



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

36

Харчова
ПРОМИСЛОВІСТЬ

Заснований у 1965 р.

Київ НУХТ 2024

Results of research and development operations on technology of foodstuff, chemical, biochemical, microbiological processes, devices, the equipment, automation of food productions and economy of the food industry are provided.

The journal was designed for scientists, engineers and technical personnel of the food industry.

Journal "Food Industry" is included into the list of professional editions of Ukraine of technical sciences (Decree of MES of Ukraine # 32 from January 15, 2018) and the category "Б" (Decree of MES of Ukraine # 612 from May 7, 2019, # 975 from July 11, 2019; in specialties 122, 133, 141, 144, 151, 162, 181), where the results of dissertations for scientific degrees of PhD and candidate of science can be published.

The Journal "Food Industry" is indexed by the following scientometric databases:

- Google Scholar
- Index Copernicus

Publications are represented in authoring edition.

Editorial office address:

National University of Food Technologies
Volodymyrska str., 68, 01601 Kyiv, Ukraine
(044) 287-93-07, internal 93-07
E-mail: hpnuht@ukr.net

Recommended for publication by the Academic Council of the National University of Food Technologies.
Protocol # 6 from 19 th of
December, 2024

Висвітлені результати науково-дослідних робіт з технології харчових продуктів, хімічних, біохімічних, мікробіологічних процесів, апаратів, обладнання, автоматизації харчових виробництв та економіки харчової промисловості.

Розрахований на наукових та інженерно-технічних працівників харчової промисловості.

Журнал «Харчова промисловість» включено в перелік наукових фахових видань України з технічних наук (Наказ МОН України № 32 від 15.01.2018) та категорію «Б» (Накази МОН України № 612 від 07.05.2019 р. та № 975 від 11.07.2019, за спеціальностями 122, 133, 141, 144, 151, 162, 181), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук.

Журнал «Харчова промисловість» індексується такими наукометричними базами:

- Google Scholar
- Index Copernicus

Статті друкуються в авторській редакції.

Адреса редакції:

Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01601
(044) 287-93-07, внутрішній 93-07
E-mail: hpnuht@ukr.net

Рекомендовано вченою радою
Національного університету харчових технологій.
Протокол № 6 від
19 грудня 2024 року

Редакційна колегія

Склад редакційної колегії журналу «Харчова промисловість»

Головний редактор Editor-in-Chief

Олександр ГАВВА
Oleksandr GAVVA

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Відповідальний секретар Accountable secretary

Тетяна ОСЬМАК
Tetiana OSMAC

канд. техн. наук, Україна
Ph. D., National University of Food Technologies, Ukraine

Члени редакційної колегії:

Андрій МАРІНІН
Andrii MARYNIN

канд. техн. наук, ст. наук. співр., Україна
Ph. D., Senior Research Officer, National University of Food Technologies, Ukraine

Василь КИШЕНЬКО
Vasil KYSHENKO

канд. техн. наук, Україна
Ph. D., National University of Food Technologies, Ukraine

Віктор ЄМЦЕВ
Viktor YEMTSEV

д-р екон. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Віктор СТАБНИКОВ
Viktor STABNIKOV

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Віра ЮРЧАК
Vira YURCHAK

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Віталій ПРИБИЛЬСЬКИЙ
Vitaliy PRYBYL'S'KYU

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Галина ПОЛІЩУК
Galina POLISCHUK

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Галина СИМАХІНА
Halyna SIMAKHINA

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Лариса АРСЕНЬЄВА
Larysa ARSEN'YEVA

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Микола ЯКИМЧУК
Mykola YAKYMCHUK

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Наталія ГУСЯТИНСЬКА
Nataliia HUSIATYNSKA

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Наталія ПУШАНКО
Nataliia PUSHANKO

канд. техн. наук, Україна
Ph. D., National University of Food Technologies, Ukraine

Оксана КОЧУБЕЙ-ЛИТВИНЕНКО
Oksana KOCHUBEI-LYTVYNNENKO

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Олександр КУРГАЄВ
Oleksandr KURGAEV

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Олександр СЕРЬОГІН
Oleksandr SER'OHIN

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Олександр ШЕВЧЕНКО
Olexander SHEVCHENKO

д-р техн. наук, Україна
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Олена БЛИК

Olena BILYK

канд. техн. наук, Україна

Ph. D., National University of Food Technologies, Ukraine

Світлана ЛІТВИНЧУК

Svitlana LITVYNCHUK

канд. техн. наук, Україна

Ph. D., National University of Food Technologies, Ukraine

Сергій ТОКАРЧУК

Serhiy TOKARCHUK

канд. техн. наук, Україна

Ph. D., National University of Food Technologies, Ukraine

Станка ДАМЯНОВА

Stanka DAMYANOVA

д-р техн. наук, Болгарія

DSc, Razgrad Branch of the University of Ruse, Bulgaria

Стефан СТЕФАНОВ

Stefan STEFANOV

д-р інж., проф., Болгарія

DSc, University of Food Technologies, Plovdiv, Bulgaria

Тамара НОСЕНКО

Tamara NOSENKO

д-р техн. наук, Україна

Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Тетяна ЛЕБЕДЕНКО

Tetiana LEBEDENKO

д-р техн. наук, Україна

Ph. D. Hab., Odessa National Academy of Food Technologies
Ukraine

Тетяна ПИРОГ

Tetyana PYROH

д-р біол. наук, Україна

Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Тетяна СИЛЬЧУК

Tetiana SYLCHUK

д-р техн. наук, Україна

Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

Юлія КАМБУЛОВА

Yuliia KAMBULOVA

д-р техн. наук, Україна

Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЇ, СИРОВИНА ТА МАТЕРІАЛИ**Сировина та матеріали**

Гащук О. І., Москалюк О. Є., Осьмак О. О., Меркулова Ю. Ю. Використання рослинної сировини у технології посічених напівфабрикатів

Технології: дослідження, застосування та впровадження

Михонік Л. А., Гетьман І. А., Погорєлов І. С. Дослідження структурно-механічних властивостей тіста з гречаним борошном

