyi D.S., Higher education degree holder, «Doctor of Philosophy»
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. *Odessa Black*, better known as *Aliberne*, is one of Ukraine's unique technical red grape varieties. It was obtained by hybridizing the *Alicante Bouchet* and *Cabernet Sauvignon* varieties at the V. E. Tairov Scientific Centre for Viticulture and Winemaking. In 1972, the variety was officially entered into the state register, confirming its importance for the national viticulture and winemaking industry. Today, *Odessa Black* is rightly considered a symbol of Ukrainian winemaking, as it combines hardiness in cultivation, adaptability to soil and climatic conditions, and high potential for producing wines of various styles.

A distinctive feature of this variety is the rich ruby color of the wine and its distinctive flavor profile with a harmonious combination of fruity and spicy notes. These characteristics make it stand out among other red grape

varieties. Traditionally, Odessa Black grapes were used to make dessert and fortified wines, as well as in blending, where they added depth of color, tannin richness and aromatic intensity. However, in recent decades, there has been a steady trend towards expanding the production of dry single-varietal wines from these grapes, which allows their natural potential to be better revealed.

Among the well-known domestic producers who successfully work with the Aliberne variety, it is worth noting Kolonist, Wine House Gigineishvili, Villa Tinta, Biologist, and others. Their products demonstrate the wide range of possibilities of this grape and shape the perception of the modern style of Ukrainian wines.

Given the growing competition in the domestic and international markets, an urgent task is to improve the quality and competitiveness of wines made from Odessa Black. One promising avenue for improvement is the use of oak alternatives (chips, cubes, extracts), which allow for an improvement in the aromatic and flavor profile without significant economic costs. Combining these methods with sensory analysis provides the opportunity for targeted correction of organoleptic characteristics, making wines more harmonious, rich and attractive to consumers. Improving the technology for processing Odessa Black grapes in this direction is an important step towards improving the quality of Ukrainian winemaking and forming its positive image at the international level.

Keywords: Odessa Black, grapes, sensory analysis, variety, technology, oak alternative

Список використаної літератури

1. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу: <http://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 10.03.2024).
2. Titlova O., Tkachenko O. *The place of Ukraine in development of the world vine growing and winemaking industry under the changing climate conditions*. – University de Bordeaux - Institutes des Sciences de la Vigne et du Vin. – Athens, 2019. – 122 с.
3. Boom of sparkling rosé: The end of sexism in the world of wine [Електронний ресурс] // POSTEAT. – Режим доступу: <https://posteat.ua/position/bum-igristogo-rose-konec-seksizma-v-mire-vina/> (дата звернення: 05.05.2024).
4. Wine industry insights [Електронний ресурс] // Nielsen. – Режим доступу: <https://www.nielsen.com/us/en/news-center/related-tag/wine/> (дата звернення: 05.05.2024).
5. Wines.com [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wines.com/> (дата звернення: 05.05.2024).
6. Italy's Prosecco producers prepare for rosé Christmas [Електронний ресурс] // The Drinks Business. – 2020. – Режим доступу: <https://www.thedrinksbusiness.com/2020/07/italys-prosecco-producers-prepare-for-rose-christmas/> (дата звернення: 05.05.2024).
7. Inside the new winery for Brad Pitt and Angelina Jolie: Miraval's record-breaking rosé [Електронний ресурс] // Wine Spectator. – Режим доступу: <https://www.winespectator.com/articles/inside-the-new-winery-for-brad-pitt-and-angelina-jolie-miraval-record-breaking-rose-unfiltered> (дата звернення: 06.08.2024).
8. Kylie Minogue launches her own wine line [Електронний ресурс] // POSTEAT. – Режим доступу: <https://posteat.ua/news/kajli-minoug-zapuskaye-vlasnu-linijku-vin/> (дата звернення: 06.08.2024).
9. Wine harvest dates are getting earlier due to climate change [Електронний ресурс] // National Geographic. – 2019. – Режим доступу: <https://www.nationalgeographic.com/science/2019/09/wine-harvest-dates-earlier-climate-change/> (дата звернення: 06.08.2024).
10. Wine consumer tastes are changing [Електронний ресурс] // Mintel. – Режим доступу: <https://www.mintel.com/blog/drink-market-news/wine-consumer-tastes-are-changing> (дата звернення: 06.08.2024).
11. Ollat N. та ін. Climate change impacts and adaptations: New challenges for the wine industry // *Journal of Wine Economics*. – 2016. – Т. 11, № 1. – С. 139–149.
12. Schäufele I., Pashkova D., Hamm U. Which consumers opt for organic wine and why? An analysis of the attitude-behaviour link // *British Food Journal*. – 2018. – Т. 120, № 8. – С. 1901–1914.
13. Schäufele I., Hamm U. Consumers' perceptions, preferences and willingness-to-pay for wine with sustainability characteristics: A review // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Т. 147. – С. 379–394.
14. Swiegers J., Bartowsky E., Henschke P.A., Pretorius I.S. Microbial modulation of wine aroma and flavour // *Australian Journal of Grape and Wine Research*. – 2005. – Т. 11, № 2. – С. 139–173. – DOI: 10.1111/j.1755-0238.2005.tb00285.x.
15. Ribéreau-Gayon P., Dubourdieu D., Donèche B., Lonvaud A. *Handbook of Enology. Volume 1: The Microbiology of Wines and Vinification*. – Chichester (UK): John Wiley & Sons Ltd, 2000.
16. ISO 13299:2016. *Sensory analysis — Methodology — General guidance for establishing a sensory profile*. – ISO/TC 34/SC 12 Sensory analysis. – Geneva: International Organization for Standardization, 2016. – 41 с.
17. ISO 8586:2012. *Sensory analysis — General guidelines for the selection, training and monitoring of selected assessors and expert sensory assessors*. – ISO/TC 34/SC 12 Sensory analysis. – Geneva: International Organization for Standardization, 2012. – 28 с.

Отримано в редакцію 04.07.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 04.07.2025

Approved 02.09.2025

УДК 66.061.3:66.023.5:547.263:665.347
DOI <https://doi.org/10.15673/swonaft.v89i1.3264>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕКСТРАГУВАННЯ ОЛІЇ СОНЯШНИКА ВОДНИМИ РОЗЧИНАМИ ЕТАНОЛУ

Запорожець Д.О., аспірант, Ружицька Н.В., к.т.н., асистент
Одеський національний технологічний університет

Анотація. Україна є світовим лідером із виробництва соняшникової олії, проте під час переробки насіння після другого пресування в макусі залишається до 16 % залишкової олії. Вилучення олії переважно здійснюється вуглеводневими екстрагентами – продуктами переробки нафти, зокрема гексаном — вибухо-небезпечним і токсичним розчинником.

В якості екологічно безпечної альтернативи запропоновано етанол. Причому, замість абсолютного етанолу, технології використання якого описано в літературних джерелах, пропонується використовувати більш доступні водно-спиртові розчини з вмістом етанолу 80...96 %. Етанол є відновлюваним екстрагентом. Процес екстрагування пропонується електродинамічною дією, що активує механодифузійний механізм масопереносу.

Розроблено математичну модель процесу екстрагування, яка пов'язує ефективний коефіцієнт масовіддачі з параметрами сировини, властивостями екстрагенту та енергетичними режимами.

Проведені на електродинамічному екстракторі експерименти показали, що збільшення гідромодулю до 1:10 суттєво збільшує вихід олії. Розчини етанолу концентрацією 90 % здатні вилучити до 90% олії, яка міститься у макусі. Досліджено вплив питомого енергопідведення на вихід олії. Підтверджено ефект механодифузії та часткового емульгування, що дозволило отримати вміст олії в екстракті, який у 1,6 раза перевищує граничну розчинність.

Запропонована технологія дає змогу інтенсифікувати процес екстрагування, замінити екологічно небезпечні, або дорогі екстрагенти відновлюваним етанолом, зменшити енергоємність виробництва.

Ключові слова: макуха соняшника, електродинамічний екстрактор, мікрохвильове поле, тепломасообмін, екстрагування, механодифузія, етанол.

Вступ. Україна є одним з провідних виробників та експортерів соняшникової олії у світовому масштабі [1]. Після другого пресування у відходах олійного виробництва – макусі залишається близько 16 % олії, яку можна додатково вилучити [2]. Існуючі технології екстрагування передбачають використання вуглеводневих екстрагентів, таких, як екстракційні бензини та гексан, які ефективно розчиняють олію, проте є пожежо- та вибухонебезпечними, виробляються з нафтопродуктів, а, отже, відносяться до невідновлюваних ресурсів [3]. Крім того, в багатьох країнах використання гексану визнано небезпечним для здоров'я споживача. А, оскільки шрот в подальшому використовується в якості білкової кормової добавки, сліди гексану знижують його екологічну безпеку [4].

Формулювання проблеми. В якості альтернативи вуглеводневим екстрагентам пропонують надкритичні рідини та абсолютний етанол. Розчинність олії в надкритичному CO₂ невисока, а процес потребує високого тиску [5]. Абсолютний етанол вимогливий до умов зберігання, відпрацьований екстрагент після дистиляції потребує додаткового зневоднення [3]. Таким чином, зацікавленість викликає можливість використання в якості екстрагенту 96% етанолу, а також водо-спиртових розчинів з нижчим вмістом етанолу.

Оскільки розчинність олії в етанолі низька, традиційні технології екстрагування етанолом концентрацією 96% і менше вважають неефективними [3]. Для інтенсифікації процесу екстрагування пропонується задіяти механізм механодифузії, який ініціюється мікрохвильовим полем [6]. Даний метод показав високу ефективність в процесах екстрагування олії амаранту, збагаченої скваленом [7], олії ріпаку, сої [8], кави [9].

Викладення основного матеріалу. При моделюванні процесу враховувався вплив таких чинників, як розмір частинок d , густина ρ та в'язкість μ екстрагенту, коефіцієнт дифузії D . Різниця концентрацій ΔC , та гравітаційне поле g визначають внесок природної конвекції. Дія механодифузії визначається потужністю мікрохвильового інтенсифікатора N , питомою теплою пароутворення екстрагенту r . Також враховуються витрати продукту (G_{np}) та розчинника ($G_{роз}$), концентрація етанолу в екстрагенті ($X_{ет}$). Інтенсивність процесу екстрагування характеризує ефективний коефіцієнт масовіддачі, як функція зазначених вище параметрів:

$$\beta_{ef} = f(d, \rho, \mu, D, r, \Delta C, N, G_{np}, G_{роз}, g, X_{ет}). \quad (1)$$

Методом аналізу розмірностей одержано загальний вигляд критеріального рівняння:

$$Sh = A \cdot Sc^n \cdot Bu^m \Gamma^k E^l \quad (2)$$

Де Γ – гідромодуль, E – безрозмірний комплекс, який враховує розчинність етанолу в екстрагенті.

Об'єкти досліджень та обладнання. Досліди проводились на експериментальному об'ємному електро-динамічному екстракторі періодичної дії, розробленому на кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту, та лабораторній водяній бані ВБ-2. Для обробки експериментальних зразків використовувались сушильна шафа 2В-151, ваги аналітичні Radwag - 220, центрифуга ЦЛС-3.

Розчинність олії в розчинах етанолу визначали експериментально для температури кипіння етанолу.

В результаті апроксимації даних, отримано залежність для розрахунку розчинності олії в розчинах етанолу в залежності від концентрації етанолу (рис. 1).

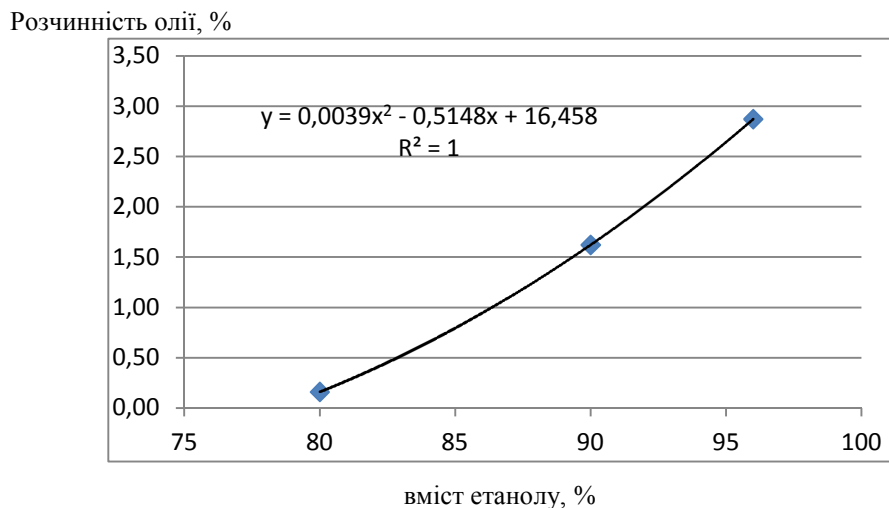
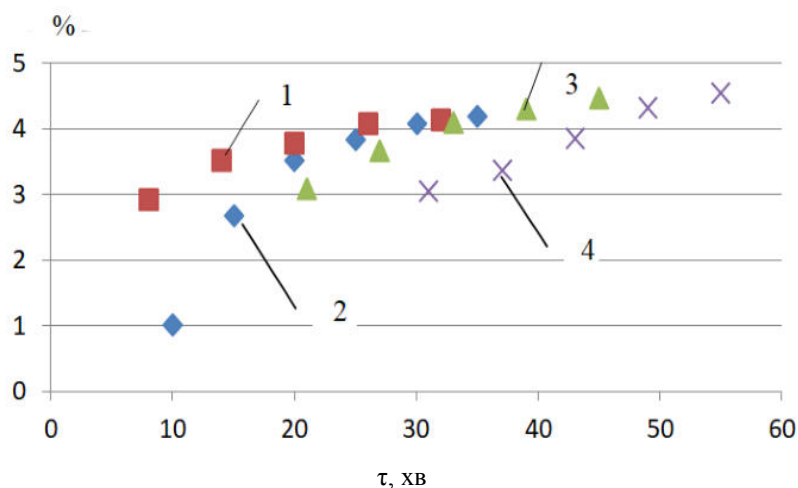


Рис. 1 – Графік розчинності соняшникової олії у водно-спиртових розчинах в залежності від концентрації етанолу за температури кипіння

В результаті обробки експериментальних даних, отримано залежність для розрахунку розчинності олії в розчинах етанолу (2) за температури кипіння етанолу:

$$X_{ol} = 0,0039 \cdot X_{C_2H_5OH} - 0,5148 \cdot X_{C_2H_5OH} + 16,458 \quad (2)$$

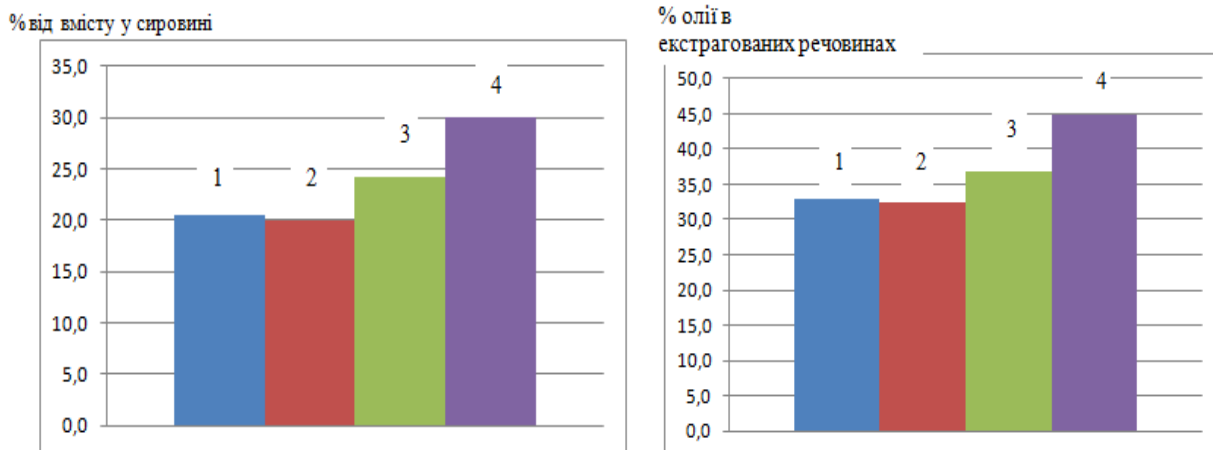
Вплив питомого підведення енергії на кінетику екстрагування та вихід олії. Для визначення впливу питомого енергопідведення досліджувалась кінетика вилучення сухих речовин та вихід олії. Питоме енергопідведення визначалось як відношення кількості підведеної енергії до маси сировини та екстрагенту, завантаженої у камеру. Досліди проводились з використанням етанолу концентрацією 90 % в режимі кипіння за атмосферного тиску. Результати досліджень наведено на рис. 2.



1 – МХ-кипіння, 3,74 МДж/кг; 2 – МХ-кипіння, 2,39 МДж/кг; 3 – МХ-кипіння, 1,42 МДж/кг; 4 – 750 кДж/кг

Рис. 2 – Кінетика вилучення сухих речовин в залежності від питомого енергопідведення

Вихід олії визначався після розділення екстракту на фракції. На рис. 3 показано, що за менших питомих енерговитрат вихід олії збільшився, проте збільшилась і тривалість виходу процесу на стаціонарний режим, а, отже, і загальна тривалість обробки.

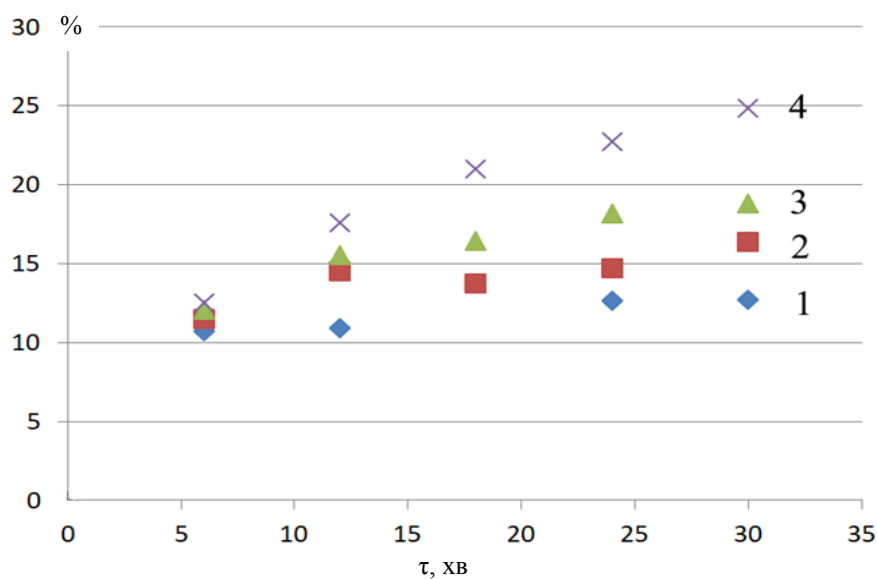


1 – 3742 кДж/кг; 2 – 2393 кДж/кг; 3 – 1422 кДж/кг; 4 – 750 кДж/кг

Рис. 3 – Вихід олії в залежності від питомого підведення енергії

Зі зменшенням питомих енерговитрат збільшується й частка олії в екстрагованій речовині. Таким чином, екстрагування за високих потужностей мікрохвильового поля не є доцільним.

Вплив гідромодуля на кінетику екстрагування та вихід олії. Збільшення гідромодуля збільшує різницю концентрацій екстрактивних речовин у сировині та твердій фазі, проте зростають і витрати екстрагенту, який в подальшому необхідно вилучити з місцели. У випадку місцели олії в етанолі, основну частину екстрагенту можна відокремити охолодженням та відстоюванням, що суттєво знижує енерговитратність технології. Досліджувались гідромодулі 1:3, 1:5, 1:10, 1:20. Кінетичні криві будувались за відсотком маси твердої фази, що перейшов до екстракту, оскільки за різних гідромодулів порівняння концентрації екстрактивних речовин в екстракті неінформативне. Результати досліджень наведено на рис. 4.

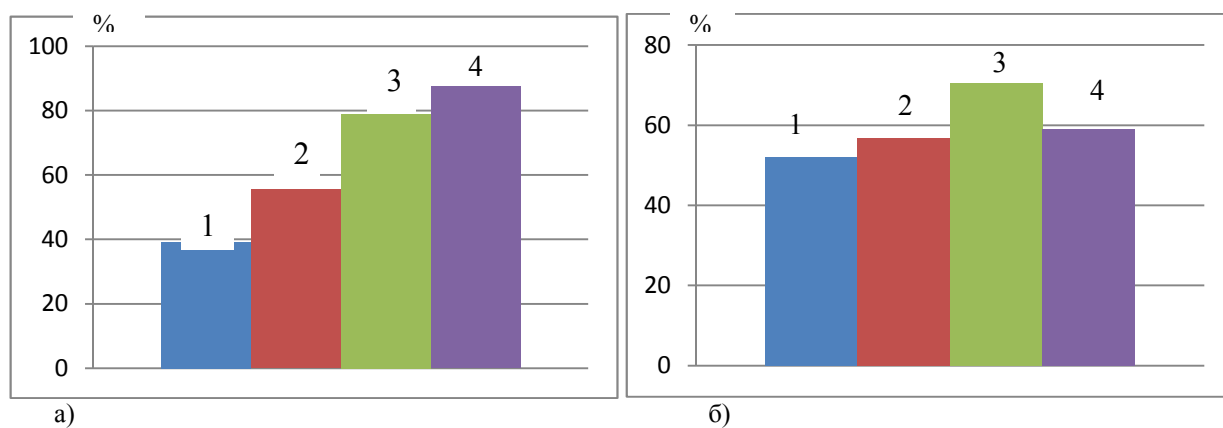


1 – 1:3; 2 – 1:5; 3 – 1:10; 4 – 1:20

Рис. 4 – Кінетика вилучення сухих речовин в залежності від гідромодуля (за виснаженням твердої фази)

Очевидно, що зі збільшенням гідромодуля, інтенсивність масовіддачі збільшується. Найбільша а інтенсивність спостерігалась при гідромодулі 1:20.

Оцінювався вихід олії відносно вмісту олії в сировині, та частка олії в екстрактивних речовинах.



1 – 1:3; 2 – 1:5; 3 – 1:10; 4 – 1:20

Рис. 5 – Вихід олії в залежності від гідромодуля: а) відносно вмісту олії в сировині; б) частка олії в екстрактивних речовинах

Збільшення гідромодуля до 1:10 суттєво збільшує вихід олії (до 80%), також, за цього гідромодуля найбільша частка олії в екстрагованих речовинах. Це може бути пов'язане з різницею в розчинності всіх компонентів суміші, оскільки спирторозчинна фракція з соняшника відрізняється складним хімічним складом. Для подальших досліджень перевагу надано гідромодулю 1:10.

Вплив концентрації етанолу в екстрагенті на кінетику екстрагування та вихід олії. Враховуючи наявність механізму емульгування олії в етанолі в процесі екстрагування з макухи, було досліджено вплив вмісту етанолу в екстрагенті. Досліди проводились з 96%, 90% та 80% етанолом. Гідромодуль було обрано 1:10. Кінетичні криві процесу за концентрацією сухих речовин у екстракті наведено на рис. 6.

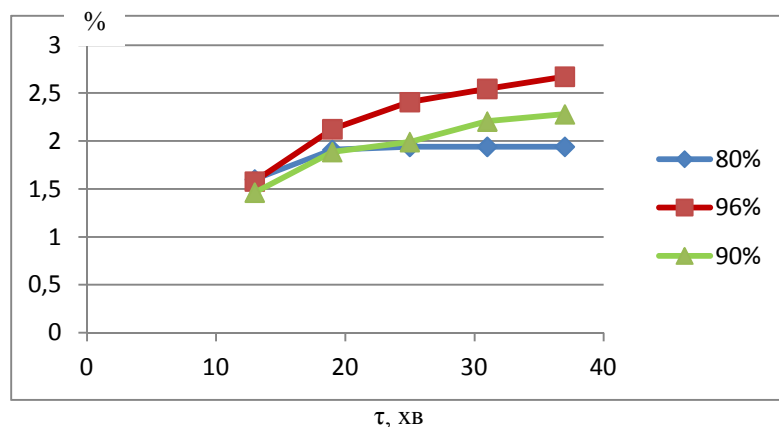
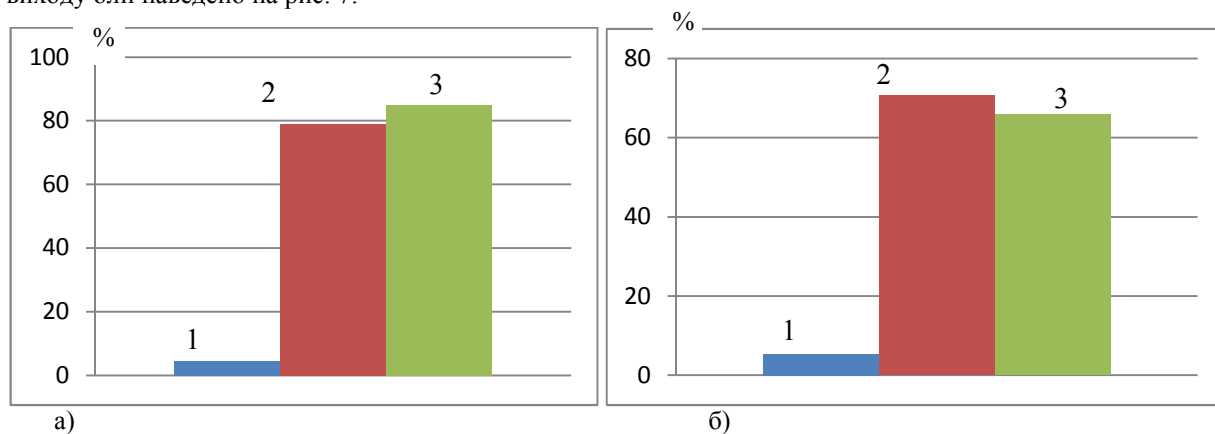


Рис. 6 – Кінетика вилучення сухих речовин в залежності від вмісту етанолу в екстрагенті

Графіки на рис. 6 показують загальний вихід екстрактивних речовин і не враховують вміст олії у екстракті, а різниця у виході сухих речовин при 96% та при 80% етанолу в екстрагенті склала 0,5%. Порівняння виходу олії наведено на рис. 7.

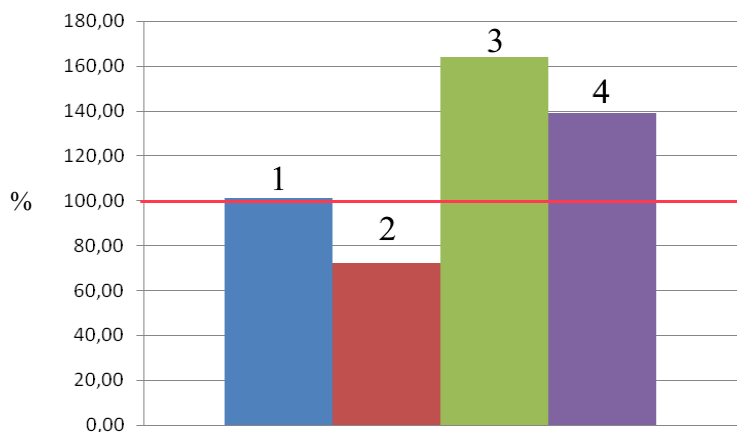


1 – 80%; 2 – 90%; 3 – 96%

Рис. 7 – Вихід олії в залежності від вмісту етанолу в екстрагенті: а) відносно вмісту олії в сировині; б) частка олії в екстрактивних речовинах

Вихід олії при екстрагуванні 80% етанолом незначний: близько 5% від всієї олії, та також близько 5% в екстрактивних речовинах. Найбільший вихід олії спостерігався при екстрагуванні 96% етанолом, а найбільший відсоток олії в екстрактивних речовинах – при 90%. Таким чином, використання 90% для екстрагування олії з макухи соняшника можливе.

Порівняння виходу олії з макухи з розчинністю олії в розчинах етанолу. Для підтвердження механізму емульгування внаслідок механо дифузії, порівняно вміст олії в одержаних екстрактах з розчинністю олії у відповідних екстрагентах. Розчинність взята за 100 %. Результати наведено на рис. 8.



1 – електродинамічний екстрактор, гідромодуль 1:3, 2-3 мм, 1422 кДж/кг; 2 – традиційне нагрівання, гідромодуль 1:3, 2...3 мм, 1422 кДж/кг; 3 – електродинамічний екстрактор, гідромодуль 1:3, 0,2...0,8 мм, 2,39 МДж/кг; 4 – електродинамічний екстрактор, гідромодуль 1:5, 0,2...0,8 мм, 2,39 МДж/кг

Рис. 8 – Вміст олії в екстракті в порівнянні з розчинністю

Як видно з рис. 8 вміст олії в екстракті за деяких режимів перевищує розчинність у 1,6 рази, а за однакових умов, при традиційному нагріванні вміст олії в екстракті складає близько 70% від розчинності, в той час, як в електродинамічному – 101%. Таким чином, підтверджується часткове емульгування олії під час екстрагування етанолом, а збільшення виходу олії пов'язується з явищем механо дифузії.

Висновки. Встановлено, що використання 96 % і 90 % етанолу як екстрагенту можливе для вилучення олії з соняшниккової макухи. Показано, що мікрохвильове поле ініціюючи механо дифузію інтенсифікує часткове емульгування, внаслідок чого вміст олії в екстракті може перевищувати її розчинність у 1,6 рази.

Найбільший вихід олії спостерігається за значень гідромодулю 1:10 та 1:20. Екстрагуванням 90%-м етанолом вдалось вилучити до 90% олії, що містилась у сировині. Використання розчинів концентрацією 80 % є недоцільним через низький вихід олії. Підвищення питомого підведення енергії прискорює перехід суміші в екстракторі у стаціонарний режим кипіння, але збільшує енерговитрати, та не збільшує вихід олії, тому потужності МХ-нагріву більш за 1422 кДж/кг є недоцільними.

References

- Shevchenko, A., Petrenko, O., & Helas, V. (2024). *Strategic development of sunflower cultivation in Ukraine. Economic Bulletin of the Black Sea Littoral*, 5, 133–145. <https://doi.org/10.37000/ebbsl.2024.05.11>
- Shemanska, Ye. I., & Radzievska, I. H. (2020). *Tekhnologhii roslinnykh olii, zhyrovyykh i kosmetychnykh produktiv* [Technologies of vegetable oils, fats and cosmetic products]. Vyshcha shkola. (in Ukrainian)
- Petik, P. F., Hirman, V. V., Papchenko, V. Yu., et al. (2018). *Innovatsiini tekhnologhii kompleksnoi pererobky nasinnia soniashnyku* [Innovative technologies of complex sunflower seed processing]. Agrarna nauka. (in Ukrainian)
- Raimundo, K., Silva, T., Silva, A., & Sakai, O. (2020). Efficiency of ethanol and hexane extraction of sunflower oil from seeds of plants inoculated with *Azospirillum brasilense* and fertilized with sewage sludge. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, 5. <https://doi.org/10.21575/25254782rmetg2020vol5n71323>
- Kulazynski, M., Stolarski, M., Faltynowicz, H., et al. (2016). Supercritical fluid extraction of vegetable materials. *Chemistry & Chemical Technology*, 10(4s), 637–643
- Burdo, O. G., Zikov, A. V., Terziev, S. G., & Ruzhitskaya, N. V. (2016). The nanotechnological innovation in food industry. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 6(3), 144–150.
- Buivol, S. M., Svitlychnyi, P. I., & Malashevych, S. A. (2011). *Intensyfikatsiia ekstrahuvannia olii v elektromagnitnomu poli* [Intensification of oil extraction in an electromagnetic field]. *Naukovi pratsi ONAKhT*, 39, 163–166. (in Ukrainian)
- Bandura, V. M., & Kolianovska, L. M. (2011). *Intensyfikatsiia ekstrahuvannia roslinnykh olii elektromagnitnym polem* [Intensification of vegetable oil extraction by electromagnetic field]. *Naukovi pratsi ONAKhT*, 39, 186–190. (in Ukrainian)

9. Ruzhytska, N. V. (2013). *Kinetics of drying and extraction processes during coffee sludge utilization* (Doctoral dissertation). Odesa National Academy of Food Technologies. (in Ukrainian)

EXPERIMENTAL AND MATHEMATICAL MODELING OF SUNFLOWER OIL EXTRACTION PROCESSES USING WATER-ETHANOL SOLUTIONS

Zaporozhets D.O., graduate student, Ruzhytska N.V., PhD
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. Ukraine is a world leader in sunflower oil production. However, during the processing of seeds, up to 16 % of residual oil remains in the oil cake after the second pressing. Oil extraction is predominantly carried out using hydrocarbon extractants – products of oil refining, particularly hexane – which is an explosive and toxic solvent.

As an environmentally safe alternative, ethanol has been proposed. Moreover, instead of absolute ethanol, the technology for the use of which is described in the literature, it is suggested to use more readily available water-alcohol solutions with an ethanol content of 80 % - 96 %. Ethanol is a renewable extractant. The extraction process is proposed to be activated by an electrodynamic effect, which activates the mechanodiffusion mechanism of mass transfer.

A mathematical model of the extraction process has been developed. It relates the effective mass transfer coefficient to the raw material parameters, the properties of the extractant, and the energetic regimes.

Experiments conducted on an electrodynamic extractor showed that increasing the hydromodulus (solvent-to-solid ratio) up to 1:10 significantly increases the oil yield. Ethanol solutions with a concentration of 90 % are capable of extracting up to 90 % of the oil contained in the oil cake. The influence of specific energy input on the oil yield was investigated. The effect of mechanodiffusion and partial emulsification was confirmed, which allowed for an oil content in the extract that exceeds the ultimate solubility by 1,6 times.

The proposed technology makes it possible to intensify the extraction process, replace environmentally hazardous or expensive extractants with renewable ethanol, and reduce the energy consumption of production.

Keywords: sunflower oil cake, electrodynamic extractor, microwave field, heat and mass transfer, extraction, mechanodiffusion, ethanol

Список використаної літератури

1. Шевченко А., Петренко О., Гелас В. Стратегічний розвиток вирощування соняшнику в Україні // *Економічний вісник Причорномор'я*. – 2024. – № 5. – С. 133–145.
2. Шеманська Є. І., Радзівська І. Г. Технології рослинних олій, жирів і косметичних продуктів. – Київ : Вища школа, 2020. – 182 с.
3. Інноваційні технології комплексної переробки насіння соняшнику : монографія / П. Ф. Петік, В. В. Гірман, В. Ю. Папченко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Київ : Аграрна наука, 2018. – 176 с.
4. Raimundo K., Silva T., Silva A., Sakai O. Efficiency of ethanol and hexane extraction of sunflower oil from seeds of plants inoculated with *Azospirillum brasilense* and fertilized with sewage sludge // *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*. – 2020. – Vol. 5. – DOI: 10.21575/25254782rmetg2020vol5n71323.
5. Kulazynski M., Stolarski M., Faltynowicz H. [та ін.] Supercritical fluid extraction of vegetable materials // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2016. – Vol. 10, № 4(s). – С. 637–643.
6. The Nanotechnological Innovation in Food Industry [Text] / O.G. Burdo, A. V. Zykov, S. G. Terziev, N.V. Ruzhitskaya // *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* – 2016 - Vol. 6 - Issue 3 - P. 144-150
7. Буйвол С. М., Світличний П. І., Малашевич С. А. Інтенсифікація екстрагування олії в електромагнітному полі // *Наукові праці ОНАХТ*. – Одеса, 2011. – Вип. 39. – С. 163–166.
8. Бандура В. М., Коляновська Л. М. Інтенсифікація екстрагування рослинних олій електромагнітним полем // *Наукові праці ОНАХТ*. – Одеса, 2011. – Вип. 39. – С. 186–190.
9. Ружицька Н. В. Кінетика процесів сушіння та екстрагування при утилізації шламу кави : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / Одес. нац. акад. харч. технологій. – Одеса, 2013. – 137 с.

Отримано в редакцію 06.07.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 06.07.2025

Approved 02.09.2025

КІНЕТИКА ТА ЕНЕРГЕТИКА СПОСОБІВ СУШІННЯ ВАРЕНОГО РИСУ

Терзієв С.Г., д.т.н., доц., Безбах І. В., д.т.н., доц., Тараненко Є. Ю., аспірант, Безбах С. В.,
аспірант, Казани В. З., аспірант
Одеський національний технологічний університет

Анотація. У роботі проведено експериментальні дослідження кінетики процесу зневоднення та оцінено енергетичну ефективність різних способів сушіння вареного рису. Розглянуто три типи термообробки: мікрохвильове (НВЧ), інфрачервоне (ІЧ) та мікрохвильове сушіння у вакуумі. Проаналізовано вплив попередніх технологічних операцій — варіння та пропарювання — на інтенсивність видалення вологи, тривалість процесу й питомі енерговитрати. Встановлено, що використання інфрачервоного випромінювання забезпечує найвищу швидкість випаровування вологи завдяки глибокому прогріву зерна, тоді як вакуумне мікрохвильове сушіння характеризується найменшими питомими енерговитратами через зниження температури кипіння води та ефективне використання енергії поля. Порівняльний аналіз показав, що поєднання ІЧ та НВЧ впливу дає змогу оптимізувати процес зневоднення, зменшити тривалість сушіння і водночас зберегти структурну цілісність та колір продукту. На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо оптимізації лабораторних режимів термообробки рису, які забезпечують рівномірний розподіл температури в шарі матеріалу, запобігають перегріву та сприяють зменшенню енергетичних втрат, а також можуть бути використані для планування промислових технологій сушіння зернових культур з підвищеною енергоефективністю. Отримані дані можуть знайти застосування при розробленні енергоощадних технологій сушіння зернових продуктів у харчовій промисловості та під час оптимізації процесів зберігання та переробки продукту на лабораторному і промисловому рівнях.

Ключові слова: рис, сушіння, мікрохвильова енергія, інфрачервоне випромінювання, енергетична ефективність, кінетика.

Вступ. Технологічна обробка зернових культур — ключовий етап у виробництві харчових продуктів, що значною мірою визначає їхню якість, харчову цінність та енергетичні витрати виробництва. Особливе місце серед зернових займає рис, який є базовим продуктом харчування для мільярдів людей у світі. Процес приготування вареного рису — комплекс фізико-хімічних і біотехнологічних перетворень, що включають гідратацію зерна, желатинізацію крохмалю, денатурацію білків та трансформацію смакових і ароматичних сполук. Ці процеси супроводжуються інтенсивним тепло- та масообміном і мають складну кінетику, від якої залежить як технологічна якість продукту (структура зерен, ступінь розварювання, щільність, текстура, смак), так і енергетична ефективність способу обробки.

Останні десятиліття виявили посилену увагу на два взаємопов'язаних напрями: по-перше, детальне вивчення кінетики фізико-хімічних перетворень у зерні рису під час нагрівання, і, по-друге, оптимізація енергетичних витрат процесів при збереженні або покращенні органолептичних й поживних властивостей кінцевого продукту. Це обумовлено як ресурсними та екологічними викликами (підвищення цін на енергоносії, необхідність зниження викидів парникових газів), так і прагненням до підвищення якості харчових продуктів: збереження вітамінів, поліненасичених жирних кислот і термочутливих ароматичних сполук.

Термічна обробка рису застосовується у різноманітних технологічних режимах: традиційне кип'ятіння у надлишку води, тушкування, парова обробка, інноваційні підходи, такі як приготування у вакуумі або під тиском, мікрохвильова термообробка, а також комбіновані методи (мікрохвилі + пара, інфрачервоне + конвекція). Кожен із зазначених методів має свої особливості теплопередачі та кінетики процесів усередині зерна. Так, при варінні у воді домінуючими є конвективні та кондуктивні механізми передачі тепла через рідину та оболонку зерна, при паровій обробці — паропроникність і конденсація на поверхні, у мікрохвильовому режимі — об'ємний діелектричний нагрів полярних молекул води всередині зерна, що призводить до іншого розподілу температур та швидкості желатинізації.

Кінетика желатинізації крохмалю та гідратації є центральним науковим питанням для приготування вареного рису. Желатинізація — процес руйнування кристалічних зон амілози та амілопектину під впливом води і температури, що супроводжується набуханням гранул крохмалю та зміною в'язкості середовища. Кінетичні параметри цього процесу (швидкість, порядок реакції, енергія активації) залежать від сорту рису, ступеня полірування, попередньої термічної обробки, вмісту вологи, розміру і морфології зерна, а також від конкретного теплового режиму. Різні способи нагріву призводять до різних профілів температури і вологи всередині зерна, що змінює динаміку желатинізації та кінцеву текстуру. Тому для наукового та практичного управління якістю вареного рису необхідно не лише описати кінетику окремих перетворень, а й побудувати інтегровані моделі тепломасопереносу та хіміко-фізичних трансформацій.

Енергетичні аспекти приготування вареного рису охоплюють питому витрату енергії на одиницю про-

дукції, ефективність перетворення спожитої енергії у корисну теплоту, втрати в навколишнє середовище та можливості рекуперації. Традиційне кип'ятіння характеризується суттєвими тепловими втратами (відвід пари, підігрів надлишку води, тепловіддача від стінок посуду), а також низьким рівнем енергоефективності при невеликих партіях. Поява методів, що використовують вакуум, тонкі шарові апарати, індукційне та мікрохвильове нагрівання, дозволяє зменшити теплові втрати і створити більш сприятливі умови для швидкої та рівномірної желатинізації, тим самим знижуючи питомі енерговитрати. Оцінка енергетики методів приготування потребує комплексного підходу, що включає вимірювання споживаної електричної і теплової енергії, аналіз кінцевої температури і вмісту вологі продукту, а також врахування технологічних факторів, таких як час обробки, об'єм партії та продуктивність установки.