Поліщук Г. Є., Іващенко О. М. Наукове обґрунтування рецептурного складу йогурту з крохмалепродуктами

Дудзінський О. В., Кохан О. О., Камбулова Ю. В. Дослідження впливу повторного використання зворотних відходів на якість цукерок, виготовлених на основі фруктового помадного корпусу в крохмальних формах

Олішевський В. В., Бабко Є. М., Бондаренко Ю. В., Погорілий Т. М., Цюрпита М. Є., Цюрпита Д. Є. Вплив магнію та цинку на технологічний процес і якість хлібобулочних виробів: порівняльне дослідження

РОЗДІЛ 2. ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ**Процеси харчових виробництв**

Вербицький С. Б., Мінорова А. В., Пацера Н. М., Козаченко О. Б., Недорізанюк Л. П., Муйжнієце-Брасава С. Інституційні та нормативні питання технічного регулювання вимог до екологічного пакування харчових продуктів

Омельченко О. С., Луцька Н. М. Розробка математичних моделей віртуальних сенсорів для моніторингу динамічних процесів у дистиляційному відділенні спиртового виробництва

Обладнання та устаткування

Зьоменко О. С., Губеня О. О. Вплив кількості циклів пресування і частоти обертання ротора таблетпреса на міцність і стиранисть таблеток

SECTION 1. TECHNOLOGIES, RAW MATERIALS AND MATERIALS**Raw Materials and Materials**

Haschuk O., Moskalyuk O., Osmak O., Merkulo-va Yu. Use of vegetable raw materials in the technology of cut semi-finished products

Technologies: Researches, Application and Introduction

Mykhonik L., Hetman I., Pohorielov I. Study of structural and mechanical properties of buckwheat flour dough

Polishchuk H., Ivashchenko O. Scientific rationale for the formulation of yogurts with starch derivatives

Dudzinskyi O., Kokhan O., Kambulova Yu. Research on the impact of reusing reverse waste on the quality of candies made on the basis of fruit fondant mass in starch forms

Olishkevskyi V., Babko E., Bondarenko Yu., Pogorilyi T., Tsyurpyta M., Tsyurpyta D. Influence of magnesium and zinc on the technological process and quality of bakery products: comparative study

SECTION 2. PROCESSES AND EQUIPMENT**Processes of Food Industries**

Verbytskyi S., Minorova A., Patsera N., Kozachenko O., Nedorizanyuk L., Muižniece-Brasava S. Institutional and normative issues of technical regulation of requirements for eco-friendly packaging of foods

Omelchenko O., Lutska N. Development of mathematical models for virtual sensors to monitor dynamic processes in the distillation department of ethanol production

Equipment and machinery

Zomenko O., Gubenia O. Impact of number of compression cycles and rotary table speed on tablets strength and friability

- Стрижак Д. В., Гусятинська Н. А.* Розроблення модульної установки для очищення підземних вод з високою мінералізацією
- Гавва О. М., Чуприна А. В., Чепелик О. М., Степанець В. В., Марцинкевич Л. В.* Кращі практики і технічні рішення для зниження енерговитрат під час роботи відцентрових сепараторів
- Глушченко І. С., Якимчук М. В.* Дослідження робочої зони спеціалізованих роботизованих комплексів для групового пакування харчових продуктів
- Кривопляс-Володіна Л. О., Костін В. Б., Деренівська А. В., Костюк В. С.* Дослідження кінематики виконавчого механізму укладальника пляшок (частина 1)
- 92 *Stryzhak D., Husiatynska N.* Development of a modular plant for the purification of groundwater with high mineralization
- 103 *Gavva O., Chupryna A., Chepeliuk O., Stepanets V., Martsynkevych L.* Best practices and technical solutions for reducing energy consumption during operation of centrifugal separators
- 114 *Hlushchenko I., Iakymchuk M.* Research of the workspace of specialized robotic complexes for group packaging of food products
- 124 *Krivoplias-Volodina L., Kostin V., Derenivska A., Kostiuk V.* Kinematics study of the executive mechanism of a bottle manipulator for case packing (part 1)

УДК 664.123.4:621.374

USE OF VEGETABLE RAW MATERIALS IN THE TECHNOLOGY OF CUT SEMI-FINISHED PRODUCTS

O. Haschuk, O. Moskalyuk, O. Osmak, Yu. Merkulova

National University of Food Technologies

Key words:

poultry meat,
lentils,
model minced meats,
chopped meat-vegetable
semi-finished products

Article history:

Received 05.12.2024

Received in revised form
07.12.2024

Accepted 17.12.2024

Corresponding author:

moskalyukoe@ukr.net

ABSTRACT

The article presents the results of research on model samples of chopped semi-finished poultry meat products using legumes. The combination of meat raw materials, namely poultry meat in a given ratio and the influence of lentils on the functional and technological indicators of the developed product are important. The model minced meat consisted of the following ingredients, %: chicken — 45.0—60.0, lentils moistened 1:3 — 24.0—40.0 in a pasty form. According to the results of organoleptic evaluation of the samples of model semi-finished products with moistened lentils, it was found that samples 1 (content 24%) and 2 (content 32%) have a dense and delicate consistency. Sample 3 (content 40%) was distinguished by a somewhat soft, loose consistency. All samples had a pleasant taste and aroma, the taste of lentils was not felt. Functional and technological indicators of the model minced meat with hydrated lentils correlate with the control. When adding up to 40% of blanched hydrated lentils 1:3, the moisture-binding capacity does not deteriorate. The moisture and fat-holding capacity is at the level of the control sample, since chicken and lentil proteins retain the aqueous phase. During heat treatment of meat-vegetable semi-finished products, a decrease in mass occurs due to the melting of fat and dehydration of the surface layers of the semi-finished product. Replacing fatty pork and bacon (control sample) with chicken meat and hydrated blanched lentils, and as a result, reducing the fat content, allowed reducing mass losses during heat treatment by 5—6%. According to the results of research on the developed recipe for minced meat-vegetable semi-finished products using hydrated red lentils in a ratio of 1:3, the optimal amount of the additive was established as 32% of the total product mass. The studied functional and technological indicators of model minced meats indicate the correct selection of recipe components, the combination of which allows creating products with good organoleptic indicators and high yield.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-3

ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ У ТЕХНОЛОГІЇ ПОСІЧЕНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

О. І. Гашук, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-2726-5271

О. Є. Москалюк, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-7090-6834

О. О. Осьмак, ORCID ID: 0000-0002-6066-6555

Ю. Ю. Меркулова, здобувач

Національний університет харчових технологій

У статті наведено результати досліджень модельних зразків посічених м'ясо-рослинних напівфабрикатів для загального споживання з м'яса птиці з використанням бобових культур. Результатами досліджень розробленої рецептури встановлено, що кількість внесення сочевиці червоної гідратованої у співвідношенні 1:3 складає 32% від загальної маси продукту.

Досліджені функціонально-технологічні показники модельних фаршів свідчать про правильний підбір компонентів рецептури, поєднання яких дає змогу створити продукцію з хорошими органолептичними показниками та високим виходом.

Ключові слова: м'ясо птиці, сочевиця, модельні фарші, посічені м'ясо-рослинні напівфабрикати.

Постановка проблеми. Український ринок м'яса та м'ясних продуктів є одним із тих, що активно розвиваються. Його роль визначається не лише збільшенням обсягів виробництва, попиту і споживання м'ясних продуктів, але і їх значимістю. Адже м'ясо є основним джерелом білка тваринного походження в раціоні людини. Для м'ясопереробних підприємств є важливим завданням пошук нових технологічних рішень, пов'язаних з переробкою м'яса, і впровадження на підприємствах сучасних підходів використання харчових інгредієнтів. Продукт, що розробляється, повинен не тільки задовольняти споживача збалансованим складом, з точки зору харчової цінності, але й відповідати за органолептичними показниками традиційним продуктам з м'яса птиці, яловичини, свинини [1, 2].

Статистичні дані останніх років свідчать про зростання попиту населення на продукти швидкого приготування. В раціоні економічно активної та платоспроможної частини населення все частіше з'являються різні продукти швидкого приготування, серед яких не останнє місце належить м'ясним напівфабрикатам: посіченим, замороженим, кулінарним [3, 4].

Зарубіжні й вітчизняні науковці роблять вагомий внесок у розроблення технологій м'ясних продуктів з використанням сировини рослинного походження (В. Пасічний, М. Паска, Г. Сімахіна, Л. Авдєєва, М. Янчева, Л. Віннікова Л. Г., F. Jimenez-Colmenero, M. Ramos-Diaz, K. Kantanen та інші вчені [5—8]). У зазначених працях була доведена доцільність поповнення дефіциту білка в харчуванні людини за рахунок використання білків рослинного походження. Значні ресурси таких білків компенсує їх меншу повноцінність у якісному відношенні. Витрати праці й енергії на виробництво рослинних білків в 10 разів менші, ніж витрати на виробництво тваринних [9, 10].

Переорієнтація на рослинні джерела білка сприяє ефективнішому використанню ресурсів та зменшенню впливу тваринництва на навколишнє середовище. Загалом, впровадження нем'ясних білкових харчових інгредієнтів рослинного походження вирішує не лише економічні аспекти, а й робить важливий внесок у сталість вироб-

ництва та створює можливості для розширення асортименту високоякісних продуктів харчування, що відповідають сучасним тенденціям споживацьких уподобань [11].

Підхід включає в себе розробку технологій виробництва таких інгредієнтів, вивчення їх функціональних властивостей і механізмів взаємодії з м'ясними системами, а також складання рецептур м'ясо-рослинних продуктів. Крім того, ці інгредієнти виступають як хороші поверхнево-активні речовини, які знижують міжфазний натяг у фарші. Функціональні властивості високобілкових рослинних інгредієнтів включають їхню термостійкість, можливість утворення гелів і здатність підвищувати волого- та жирутримуючі характеристики м'ясних систем загалом. Застосування нем'ясних білкових харчових інгредієнтів рослинного походження дає змогу значно підвищити економічні показники виробництва шляхом зниження вартості вихідної сировини, збільшення рентабельності виробництва продукції та більш раціонального використання м'ясної сировини.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Основна частка попиту на м'ясні напівфабрикати зосереджена в найбільших містах (близько 70%). До 40% мешканців регулярно вживають готові напівфабрикати у своєму раціоні. Зростання на 2—3% попиту населення на готові продукти вимагає інтенсивного впровадження інноваційних підходів, використання додаткових ресурсів і розширення асортименту [2].

Одним із шляхів створення нових м'ясопродуктів є комбінування сировини тваринного і рослинного походження, в результаті чого продукти збагачуються вуглеводами, вітамінами, мінеральними речовинами, баластними речовинами та іншими сполуками, необхідними для нормального функціонування організму людини.

У харчуванні людини спостерігається дефіцит біологічно активних нутрієнтів, найважливішим з яких є білок. За даними FAO/ВОЗ, норма споживання білка становить 90...100 г/добу, серед них — 30...40% білків рослинного походження [12]. Поліпшити існуючий стан у досить стислі терміни можна, збагативши раціон людини білком зерно-бобових культур: сої, люпину, гороху, квасолі, сочевиці, машу, нуту, насіння яких містить до 42% білка.

Бобові культури відповідно до їхньої здатності синтезувати білок можна розташовувати у такій послідовності: квасоля, нут, сочевиця, горох і соя. Незважаючи на те, що соя знаходиться на останньому місці за цим показником, її білки є ідеальним джерелом незамінних амінокислот, а білкові препарати на основі сої є найбільш прийнятними в технології м'ясних продуктів. Із соєвих бобів виробляють різні білкові препарати, такі як соєве борошно, соєвий концентрат та соєвий ізолят залежно від вмісту білків, жирів і вуглеводів. Кожна група соєвих препаратів має свої властивості та якість, залежно від вихідної сировини й схеми виробництва [13, 14].