Науковий інтерес також викликає питання збереження харчової цінності та мікробіологічної безпеки при різних режимах термообробки. Вміст вітаміну B1, вітаміну PP, деяких амінокислот та міnorних сполук чутливий до температури і тривалості нагріву. Механізми деградації цих компонентів мають свою кінетику, часто описувану першими або другими порядками реакції з власною енергією активації. Оптимізація режимів приготування повинна балансувати між досягненням потрібної текстури та збереженням корисних речовин. Тут важливими чинниками виступають не лише температура і тривалість обробки, але й характер нагріву (поверхневий або об'ємний), а також швидкість масообміну з навколишнім середовищем, яка визначає, наскільки швидко внутрішня вологість досягає умов, необхідних для завершення желатинізації без надлишкового перегріву.

Крім фундаментальної наукової проблематики, існує явна прикладна потреба у стандартизованих підходах до оцінки та порівняння методів приготування вареного рису. Для практичного впровадження інноваційних методів у промислове та побутове виробництво важливими є розробка критеріїв якості (текстура: твердість і клейкість зерен, розпадність, візуальні показники), показників енергетичної ефективності (кДж/кг готового продукту), екологічності (CO₂-еквівалент на одиницю продукції) та економічної доцільності (капітальні та експлуатаційні витрати, термін окупності).

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Наразі в літературі є багато експериментальних даних щодо окремих методів приготування, проте відсутня узагальнена, системна оцінка кінетичних та енергетичних характеристик різних способів з урахуванням гетерогенності сировини та масштабованості процесу.

В дослідженні [1] ставили за мету дослідити комбінований вплив різних методів сушіння а також попередньої ферментативної обробки на текстурні характеристики, фізичні властивості, кінетику регідrataції та засвоюваність вареного рису. Використовували сушіння в камерній конвективній сушарці та сублімаційній. Як модельний продукт використовували гібридний сорт рису Sembada 188. Зразки сублімованого вареного рису демонстрували нижчу об'ємну щільність (0,24...0,28 г/мл) та вищу пористість (58,6...62,9%) порівняно зі зразками вареного рису в камерній конвективній сушарці (об'ємна щільність: 0,47...0,53 г/мл, пористість: 52,3...60,4%). Попередня ферментативна обробка ще більше знизила об'ємну щільність та збільшила пористість. Зразки, оброблені амілоглюкозидазою, демонстрували значно вищі коефіцієнти регідrataції ($p < 0,05$), ніж інші зразки, оброблені ферментами, незалежно від техніки сушіння. Зразки сублімованого рису швидкого приготування, обробленого β -амілазою, показали найвищу швидкість перетравлення, ймовірно, через збільшення площі поверхні. Поєднання сублімаційного сушіння та ферментативної обробки амілоглюкозидазою дало найперспективніші результати, отримуючи рис швидкого приготування з чудовими властивостями регідrataції та текстури. В дослідженні більшу увагу приділено визначенню якісних характеристик продукту. Кінетичні характеристики процесу сушіння не визначались.

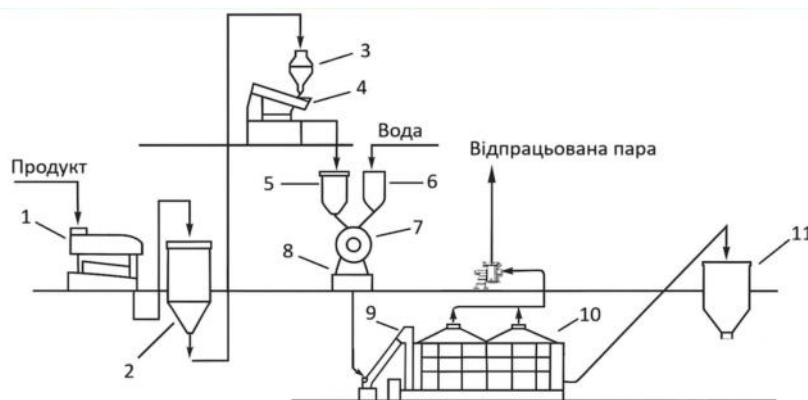
В дослідженні [2] проаналізовано зовнішній вигляд, якість обробки, фізико-хімічні властивості, кулінарні та споживчі якості, а також динаміку характеристик вологості зерна рису та їх співвідношення за умов постійних температур сушіння 40, 50 та 60 °C. Результати показали, що зі збільшенням температури сушіння вміст вільної води в рисі зменшувався, а якість обробки, споживання та приготування погіршувалася. Однак реакція зміни якості рису на температуру сушіння була неоднаковою для різних сортів. Ці відмінності були головним чином зумовлені співвідношенням довжини до ширини, початковим вмістом вільної води та вмістом амілози. У процесі високотемпературного сушіння сорти рису з нижчим співвідношенням довжини до ширини та вмістом амілози, вищим початковим вмістом вільної води демонстрували вищі показники розтріскування зерен та більше зниження харчових якостей. В дослідженні не ставили завдання вивчення енергетичних характеристик процесу.

Одним із способів приготування рису швидкого приготування є варіння, заморожування та сушіння [3], що призводить до утворення пористої структури, яка забезпечує легку регідrataцію. Дослідження мало на меті розробити альтернативний метод приготування рису швидкого приготування з використанням комбінації методу сушіння з псевдозрідженим шаром та додавання гліцерину. Зразки були оцінені, включаючи фізичні характеристики, сприйняття споживачами та інформацію про харчову цінність вибраного продукту. Рис полірували протягом 30, 45 та 60 секунд, і фіксували ступінь його білизни. Згодом насіння промивали, попередньо варили з додаванням гліцерину (0, 2 та 4%), обробляли паром, заморожували та сушили. Варений рис заморожували в морозильній камері протягом 24 годин при температурі -20 °C та сушили в сушарці з псевдозрідженим шаром до досягнення постійної ваги. Додавання гліцерину не вплинуло на якісні харак-

теристики продукту. Обраний спосіб обробки продемонстрував такі фізичні характеристики: час регідратації (7,5 хв), об'ємна щільність ($0,41 \pm 0,03$ г/мл), водопоглинання ($41,92 \pm 0,50\%$), коефіцієнт регідратації ($3,58 \pm 0,02$) та коефіцієнт розширення об'єму ($223,72 \pm 12,94$), що свідчить про відповідність критеріям швидкого приготування. Харчова цінність на порцію 60 г була наступною: загальна енергетична цінність (240 ккал), білок 3 г (6% від рекомендованої добової норми споживання), загальний вміст жиру 0 г та вуглеводи 56 г.

Для виробництва швидкорозчинного пророщеного рису VD20 було проведено дослідження кінетики дегідратації [4], термічного розкладу поліфенолів та регідратації швидкорозчинного продукту. У цьому дослідженні застосовувалися різні температури, включаючи 50°C, 55°C, 60°C та 65°C. Для опису цих змін було розроблено різні моделі. Модель Пейджа найкраще відповідає властивостям дегідратації зразка, з коефіцієнтом дифузії води (D_{ef}) від $7 \cdot 10^{-12}$ до $1,19 \cdot 10^{-11}$ м²/с та енергією активації 31,70 кДж/моль. Модель нульового порядку описувала зміну поліфенолів під час процесу сушіння. Значення періоду напіврозпаду коливалися від 3,737 год до 5,723 год. Також була використана модель штучної нейронної мережі. Це інтелектуальна модель, створена на основі штучної нейронної мережі. Він працював краще та швидше, ніж попередні моделі, такі як модель Пейджа для поведінки дегідратації та модель нульового порядку для властивості деградації. Коефіцієнт регідратації швидкопророщеного рису також добре узгоджувався з експоненціальною моделлю. Ці отримані дані можуть сприяти подальшій оптимізації та виробництву у більших масштабах, що дозволить фермерам виробляти більше продукції з цього рису.

До кафедри процесів, апаратів та енергетичного менеджменту ОНТУ звернувся ПАТ «Енні Фудз», яке планує виробляти рисову кашу швидкого приготування за наступною технологічною схемою (рис. 1).



1 – зерновий сепаратор, 2 – бункер, 3 – автоваги, 4 – зерномийна машина, 5 – бункер-мірник, 6 – збірник-мірник, 7 – варильний апарат, 8 – приймач для круп, 9 – розподілювач, 10 – стрічкова сушарка, 11 – бункер

Рис. 1 – Технологічна схема виробництва каш швидкого приготування

Спочатку крупу очищують від сторонніх домішок на зерновому сепараторі 1. Очищена сировина потрапляє у бункер 2, звідки за потреби транспортується на авто ваги 3. Після зважування крупу направляють у зерномийну машину 4 та збирають у бункер-мірник 5. Після цієї підготовки сировина потрапляє до двох ключових вузлів лінії – до варильного апарату 7, а потім до стрічкової сушарки 10.

Працівники підприємства ПАТ «Енні Фудз» самостійно провели два тестових цикли приготування такої продукції, але невдало через відсутність оптимальних режимів варіння та сушіння рису. Це робилось на досить великих партіях сировини, що, звісно, не є економічно доцільним. Необхідно розробити режими термообробки саме у лабораторних умовах, що забезпечать якість продукту та його швидке відновлення.

Виходячи з розглянутих публікацій та вимог з боку виробників – проблема: відсутність оптимальних режимів варіння та сушіння рису для виробництва каш швидкого приготування, високі енерговитрати при сушінні.

Пропонується наступна гіпотеза: використання НВЧ способу підведення енергії призведе до зниження енерговитрат за рахунок адресної доставки енергії до води, що міститься у продукті

Використання НВЧ обробки та НВЧ обробки у вакуумі призведе до збільшення пор зерна, що, в свою чергу, впливатиме на здатність до відновлення.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження: дослідити процес сушіння вареного рису, визначити режими термообробки, що забезпечать якість продукту та його швидке відновлення

Завдання:

- дослідити кінетику сушіння рису;
- оцінити та порівняти енергетичні витрати процесів;

Матеріали та методи дослідження. Рис довго зернистий (SunPanda, Таїланд) вологістю 7 % попередньо замочували у воді (гідромодуль 1:2) на протязі 15 хв. Процес пропарювання відбувався в автоклаві (M0-ST-75-VU, Україна) при тиску 0,15 МПа. Саме такий тиск утворюється у варильному апараті на виробницт-

ві. Обробку парою проводили на протязі 25 хв.

Для другої серії експериментів рис варили (гідромодуль 1:2,15) на протязі 20 хв.

Для визначення початкової вологості рис попередньо дробили і пропускали через сито діаметром 1мм. Вологість початкового продукту визначалась методом висушування постійної маси при температурі 120°C. У попередньо висушений бюкс з відомою масою розміщували 5 г продукту. Час висушування становив 45 хвилин. Після цього бюкс розташовувався в ексікаторі для охолодження на 30 хвилин, після чого проводилося зважування на аналітичних вагах Radwag AS 220/C з точністю ± 0.0004 г.

Вологість початкової сировини розраховувався за формулою

$$w = \left(1 - \frac{m_c}{m_n} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

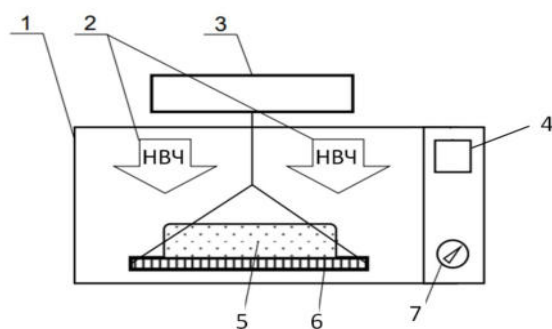
де, m_c - маса сухого продукту, кг;

m_n - маса початкової сировини, кг.

Для вирішення завдання експериментального моделювання сушіння сировини мікрохвильовим електромагнітним полем, на базі мікрохвильової камери, зібраний експериментальний стенд, що включає: саму камеру з вбудованою системою витяжної вентиляції та випромінювачем мікрохвильової енергії, електронні ваги (ТВЕ-2,1-0,01), підвіснукасету для розміщення шару сировини, що нагрівається, безконтактний вимірювач температури (Benetech GM320), енергомір (Feron TM-55). Схему дослідницького стенду показано на рис. 2.

Відповідно до плану, експеримент проходив у наступному порядку. Шар зерен рису заданої висоти, рівномірно розподілявся по касеті. Касета виконана з радіопрозорого пластику підвішена до вимірювальної пластини лабораторних ваг, що безперервно фіксують вагу зразка. Встановлювалися параметри камери (потужність магнетрону, тривалість включення) і запускався процес, у ході якого безперервно фіксувалися: вага зразка, температура зразка та електрична потужність – періодичним записом показань вимірювальних приладів.

Потужність випромінювання встановлювалася штатними засобами пульта управління мікрохвильової камери нагріву, який дозволяє встановити потужність випромінювання у відсотках щодо максимальної потужності випромінювача. Для проведення серії експериментів були обрані значення 70 % потужності, що відповідає 560 Вт мікрохвильового випромінювання генератора



1 – сушильна камера; 2 – генератори НВЧ поля; 3 – електронні ваги; 4 – таймер; 5 – сировина;
6 – касета; 7 – регулятор потужності НВЧ генераторів

Рис. 2 – Схема стенду для дослідження сушіння сировини

Тривалість експерименту обмежувалася моментом досягнення зразком рівноважної вологості 14%. При досягненні вологості експеримент завершувався, дані вимірювань вносилися до таблиці результатів подальшої обробки.

Таблиця 1

Умови експериментальних досліджень

Метод обробки	Метод сушіння	Початкова Вологість, %	Кінцева вологість, %	Початкова маса продукту, кг
Варіння	НВЧ	68,9	14	0,084
	НВЧ вакуум			
	ІЧ			
Пропарювання	НВЧ	38		
	НВЧ вакуум			
	ІЧ			

Схема сушарки з ІЧ випромінювачами аналогічна сушарці з НВЧ. Відмінності – касету виконано зі сталі. Потужність ІЧ випромінювача складала 650 Вт.

Схема сушарки з використанням вакууму аналогічна сушарці з НВЧ. Відмінності – всередині сушильної камери розташовано радіопрозору ємність з продуктом, до якої під'єднано вакуум систему. Тиск в ємності підтримували на рівні $65 \cdot 10^{-5}$ МПа.

Результати досліджень процесу сушіння вареного рису

Результати досліджень кінетики процесу. За отриманими в результаті серії даними, визначено залежність зміни вмісту води шару рису, під впливом НВЧ, ІЧ випромінювання та НВЧ обробки у вакуумі. Дані про вміст води шару реєструвалися за допомогою електронних ваг як різницю між початковою вагою зразка (навішування) з відомою початковою вологістю і його вагою в контрольних точках в процесі сушіння.

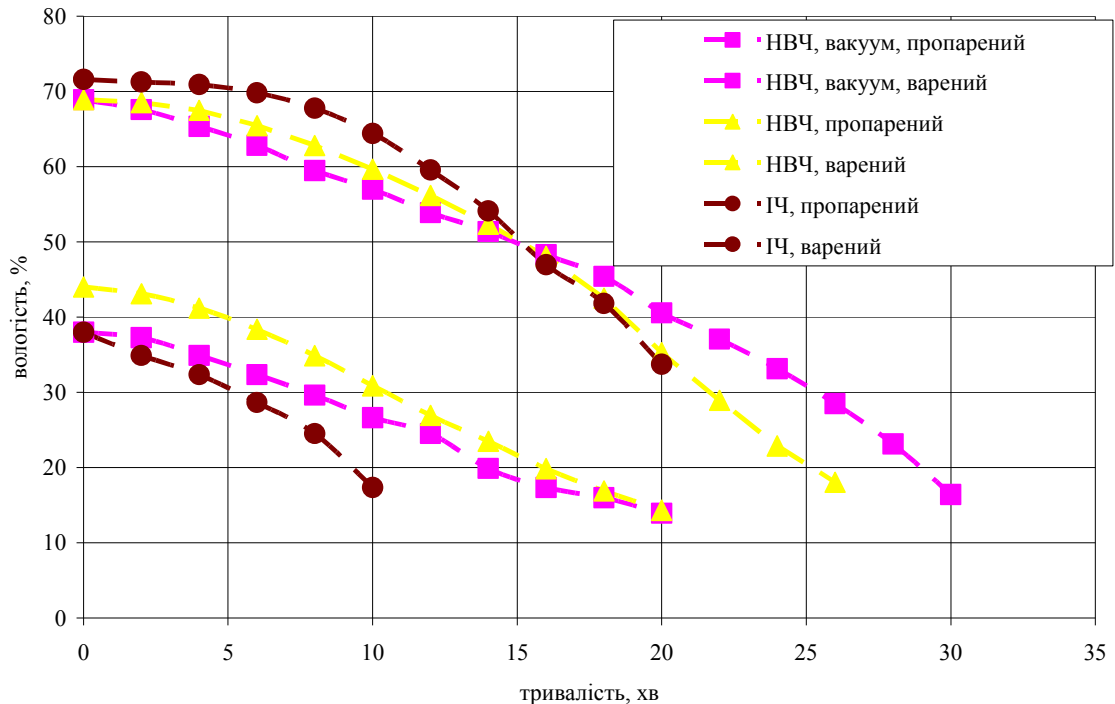


Рис. 3 – Залежність вологості шару рису від способів сушіння та попередньої термообробки

За отриманими даними побудовані графіки зміни вологості шару сировини в процесі сушіння різними способами та для різної попередньої обробки. Графіки залежностей наведено рис. 3. Криві, що відповідають вареному рису починаються із значень більшої вологості, тому розміщені вище, криві пропареного рису відповідно нижче.

Аналізуючи отримані залежності можна визначити, що на кривій сушіння присутня початкова ділянка, що відповідає прогріву шару сировини, величина якого змінюється від 0,5 до 5 хв для вареного рису і до 2 хв для пропареного.

Після ділянки прогріву вологість шару змінюється практично лінійно. До другого етапу сушіння, коли швидкість сушіння падає, а швидкість зменшується внаслідок ущільнення поверхневого шару частинок (зерен), процес не доходить. Отримана залежність побічно підтверджує наявність односпрямованих температурного та вологого градієнтів у зернівках, що не дозволяють ущільнитися поверхні зерен (часток) внаслідок висихання.

Для ІЧ способу швидкість сушіння постійно зростає, про що говорить не характерний вид кривих сушіння.

Оцінка енергетичних витрат процесу. Питомі енерговитрати $E_{\text{пит}}$, МДж/(кг вид. вол.) визначалися як відношення загальної витраченої енергії до кількості віддаленої води. Вплив на величину енерговитрат створюють наступні фактори:

1. Властивості продукту: вологість, діелектричні властивості (для НВЧ), оптичні/поглинальні характеристики (для ІЧ), теплопровідність.
2. Товщина шару та геометрія: тонкий шар вигідніший для ІЧ; НВЧ дає перевагу в об'ємі, але потребує оптимізації розподілу поля.
3. Режим роботи: імпульсне дія НВЧ іноді ефективніша, знижує перегрів.
4. Ефективність обладнання: ККД магнетрону, відбиття в камері, теплоізоляція, коефіцієнт корисного завантаження сушарки.
5. Побічні споживачі енергії: вакуум-насос, вентилятори, насоси, конденсатори.
6. Масштаб: на лабораторних установках втрати вище у перерахунку на 1 кг продукції; при індустріаль-

ному масштабі економія вища.

Отримані енерговитрати в залежності від способу сушіння представлені на рис. 4.

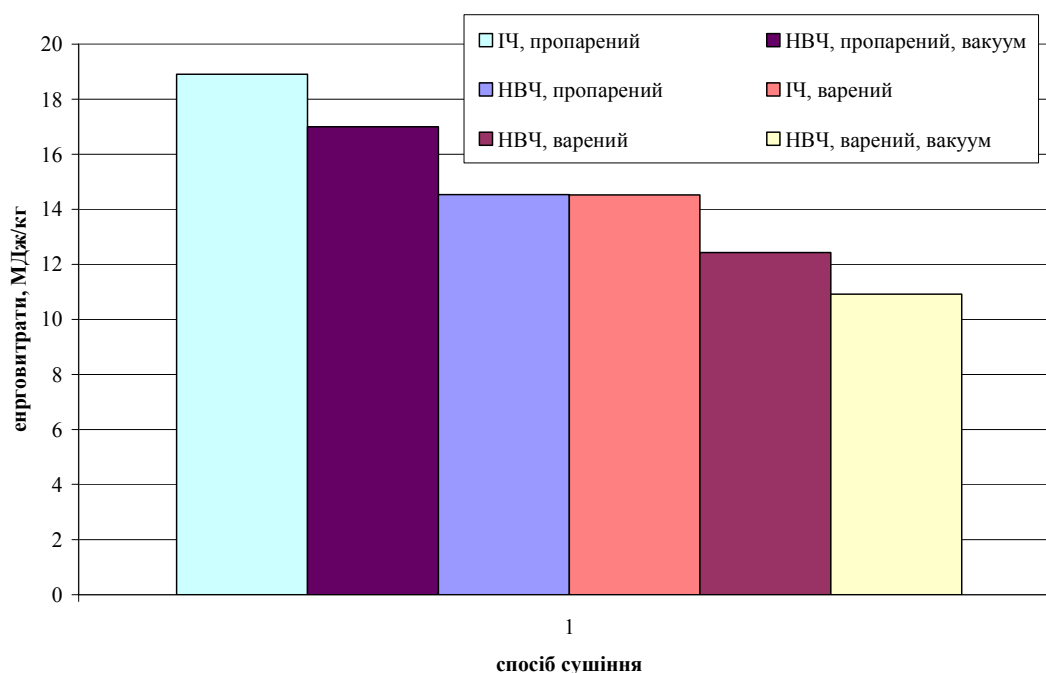


Рис. 4 – Енерговитрати в залежності від термообробки та способу сушіння

Видно, що енерговитрати на процес поступово зменшуються в залежності від термообробки та способу сушіння.

Обговорення результатів дослідження процесу. Результати роботи можуть мати прикладне значення для харчової індустрії (виробники готових страв, консервації), наукових установ, що займаються фізикою крохмалю і технологією зернових продуктів, а також для розробників побутових пристроїв для приготування рису, орієнтованих на енергоефективність та збереження харчової цінності. Новизна полягає у впровадженні інтеграційного підходу, який об'єднує кінетичний аналіз із енергетичною оцінкою технологічних процесів приготування вареного рису. Такий підхід дозволить не лише зрозуміти фундаментальні закономірності, але й надати практичні інструменти для оптимізації режимів.

Питомі витрати вийшли досить високими. Скоріше за все це пов'язано із тим, що в дослідженні використане весь корисний об'єм сушарок. Наважка має бути більшою. Виходячи з рівняння теплового балансу, менше 10% енергії йде на корисну роботу, а все інше потрапляє у навколишнє середовище. напрям наступних досліджень – збільшення маси продукту в касеті, що призведе до більш ефективного використання сушарок та знизить питомі енерговитрати.

Подальшим напрямком роботи також є експерименти з визначення коефіцієнтів регідратації та інших якісних показників продукту.

Висновки

1. Проведено експерименти з визначення кінетику сушіння рису в залежності від способів сушіння та способів термообробки. Найбільша швидкість процесу спостерігається при ІЧ сушінні.
2. Визначено енергетичні витрати процесу. Найнижчі показники відповідають сушінню вареного рису в умовах вакууму та НВЧ поля.

References

1. Yussof, N. Y. S. M., Abu Bakar, N. W., Hong, S.-P., & Basri, A. M. (2025). Combined enzyme-pretreatments and drying techniques on rehydration kinetics, digestibility, and physicochemical properties of instant rice. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19(9), 6584–6600. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03426-z>
2. Fan, F., Zheng, X., Dong, H., Qin, Y., Shao, Y., & Zhu, D. (2025). Analysis of grain moisture distribution and quality response of different types of rice varieties after drying. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 39(8), 1709–1720. <https://doi.org/10.11869/j.issn.1000-8551.2025.08.1709>
3. Purwaningrum, B. A., Taqi, F. M., Muhandri, T., & Saraswati, S. (2025). Development of instant sorghum rice using fluidized bed dryer technology and glycerol addition. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 36(1), 84–94. <https://doi.org/10.6066/jtip.2025.36.1.84>
4. Loan, L. T. K., Tat, T. Q., Minh, P. D. T., Thao, V. T. T., Hoang, P. T. M., Nhi, T. T. Y., Giang, B. L., Phat, D. T., Mansamut, C., & Tai, N. V. (2025). Modeling of dehydration, polyphenol thermal degradation, and

rehydration of instant germinated VD20 rice: Mathematical and artificial intelligence model. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 24(1), 1–18. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim24400>

KINETICS AND ENERGETICS OF DRYING METHODS OF COOKED RICE

Terziev S.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bezbakh I.V., Doctor of Technical Sciences Associate Professor, Taranenko Y.Yu., postgraduate student, Bezbakh S.V., postgraduate student, Kazani V.Z., postgraduate student
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. The study presents experimental research on the kinetics of moisture removal and the energy efficiency of various methods for drying cooked rice. Three types of thermal treatment were investigated: microwave (MW), infrared (IR), and microwave drying under vacuum conditions. The influence of preliminary technological operations—boiling and steaming—on the drying rate, process duration, and specific energy consumption was analyzed. It was found that the use of infrared radiation ensures the highest moisture evaporation rate due to deep heating of the grain, while vacuum microwave drying provides the lowest specific energy consumption as a result of reduced boiling temperature and efficient utilization of electromagnetic energy. Comparative analysis demonstrated that the combined application of IR and MW heating allows optimization of the dehydration process, reduces drying time, and simultaneously preserves the structural integrity and color of the product. Based on the obtained results, recommendations were developed for optimizing laboratory regimes of rice thermal treatment that ensure uniform temperature distribution within the material layer, prevent overheating, and contribute to reducing energy losses, and can also be applied for planning industrial cereal drying technologies with improved energy efficiency. The findings may be used in the development of energy-saving technologies for drying cereal products in the food industry and in the optimization of storage and processing operations at both laboratory and industrial scales.

Keywords: rice, drying, microwave energy, infrared radiation, energy efficiency, kinetics.

Список використаної літератури

1. Yussof N. Y. S. M., Abu Bakar N. W., Hong S.-P., Basri A. M. Combined enzyme-pretreatments and drying techniques on rehydration kinetics, digestibility and physicochemical properties of instant rice. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2025. Vol. 19, No. 9. P. 6584–6600. DOI: [10.1007/s11694-025-03426-z](https://doi.org/10.1007/s11694-025-03426-z).
2. Fan F., Zheng X., Dong H., Qin Y., Shao Y., Zhu D. Analysis of grain moisture distribution and quality response of different types of rice varieties after drying. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*. 2025. Vol. 39, No. 8. P. 1709–1720. DOI: [10.11869/j.issn.1000-8551.2025.08.1709](https://doi.org/10.11869/j.issn.1000-8551.2025.08.1709).
3. Purwaningrum B. A., Taqi F. M., Muhandri T., Saraswati S. Development of instant sorghum rice using fluidized bed dryer technology and glycerol addition. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*. 2025. Vol. 36, No. 1. P. 84–94. DOI: [10.6066/jtip.2025.36.1.84](https://doi.org/10.6066/jtip.2025.36.1.84).
4. Loan L. T. K., Tat T. Q., Minh P. D. T., Thao V. T. T., Hoang P. T. M., Nhi T. T. Y., Giang B. L., Phat D. T., Mansamut C., Tai N. V. Modeling of dehydration, polyphenol thermal degradation, and rehydration of instant germinated VD20 rice: Mathematical and artificial intelligence model. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2025. Vol. 24, No. 1. P. 1–18. DOI: [10.24275/rmiq/Alim24400](https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim24400).

Отримано в редакцію 06.07.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 06.07.2025

Approved 02.09.2025

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КРАФТОВОГО ВИРОБНИЦТВА ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ ЗА ТЕХНОЛОГІЯМИ «ВІДКЛАДЕНОГО ВИПІКАННЯ» У ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННОМУ БІЗНЕСІ

Солоницька І.В., доцент, Трішин Ф.А., доцент, Жигунов Д.О., професор,
Лебеденко Т.Є. професор
Одеський національний технологічний університет

Анотація. Метою статті являється обґрунтування нових сучасних підходів до управління якістю хлібобулочних напівфабрикатів та автоматизація процесів крафтового виробництва у готельно-ресторанному бізнесі. Автори приділяють увагу сучасним технологіям, а саме метою роботи являється розробка технології «відкладеного випікання», направлена на покращення показників якості готових виробів, в першу чергу структурно-механічних властивостей. Основною метою є забезпечення населення свіжими хлібобулочними виробами з «best quality» якістю за рахунок використання інноваційних технологій управління якістю та автоматизації технологічних процесів.

Висвітлено роль автоматизації у процесах крафтового виробництва хлібобулочних виробів за технологіями «відкладеного випікання» у готельно-ресторанному бізнесі, виробничих процесів для оптимізації виробництва. Також розглянуто новітні технології, що сприяють стабільній якості авторських, крафтових сортів хліба та виробництву хлібобулочних заморожених напівфабрикатів за технологіями «відкладеного випікання» у готельно-ресторанному бізнесі.

Запропоновані у статті підходи можуть бути застосовані для вдосконалення систем контролю якості забезпечення хлібобулочними виробами крафтового виробництва готельно-ресторанного бізнесу, що забезпечить високу якість продукції та відповідність сучасним трендам та НАССР.

Ключові слова: авторські крафтові хлібобулочні вироби, управління якістю напівфабрикатів, технології «відкладеного випікання», автоматизація процесів готельно-ресторанного бізнесу, крафтове виробництво, хлібобулочні напівфабрикати заморожені, охолоджені.

Вступ

Рішення про самостійне виробництво хлібобулочних виробів або допикання хлібобулочних напівфабрикатів у готельно-ресторанному бізнесі залежить від характеру закладу та від площі, яку можна відвести під виробничі приміщення. Якщо свіжий гарячий хліб та апетитна випічка — невід'ємна складова концепції, а заклад має достатню кількість посадок та високу відвідуваність, то сенс випікати самим є. Зростаючий інтерес до натуральних продуктів: споживачі все більше уваги приділяють складу продуктів, віддаючи перевагу натуральним інгредієнтам, уникаючи штучних добавок. Коли клієнт обирає готель або ресторан для відпочинку, він запам'ятовує емоції від відвідування, смакування і звертає увагу на світові тренди. До світових трендів відноситься пошук унікальності та автентичності. Авторський, крафтовий хліб забезпечує широкий вибір смаків та текстур, які неможливо забезпечити споживачу у масовому виробництві, що задовольняє потребу у виборі та індивідуальності. Крафтове виробництво в більшості своїй використовує закваски, що надає виробам особливого смаку, аромату, а також покращує його засвоюваність. Потрібно лише уважно підійти до формування асортименту. Хлібобулочні вироби займають особливе місце в раціоні людини. В останні роки відвідувач віддає перевагу свіжій випічці крафтового виробництва, свіжовипечені, тому скорочується виробництво хлібобулочних виробів по традиційній технології. Перспективною являється технологія «відкладеного випікання», яка дозволить готелям, ресторанам використовувати продукцію великих підприємств, які виготовляють заморожені напівфабрикати та поставляють їх в місця реалізації. Дану технологію можна вважати енергозберігаючою, за рахунок часткового випікання. Перевагою хлібобулочних виробів, виготовлених за технологію «відкладеного випікання» являється тривалий спосіб зберігання [1,2].

Виходячи з необхідної площі, легко оцінити, чи покриє додатковий прибуток від продажу власного хліба та хлібобулочних виробів і залучення нових клієнтів, щомісячні витрати на оренду та утримання персоналу, а також чи окупить інвестиції в обладнання. Загалом, крафтовий хліб відповідає сучасним тенденціям споживання, де якість, натуральність та унікальність виходять на перший план. Він може стати не лише смачним доповненням до раціону, але й фактором, що сприяє розвитку готельно-ресторанного бізнесу регіону, місцевої економіки та туризму. В останні роки технології виробництва хлібобулочних виробів із напівфабрикатів за технологіями «відкладеного випікання» набуває все більшого поширення, оскільки дозволяє значно розширити мережу пекарень в місцях реалізації за рахунок створення міні-пекарень у готелях або готельно-ресторанних комплексах з неповним набором устаткування.

Саме тому дослідження, спрямовані на вдосконалення контролю якості хлібобулочних виробів, автоматизації процесів крафтового виробництва у готелях, ресторанах мають важливе значення для розвитку туристичного та готельно-ресторанного бізнесу регіону, країни.

Сучасні автоматизовані методи контролю та управління якістю хлібобулочних виробів у готельно-ресторанному бізнесі. До числа найважливіших завдань, що стоять перед виробниками хлібобулочних виробів, як і перед ресторанами, готелями відноситься виробництво інноваційної продукції при дотриманні встановлених норм виходу. Важливим етапом є контроль, який дозволяє постійно контролювати процес виробництва і у разі необхідності коригувати. Для цього існують технологічні інструменти впливу на протікання процесів тістоприготування. Зокрема дані виробничого контролю служать для прийняття оперативних заходів боротьби з втратами під час приготування.

Система забезпечення якості, яка забезпечує контроль виробництва дозволяє забезпечити випуск готових страв, що відповідає розробленим технологічним карткам та вимогам якості. Сучасні методи управління контролем якості включають аналіз сировини, напівфабрикатів, готової продукції і моніторинг фізико-хімічних показників та органолептичну оцінку готової продукції.

Всі показники якості хлібобулочних виробів, які виробляються хлібо заводами, нормуються державними стандартами або технічними умовами. У сфері готельно-ресторанного господарства поряд із хлібобулочними виробами промислового виробництва широко застосовують власні, авторські або крафтові рецептури. Якість таких виробів оцінюють за органолептичними показниками та масою. Під час органолептичної оцінки враховують форму хліба, колір і стан скоринки, смак, аромат, еластичність, пористість, свіжість м'якушки, а також визначають вагу виробу. Смакові властивості, свіжість, аромат і наявність хрусткості перевіряють шляхом дегустації; колір м'якушки, рівномірність пористості та можливі сліди непромісу оцінюють візуально на зрізі. Еластичність м'якушки визначають легким натисканням пальцем на зріз, а масу — зважуванням готового виробу [3].

Хліб — це продукт щоденного споживання практично кожною людиною, тому несе потужний фізіологічний вплив на організм. Тому саме якість та безпека виробництва у готельно-ресторанному бізнесі крафтових та авторських рецептур повинна забезпечувати позитивний вплив на організм відвідувача-споживача. Тому, при розробці технологій та підборі асортименту хлібобулочних виробів для підприємств ресторанного бізнесу необхідно використовувати основні підходи до трендів, хімічного складу та способів приготування. Хімічний склад хлібобулочних виробів (загалом — хліба) визначається переважно видом борошна, з якого їх виготовляють, та особливостями рецептури. Основу складу хліба становлять вуглеводи, частка яких коливається від 40 % у житньому хлібі з обойного борошна до приблизно 70 % у сухарях. До основних вуглеводів належать крохмаль і продукти його гідролізу — декстрини, а також прості цукри: моносахариди (глюкоза, фруктоза, пентоза, арабіноза, ксилоза, галактоза) і дисахариди (сахароза, мальтоза, лактоза — у разі наявності молочних інгредієнтів у рецептурі). Окрім розчинних вуглеводів, до складу хліба входять нерозчинні полісахариди — целюлоза, геміцелюлоза, клітковина, пектини та пентозани. Один грам вуглеводів забезпечує організм людини приблизно 3,75 ккал (або 15,70 кДж) енергії.

Вміст білкових сполук у хлібі становить від 6,5 % до 11 %. Вони представлені як власне білками, так і продуктами їх часткового гідролізу. До складу входять також органічні кислоти — переважно молочна, оцтова, винна, яблучна, щавлева та мурашина. Їх загальна кількість у готових виробах зазвичай становить 0,3–1,3 %.

Хліб є джерелом біологічно активних речовин — вітамінів і мінералів, які виконують важливі функції в обміні речовин і підтримують життєдіяльність організму. Мінеральних сполук у ньому міститься від 1,2 % до 2,5 %. Вітамінний комплекс представлений вітамінами групи В — тіаміном, рибофлавіном, нікотиновою кислотою (РР), токоферолом (Е) та іншими.

Жирів у хлібі міститься приблизно 0,6–1,2 %, і вони надходять переважно з борошном. До складу жирів входять три гліцериди, а також насичені й ненасичені жирні кислоти. Крім основних складових, у хлібі присутні сполуки, що формуються під час бродіння тіста та його випікання, — спирти, ефіри, альдегіди, кетони, меланоїдини та інші продукти складних хімічних реакцій.

Під час виготовлення окремих видів авторського хліба до основного виду борошна можуть додаватися інші його різновиди — кукурудзяне, вівсяне, ячмінне, гречане, а також борошно з бобових культур, зокрема соєве, горохове, люпинове тощо. Крафтове виробництво відрізняється різноманітністю асортименту, рецептурних інгредієнтів та використанням ручної обробки. У термінології існує багато назв, таких як крафтові, рустикальні, авторські, селянські тощо. Вироби мають неповторний аромат, завдяки методу тісто приготування на заквасках, з меншою кількістю пресованих дріжджів, під час бродіння утворюють багато ароматуючих речовин. Зазвичай, зокрема у готельно-ресторанному бізнесі такі сорти хліба виробляються маленькими партіями, прості за рецептурою, здебільше з борошна грубого помелу, цільнозернового або суміші декількох видів і сортів борошна. І безперечно, такі вироби багатіші на клітковину, мікро- та мікроеlementи, вітаміни, що робить їх більш кориснішими ніж звичайні хлібобулочні вироби масового споживання, особливо для обміну речовин та для травлення.

Найбільш інтенсивний аромат мають щойно випечені вироби. Завдяки використанню технологій «відкладеного випікання» при виробництві хлібобулочних напівфабрикатів набуває все більшого поширення.

Застосування хлібобулочних напівфабрикатів дозволяє зменшити витрати, пов'язані з транспортуванням готової продукції, забезпечити централізований контроль якості та безпечності виробів на етапі виготовлення напівфабрикатів, а також підвищити привабливість готелів і закладів ресторанного господарства шляхом організації міні-пекарень із частково спрощеним обладнанням [4].

При впровадженні технологій «відкладеного випікання» у готельно-ресторанних комплексах, можливо організувати виробництво крафтового хліба на обладнанні, яке є в ресторанах. Це, як правило, пароконвектомат і планетарний міксер, а не подова піч і тістомісильні машини. Зазвичай хліб у ресторанах, як і інша випічка, потрібен зранку, на сніданок. Тож необхідно процес організовувати таким чином, щоб використовувати для підготовки хлібобулочних напівфабрикатів, вечірній час. Наприклад, замішуємо тісто ввечері і ставимо його у холодильник. Зранку, враховуючи графік завантаження залу, о 6.00, тісто потрібно дефростувати, поділити на частини і залишити розстоюватися. Через те, що тісто холодне, але у ньому вже є достатньо мікрофлори, під час зміни температурного режиму воно стрімко зростає – приблизно за 40 хвилин. Тож якщо взяти орієнтовний час випікання хліба 25 хвилин, півгодини йому потрібно, щоб відійти після випікання, то можна сказати, що за 2 години вранці ми маємо свіжий хліб, який можна подавати зранку, або ж заморозити [5].

В залежності від концепції розвитку готельно-ресторанного закладу є можливість організувати, як виробництво так і роботу на хлібобулочних напівфабрикатах необхідного ступеню готовності. Дуже зручно, для забезпечення свіжовипеченими хлібобулочними виробами сніданок у готелі або мережі готелів, дефростувати пласт тіста великої або середньої маси та сформувати різної форми, з різними начинками різноманітний асортимент. До переваг роботи на хлібобулочних охолоджених або заморожених напівфабрикатах можна віднести відсутність залучення додаткових витрат на обладнання для організації процесу виробництва, на технологічний персонал та відсутність відходів. До недоліків відноситься вузький асортимент хлібобулочних виробів та додаткове обладнання для зберігання охолоджених або заморожених напівфабрикатів. Зокрема до недоліків відноситься пришвидшене усихання допечених напівфабрикатів, втрати виходу продукції, які не можуть не впливати на економічну складову організації роботи ресторану або готелю.