У технологічній практиці важливу роль відіграє здатність соєвих білкових препаратів до утворення гелю. Це позитивно впливає на стійкість фаршу та консистенцію продукту, сприяє збереженню води у м'ясних виробах.

На другому місці після сої серед рослин за рівнем вмісту білка знаходиться люпин, тож ця культура є перспективною для використання у складних, багатокомпонентних композиціях м'ясних продуктів. У таких країнах, як Австрія, США, Німеччина, Іспанія, Португалія, Велика Британія, Чилі, Єгипет, Польща та Угорщина проводяться численні наукові дослідження, спрямовані на детальне вивчення хімічного складу білка, насіння люпину, різних видових сортів на пошук способів його виділення й отримання білкових препаратів (концентратів та ізолятів) з необхідними

функціональними властивостями, а також можливостей їх використання в технології м'ясних продуктів [15].

Дослідники Кульмбахського федерального центру наукових досліджень м'яса (Німеччина) в рецептурах експериментальних ковбас заміняли 7,6% нежирної м'ясної сировини на 2% ізоляту люпину та 5,6% питної води. За органолептичними характеристиками дослідні зразки варених ковбас не відрізнялися від зразків, виготовлених із м'яса [16]. В університеті ім. Аристотеля (Греція) досліджували вплив ізолятів білка люпину (*Lupin usalbus* sp. *graecus*) на функціонально-технологічні властивості ковбасного фаршу та якісні показники сосисок. Ізолят люпину із вмістом білка 92% у вигляді порошку вносили в рецептуру сосисок у кількості 1—3% від загальної маси всіх компонентів, при цьому на кожен відсоток білка додавали 1% води. При внесенні ізоляту люпину 1% у фарш значно покращувалися його технологічні властивості та якість сосисок, при цьому забарвлення продукту та його текстура не змінювалися [17].

Також перспективним видом сировини для м'ясної галузі є горох [18]. Харчова цінність у гороху вища, ніж у круп і злаків, завдяки високому (25%) вмісту білків, які збалансовані за незамінними амінокислотами і характеризуються високим вмістом триптофану, лізину, фенілаланіну+тирозину та лімітовані лише за метіоніном+цистином». Науковці Канади запропонували спосіб екструзійного текстурування горохового білка. Доведено, що збільшення густини екструдату за рахунок зменшення вологості маси та при зниженні швидкості обертання шнеків і температури екструзії може впливати на рівень засвоювання білка, зниження руйнування лізину. Американські вчені довели можливість отримання модифікованого білкового продукту з горохового борошна шляхом ендogenous гідролізу. Результати досліджень функціональних властивостей білка в модифікованому та вихідному борошні гороху свідчать про те, що ендogenous гідроліз підвищує емульгуювальну здатність і знижує критичну концентрацію гелеутворення горохового борошна. Це надає можливість застосувати модифікований білок гороху в технології м'ясних фаршевих продуктах [19, 20].

Науковці вимушені здійснювати пошук альтернативних джерел повноцінних білків серед вітчизняних сортів сільськогосподарських зерно-бобових культур [21, 22]. Бобові — цінний продукт харчування, за вмістом білків вони перевищують м'ясо, хоча поступають йому за амінокислотним складом білків. Нині широкого використання набула саме соя, проте цей продукт викликає невдоволення населення через велику кількість генномодифікованої сировини. З огляду на це особливу цікавість викликає сочевиця. Сприятливе поєднання у насінні білка, жиру, вуглеводів, мікроелементів, вітамінів, біологічно активних речовин робить її популярним продуктом у харчуванні населення. Насіння сочевиці містить: білка — 25—35%, крохмалю — 47—60%, жиру — 0,6—4,4%, клітковини — 2,4—4%, мінеральних речовин — 2,3—4,4%. Своїми поживними властивостями білок сочевиці нічим не поступається м'ясному білку, він набагато легше засвоюється нашим організмом. Сочевиця, як сировина для виробництва напівфабрикатів, промислового значення поки ще не набула, хоча вона має багато позитивних властивостей: багата на вітаміни групи В, А, мікроелементи: калій, фосфор, кальцій, залізо, мідь, молібден, марганець, бор, кобальт, йод, цинк, жирні кислоти групи Омега-6, Омега-3. Сочевиця є екологічно чистим продуктом, тому що не накопичує токсичні речовини. Вона містить ізофла-

вони, що відносяться до фітоестрогенів, які володіють метаболічними і антиканцерогенними властивостями і також позитивно впливають на стан шкіри, роботу серцево-судинної системи і зберігаються після оброблення [23].

Тож створення м'ясо-рослинних посічених напівфабрикатів з використанням сочевиці червоної, збалансованих за органолептичними показниками, підвищеною харчовою і біологічною цінністю та високим виходом, є важливим і актуальним завданням.

Метою досліджень є наукове обґрунтування використання рослинної сировини у технології м'ясо-рослинних посічених напівфабрикатів.

Матеріали і методи. Органолептичну оцінку здійснювали за ДСТУ 4823.2:2007 «Продукти м'ясні. Органолептичне оцінювання показників якості. Частина 2. Загальні вимоги» у такій послідовності: зовнішній вигляд — за структурою, малюнком на розрізі, рівномірним розподілом рослинної складової у фарші; колір — візуально на розрізі напівфабрикату; запах (аромат), смак і соковитість — випробуванням продуктів одразу після того, як їх нарізали шматочками; визначали відсутність або наявність стороннього запаху, присмаку, ступінь вираженості аромату прянощів і солоність; консистенцію — надавлюванням на виріб. Оцінювання зразків модельних виробів здійснювали за 5-бальною шкалою, кожний показник має 5 ступенів якості, виражених у балах: 5 — відмінна якість, 4 — добра якість, 3 — задовільна якість, 2 — незадовільна якість, 1 — погана якість.

Вологозв'язувальну здатність (ВЗЗ) визначали методом пресування за методикою Р. Грау та Р. Хамму в модифікації В. Воловинської та Б. Кельман.