В останні роки актуальність використання хлібобулочних напівфабрикатів різного ступеню готовності набирає все більше обертів у зв'язку з економічним станом галузі та сучасними світовими тенденціями. Існують різні види технологій «відкладеного випікання», за якими виробляють хлібобулочні вироби в Україні та світі. До технологій «відкладеного випікання» відносяться декілька способів виробництва хлібобулочних напівфабрикатів, які доцільно впроваджувати саме у закладах готельно-ресторанної індустрії. Перший спосіб - готове до формування та вистоювання тісто, що дає можливість забезпечити свіжовипеченими виробами різної форми, з різними видами начинок, з різним оздобленням тощо. Такі хлібобулочні напівфабрикати доцільно використовувати у великих мережевих готелях при розробці меню сніданка, вечері. Час приготування готових виробів з таких напівфабрикатів становить 3-4 години. Другий спосіб – остаточно сформовані тістові заготовки, вистояні, готові до випікання. Час приготування готових виробів з таких напівфабрикатів становить 1-2 години і використовувати доцільно у будь-якому закладі готельно-ресторанного бізнесу. Але ці види технологій «відкладеного випікання» вимагають наявності у штаті закладу кваліфікованого персоналу. Третій спосіб і найбільш економічно ефективніший та зручний- часткове випікання чи хлібобулочні вироби високого ступеню готовності. Це (part bake-ready to bake) продукт, який пройшов фазу замішування, тісто приготування, тісто поділу та надання остаточної форми, вистійки і та піддається частковому випіканню (приблизно на 80–90% готовності) перед процесом заморожування. Тривалість доведення до повної готовності безпосередньо на місці реалізації становить у необхідний час реалізації та подачі – 10-12 хвилин. Технологія «part bake» передбачає часткове випікання тістових заготовок, які проходять майже повний виробничий цикл і пропікаються до 80–90% готовності, після чого піддаються шоківому заморожуванню до температури близько -18°C у середині виробу. Продукція, виготовлена за принципом так званого «відкладеного випікання», може зберігатися щонайменше шість місяців. Упродовж цього періоду заморожені напівфабрикати за потреби розморожують і доводять до повної готовності. Такий підхід дає змогу дозволяє завжди мати у ресторані або у ресторані готелю завжди свіжий гарячий хліб у будь-який час доби за необхідністю. Перевагою цього способу є відсутність необхідності кваліфікованого пекаря або технолога і встановлення додаткового обладнання для організації виробництва хлібобулочних виробів у гарячому цеху або окремому пекарному цеху [6,7,8].

Крім забезпечення відповідності світовим трендам, вподобанням споживачів готелів, ресторанів, у пріоритеті завжди є якість, безпека та система забезпечення якості при виробництві харчової продукції. Якісні показники хлібобулочної продукції визначаються вимогами нормативно-технічної документації, що регламентує виготовлення таких виробів. Установлені показники якості закріплені в чинних стандартах або технічних умовах і підлягають обов'язковому дотриманню.

Автоматизовані системи моніторингу дозволяють здійснювати постійний контроль відхилень. Поеднання стандартів, таких як HACCP, ISO 22000, BRC та IFS, забезпечують системний підхід до управління якістю, як на потужних підприємствах так і у крафтовому виробництві [10, 11].

Автоматизація процесів у готельно-ресторанного бізнесі зокрема спрямована на підвищення рівня ефективності управління діяльністю підприємства. Автоматизація процесів у готельно-ресторанному бізнесі,

зокрема, спрямована на підвищення результативності управління операційною діяльністю підприємства. Для реалізації поставленої мети важливо враховувати роль сучасних технологій автоматизації у розвитку науково-технічного прогресу у світі, а саме:

- основні закономірності процесів управління для всіх видів об'єктів;
- загальні властивості систем автоматичного регулювання технологічними об'єктами;
- основні складові рівні інформаційно-управляючої структури виробничого підприємства, а також функціональність стандартів та методологій, які використовуються при створенні інформаційних систем;
- стан і перспективи розвитку технологій автоматизації бізнес-процесів в ринкових умовах готельно-ресторанного бізнесу;
- сучасні апаратні та програмні засоби, які необхідні керівникам, ТОП- менеджерам підприємств готельно-ресторанного бізнесу;
- основи системи менеджменту якості, яка створена на базі системи забезпечення якості та безпеки сировини та готової продукції ресторану або ресторану готелю;
- основні та допоміжні бізнес-процеси в організації будь-якого підприємства;
- види організаційних структур та сучасні підходи і методології для аналізу й моделювання бізнес-процесів;
- інструментальні CASE-засоби та технології їх застосування для документування та опису бізнес-процесів;
- основні принципи формування систем управління бізнес-процесами;
- етапи розробки автоматизованих систем для управління бізнес-процесами та їх ключова сутність.

Для розробки пакету пропозицій по вдосконаленню, використанню процесного підходу в управлінні якістю та організації розробки системи забезпечення якості необхідно провести аналіз організаційної структури підприємства готельно-ресторанного бізнесу та дослідити бізнес-процеси. При формуванні пропозицій по вдосконаленню бізнес-процесів доцільно:

- описувати бізнес-процеси за допомогою інструментальних засобів з їх моделювання та аналізу;
- розробляти, впроваджувати та ефективно використовувати автоматизовану систему управління бізнес-процесами на підприємстві,
- працювати з різними технічними засобами та програмним забезпеченням, які використовуються для автоматизації процесів підприємств готельно-ресторанного бізнесу;
- організувати ефективну роботу комерційного підприємства з використанням сучасних технологій автоматизації; ввести основні відомості до налаштувань систем програмного забезпечення та здійснити заповнення основних довідників;
- створити документи прибуткові, видаткові та на передачу та ієрархію документації системи управління якістю.

Щорічна виставка - конференція «Інновації у хлібопекарській галузі 2025» не випадково приділяє увагу саме автоматизації та роботизації хлібної індустрії. Топ-темами для обговорення стали питання автоматизації та роботизації, роботизовані лінії, сенсорні конвеєри та автоматичні дозатори, які оптимізують процес випікання та швидко реагують на відхилення у якості, питання інтеграції реального часу моніторингу температури/вологості, які забезпечують стабільність текстури та смаку продукції. Штучний інтелект у печенні AI-системи прогнозують точний час випікання, необхідну кількість сировини й передбачають технічні збої. Пілоти із AI-рецептурами (наприклад, co-creation bread with AI) тестуються для створення нових смакових профілів. Зростає попит на хліб із клітковиною та пробіотиками, безглютенові та білкові варіанти. Печиво/снеки з біоактивними добавками (поліфеноли, ферменти), іноді виробляються через 3D-друк для збереження активності. Стійкість та безпека енергоефективних печей (наприклад Emithermic XE без прямих пальників) знижують викиди CO₂ та паливні витрати. Traceability через сенсори та IoT-системи забезпечують шлях від замішування тіста до полиць прозорий і контрольований. Пілотні рішення: smart-упаковки, що моніторять псування, інформують споживача про якість і автоматично продовжують термін придатності, що є однією з найактуальніших проблем виробників хлібобулочних виробів [11, 12].

Сучасне виробництво хлібобулочних виробів – це новітнє обладнання та повна автоматизація виробництва. Але крафтове виробництво у більшості це ручне оброблення, ручне формування та різноманітність рецептурних інгредієнтів. У зв'язку з розвитком автоматики з'явилась можливість автоматизувати короткі технологічні стадії, які є важливими для забезпечення якості. При автоматизації з'являється можливість уникнути перевитрат на використання кваліфікованого персоналу і забезпечуються виконання функцій управління виробництвом та якістю. Тому, автоматизацію ми розглядаємо, як якісно новий етап розвитку виробництва та можливість автоматизувати та впровадити систему управління якістю хлібобулочних виробів у готельно-ресторанному бізнесі.

Завдяки впровадженню повної або часткової автоматизації для підприємств галузі, які обрали шлях організації виробництва хлібобулочних виробів на відміну від використання хлібобулочних напівфабрикатів досягається збільшення продуктивності обладнання, зниження собівартості, скорочується кількість браку та підвищується безпека роботи, поліпшується санітарний стан підприємства тощо. Процес випікання або допікання хліба, у разі використання хлібобулочних напівфабрикатів – це складний комплекс різноманітних

технологічних процесів. Для отримання готових виробів високої якості процес виробництва повинен бути простежуваний та безперервний зокрема необхідно враховувати тривалість технологічних операцій. Тому для автоматизації процесів крафтового виробництва хлібобулочних виробів за технологіями «відкладеного випікання» у готельно-ресторанному бізнесі потрібно забезпечити наявність технічних засобів для безперервного збору даних із датчиків та регулювання режимів роботи хлібопекарського обладнання. Це дозволить підприємству оптимізувати виробничі процеси, гарантувати високі показники кінцевої продукції та досягти максимального економічного ефекту.

Автоматизація виробничих процесів є ключовим фактором підвищення ефективності та якості продукції. Використання сучасного обладнання, оснащеного системами управління на основі штучного інтелекту, дозволяє оптимізувати процеси замішування тіста, випікання та пакування виробів. Зокрема, впровадження алгоритмів машинного навчання та комп'ютерного зору сприяє виявленню дефектів на ранніх стадіях виробництва, що забезпечує високу якість кінцевого продукту. Автоматизація виробничих процесів – застосування сенсорних систем для моніторингу параметрів виробництва в режимі реального часу.

Важливими факторами є температура, вологість, контроль процесів бродіння та випікання. Недотримання технологічних умов може призвести до дефектів продукції [13].

Впровадження автоматизованих систем контролю. Застосування сучасних систем дозволяє здійснювати моніторинг виробництва в реальному часі, виявляти дефекти на ранніх стадіях та запобігати браку. Мета роботи – обґрунтувати шляхи автоматизації управління якістю для підвищення ефективності та продуктивності готелю або ресторану. Впровадження сучасних автоматизованих технологій «відкладеного випікання» у готельно-ресторанному господарстві забезпечать автоматизацію системи управління якістю та безпеки всього процесу виробництва. Необхідно провести детальний аналіз та технологічний аудит поточних процесів управління якістю хлібобулочних виробів, вироблених за технологіями «відкладеного випікання» на підприємствах готельно-ресторанного бізнесу. За результатами проведеного технологічного аудиту визначено ключові проблемні ділянки виробництва та встановлено напрями, що потребують автоматизації. Передбачувані результати – розробка програмного продукту, що включає функціональні модулі для автоматизації процесів контролю та управління якістю хлібобулочних виробів. Для оцінки ефективності системи управління якістю було запропоновано впровадження розробленого програмного продукту в існуючу АСУ будь-якого готелю, ресторану або готельно-ресторанного комплексу. Такий підхід дозволив би оцінити відповідність очікуваних результатів впровадження фактичним показникам. Важливість виконаної роботи полягає у тому, що використані методи та проведені дослідження сприяли формуванню ефективної системи контролю та управління якістю хлібобулочних виробів на підприємствах галузі [14,15].

Перспективи розвитку інноваційних підходів. Сектор промислового та крафтового хлібопечення переживає значні зміни, що підживлюються передовими технологіями. Від автоматизації та розумного виробництва на основі штучного інтелекту до ініціатив сталого розвитку та прозорості блокчейну – ці досягнення революціонізують галузь. Щоб залишатися конкурентоспроможними, пекарні, готелі, ресторани повинні впроваджувати цифрову трансформацію та сталий розвиток, одночасно задовольняючи мінливі потреби споживачів. Наступне десятиліття стане свідком подальших інновацій, що зробить промислове та крафтове виробництво хлібобулочних виробів більш ефективним, сталим та адаптованим до ринкових тенденцій.

Подальше впровадження цифрових технологій, штучного інтелекту та біотехнологій дозволить підвищити ефективність виробництва та конкурентоспроможність харчової продукції. Інноваційні підходи до управління готелем взаємопов'язано з управлінням якістю виробництва хлібобулочних крафтових виробів власного виробництва і сприяють підвищенню безпеки, покращенню характеристик продукції та оптимізації виробничих процесів. Запропоновані методи можуть бути використані для вдосконалення контролю якості на різних етапах технологічного процесу.

Останні дослідження у сфері управління якістю харчових продуктів підтверджують важливість застосування інноваційних підходів. Зокрема, розглядається впровадження автоматизованих систем контролю на основі сенсорних технологій, що дозволяють зменшити вплив людського фактора. У дослідженнях детально проаналізовано застосування штучного інтелекту для оптимізації технологічних процесів та раннього виявлення дефектів продукції. Крім того, вивчено перспективи використання нанотехнологій та ферментних препаратів для підвищення стабільності та безпечності хлібобулочних виробів.

Дослідження показали, що сенсорні системи можуть забезпечувати безперервний моніторинг фізико-хімічних параметрів продукції в режимі реального часу, що значно підвищує ефективність контролю якості. Готовність деяких напівфабрикатів визначається саме за фізико-хімічними показниками таким чином регулюють подальший технологічний процес. Такі дослідження підкреслюють важливість впровадження інноваційних підходів у сфері автоматизації та управління якістю харчових продуктів зокрема хлібобулочних виробів для забезпечення безпеки та задоволення зростаючих вимог споживачів.

Метою даної статті є аналіз сучасних інноваційних підходів до управління якістю крафтових хлібобулочних виробів за технологіями «відкладеного випікання», забезпечення високого рівня якості готових виробів та забезпечення свіжовипеченими хлібобулочними виробами готельно - ресторанного бізнесу, пошуку можливості впровадження інноваційних методів забезпечення систем управління якістю, недоліків та шляхів їх усунення.

Основними завданнями є: аналіз традиційних та сучасних методів контролю якості у поєднанні зі світовими вимогами, оцінка впровадження автоматизованих систем контролю; формулювання рекомендацій щодо удосконалення процесів управління якістю та безпекою готової продукції у готельно-ресторанному бізнесі при виробництві крафтових хлібобулочних виробів за технологіями «відкладеного випікання» [16, 17].

Висновки

Забезпечення високої якості хлібобулочних виробів крафтового виробництва є пріоритетним завданням сучасної готельно-ресторанної індустрії. Інноваційні технології, автоматизація та впровадження цифрових методів контролю сприяють вдосконаленню виробничих процесів та підвищенню безпеки продукції. Використання новітніх методів управління якістю дозволяє задовольняти зростаючі вимоги споживачів та забезпечувати стійкий розвиток готельно-ресторанного бізнесу, економіки країни, туризму.

Управління якістю та безпечність харчової продукції зокрема хлібобулочних виробів у виробничих цехах готелю, ресторану є комплексним процесом, що охоплює контроль сировини, оптимізацію виробничих параметрів та впровадження сучасних методів моніторингу.

Перспективним способом підвищення якості та безпеки, урізноманітнення асортименту хлібобулочних виробів, забезпечення сучасними трендами готельно-ресторанного бізнесу крафтового виробництва є використання хлібобулочних напівфабрикатів, вироблених за технологіями «відкладеного випікання», раціональний добір та поєднання рецептурних складових природного походження, які характеризуються необхідними технологічними й фізіологічними властивостями (зокрема, різні типи борошна, пектинові речовини, модифіковані крохмалі, продукти переробки плодів шипшини, винограду тощо). Ключовою вимогою технології є збереження високої якості готового виробу: мінімальні втрати маси під час зберігання та максимальне повне відновлення структури й поживних властивостей після розморожування й остаточного випікання, що й забезпечать автоматизовані системи.

References

1. Solonytska, I., Makarova, O., & Ganchev, S. (2024). *Innovative approaches to quality management of bakery, confectionery, pasta products and food concentrates*. Scientific Works, 88(1), 162–166. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.3026> <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/swonaft/article/view/3026>
2. Tkachenko, O. B., Kameneva, N. V., Titlova, O. O., Verkhivker, Y. G., Solonytska, I. V., Soletska, A. D., & Manoli, T. A. (2020). *Fundamentals of sensory analysis of food products* [Textbook]. Odesa National Academy of Food Technologies. Helvetica. ISBN 978-966-992136
3. Dobrovolskyi, V. V., Proskurnya, K. V., Solonytska, I. V., & Lebedenko, T. E. (2020). *Flour quality, supply and demand, problems and challenges*. Mir Produktov, 2, 12–15. <https://journals.ua/prof/mir-produktov/30581-02-20.html>
4. Drobot, V. I., & Mykhonik, L. A. (2014). *Low-temperature and extrusion technologies. Part 1: Low-temperature technologies* [Lecture notes]. Kyiv: NUFT.
5. Kulp, K., & Lorenz, K. (2005). *Manufacture of frozen dough*. Springer.
6. Neyreneuf, O., & Van der Plaats, J. B. (1991). *Preparation of frozen French bread dough with improved stability*. Cereal Chemistry, 68(1), 60–66.
7. Solonytska, I., Popel, O., Mardar, M., & Ganchev, S. (2024). *Evolution of quality control systems: From Taylor to modern standards*. Scientific Works, 88(2), 132–137. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i2.3055>
8. Vigurzhynska, S. Y., Gorbachenko, S. A., Dyshkantyuk, O. V., Karpynska, G. V., Kolesnyk, V. I., Konstantinova, T. V., Makarynska, A. V., Murzanovskyi, H. M., Nemchenko, G. V., Savchenko, I. V., Svistun, T. V., Solonytska, I. V., Sots, S. M., & Turlenko, N. V. (2019). *Innovation and investment development of business structures in Ukraine* [Collective monograph]. Edited by N. Y. Basyurkina. Kyiv: FOP Gulyaeva V. M. ISBN 978-617-7503-85-8.
9. Iorgachova, K. G., & Lebedenko, T. Ye. (2015). *Bakery products for health purposes with the use of phytosupplements* [Monograph]. Kyiv: K-Press.
10. *A major shift in baking technology: The industrial bakery sector*. (n.d.). Magazine BBM. <https://magazinebbm.com/blog/a-major-shift-in-baking-technology-the-industrial-bakery-sector-3740>
11. *Automation of food industry*. (n.d.). In Agro.
12. *HACCP system: What you need to know?* (n.d.). SkyService POS.
13. *Automation of quality control and visual inspection*. (n.d.). Machine Vision Ukraine.
14. *Quality and safety management at bakeries*. (n.d.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/357947470_Quality_and_safety_management_at_bakeries
15. *New strategies to improve the stability and quality of bakery products*. (n.d.). Italian Food Tech. <https://www.italianfoodtech.com/new-strategies-to-improve-the-stability-and-quality-of-bakery-products>
16. *The University of Alicante develops a biosensor capable of indicating if fresh food is suitable for consumption*. (2024, September 30). Cadena SER. <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2024/09/30/la-universidad-de-alicante-desarrolla-un-biosensor-capaz-de-indicar-si-un-alimento-fresco-esta-en-buen-estado-para-su-consumo-radio-alicante/>

17. *A major shift in baking technology: The industrial bakery sector.* (n.d.). Magazine BBM. <https://magazinebbm.com/blog/a-major-shift-in-baking-technology-the-industrial-bakery-sector>

QUALITY MANAGEMENT AND AUTOMATION OF ARTISAN BAKERY PRODUCTION PROCESSES USING "DELAYED BAKING" TECHNOLOGIES IN THE HOTEL AND RESTAURANT BUSINESS

Solonytska I.V., associate professor, Trishyn F.A., associate professor, Zhigunov D.O. professor,
Lebedenko T.E. professor
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. *The purpose of the article is to substantiate new modern approaches to quality management of bakery semi-finished products and the automation of artisanal production processes in the hotel and restaurant business. The authors draw attention to modern technologies, namely the purpose of the work is to develop a "delayed baking" technology aimed at improving the quality indicators of finished products, primarily structural and mechanical properties. The main purpose is to provide the population with fresh bakery products of "best quality" quality by using innovative technologies for quality management and automation of technological processes.*

The role of automation of artisanal production of bakery products using "delayed baking" technologies in the hotel and restaurant business, production processes for optimizing production are highlighted. The latest technologies that contribute to the stable quality of original, artisanal varieties of bread and the production of frozen bakery semi-finished products using "delayed baking" technologies in the hotel and restaurant business are considered as well.

The approaches proposed in the article can be applied to improve the quality control systems for the supply of artisanal bakery products to the hotel and restaurant business, which will ensure high product quality and compliance with modern trends and HACCP.

Keywords: original craft bakery products, quality management of semi-finished products, "delayed baking" technologies, automation of business processes in hotels and restaurants, craft production, frozen, chilled bakery semi-finished products.

Список використаної літератури

- Solonytska, I., Makarova, O., & Ganchev, S. (2024). Innovative approaches to quality management of bakery, confectionery, pasta products and food concentrates. *Scientific Works*, 88(1), 162 -166. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.3026> <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/swonaft/article/view/3026>
- O.B. Tkachenko, N. V. Kameneva, O. O. Titlova, Y. G. Verkhivker, I. V. Solonytska, A. D. Soletska, T.A. Manoli. (2020). Fundamentals of sensory analysis of food products. [Text]: academic. manual/O; Odessa national Acad food Technologies.—Odesa:Helvetica,2020.—304p.:table,fig.ISBN978-966-992136 <https://elc.library.ontu.edu.ua/libraryw/DocumentView?docid=OdONAHT.1439050&field=0>
- Dobrovolskyi V.V., Proskurnya K.V., Solonytska I.V., Lebedenko T.E.(2020) Flour quality, supply and demand, problems and challenges.//Dobrovolskyi V.V., Proskurnya K.V., Solonytska I .V., Lebedenko T.E. "Mir produktov" information and analytical publication for food market operators, Kyiv, 2/2020, No. 2-S.12-15 <https://journals.ua/prof/mir-produktov/30581-02-20.html>
- Дробот, В. І. Низькотемпературні та екструзійні технології. Ч. 1 «Низькотемпературні технології» [Електронний ресурс] : конспект лекцій для студентів напряму підготовки .051701 «Харчові технології та інженерія» денної та заочної форм навчання / В. І. Дробот, Л. А. Михонік. – К. : НУХТ, 2014.
- Kulp, K., Lorenz, K. (2005). Manufacture of frozen dough.p.288
- Neyreneuf, O., and Van der Plaat, J.B. Preparation of frozen French bread dough with improved stability. *Cereal Chem.* 68:60–66.,1991.
- Solonytska, I., Popel, O., Mardar, M. Ganchev, S. (2024). Evolution of quality control systems: from taylor to modern standards. *Scientific Works*, 88(2), 132-137. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i2.3055>
- Vigurzhynska S.Yu., Gorbachenko S.A., Dyshkantuyuk O.V., Karpynska G.V., Kolesnyk V.I., Konstantinova T.V., Makarynska A.V., Murzanovskyi H.M., Nemchenko G.V., Savchenko I.V., Svistun T.V., Solonytska I.V., Sots S.M., Turlenko N.V. (2019). Innovation and investment development of business structures in Ukraine: Collective monograph;/ edited by N.Y. Basyurkina. Odessa national Acad. food. technologies. — Kyiv: FOP Gulyaeva V.M., 2019.—167 p.:table,fig.—Bibliogr.: p.150-163.-ISBN 978-617-7503-85-8. <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/11843>
- Iorgachova K.G., Lebedenko T.Ye. Bakery Products for Health Purposes with the Use of Phytosupplements: Monograph. – Kyiv: K-Press, 2015. – 464 p.

10. https://magazinebbm.com/blog/a-major-shift-in-baking-technology-the-industrial-bakery-sector-3740utm_source=chatgpt.com
11. Automation of Food Industry. // InAgro.
12. HACCP System: What You Need to Know? // SkyService POS.
13. Automation of Quality Control and Visual Inspection. // Machine Vision Ukraine.
14. Quality and safety management at bakeries // ResearchGate. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/357947470_Quality_and_safety_management_at_bakeries.
15. New strategies to improve the stability and quality of bakery products // Italian Food Tech. – [Електронний ресурс]. <https://www.italianfoodtech.com/new-strategies-to-improve-the-stability-and-quality-of-bakery-products>
16. <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2024/09/30/la-universidad-de-alicante-desarrolla-un-biosensor-capaz-de-indicar-si-un-alimento-fresco-esta-en-buen-estado-para-su-consumo-radio-alicante/>
17. "A Major shift in baking technology: The industrial bakery sector" / <https://magazinebbm.com/blog/a-major-shift-in-baking-technology-the-industrial-bakery-sector>

Отримано в редакцію 22.07.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 22.07.2025
Approved 02.09.2025

МОДИФІКОВАНИЙ ТОПІНАМБУР ЯК КОМПОНЕНТ ОЗДОРОВЧИХ ПРОДУКТІВ

Антіпіна О.О., к.т.н., доцент, Озоліна С.О., к.х.н., доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Останнім часом джерела інформації все частіше звертаються до питання обмеження в складі їжі жирів та засвоюваної вуглеводної складової у зв'язку із збільшенням поширення населення з надлишковою вагою. Проте споживачі звикли до продуктів із солодким смаком, що є популярними серед різних верств населення. Шляхом до вирішення цієї проблеми є випуск харчових продуктів з додаванням інуліну – полісахариду, який може служити жирозамінником, структуроутворювачем і до того ж має пребіотичні властивості. Продукти гідролізу інуліну – фруктоолігосахариди і фруктоза – солодкі за смаком, мають очевидні переваги в порівнянні з сахарозою з точки зору нутриціології. Проте процес отримання інуліну, фруктоолігосахаридів і фруктози з цикорію або топінамбуру з подальшим додаванням їх до складу харчових продуктів суттєво впливає на рівень цін останніх.

Метою роботи було дослідження процесу обмеженого гідролізу інуліну, що міститься в складі топінамбуру, виключаючи процес його попереднього вилучення з сировини, з подальшим додаванням отриманого модифікованого топінамбуру до складу сиркових десертів.

Гідроліз інуліну проводили із застосуванням харчових кислот як каталізаторів: лимонної, винної, яблучної, які використовуються при виробництві харчових продуктів для підкислення харчових систем. Умови процесу були оптимізованими: значення рН середовища дорівнювало 3,0 і 3,5, температура 70 °C та 80 °C. Перебіг гідролізу контролювали, визначаючи вміст редуруючих речовин в рідкій фазі. Проте за допомогою цього показника важко зробити висновок про склад гідролізату інуліну. Окремою вимогою було збереження пребіотичних властивостей обробленого топінамбуру, які обумовлені присутністю інуліну і фруктоолігосахаридів. Дослідження молекулярно-масового розподілу продуктів гідролізу інуліну дозволяє обґрунтувати напрямки подальшого використання продукту. У випадку спрямування його переважно як підсолоджувача, доцільно використовувати зразок, де вміст компонентів з молярною масою до 2 кДа є найбільшим. Найкращим з цього погляду варіантом є використання продукту, отриманого при обробці топінамбуру лимонною кислотою протягом 45 хвилин при значенні рН середовища, що дорівнює 3. У випадку, коли пріоритетом є введення до складу харчової системи додаткового компонента, якому притаманні властивості жирозамінника та/або структуроутворювача, доцільним має бути запровадження умов гідролізу, коли масова частка вуглеводів з більшою молекулярною масою є більш значною. Зокрема, це обробка сировини при значенні рН середовища що дорівнює 3,5 протягом 15 хвилин.

Для підтвердження можливості створення продуктів оздоровчого спрямування з модифікованим топінамбуром обрали сиркові десерти, інгредієнти яких були частково замінені на пюре з оброблених бульб. Сенсорна оцінка сиркових десертів з додаванням 4 – 7 % модифікованого топінамбуру засвідчила високу якість отриманих продуктів. Додавання модифікованого топінамбуру до сиркового крему значно підвищує біологічну цінність продукту за рахунок внесення розчинних та нерозчинних харчових волокон, вітамінів, мінеральних речовин рослинної сировини та зниження загальної калорійності.

Ключові слова: топінамбур, інулін, гідроліз, оздоровчі продукти, функціональні властивості

Постановка проблеми. Безперечним пріоритетом кожної цивілізованої (прогресивної) держави є стан здоров'я населення. Останні десятиліття спостерігається погіршення цього показника, чому є декілька об'єктивних чинників, серед яких зміни кліматичних умов, екології навколишнього середовища, зміна способу і підвищення темпу життя, що супроводжується зростанням фізичного і психологічного навантаження тощо. Загально поширеним стає вживанням напівфабрикатів і готових продуктів, створених за сучасними технологіями, які широко використовують прийоми, що не відповідають поняттям про «здорове харчування», натомість, щоб їх продукція користувалась попитом, виробники використовують широкий спектр харчових добавок, які не містять біоактивних речовин і, відповідно, не підвищують біологічну цінність їжі, проте лише роблять її більш привабливою для споживача.

Джерела інформації останнім часом все частіше звертаються до питання обмеження в складі їжі жирів та вуглеводної складової у зв'язку із збільшенням поширення населення з надлишковою вагою [1, 2]. Проте споживачі звикли до продуктів із солодким смаком, що є популярними серед різних верств населення.

На сьогодні перелік харчових добавок, які за своїм призначенням є підсолоджувачами, доволі довгий. Вони сприяють суттєвому зниженню калорійності продуктів і можуть використовуватися хворими на діабет, але деякі з них залишають характерне відчуття післясмаку, а інші потребують додаткових досліджень, хоча їх використовують близько 40 країн світу. З комплексу цих причин, а також загальної упередженості до

вживання інгредієнтів синтетичного, неприродного походження, певна частина населення скептично відноситься до продуктів з їх включенням. Природний харчовий сировини рослинного походження, що характерна для нашого регіону, і яку ми традиційно вживаємо в складі їжі, притаманні моносахариди: глюкоза і фруктоза, а також дисахарид сахароза, джерелом яких є фрукти, ягоди та овочі. Іноді в їх складі присутні багатоміспирити: ксилітол і сорбітол. При заміщенні сахарози в складі солодощів сорбітолом або ксилітолом продукти стають доступними для діабетиків, але суттєвого зниження калорійності не відбувається, оскільки спирти перетравлюються в шлунково-кишковому тракті, а їх солодкість доволі близька до такої сахарози. Заміщення сахарози фруктозою, солодкість якої перевершує цей показник для сахарози більше як в півтора рази, дозволяє знизити її кількість в складі продукту, і таким чином певною мірою знизити калорійність; при цьому значно знижується потреба в інсуліні. Проте добове споживання фруктози також має межу.

Більш привабливим є використання інуліну, який не перетравлюється ферментними системами шлунку і тонкого кишечника, а розщеплюється лише в товстій кишці, де служить поживним середовищем для біфідобактерій і лактобактерій, тобто є пребіотиком [3, 4]. Тому виробництво продуктів «здорового харчування», збагачених інуліном, які придатні для повсякденного вживання та доступні для широких верств населення, є актуальним.

Аналіз літературних джерел. Інูลіни – це група природних полісахаридів, які синтезуються багатьма видами рослин. Вони відомі як фруктани. Інулін використовується рослинами переважно як засіб зберігання енергії і зазвичай зустрічається в коренях або кореневищах. Він є традиційним компонентом раціону людини. Зокрема інулін міститься в складі цибулі, цибулі-порей, бананів, часнику, пшениці, жита, ячменю. Він присутній також в коренях цикорію, топінамбура, жоржини, кульбаби тощо.

Природний інулін являє собою неоднорідну суміш фруктозних полімерів. Він складається з ланцюгів з термінуємими глюкопіранозними залишками і повторюваними фруктофуранозними, які пов'язані β -(2 $\rightarrow$ 1) зв'язками. Ступінь полімеризації стандартного інуліну знаходиться в межах 60. Переважна більшість авторів розглядають фракції зі ступенем полімеризації 10 і нижче як фруктоолігосахариди, і називають інуліном лише більш довголанцюгові молекули [5, 6].

У вищих рослинах описано п'ять типів фруктанів з різною структурою: фруктани інулінового типу (1-кестоза), фруктани леванового типу (6-кестоза), фруктани інулінової неосерії (неокестоза), левани змішаного типу та фруктани леванової неосерії [5-7]. Структури фруктанів є по суті лінійними; однак, в інуліні може відбуватися низький ступінь розгалуження через зв'язки β -(2 $\rightarrow$ 6). У деяких випадках кінцева молекула глюкози може бути відсутня, тому спостерігається відновна поведінка.

Інулін є унікальним, оскільки його каркас не містить цукрового кільця і по суті являє собою поліетиле-ноксид [8]. Це призводить до більшої свободи руху та, отже, до більшої гнучкості молекули. Крім того, інулін побудований переважно з фуранозних груп, які є більш гнучкими, ніж піранозні кільця. За думкою дослідників [9] це вказує на те, що в розчині спіральна конформація можлива для олігофруктози зі ступенем полімеризації 5. Однак така конформація була б неможливою для інулінів з вищою молекулярною масою через стеричні перешкоди.

Фізико-хімічні властивості інуліну обумовлені будовою і розміром його молекул [8, 9]. Енергія активації процесу гідролізу сахарози становила 107 кДж/моль, для коротколанцюгових молекул інуліну з ступенем полімеризації до 18 була близька до такої і становила 108,5 кДж/моль. Для інуліну зі ступенем полімеризації 30 енергія активації була меншою і дорівнювала 80,5 кДж/моль. На думку авторів це обумовлено різною конформацією молекул у розчині.

Щодо здатності інуліну до гелеутворення, то цей процес базується на взаємодіях, що відбуваються між розчиненими ланцюгами інуліну. Однак гелі інуліну також можуть містити нерозчинені мікрокристали. Інูลіни з високою молекулярною масою є кращими гелеутворювачами, ніж їхні аналоги з нижчою молекулярною масою [9].

Через наявність зв'язків β -(2 $\rightarrow$ 1) в молекулі інуліну, він не перетравлюється ферментами в аліментарній системі людини, що обумовлює такі його функціональні властивості: знижена калорійність, позитивний вплив на організм людини як харчового волокна, пребіотичні ефекти [4]. Олігофруктоза має 35% солодкості сахарози, а її підсолоджуючий профіль схожий на цукор. Інулін лише злегка солодкуватий на смак. Без кольору і запаху, він мало впливає на сенсорні характеристики харчових продуктів. При ретельному перемішуванні з рідиною інулін утворює гель, який має білу кремову структуру, що схожа на жир [10, 11]. Як пребіотик полісахарид стимулює ріст існуючих штамів корисних бактерій у товстій кишці, що покращує всмоктування важливих мінеральних компонентів, таких як кальцій та магній, а також синтез вітамінів групи В. Підтримуючи життєдіяльність біфідофлори, він перешкоджає розмноженню сальмонел і колібактерій. Включення інуліну до раціону знижувало вміст ліпідів у крові та печінці дослідних тварин [4]. Інулін виявляє імуномодулювальну, протипухлинну та протизапальну активність. Інуліновмісні продукти позитивно впливають на регуляцію обміну речовин при цукровому діабеті, атеросклерозі, ожирінні [12-15].

Виходячи із зазначених функціональних властивостей, інулін широко застосовується в харчовій промисловості. Здебільшого його використовують як замітник цукру та жиру, а також як пребіотик в складі таких молочних продуктів як сир, молоко, йогурт, морозиво, його додають до складу хліба, печива, м'ясних продуктів, напоїв [9, 16-20].

Інулін можна повністю гідролізувати до фруктози, яка широко використовується як підсолоджувач замість сахарози в оздоровчих харчових продуктах та напоях. Суттєвою перевагою фруктози є різниця в глікемічному індексі: для сахарози він дорівнює 65, тоді як для фруктози лише 23. До того ж, солодкість фруктози на 100 – 150 % вища, ніж у сахарози. Це робить фруктозу найсприятливішим підсолоджувачем для пацієнтів з діабетом або ожирінням.

В роботі [19] розглянуто процес гідролізу інуліну цикорію. Визначено умови, що дозволяють отримати сироп із вмістом 75 – 77 % фруктози і 13 – 15 % олігофруктози, який пропонується для додавання до харчових продуктів і напоїв. За результатами досліджень [20] встановлено, що інулін і олігофруктоза, що додані до складу соку, тривалий час зберігаються, не піддаючись гідролізу.

Промислове виробництво інуліну тривалий час майже виключно використовувало коріння цикорію як сировину і було зосереджене в Нідерландах та Бельгії [21]. На сьогодні цикорій та топінамбур є двома найпоширенішими джерелами для виробництва інуліну в промислових масштабах. Топінамбур як джерело інуліну в порівнянні з цикорієм має конкурентні переваги, оскільки він є економічно вигідною культурою: це низькі витрати на вирощування, висока врожайність, широка адаптація до кліматичних і ґрунтових умов, висока стійкість до шкідників і хвороб рослин.

Типовий процес виробництва інуліну включає такі основні етапи. Подрібнену сировину обробляють гарячою водою, при цьому до екстракту переходять вуглеводи, а також деякі супутні речовини. Екстракт очищають за допомогою відбілювання, адсорбції на активованому вугіллі або іонного обміну. При цьому зазвичай розчин інуліну відокремлюють від низькомолекулярних вуглеводів, що присутні в сировині. Очищені розчини концентрують і сушать, отримуючи чисті порошки інуліну і фруктоолігосахаридів. Для підвищення ефективності виробництва інуліну проводились експерименти щодо оптимізації умов його екстракції, використання прямої та непрямої ультразвукової екстракції, мікрохвильової екстракції.

Незважаючи на всі зусилля з вдосконалення процесів виділення інуліну з сировини, отримати якісний продукт доволі важко, а введення його до складу харчових продуктів суттєво впливає на їх ціну [9]. Застосування інуліну в харчовій промисловості та виробництві напоїв зростає як у країнах, де виробляється цей інгредієнт, так і в тих країнах, які повинні його імпортувати, що ще більшою мірою впливає на збільшення вартості продуктів. Це підштовхнуло дослідників до розроблення технологій отримання харчових продуктів з додаванням власне топінамбуру. Тим більше, що таким чином зберігається потенціал сировини, яка є джерелом багатьох цінних для організму людини інгредієнтів [17, 22].

В огляді [17] наведено всебічну характеристику хімічного складу топінамбуру. Зокрема зазначено, що сухі речовини складають 24,6 %, серед яких 21, 3 % – це вуглеводи, масова частка полісахариду інуліну сягає 72,2 % від їх загальної кількості. Визначено вміст та надано характеристику білкових, мінеральних речовин, вітамінів, фенольних сполук тощо. Підкреслено високий вміст вітамінів В₁ і В₂, калію, заліза, присутність селену, який сполучений з органічними молекулами, що сприяє його засвоєнню.

Використання топінамбуру в складі харчових продуктів зазвичай здійснюється у вигляді порошку або пюре. Зокрема, в низці робіт вітчизняних авторів розглянуто можливості використання топінамбуру в технології борошняних виробів [23, 24].

Так, показано [23], що часткова заміна пшеничного борошна на пюре з топінамбуру при виробництві здобного булочного виробу приводить не тільки до зменшення кількості сирової клейковини, але й до зміни її якості, а також до скорочення тривалості бродіння тіста. Автори рекомендують виробництво здобного булочного виробу підвищеної біологічної цінності з додаванням пюре топінамбуру.

Виконаний комплекс досліджень [24] дозволяє вважати, що використання порошку топінамбуру в технології хлібобулочних виробів в якості харчової добавки доцільне і ефективне. Він позитивно впливає на хід технологічного процесу, інтенсифікуючи бродіння, покращує якість хлібобулочних виробів, надає їм функціональної направленості, а також подовжує терміни збереження свіжості.

Доведено можливість використовувати напівфабрикату з топінамбура і кизику в технології самбуків, що дозволило зменшити використання традиційних структуроутворювачів і одночасно збагатити готовий продукт біоактивними речовинами доданої рослинної сировини [25].

Окремим напрямком є розробка ферментованих продуктів на основі топінамбуру [26, 27]. Розроблено технологію комплексної переробки бульб топінамбура, що дозволяє розширити асортимент продуктів оздоровчого спрямування на його основі. Запропоновано переробляти бульби на цукати, ферментований сік та овочеву пасту. Всі ці продукти за результатами дегустаційних проб мали високі органолептичні якості.

Таким чином, вклучення топінамбуру до складу харчових продуктів має очевидні переваги: продукт збагачується комплексом різноманітних, корисних для організму біоактивних речовин, що містяться в його складі. Це розповсюджена регіональна сировина. Між тим, слід зауважити наступне. Переважаючою кількісно і цінною з точки зору нутриціології складовою є інулін і супутні фруктоолігосахариди. Проте під час бродіння саме ці складові зазнають перетворень. Окрім того, наприклад, випікання хлібобулочних виробів передбачає застосування високих температур, що створює умови для взаємодії низькомолекулярних вуглеводів з білковою складовою сировини. І за таких умов збереження всього комплексу біоактивних речовин сировини є доволі проблематичним.

Метою даного дослідження було розроблення умов обмеженого гідролізу інуліну, що міститься в топінамбурі, без його попереднього вилучення з сировини, з подальшим додаванням отриманого модифікованого продукту до складу сиркових десертів як цукрозамінника, жирозамінника, структуроутворювача, який до того ж має пребіотичні властивості.

Методи дослідження. При аналізі хімічного складу топінамбуру застосовували класичні методи біохімічного дослідження: масову частку Нітрогену визначали за методом К'ельдаля, жиру – методом Сокслета, мінеральних речовин – прожарюванням, вміст фруктози і інуліну – реакцією з резорцином, пектинових речовин – кальцій-пектатним методом, клітковини – із застосування суміші оцтової і нітратної кислот, редукуючих речовин – за Бертрамом, загальних вуглеводів – антроновим методом, молекулярно-масовий розподіл вуглеводів – хроматографією на колонках із сефадексом G-15 і G-25.

Результати дослідження.

Для досліджень використовували топінамбур врожаю 2024 р., вирощений в Одеському регіоні. Хімічний склад бульб свіжого топінамбуру представлений в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад бульб топінамбуру

Показник	Вміст, %
Волога,	75,3
Моносахариди + олігосахариди	3,9
Інулін	15,4
Пектин	1,0
Клітковина	1,2
Білок	2,2
Жир	0,1
Мінеральні сполуки	0,7

Отримані результати узгоджуються з даними інших дослідників [17, 22]. Провідною складовою сировини є вуглеводи. Серед них переважає інулін, доволі високий вміст моносахаридів і олігосахаридів – носіїв солодкого смаку. Сировина практично не містить жиру і характеризується доволі низьким вмістом білка.

Для реалізації мети роботи, спочатку було досліджено вплив деяких факторів на процес гідролізу інуліну безпосередньо, в складі сировини, виключаючи стадію його попереднього вилучення.