Вміст зв'язаної води, % до загальної води, було визначено за формулою:

$$ВЗЗ = \frac{a - 8.4b}{a} \times 100\%, \quad (1)$$

де ВЗЗ — вміст зв'язаної води, до загальної води, %;

$$a = \frac{a \times W}{100}, \quad (2)$$

b — різниця площ плям, cm^2 ; W — вміст води у продукті, %; m — маса наважки, взятої для визначення ВЗЗ, мг.

Вологоутримувальну і жирутримувальну здатності визначали так методом: зразки фаршу масою 180—200 г, вміщені в герметично закриті банки, зважують і піддають тепловому обробленню при режимах, що відповідають виробничим (варіння на водяній бані за температури 78—80 °C протягом 1 год, охолодження у проточній воді до температури 12—15 °C. Потім банки розкривають, бульйон і жир, що виділилися, переносять у попередньо зважені алюмінієві бюкси. Після видалення бульйону і жиру фарш промокають фільтрувальним папером і зважують. Бюкси з бульйоном вміщують у сушильну шафу і сушать до постійної маси за температури 103—105 °C. Визначають масову частку води, що виділилася при тепловому обробленні фаршу і вологоутримувальну здатність фаршу.

Вологоутримувальна здатність, % до маси фаршу,

$$ВУЗ = W - \frac{m_{\text{б}_1} m_{\text{б}_2}}{m_{\text{б}_2} m} 100, \quad (3)$$

де W — масова частка води у фарші, %; $m_{\text{б}}$ — маса води в досліджуваному бульйоні, г; $m_{\text{б}_2}$ — маса досліджуваного бульйону із жиром, г.

Жирутримувальна здатність фаршу, % до маси фаршу,

$$ЖУЗ = Ж_{\phi} - \frac{m_{\phi_1} m_{ж}}{m_{\phi_2} m}, \quad (4)$$

де $Ж_{\phi}$ — масова частка жиру у фарші, %; $m_{ж}$ — маса жиру в досліджуваному бульйоні, г.

Ступінь набухання φ виражають через приріст маси у % до початкової наважки G_0 :

$$\varphi = \frac{G_1 - G_0}{G_0} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де G_1 — маса набухлої наважки, г.

Усі отримані результати досліджень зображають графічно в координатах: вісь x — час набухання, хв; вісь y — ступінь набухання φ , %. Для розрахунку кінетичних констант інерції набухання визначають максимально досягнуте в досліді φ_{max} .

Всі результати за 3—5-кратної повторності були статистично оброблені за допомогою програми Statistika 10. Побудову діаграм здійснено у Microsoft Excel 2016.

Результати досліджень. При розробленні рецептури посічених м'ясо-рослинних напівфабрикатів обрано м'ясо птиці та гідратовану сочевицю червону. Для визначення раціональної кількості внесення гідратованої сочевиці дослідили органолептичні та функціонально-технологічні показники фаршу й готових виробів. З цією метою були створені модельні м'ясні фарші на основі рецептури котлети «М'ясо-рослинні з крупою» згідно з ДСТУ 4437: 2005 «Напівфабрикати м'ясні і м'ясо-рослинні посічені». Вивчено можливість заміни у складі рецептури посічених напівфабрикатів свинини жирної та шпикку на курятину й крупу рисову варену на гідратовану, бланшовану сочевицю червону.

Модельні фарші складали з таких інгредієнтів, % (табл. 1): курятина — 45,0—60,0, сочевиця гідратована 1:3 — 24,0—40,0 у пастоподібному вигляді.

Таблиця 1. Рецептури модельних м'ясних фаршів для посічених напівфабрикатів з використанням сочевиці

Склад рецептури	Контроль — котлети «М'ясо-рослинні з крупою» згідно з ДСТУ 4437: 2005	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
М'ясо котлетне яловиче	35,75	—	—	—
Свинина знежирована односортна	29,7	—	—	—
Курятина	—	61,7	53,7	45,7
Крупа варена рисова	27,0	—	—	—
Сочевиця гідратована 1:3 бланшована	—	24,00	32,00	40,00
Клітковина пшенична	—	5,0	5,0	5,0
Сухарі панірувальні	4,0	4,0	4,0	4,0
Цибуля ріпчаста свіжа подрібнена	6,0	2,0	2,0	2,0
Меланж	2,0	2,0	2,0	2,0
Сіль кухонна	1,2	1,2	1,2	1,2
Перець чорний	0,05	0,1	0,1	0,1
Вода питна	20,0	—	—	—
Всього:	100,00	100,00	100,00	100,00

Підготовка сочевиці червоної проводилася за традиційною схемою [24] і передбачала такі технологічні операції: інспекція, очищення, витримування у воді: обробка в холодній воді або гарячій (бланшування). Проводять це з метою поглинання зерном якомога більше вологи та подальшого набухання. При такому обробленні маса і об'єм бобових збільшуються в 1,6—2,6 рази. За рахунок поглинання вологи білками і крохмалем відбувається набухання бобових, також цей результат залежить від температурних режимів. При поглинанні зерном вологи його оболонка стає більш еластичною, проте при збільшенні об'єму залишається цілою.

Процес набухання сочевиці проводили за температури 40 °С з протягом 200 хв та подальшим бланшуванням протягом 30 хв і охолодженням.

За експериментальними даними та розрахунками встановлено, що ступінь набухання становить 96,5% а інерція набухання сочевиці, тобто час, необхідний для того, щоб ступінь набухання досяг 90% максимального, становить 62,3 хв при температурі 40 °С. Бланшування гідратованої сочевиці червоної проводили для забезпечення м'якої пастоподібної консистенції. Ступінь набухання зерна після набухання складає 186%.