Відомо, що інулін виявляє властивості жирозамінника, завдяки стійкості до дії травних ферментів суттєво знижує калорійність продуктів, натомість він практично немає солодкого смаку. З іншого боку, фруктоолігосахаридам притаманний солодкий смак, хоча вони мають доволі низький коефіцієнт солодкості, який зазвичай коливається близько 30-35 %. Профіль їх солодкості близький до сахарози [19, 20]. Оскільки олігофруктоза має низький коефіцієнт солодкості, її використовують у комбінаціях з інтенсивними підсолоджувачами або фруктозою. При цьому вона маскує неприємний післясмак інтенсивних підсолоджувачів і різку солодкість фруктози, покращує смакові відчуття і надає харчовим продуктам м'який, однорідний смак [20].

В дослідях встановлено [28-30], що для здорової людини добові норми споживання становлять: для інуліну – 10 г, фруктоолігосахаридів – 5 г відповідно. Найбільш прийнятним з точки зору накопичення продуктів ферментації – коротколанцюгових жирних кислот (молочної, оцтової, масляної) – був зразок, що містив як інулін, так і фруктоолігосахариди.

Таким чином, для отримання продукту, який би був жирозамінником, цукрозамінником і відповідав рекомендаціям медико-біологічних досліджень щодо пребіотичних властивостей, необхідно провести обмежений гідроліз інуліну.

Відомо, що розчини хлоридної кислоти є ефективним каталізатором процесу гідролізу полісахаридів. Проте в разі її використання виникає необхідність в подальшому позбутися кислоти як інгредієнта харчової системи, окрім того, її висока агресивність і летючість зумовлює додаткові проблеми. Між тим, оскільки інулін побудований із залишків D-фруктофуранози, він піддається гідролізу в м'якіших – в порівнянні з переважною більшістю рослинних полісахаридів – умовах. Тобто можливо використання як каталізаторів процесу розщеплення інуліну органічних кислот, які значно поступаються за значеннями показника сталої кислотності pK_a в порівнянні з неорганічними, навіть ортофосфатною кислотою.

Натомість, обираючи органічну кислоту як каталізатор реакції розщеплення інуліну, треба враховувати, що харчові кислоти беруть участь в формуванні смаку продукту. Це треба заздалегідь брати до уваги при прогнозуванні подальшого використання отриманої харчової системи. Зокрема, таким чином не розглядали можливості гідролізу інуліну з використанням оцтової кислоти у зв'язку з її летючістю при підвищенні температури, а також створення характерного післясмакового відчуття.

До того ж харчові гідроксиациди – лимонна, яблучна, винна є сильнішими за оцтову – константи їх дисоціації становлять відповідно: $pK_{a1}=7,1 \cdot 10^{-4}$, $pK_{a1}=3,9 \cdot 10^{-4}$, $pK_{a1}=1,04 \cdot 10^{-3}$ в порівнянні з $pK_a=1,76 \cdot 10^{-5}$ для оцтової кислоти.

Процес гідролізу подрібненої сировини проводили при температурах 70 °C і 80 °C, при значеннях pH середовища 3,0 і 3,5, враховуючи результати проведених раніше досліджень [12, 19, 20]. Хід процесу контролювали за накопиченням редукуючих речовин в рідкій фазі (табл. 2).

Згідно отриманих результатів, загальна динаміка процесу мало відрізнялась при використанні різних кислот. Концентрація редукуючих речовин закономірно зростала швидше при підвищенні температури реакційного середовища. Процес повного розщеплення полімерів і олігомерів на мономери тривав близько 2

годин при обробці сировини при температурі 70 °С і рН = 3,5, і скорочувався до 90 хвилин при підвищенні температури і зниженні і зниженні рН середовища. Отримані результати дозволили оцінити граничний термін термообробки.

Але в таких випадках в складі гідролізату домінує фруктоза і відсутні фруктан і фруктоолігомери, яким притаманні пребіотичні властивості.

Таблиця 2

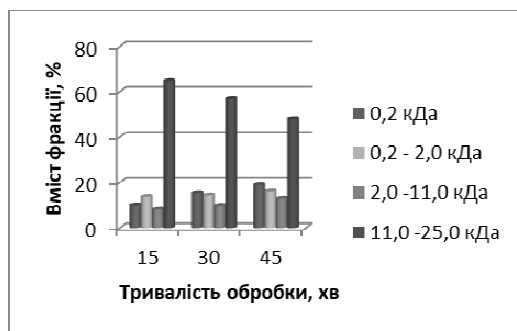
Динаміка накопичення редукуючих речовин при кислотній обробці топінамбуру, %

Кислота	Тривалість обробки, хв.							
	15	30	45	60	75	90	105	120
рН 3,5, 80 °С								
Лимонна	9,0	15,0	34,1	52,4	69,8	82,9	92,1	94,4
Яблучна	7,5	10,7	33,1	55,0	72,2	88,3	93,2	96,0
Винна	8,2	14,1	30,5	53,2	73,3	90,1	93,1	94,6
рН 3,0, 80 °С								
Лимонна	10,3	22,7	45,0	65,7	85,3	97,1	95,3	94,2
Яблучна	8,9	21,0	44,2	66,3	80,2	96,2	92,7	92,0
Винна	8,7	20,1	44,7	64,1	85,0	97,0	95,0	94,1
рН 3,5, 70 °С								
Лимонна	5,5	11,0	22,7	37,3	51,9	69,6	88,9	97,1
Яблучна	5,7	12,1	24,3	35,4	53,2	72,3	89,4	95,3
Винна	5,9	10,5	23,8	34,8	53,1	71,2	90,0	97,2
рН 3,0, 70 °С								
Лимонна	9,2	15,3	31,1	49,2	64,4	80,6	90,5	95,0
Яблучна	6,8	13,7	27,7	53,0	62,5	82,3	90,8	94,6
Винна	6,2	12,5	28,4	51,1	65,0	84,3	91,2	94,8

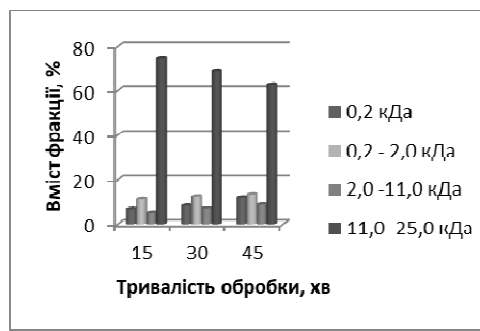
Проте в жодному випадку немає повного збігу між кількістю редукуючих речовин і загальним вмістом розчинних вуглеводів в харчовій системі. Це може бути обумовлено реакцією Майяра – взаємодією редукуючих вуглеводів з аміногрупами білків та амінокислот, хоча в кислому середовищі такі процеси пригнічуються.

Слід зазначити, що у вихідній сировині містяться вуглеводи, що представлені моносахаридами, олігосахаридами і полісахаридами. Спостерігаючи за ходом процесу гідролізу, контролювали накопичення редукуючих речовин, проте олігомерні сполуки – продукти часткового розщеплення інуліну можуть бути двох типів: ті, що мають залишок глюкози і, таким чином, не містять залишку фруктози з вільним глікозидним гідроксилом, тобто нередукуючі вуглеводи, а також навпаки – олігомерні структури, які утворилися внаслідок відщеплення термінального залишку глюкози і є редукуючими [8]. Тому для більш повної, об'єктивної оцінки результатів було досліджено молекулярно-масовий розподіл водорозчинних вуглеводів при обробці сировини лимонною кислотою, яка зазвичай використовується в складі десертів.

Результати аналізу молекулярно-масового розподілу продуктів розщеплення інуліну дозволили отримати більш об'єктивну інформацію (рис.1). Це є важливим при визначенні напрямків подальшого використання продукту. У випадку спрямування його як підсолоджувача, за допомогою якого можна частково замінити сахарозу, наприклад, в складі солодких десертів, доцільно використовувати зразок, де вміст компонентів з молярною масою до 2 кДа є найбільшим. Вони являють собою суміш моносахаридів і олігосахаридів, ступінь полімеризації яких знаходиться в межах від 2 до 10 кДа.



а) рН = 3,0



б) рН = 3,5

Рис.1 – Молекулярно-масовий розподіл вуглеводів в гідролізатах

Найкращим з цього погляду варіантом є використання продукту, отриманого при обробці топінамбуру лимонною кислотою протягом 45 хвилин при значенні середовища $\text{pH} = 3$. Вміст низькомолекулярних вуглеводів з молярною масою в межах 2 кДа в цьому випадку становить 35 %. При збільшенні терміну обробки суттєво прискорюються процеси розщеплення олігосахаридів, яким притаманні пребіотичні властивості, до моносахаридів, що не є метою даного дослідження.

В проміжок часу в межах 45 хвилин при значенні pH середовища 3,5 зниження масової частки фракцій з більшими молекулярними масами (понад 11 кДа) відбувається повільно. Частково продукти їх розщеплення поповнюють фракції з молярними масами від 2 до 11 кДа. Помітним стає збільшення фракції моносахаридів, а також фракції з молярною масою від 0,2 до 2 кДа, яка являє собою суміш олігосахаридів, переважно вона містить так звані фруктоолігосахариди. Звертає на себе увагу той факт, що на початку процесу переважають процеси розщеплення фракцій з меншою молекулярною масою. Вважають [8, 14], що в цьому процесі важливу роль відіграє напрямок перебігу реакції гідролізу – можливість атаки нередукуючих фруктофуранозних залишків, вміст яких збільшується із зменшенням довжини ланцюга. При зниженні значення pH середовища з 3,5 до 3,0 активізується розщеплення фракцій з більшою молекулярною масою.

Переважає більшість інуліну складає фракцію з молекулярною масою 11 – 25 кДа. Відомо, що молекули інуліну здатні утворювати певні структури в розчинах, завдяки чому він відіграє роль жирозамінника та структуроутворюючого агенту. З цих позицій більш прийнятним буде використання зразка, який піддавали найменш тривалій обробки, тобто 15 хвилин при $\text{pH} = 3,5$. Саме цей зразок характеризується найбільшим вмістом високомолекулярної фракції.

Для підтвердження можливості створення продуктів оздоровчого спрямування з модифікованим топінамбуром обрали сиркові десерти, інгредієнти яких були частково замінені на пюре з оброблених бульб. Основою для дослідження був взятий крем сировий 5 % жиру виробництва ТОВ «Гормолзавод», м. Одеса. В дослідних зразках було зменшено кількість цукру та жиру, використовуючи модифікований топінамбур в якості підсолоджувача та жирозамінника у кількості 4 – 7 %. Рецептури наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Рецептура сиркових десертів

Інгредієнт, г	Зразки				
	Контроль	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Сир кисломолочний	500	500	500	500	500
Вершки 40 % жирності	60	50	45	40	30
Цукор	25	10	15	15	15
Стабілізатор	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Топінамбур модифікований	–	25	25	30	40

До складу зразків № 1 і № 2 додавали пюре топінамбуру, обробленого протягом 45 хвилин при $\text{pH} = 3$ із значним вмістом низькомолекулярної фракції цукрів. До зразків № 3 і № 4 вносили пюре після обробки протягом 15 хвилин при $\text{pH} = 3,5$, в якому домінували високомолекулярні фракції.

Кількість внесеного модифікованого топінамбура відповідає рекомендаціям, які ґрунтуються на дослідженнях щодо толерантності організму відносно інуліну і фруктоолігосахаридів [14, 15].

Для оцінки якості сиркових десертів проводили сенсорний аналіз органолептичних показників, регламентованих нормативною документацією. Опис органолептичних показників представлений у табл. 4.

Таблиця 4

Органолептичні показники сиркових десертів

Показник	Зразки			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Зовнішній вигляд і консистенція	однорідна, ніжна	однорідна, ніжна	однорідна, щільна	однорідна, щільна
Колір	жовтуватий, з карамельним відтінком	жовтуватий, з карамельним відтінком	світло коричневий, рівномірний за всією масою	світло коричневий, рівномірний за всією масою
Смак і аромат	кисломолочний, без сторонніх присмаків і запахів	кисломолочний, без сторонніх присмаків і запахів	кисломолочний, з легким присмаком топінамбуру	кисломолочний, з присмаком топінамбуру; зменшена солодкість

Очевидно, що додавання пюре топінамбуру не впливає інтенсивно на загальні сенсорні властивості продукту, злегка забарвлюючи його та надаючи присмак рослинної добавки. Разом з тим, додавання модифікованого топінамбуру до сирового крему значно підвищує біологічну цінність продукту за рахунок вне-

сення розчинних та нерозчинних харчових волокон, вітамінів, мінеральних речовин рослинної сировини та зниження загальної калорійності. Олігосахариди, що утворилися при частковому гідролізі інуліну внаслідок кислотної обробки, позитивно впливають на життєдіяльність корисної мікрофлори кишківника людини.

Висновки. Таким чином, результати проведених досліджень свідчать про доцільність отримання модифікованого кислотною обробкою топінамбуру, з подальшим використанням його в складі продуктів, призначених для «здорового харчування». Він поєднує властивості цукрозамінника, жирозамінника, структуроутворювача і пребіотика, має низьку калорійність. Запропонований спосіб підготовки топінамбуру є простим і може бути реалізований, зокрема, безпосередньо в закладах санаторно-курортного харчування.

Визначено параметри обробки топінамбуру залежно від напрямку його використання при створенні оздоровчих продуктів. При внесенні модифікованого топінамбуру як підсолоджувача, обробку органічними кислотами доцільно проводити при $\text{pH} = 3$ протягом 45 хв., вміст низькомолекулярних фракцій вуглеводів, що утворилися при розщепленні інуліну, був при цьому найбільшим. У випадку, якщо використовувати добавку, в першу чергу, як жирозамінник та структуроутворювач, обробка має бути мінімальною: 15 хв. при $\text{pH} = 3,5$, при цьому зберігається найбільший вміст високомолекулярних фракцій – продуктів гідролізу інуліну.

References

1. Rak. S.O. (2019). Neinfektsiina epidemiia tsukrovoho diabetu. *Medsestrynstvo*, (3), 42–44. <https://doi.org/10.11603/2411-1597.2019.3.10682>
2. Tsytoyskyi M. N. (2017). Statystychnyi, klinichnyi ta morfolohichnyi aspekty vplyvu tsukrovoho diabetu na stan sertsevo-sudynnoi systemy. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho un-tu. Seriia «Medytsyna»*, 55(1), 168–177.
3. Shao T., Yu Q. et al. (2020). Inulin from Jerusalem artichoke tubers alleviates hyperglycaemia in high-fat-diet-induced diabetes mice through the intestinal microflora improvement. *British Journal of Nutrition*, 123(3), 308–318. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007114519002332>
4. Marcel R.B. (2007). Inulin-Type Fructans: Functional Food Ingredients12. *The Journal of Nutrition*, 137(1), 2493S–2502S.
5. Rubel I.A., Iraporda C. et al. (2021). [Inulin from Jerusalem artichoke \(Helianthus tuberosus L.\): From its biosynthesis to its application as bioactive ingredient](#). *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 26, 100281
6. Van Arkel J., Sévenier R. et al. (2013). Tailormade fructan synthesis in plants: A review. *Carbohydrate Polymer*, 93, 48–56.
7. Apolinário A.C., de Lima Damasceno B.P.C. et al. (2014). Inulin-type fructans: A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. *Carbohydrate Polymers*, 101, 368–378. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.09.081
8. Barclay T., Ginic-Markovica M. et al. (2012). Analysis of the hydrolysis of inulin using real time 1H NMR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 352, 117–125. doi:10.1016/j.carres.2012.03.001
9. Mensink M.A., Frijlink H. W. et al. (2015). Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics. *Carbohydrate Polymers*, 130, 405–419.
10. Bach, V., Jensen, S. et al. (2013). The effect of culinary preparation on carbohydrate composition, texture and sensory quality of Jerusalem artichoke tubers (*Helianthus tuberosus* L.). *LWT-Food Science and Technology*, 54(1), 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.05.003>
11. Meyer D., Bayarri S. et al. (2011). Inulin as texture modifier in dairy products. *Food Hydrocolloids*, 25, 1881–1890.
12. González-Herrera, S. M., Herrera, R. R. et al. (2015). Inulin in food products: Prebiotic and functional ingredient. *British Food Journal*, 117, 371–387.
13. Ahmed, W., & Rashid, S. (2019). Functional and therapeutic potential of inulin: A comprehensive review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59(1), 1–13. doi: 10.1080/10408398.2017.1355775
14. Cooper P. D., Barclay T. G. et al. (2013). The polysaccharide inulin is characterized by an extensive series of periodic isoforms with varying biological actions. *Glycobiology*, 23, 1164–1174.
15. Liu J., Willför S. et al. (2015). A review of bioactive plant polysaccharides: Biological activities, functionalization, and biomedical applications. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 5(1), 31–61. doi: 10.1016/j.bcdf.2014.12.001. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2014.12.001>
16. Karimi R., Azizi M. H. et al. (2015). Application of inulin in cheese as prebiotic, fat replacer and texturizer: A review. *Carbohydrate Polymers*, 119, 85–100.
17. Shariati M.A., Khan M.U. et al. (2021). Topinambur (the Jerusalem Artichoke): nutritional value and its application in food products: an updated treatise. *J. Microbiol Biotechnology Food Science*, 10(6), e4737. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.4737>
18. Vlasenko V.V., Kryvoruk V.M. (2017). Vplyv inulinu z topinamburu na yakist boroshnianskykh kulinarnykh vyrobiv. *Naukovyi visnyk LNUVMB im. S.Z. Hzhyskoho. Seriia Kharchovi tekhnologii*, 80(19), 135–139. doi: 10.15421/nvlvet8028.

19. Popova I.V., Maiboroda O.I., Zinchenko N.Yu., Klymenko N.O. (2018). Hidroliz inulinu za dopomohoiu lymonnoi kysloty dlia oderzhannia fruktozo-olihosakharydnykh produktiv kharchovoi promyslovosti. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, (3), 90-95.
20. Luhovska O.A. (2019). Doslidzhennia stupeniu hidrolizu inulinu ta olihofruktozy v napoiakh. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky*, 30(69), 162–165.
21. Apolinário, A. C., de Lima Damasceno, B. P. G. et al. (2014). Inulin-type fructans: A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. *Carbohydrate Polymers*, 101, 368–378.
22. Barta J., Pátkai Gy. (2007). Chemical composition and storability of Jerusalem artichoke tubers. *Acta Alimentaria*, 36(2), 257–267. DOI: <https://doi.org/10.1556/aalim.36.2007.2.13>
23. Khomych H.P., Tkach N.I., Yu. H. ta in. (2021). Vykorystannia topinamburu u tekhnologii boroshnianskykh vyrobiv. *Naukovyi visnyk LNUVMB im. S.Z. Gzhytskoho. Seriya: Kharchovi tekhnologii*, 23(95), 13–19.
24. Korkach H.V., Lebedenko T.Ye. ta in. (2009). Vplyv poroshku topinambura na yakist khlibobulochnykh vyrobiv. *Naukovi pratsi ONAKhT*, 36(1), 137–140.
25. Hnitsevykh V. A., Vasyliieva O. O. (2015). Obgruntuvannia parametriv vyrobnytstva zbyvnykh desertiv na osnovi napivfabrykatu z topinambura ta kyzylu. *Naukovyi visnyk Poltavskoho un-tu ekonomiky i torhivli*, 73(1), 11–17.
26. Bilenska, I., Lazarenko, N. et al. (2019). Comprehensive processing of Jerusalem artichoke tubers into functional products. *Food Science and Technology*, 13(4), 15–22. <https://doi.org/10.15673/fst.v13i4.1559>
27. Stankevych H.M., Bilenska I.R., Bulancha N.A. (2011). Optymizatsiia retseptur sokiv ta past na osnovi fermentovanoho topinambura. *Kharchova nauka i tekhnologhiia*, 32(4), 86–90. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khnt_2011_4_32.
28. Bonnema A.L., Kolberg L.W. et al. (2010). Gastrointestinal Tolerance of Chicory Inulin Products. *Journal of the American Dietetic Association*, 110(6), 865-868.
29. Stewart M.L., Derek A. et al. (2008). Fructooligosaccharides exhibit more rapid fermentation than long-chain inulin in an in vitro fermentation system. *Nutrition Research*, 28(5), 329–334.
30. Yvan Vandenplas Y., Zakharova I. et al. (2015). Oligosaccharides in infant formula: more evidence to validate the role of prebiotics. *British Journal of Nutrition*, 113(9), 1339–1344. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007114515000823>

MODIFIED TOPINAMBUR AS A COMPONENT OF HEALTHY PRODUCTS

**Antipina O., Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Ozolina S. Cand. Chem. Sci., Assoc. Prof.
Odesa National University of Technology, Odesa**

Abstract. Recently, sources of information have increasingly addressed the issue of limiting the composition of fats and digestible carbohydrates in food due to the increase in the overweight population. However, consumers have become accustomed to sweet-tasting products that are popular among different segments of the population. The way to solve this problem is to produce food products with the addition of inulin - a polysaccharide that can serve as a fat substitute, a structure-forming agent and also has prebiotic properties. The products of inulin hydrolysis - fructooligosaccharides and fructose - are sweet in taste and have obvious advantages compared to sucrose from the point of view of nutrition. However, the process of obtaining inulin, fructooligosaccharides and fructose from chicory or Jerusalem artichoke with their subsequent addition to the composition of food products significantly affects the price level of the latter.