У процесі нагрівання, яке сприяє збільшенню швидкості набухання, ступінь граничного набухання зменшується. При досягненні граничного значення обмежене набухання вже не залежить від часу. Так набухає амілоза — складова крохмалю сочевиці. В цих умовах міжмолекулярні взаємодії в полімері досить сильні, і розчинник не в змозі роз'єднати макромолекули, тому набухання припиняється. Саме тому для подальших досліджень використовували сочевицю гідратовану 1:3 при температурі 40 °С протягом 60—70 хв і бланшовану протягом 30 хв.

За результатами органолептичної оцінки зразків модельних напівфабрикатів з гідратованою сочевицею виявили, що зразки 1 (вміст 24%) і 2 (вміст 32%) мали щільну і ніжну консистенцію. Зразок 3 (вміст 40%) відрізнявся дещо м'якою, рихлою консистенцією. Усі зразки мали приємний смак і аромат, смак сочевиці не відчувався. Профілограму органолептичної оцінки зразків модельних м'ясних фаршів для посічених напівфабрикатів подано на рис. 1.

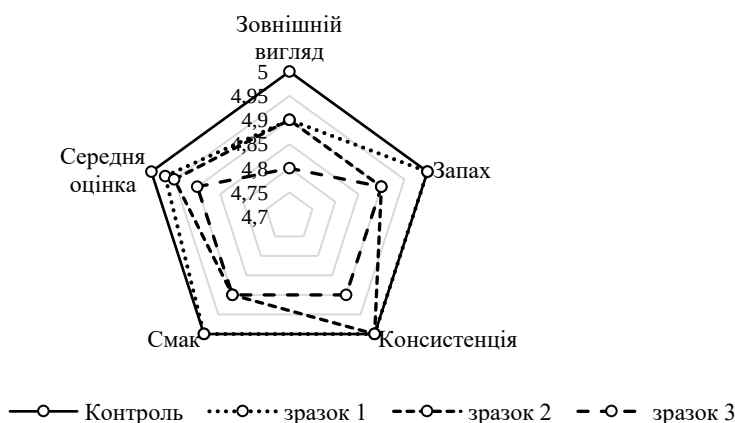


Рис. 1. Профілограма органолептичної оцінки зразків модельних м'ясних фаршів із сочевицею

Функціонально-технологічні показники модельних фаршів з гідратованою сочевицею для м'ясо-рослинних посічених напівфабрикатів представлені в табл. 2.

Однією з найважливіших функцій білка у м'ясних системах є формування водозв'язуючої здатності в результаті взаємодії в системі «білок — вода». Швидкість і стійкість зв'язування води залежить головним чином від концентрації, властивостей та стану білкових речовин.

Таблиця 2. Функціонально-технологічні показники модельних фаршів з гідратованою сочевицею для м'ясо-рослинних посічених напівфабрикатів

Зразок	Показники			
	Вміст вологи, %	ВЗЗ, % до загальної вологи	ВУЗ, %	ЖУЗ, %
Контроль	67,85±2,06	85,57±2,38	59,65±0,92	67,54±2,36
Зразок 1	68,54±1,70	83,25±0,25	60,54±1,21	69,15±0,23
Зразок 2	68,08±1,75	82,37±2,91	61,46±2,15	68,22±2,78
Зразок 3	65,34±1,96	81,34±2,44	61,35±1,72	68,05±1,70

Значний вплив мають і умови гідратації: величина рН середовища, що характеризує рівень іонізування аміногруп; ступінь денатураційних змін, що сприяють зниженню сорбції води білком унаслідок збільшення частки між білкових взаємодій; концентрація та властивості електролітів у системі [25, 27]. Ця інформація підтверджується одержаними результатами дослідження, наведеними вище.

Встановлено, що функціонально-технологічні показники модельних фаршів з гідратованою сочевицею корелюють з контролем. При внесенні сочевиці гідратованої за гідромодуля 1:3 бланшованої у пастоподібному вигляді у кількості 40% в м'ясні фарші не погіршуються ВЗЗ, % до загальної вологи.

Волого- і жирутримувальна здатності досліджуваних зразків доволі високі і співставні з цими характеристиками для контрольного зразка за рахунок наявності білків курятини та сочевиці, які ефективно утримують вологу. Результати дослідження корелюють з відомими даними щодо використання сочевиці у виробництві ковбасних виробів [26]. Авторами цього дослідження встановлено, що додавання сочевиці до рецептури ковбасних виробів призводить до збільшення ступеня набрякання волокон і більш активного накопичення в міжволокневому просторі дрібнозернистої білкової маси, що покращують умови формування виробів та їх монолітність [26].

М'ясний фарш — це складна полідисперсна система, в якій дисперсійним середовищем є водний розчин білків, низькомолекулярних органічних та неорганічних речовин, а дисперсійною фазою виступають часточки м'язової, сполучної та жирової тканини, а також інших нерозчинних інгредієнтів рецептури. Часточки у фарші сполучені між собою молекулярними силами зчеплення та утворюють суцільну об'ємну сітку або своєрідний просторовий каркас. Його стійкість залежить від параметрів теплової обробки посічених м'ясо-рослинних напівфабрикатів [25].

Однією з найголовніших технологічних властивостей фаршевої системи є міцність зв'язаної вологи, що суттєво впливає на вихід продукту (рис. 2).

При проведенні термічної обробки м'ясо-рослинних напівфабрикатів протягом 5—7 хв відбувається зниження маси за рахунок витоплювання жиру та зневоднення поверхневих шарів напівфабрикату. Заміна свинини жирної та шпик (контрольний зразок) на курятину та гідратовану сочевицю за зниження вмісту жиру дало змогу знизити втрати маси напівфабрикатів при термічній обробці на 5—6%.

Виявлений ефект обумовлюється тим, що в процесі термічної обробки під дією теплоти в продукті проходить низка складних фізико-хімічних, біохімічних і мікробіологічних процесів, що є чинниками денатурації, дегідратації та деструкції білків, топлення жиру, клейстеризації крохмалю, дифузії жиру, води і водорозчинних речовин, зміни структурних характеристик.

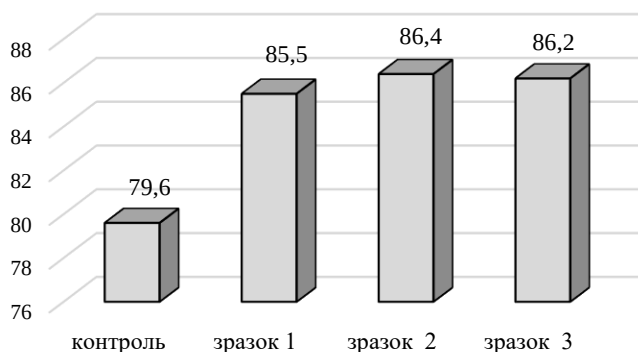


Рис. 2. Вихід посічених м'ясо-рослинних напівфабрикатів

Ступінь фізико-хімічних змін харчових продуктів визначається характером та інтенсивністю процесів тепло- і масоперенесення. Розподіл теплоти і підвищення температури всередині продукту відбувається у два етапи: у перший етап температура підвищується від поверхні продукту до центру, у другий — протягом деякого часу залишається постійною і після досягнення певного вологовмісту починає поступово підвищуватися [25, 27].

У процесі термічної обробки під час видалення вологи збільшується пористість продукту та, відповідно, підвищуються всмоктуваність за рахунок заповнення жиром пор, що не заповнені соком. Поглинання жиру залежить від форми та розмірів продукту і наявності поверхнево-активних речовин.

Усередині продукту поступово збільшується надмірний тиск, який, навпаки, негативно впливає на поглинання, що зумовлено протидією защемленої пари, і сприяє витоплюванню жиру. З огляду на те, що в центральних шарах тиск вищий, ніж у зовнішніх, слід вважати, що вміст жиру в центральних шарах, як правило, менший. Водозв'язуюча здатність пов'язана також зі складом з'єднувальної тканини. За значної кількості колагену, який під час теплової обробки перетворюється на глютин, зв'язується більша кількість вологи. Підвищений вміст еластину, який під час нагрівання практично не змінюється, не сприяє утриманню води у фарші [25, 27], що корелює з результатами дослідження.

Отже, за результатами досліджень органолептичної і функціонально-технологічної оцінки розробленої рецептури посічених м'ясо-рослинних напівфабрикатів був обраний зразок 2 з використанням сочевиці червоної гідратованої у співвідношенні 1:3 у кількості 32% від загальної маси продукту, тому що цей зразок відповідає вимогам якості за нормативними документами.

Висновки. За аналізом літературних джерел доведено, що бобові культури і, зокрема, сочевиця червона є технологічно ефективним компонентом для використання в технології м'ясо-рослинних напівфабрикатів. Це дало змогу обґрунтувати науково-

технічні передумови для розширення асортименту і розроблення рецептури модельних фаршів для котлет з використанням нетрадиційної сировини.

За результатами досліджень розробленої рецептури посічених м'ясо-рослинних напівфабрикатів для загального споживання з використанням сочевиці червоної гідратованої у співвідношенні 1:3 встановлено, що раціональний вміст рослинного компоненти у кількості 32% від загальної маси продукту.

Досліджені функціонально-технологічні показники модельних фаршів свідчать про технологічно доцільний підбір компонентів рецептури, поєднання яких надає можливість створити продукцію з нормативними органолептичними показниками.

У подальшому заплановані експериментальні дослідження харчової і біологічної цінності та мікробіологічних показників розробленого продукту в процесі зберігання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ринок м'яса і напівфабрикатів в Україні: веб сайт URL: <https://pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-zamorozhennyh-polufabrikatov-v-ukraine-rost-importa-na-115-v-2023-godu> (дата звернення 16.09.2024).
2. Перегуда, Ю. А. (2023). Дослідження конкурентоспроможності українського м'яса та продуктів з м'яса на національному і світовому ринках. Наукові праці Міжрегіональної Академії управління персоналом. *Економічні науки*, 3(70), 32—36.
3. Пичкур, Т., Бандуренко, Г., Засекин, Д. (2011). Стан українського ринку м'яса і м'ясопродуктів. *Товари і ринки*, 2, 46—53.
4. Власов, В. І., Ткач, Г. В., Духницький, Б. В. (2008). Оцінка споживання основних харчових продуктів в Україні. *Економіка АПК*, 10, 3—7.
5. Віннікова, Л. Г., Глушков, О. А., Янковая, Є. Д. (2012). Використання зернових культур для стабілізації властивостей швидкозаморожених м'ясних напівфабрикатів. *Зернові продукти і комбікорми*, 1, 34—39.
6. Янчева, М., Дроменко, О., Гринченко, О., Потапов, В., Крайнюк, Л. (2015). *Технологічні аспекти виробництва напівфабрикатів м'ясних посічених заморожених із використанням емульсійних систем*. Харків: ХДУХТ.
7. Паска, М. З., Маслійчук, О. Б. (2018). Розробка рецептур та удосконалення технології функціональних м'ясних посічених напівфабрикатів та котлет з використанням білкового збагачувача. *Продовольчі ресурси*, 11, 132—138.
8. Авдєєва, Л. Ю. (2015). Збагачення м'ясних напівфабрикатів біологічно-активними речовинами рослинної сировини. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*, 46(2), 174—176.
9. Jimenez-Colmenero, F., Carballo, J., Cofrades, S. (2001). Healthier meat and meat product their role as functional foods. *Meat Science*, 1, 5—13.
10. Ramos-Diaz, J. M., Kantanen, K., Edelmann, J. M., Jouppila, K., Sontag-Strohm, T., Piironen, V. (2022). Functionality of oat fiber concentrate and faba bean protein concentrate in plant-based substitutes for minced meat. *Current Research in Food Science*, 5, 858—867.
11. Munkata, P. S., Pérez-Álvarez, J. Á., Pateiro, M., Viuda-Matos, M., Fernández-López, J., Lorenzo, J. M. (2021). Satiety from healthier and functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, 397—410.
12. Центр громадського здоров'я МОЗ України. URL: <https://www.phc.org.ua/news/zdorove-kharchuvannya-vooz-onovila-rekomendacii-schodo-vzhivannya-zhiriv-i-vuglevodiv> (дата звернення 16.09.2024).
13. Гашук, О. І., Москалок, О. Є., Васильєва, А., Виноградов, О. (2018). Використання бобових культур у технології м'ясо-рослинних напівфабрикатів. 84 Міжнародна наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті». К.: НУХТ, Ч. 1. С. 353.
14. Арсеньєва, Л. Ю., Бондар, Н. П., Головченко, О. В. (2003). Використання насіння люпину для виробництва високобілкових харчових продуктів. *Вісник Державного університету економіки і торгівлі імені М. Туган-Барановського: науковий журнал*, 1(17), 79—83.