The aim of the work was to study the process of limited hydrolysis of inulin contained in Jerusalem artichoke, excluding the process of its preliminary extraction from the raw material, with the subsequent addition of the resulting modified Jerusalem artichoke to the composition of curd desserts.

Inulin hydrolysis was carried out using food acids as catalysts: citric, tartaric, malic, which are used in the production of food products for acidification of food systems. The process conditions were gentle: the pH value of the medium was 3.0 and 3.5, the temperature was 70 °C and 80 °C. The course of inulin hydrolysis was controlled by determining the content of reducing substances in the liquid phase. However, using this indicator it is difficult to draw a conclusion about the composition of the hydrolysate. A separate requirement was to preserve the prebiotic properties of the processed Jerusalem artichoke, which are due to the presence of inulin and fructooligosaccharides. Therefore, the results of the study of the molecular weight distribution of hydrolysis products are more informative. This allows us to substantiate the directions of further use of the product. In the case of its use primarily as a sweetener, with which it is possible to partially replace sucrose, for example, in the composition of sweet desserts, it is advisable to use a sample where the content of the components with a molar mass of up to 2 kDa is the largest. The best option from this point of view is to use the product obtained by treating Jerusalem artichoke with citric acid for 45 minutes at a pH value of the medium equal to 3. In the case when the priority is to introduce an additional com-

ponent into the food system, which has the properties of a fat substitute and/or a structure-forming agent, it should be advisable to introduce a shorter hydrolysis, when the mass fraction of carbohydrates with a higher molecular weight is more significant. In particular, this is the processing of raw materials at a pH value of the medium equal to 3.5 for 15 minutes.

To confirm the possibility of creating health-promoting products with modified Jerusalem artichoke, curd desserts were chosen, the ingredients of which were partially replaced with puree from processed tubers. Sensory evaluation of curd desserts with the addition of 4-7% modified Jerusalem artichoke confirmed the high quality of the resulting products. Adding Jerusalem artichoke puree to curd cream significantly increases the biological value of the product by introducing soluble and insoluble dietary fibers, vitamins, minerals of plant raw materials and reducing the total calorie content.

Keywords: Jerusalem artichoke, inulin, hydrolysis, health products, functional properties

Список використаної літератури

1. Рак. С.О. Неінфекційна епідемія цукрового діабету. *Медсестринство*. 2019. № 3. С. 42–44. <https://doi.org/10.11603/2411-1597.2019.3.10682>
2. Цитовський М. Н. Статистичний, клінічний та морфологічний аспекти впливу цукрового діабету на стан серцево-судинної системи. *Науковий вісник Ужгородського ун-ту. Серія «Медицина»*. 2017. Т. 55. № 1. С. 168–177.
3. Shao T., Yu Q. et al. Inulin from Jerusalem artichoke tubers alleviates hyperglycaemia in high-fat-diet-induced diabetes mice through the intestinal microflora improvement. *British Journal of Nutrition*. 2020. V. 123, I. 3, № 14 February. P. 308 – 318. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007114519002332>
4. Marcel R.B. Inulin-Type Fructans: Functional Food Ingredients12. *The Journal of Nutrition*. 2007. V. 137. I. 1. November. P. 2493S-2502S
5. Rubel I.A., Iraporda C. et al. [Inulin from Jerusalem artichoke \(Helianthus tuberosus L.\): From its biosynthesis to its application as bioactive ingredient](#). *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. 2021. V. 26, November, 100281
6. Van Arkel J., Sévenier R. et al. Tailormade fructan synthesis in plants: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2013. V. 93. P.48–56.
7. Apolinário A.C., de Lima Damasceno B.P.C. et al. Inulin-type fructans: A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. *Carbohydrate Polymers*. 2014. V. 101, January, P. 368-378. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.09.081
8. Barclaya T., Ginic-Markovica M. et al. Analysis of the hydrolysis of inulin using real time 1H NMR spectroscopy. *Carbohydrate Research*. 2012. V. 352. May. P. 117–125. doi:10.1016/j.carres.2012.03.001
9. Mensinka M.A., Frijlinka H. W. et al. Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics. *Carbohydrate Polymers*. 2015. V. 130. P. 405–419
10. Bach, V., Jensen, S. et al. The effect of culinary preparation on carbohydrate composition, texture and sensory quality of Jerusalem artichoke tubers (*Helianthus tuberosus* L.). *LWT-Food Science and Technology*, 2013. V. 54. I. 1. P. 165-170. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.05.003>
11. Meyer D., Bayarri S. et al. Inulin as texture modifier in dairy products. *Food Hydrocolloids*. 2011. V. 25. P. 1881–1890.
12. González-Herrera, S. M., Herrera, R. R. et al. Inulin in food products: Prebiotic and functional ingredient. *British Food Journal*. 2015. V. 117, 371–387.
13. Ahmed, W., & Rashid, S. Functional and therapeutic potential of inulin: A comprehensive review. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2019. V. 59. I. 1, P.1–13. doi: 10.1080/10408398.2017.1355775
14. Cooper P. D., Barclay T. G. et al. The polysaccharide inulin is characterized by an extensive series of periodic isoforms with varying biological actions. *Glycobiology*. 2013. V. 23. P. 1164–1174/
15. Liu J., Willför S. et al. A review of bioactive plant polysaccharides: Biological activities, functionalization, and biomedical applications. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. 2015. V. 5. I. 1. P. 31– 61 doi: 10.1016/j.bcdf.2014.12.001. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2014.12.001>
16. Karimi R., Azizi M. H. et al. Application of inulin in cheese as prebiotic, fat replacer and texturizer: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2015. V. 119. P. 85–100.
17. Shariati M.A., Khan M.U. et al. Topinambur (the Jerusalem Artichoke): nutritional value and its application in food products: an updated treatise. *J. Microbiol Biotechnology Food Science*. 2021. V. 10. I. 6. P. e4737. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.4737>
18. Власенко В.В., Криворук В.М. Вплив інуліну з топінамбуру на якість борошняних кулінарних виробів. *Науковий вісник ЛНУВМБ ім. С.З. Гжицького. Серія Харчові технології*. 2017. Т. 80. № 19. С. 135–139. doi: 10.15421/nvlvet8028.
19. Попова І.В., Майборода О.І., Зінченко Н.Ю., Клименко Н.О. Гідроліз інуліну за допомогою лимонної кислоти для одержання фруктозо-олігосахаридних продуктів харчової промисловості. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2018. № 3. P. 90–95.

20. Луговська О.А. Дослідження ступеню гідролізу інуліну та олігофруктози в напоях. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Том 30 (69). Ч. 2. № 2. С. 162–165.
21. Apolinário, A. C., de Lima Damasceno, B. P. G. et al. Inulin-type fructans: A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. *Carbohydrate Polymers*. 2014. V 101. P. 368–378.
22. Barta J., Pátkai Gy. Chemical composition and storability of Jerusalem artichoke tubers. *Acta Alimentaria*. 2007. V. 36. I. 2. May. P. 257–267. DOI: <https://doi.org/10.1556/aalim.36.2007.2.13>
23. Хомич Г.П., Ткач Н.І., Ю. Г. та ін. Використання топінамбуру у технології борошняних виробів. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С.З. Гжицького. Серія: Харчові технології*. 2021. Т. 23. № 95, С. 13-19.
24. Коркач Г.В., Лебеденко Т.Є. та ін. Вплив порошку топінамбура на якість хлібобулочних виробів. *Наукові праці ОНАХТ*. 2009. Вип. 36. Том 1. С. 137–140.
25. Гніцевич В. А., Васильєва О. О. Обґрунтування параметрів виробництва збивних десертів на основі напівфабрикату з топінамбура та кизилу. *Науковий вісник Полтавського ун-ту економіки і торгівлі*. 2015. Т. 73. № 1. С 11–17.
26. Bilenka, I., Lazarenko, N. et al. Comprehensive processing of Jerusalem artichoke tubers into functional products. *Food Science and Technology*. 2019. V 13. I. 4. С. 18–22. <https://doi.org/10.15673/fst.v13i4.1559>
27. Станкевич Г.М., Біленька І.Р., Буланча Н.А. Оптимізація рецептур соків та паст на основі ферментованого топінамбура. *Харчова наука і технологія*. 2011. Т. 32. №. 4. С. 86–90. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khnt_2011_4_32
28. Bonnema A.L., Kolberg L.W. et al. Gastrointestinal Tolerance of Chicory Inulin Products. *Journal of the American Dietetic Association*. 2010. V. 110. I. 6. June. P. 865–868.
29. Stewart M.L., Derek A. et al. Fructooligosaccharides exhibit more rapid fermentation than long-chain inulin in an in vitro fermentation system. *Nutrition Research*. 2008. V. 28. I. 5. May. P. 329-334.
30. Yvan Vandenplas Y., Zakharova I. et al. Oligosaccharides in infant formula: more evidence to validate the role of prebiotics. *British Journal of Nutrition*. 2015. V. 113. I. 9. May. P. 1339 – 1344. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007114515000823>

Отримано в редакцію 24.07.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 24.07.2025
Approved 02.09.2025

ЗМІСТ

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СУШАРКИ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ, РОЗРОБЛЕНІ В ІТТФ НАН УКРАЇНИ	
Снежкін Ю.Ф.	4
ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ	
Бурдо О.Г., Бурдо А.К.	18
АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ КІНЕТИКИ ЕКСТРАКЦІЇ ЗРІДЖЕНИМИ ГАЗАМИ	
Потапов В.О., Цуркан М.М., Білий Д.В.	27
ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНОГО КОМПОЗИТНОГО ПАЛИВА	
Корінчевська Т.В., Михайлик В.А., Снежкін Ю.Ф.	35
ЗАСТОСУВАННЯ МЕМБРАННИХ ПРОЦЕСІВ У БІОТЕХНОЛОГІЯХ ПОГЛИНАННЯ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ	
Дячок В.В.	42
МІКРОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ГАРБУЗОВОГО ПОРЕ ЯК СКЛАДОВОГО КОМПОНЕНТУ КОМПОЗИЦІЙНОГО ОБ'ЄКТУ РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО СУШІННЯ	
Турчина Т.Я., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Декуша Г.В.	48
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ФОРМИ МАТЕРІАЛУ ПРИ СУШІННІ ГАРБУЗА МУСКАТНОГО (CUCURBITA MOSCHATA)	
Петрова Ж.О., Новікова Ю.П.	55
ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПАРОКОНТАКТНОГО ТЕРМОКОАГУЛЯТОРА З РОЗПОДІЛЕНИМ ВВОДОМ ПАРИ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ	
Ощипок І. М.	64
ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВІДБІЛЮВАННЯМ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ	
Буйваленко А. А., Осадчук П.І., Хоменко А. Д.,	73
МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСЕННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЕФІРНИХ ОЛІЙ	
Славинський Р.Л., Славинська В.О., Грищенко Р.О.	83
ІНЖЕНЕРНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ЕКСТРАКТОРІВ ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ТИПУ	
Молчанов М.Ю., Коцур І.О.	94
НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ	
Мординський В.П., Грещук В.П., Коляновська Л.М.	101
ВПЛИВ ПОКРИТТЯ З МАЛЬТОДЕКСТРИНУ НА АКТИВНІСТЬ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЯКІСТЬ ЯГІД СУНИЦІ САДОВОЇ	
Заморська І.Л., Смілянець О.В.	109
ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА КРУПИ З ПРОСА	
Соц С.М., Кустов І.О., Чеглатонєв В.І.	115
ПІДГОТОВКА НАСІННЯ НУТУ ДО ПЕРЕРОБКИ В КРУП'ЯНІ ПРОДУКТИ	
Соц С.М., Кустов І.О., Буценко І.І.	122
АНАЛІЗ СХЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ГРАНОЛИ	
Ковальов М.О., Мельник І.В., Ковальова В.П.,	130
НАУКОВІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ІМІТОВАНОЇ РИБНОЇ ПРОДУКЦІЇ	
Манолі Т. А., Суханов А. С., Мирошніченко О.М., Баришева Я. О.	135
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ВОЛОГИ В БАГАТОЗОННИХ МІКРОХВИЛЬОВИХ СТРІЧКОВИХ СУШАРКАХ	
Яровий І.І., Коцур І.О., Анцефоров В.О.	147
ДЕРИВАТОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРНА СОРГО ДЛЯ ПОПІНГУ	
Жигунов Д.О., Тимчак Д.О.	157
СУХА ПШЕНИЧНА КЛЕЙКОВИНА ЯК КОМПОНЕНТ РЕЦЕПТУРИ ХЛІБОВУЛОЧНИХ ВИРОБІВ З ВИСОКОЮ ГІДРАТАЦІЄЮ ТІСТА	
Жигунов Д.О., Єнгібарян В.Г., Мельник І.В.	165
ВМІСТ АФЛАТОКСИНІВ ТА ОХРАТОКСИНУ А В УКРАЇНСЬКОЇ ПШЕНИЦІ	
Жигунов Д.О., Оніщенко О.В.	174
ВИКОРИСТАННЯ КОМАХ У КОРМОВИРОБНИЦТВІ: ПРОГНОЗИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ	
Макаринська А.В., Козак О.А.	180
АДАПТАЦІЯ ЛОКАЛЬНОЇ СИРОВИНИ У ТЕХНОЛОГІЮ ШВИДКОЗАМОРОЖЕНОЇ ЛАЗАНЬЇ	
Тележенко Л.М., Іваненко Є.В.	187
ВПЛИВ ВИДУ ДУБОВОЇ АЛЬТЕРНАТИВИ НА СЕНСОРНИЙ ПРОФІЛЬ ЧЕРВОНИХ СУХИХ ВИН З ВИНОГРАДУ СОРТУ ОДЕСЬКИЙ ЧОРНИЙ	
Каменєва Н.В., Мирошніченко О.М., Ткаченко Д.П., Баришева Я.О., Камінський Д.С.	196

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕКСТРАГУВАННЯ ОЛІЇ СОНЯШНИКА ВОДНИМИ РОЗЧИНАМИ ЕТАНОЛУ Запорожець Д.О., Ружицька Н.В.....	205
КІНЕТИКА ТА ЕНЕРГЕТИКА СПОСОБІВ СУШІННЯ ВАРЕНОГО РИСУ Терзієв С.Г., Безбах І. В., Тараненко Є. Ю., Безбах С. В., Казани В. З.....	211
УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КРАФТОВОГО ВИРОБНИЦТВА ХЛІ- БОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ ЗА ТЕХНОЛОГІЯМИ «ВІДКЛАДЕНОГО ВИПІКАННЯ» У ГОТЕЛЬНО- РЕСТОРАННОМУ БІЗНЕСІ Солоницька І.В., Трішин Ф.А., Жигунов Д.О., Лебеденко Т.Є.....	218
МОДИФІКОВАНИЙ ТОПІНАМБУР ЯК КОМПОНЕНТ ОЗДОРОВЧИХ ПРОДУКТІВ Антіпіна О.О., Озоліна С.О.....	226

CONTENTS

ENERGY EFFICIENT DRYERS FOR THE FOOD INDUSTRY, DEVELOPED AT THE INSTITUTE OF ENGINEERING THERMOPHYSICS OF NAS OF UKRAINE Snezhkin Yu.....	4
INNOVATIVE ENERGY TECHNOLOGIES FOR THE REVIVAL OF UKRAINE'S AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX Burdo O. G., Burdo A.K.....	18
ANALYTICAL MODEL OF KINETICS OF EXTRACTION WITH LIQUEFIED GASES Potapov V.O., Tsurkan M.M., Belyi D.V.....	27
THERMAL ANALYSIS OF ALTERNATIVE COMPOSITE FUEL Korinchevska T., Mykhailik V., Snezhkin Yu.....	35
APPLICATION OF MEMBRANE PROCESSES IN GREENHOUSE GAS ABSORPTION BIOTECHNOLOGIES Dyachok V.	42
MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF PUMPKIN PUREE AS A COMPONENT OF A COMPOSITE SYSTEM FOR SPRAY DRYING Turchyna T.Ya., Avdieieva L.Yu., Makarenko A.A., Dekusha H.V.....	48
RESEARCH ON THE INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS AND MATERIAL FORM ON THE DRYING OF MUSCAT PUMPKIN (CUCURBITA MOSCHATA) Petrova Zh.O., Novikova Y.P.....	55
JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF A STEAM CONTACT THERMOCOAGULAR WITH DISTRIBUTED STEAM INPUT TAKING INTO ACCOUNT ENERGY EFFICIENCY Oshchypok I.M.....	64
FEATURES OF SUNFLOWER OIL BLEACHING AUTOMATIC CONTROL Buiwalenko A., Osadchuk P., Khomenko A.....	73
MATHEMATICAL AND EXPERIMENTAL MODELLING OF MASS TRANSFER PROCESSES IN THE PRODUCTION OF ESSENTIAL OILS Slavinsky R.L., Slavinska V.O., Grishenko. R. A.....	83
ENGINEERING METHODS FOR CALCULATION OF ELECTRODYNAMIC EXTRACTORS OF CIRCU- LATION TYPE Molchanov M.Yu. Kotsur I.O. Terziev S.G.....	94
LOW-TEMPERATURE INSTALLATIONS FOR SEPARATION OF AQUEOUS SOLUTIONS Mordynskiy V.P., Greschuk V.P., Kolianovska L.M.....	101
INFLUENCE OF MALTODEXTRIN COATING ON ACTIVITY OF POST-HARVEST PROCESSES AND QUALITY OF STRAWBERRIES Zamorska I.L., Smilyanets O.V.....	109
FEATURES OF MILLET GROAT PRODUCTION Sots S., Kustov I., Chehlatoniev V.....	115
PREPARATION OF CHICKPEA SEEDS FOR PROCESSING INTO GROATS PRODUCTS Sots S., Kustov I., Butsenko I.....	122
ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS SCHEME FOR GRANOLA PRODUCTION Kovalov M., Kovalova V, Melnik I.....	130
SCIENTIFIC ASPECTS OF THE PRODUCTION OF IMITATED FISH PRODUCTS Manoli T., Sukhanov A., Myroshnichenko O., Barysheva Y.....	135
EXPERIMENTAL MODELING OF THE KINETICS OF MOISTURE REMOVAL PROCESS IN MULTIZONE MICROWAVE BELT DRYERS Yarovyi I.I., Kotsur I.O., Antseforov V. O.....	147

DERIVATIVE ANALYSIS OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SORGHUM GRAIN FOR POPPING	
Zhygunov D., Tymchak D.	157
VITAL WHEAT GLUTEN AS A COMPONENT OF THE FORMULATION OF BAKERY PRODUCTS WITH HIGH DOUGH HYDRATION	
Zhygunov D., Yenhibarian V., Melnik I.	165
AFLATOXINS AND OCHRATOXIN A CONTENT IN UKRAINIAN WHEAT	
Zhygunov D., Onischenko O.	174
USE OF INSECTS IN FEED PRODUCTION: FORECASTS AND PROSPECTS	
Makarynska A.V., Kozak O.A.	180
ADAPTATION OF LOCAL RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF QUICK-FROZEN LASAGNA	
Telezhenko L.M., Ivanenko E.V.	187
INFLUENCE OF THE TYPE OF OAK ALTERNATIVE ON THE SENSORY PROFILE OF DRY RED WINES FROM THE GRAPE VARIETY OF ODESSA BLACK	
Kameneva N.V., Myroshnichenko O.M., Tkachenko D.P., Barysheva Ya.O., Kaminskyi D.S.	196
EXPERIMENTAL AND MATHEMATICAL MODELING OF SUNFLOWER OIL EXTRACTION PROCESSES USING WATER-ETHANOL SOLUTIONS	
Zaporozhets D.O., graduate student, Ruzhytska N.V.	205
KINETICS AND ENERGETICS OF DRYING METHODS OF COOKED RICE	
Terziev S.G., Bezbakh I.V., Taranenko Y.Yu., Bezbakh S.V., Kazani V.Z.	211
QUALITY MANAGEMENT AND AUTOMATION OF ARTISAN BAKERY PRODUCTION PROCESSES USING "DELAYED BAKING" TECHNOLOGIES IN THE HOTEL AND RESTAURANT BUSINESS	
Solonytska I.V., Trishyn F.A., Zhigunov D.O. Lebedenko T.E.	218
MODIFIED TOPINAMBUR AS A COMPONENT OF HEALTHY PRODUCTS	
Antipina O., Ozolina S.	226