15. Grochaalska, D., Mroczek, J. (2001). Influence of soya bean preparations and reduced salt content on the quality of poultry sausages. *Medycyna weterynaryjna*, 57(1), 54—58.
16. Rodriguez, C., Frias, J. (2008). Correlations between some nitrogen fractions, lysine, histidine, tyrosine, and ornithine contents during the germination of peas, beans, and lentils. *Food Chemistry*, 108(1), 245—252.
17. Feldheim, W. (2000). The use of lupins in human nutrition. Proceedings of the 9—th International Lupin Conference. Auburn University: Auburn, 434—437.
18. Штонда, О. А. (2024). *Розробка технології ковбасних виробів з використанням гороху*: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.18.04. Київ, 20 с.
19. Pietrasic, Z., Janz, M. (2010). Utilization of pea flour, starch-rich and fiber-rich in low fat bologna. *Food Res. Int.*, 43(2), 602—608.
20. Yada, R. Y. (2004). *Protein in food processing*. Abington. Woodhead Publishing.
21. Гашук, О. І., Москалюк, О. Є., Горішний, П., Грищенко, О. А. (2019). Удосконалення технології м'ясо-рослинних консервів з використанням бобових. *Наукові праці НУХТ*, 25(6), 218—225.
22. Овсянникова, Л. К., Валевська, Л. О., Чумаченко, Ю. Д., Соколовська, О. Г. (2018). Харчова цінність та гігроскопічні властивості дрібнонасіненних бобових культур: зб. тез. доп. 78-ї наук. конф. викл. акад., Одеса, 29—31.
23. Гашук, О., Москалюк, О., Давиденко, А., Манькова, В. (2021). Посічені напівфабрикати — комплексні повноцінні продукти харчування: 9th International Scientific and Practical Conference "Fundamental and conducted studies in the modern world" (April 14—16, 2021) BoScience Publisher, Boston, USA, 268—274.
24. Маєвський, О., Матко, С., Бессараб, О. (2017). Встановлення кінетики набухання бобових залежно від технологічних факторів: матеріали 83 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», 5—6 квітня. К.: НУХТ, Ч. 1, 278.
25. Нечепуренко, К. Б., Пивоваров, П. П., Радченко, Л. О. (2019). Технологія термостабільних пружних емульсій для виробів із фаршів: монографія. ХДУХТ, Харків.
26. Паска, М. З., Маркович, І. І. (2014). Гістологічна характеристика напівкопчених ковбас із використанням різного вмісту борошна сочевиці. *ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького*, 16(2(59)), 165—163.
27. Черевко, О. І., Михайлов, В. М., Бабкіна, І. В., Ляшенко, Б. В., Лебединець, І. В. (2008). *Прогресивні процеси виробництва м'ясо-рослинних кулінарних виробів*: монографія. ХДУХТ, Харків.

УДК 664.664.6

STUDY OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BUCKWHEAT FLOUR DOUGH

L. Mykhonik, I. Pohorielov*National University of Food Technologies***I. Hetman,***Institute of Food Resources***Key words:**

flour,
green buckwheat,
structural and mechanical
properties,
nutritional value,
bakery products

Article history:

Received 12.09.2024

Received in revised form
25.09.2024

Accepted 10.10.2024

Corresponding author:

GM_Lora@i.ua

ABSTRACT

The article provides an analytical review of the use of buckwheat flour in the technology of bakery products. It is shown that the use of this raw material will improve the amino acid, mineral and vitamin composition of the products, will help to increase the content of food fibers in them and reduce the glycemic index, will help to expand the assortment of health products. Today, there are two types of buckwheat flour on the market — from green and dark buckwheat. Green buckwheat flour is made from thermally unprocessed groats, so it maximally preserves the entire range of macro- and micronutrients, biologically active substances. The use of flour from dark and green buckwheat in the baking industry requires the study of the technological properties of this raw material, including the rheological characteristics of the dough with it. The purpose of research, selected materials and research methods are formulated in the article. The results of a set of studies on the study of the structural and mechanical characteristics of wheat flour dough with the addition of 20% of dark and green buckwheat flour are presented.

With the help of a farinograph and alveograph, it was established that the addition of buckwheat flour increases the water absorption capacity and duration of dough formation, increases its thinning, elasticity and reduces extensibility, but at the same time its stability increases. The rheological characteristics of the dough with green buckwheat flour, namely its specific volume, duration of formation, stability, elasticity, P/L ratio, expansion index (G) are close to the corresponding values of the control sample, which indicates a smaller negative effect of this flour on the structural — mechanical properties of the dough.

The study of the shape-retaining and gas-retaining abilities showed that dough blanks with green buckwheat flour will have a larger volume than blanks with dark buckwheat flour, but at the same time they will fall and lose their shape faster.

Further research should be directed to the study of the influence of buckwheat flour on the course of the technological process and the quality of products in order to develop technological recommendations and optimal recipes for obtaining products with high consumer properties.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-4

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТІСТА З ГРЕЧАНИМ БОРОШНОМ

Л. А. Михонік¹, канд. техн. наук, ORCID ID 0000-0002-6997-2081

І. А. Гетьман², доктор філософії, ORCID ID 0000-0002-9448-9956

І. С. Погорєлов¹, аспірант, ORCID ID 0009-0000-7843-9556

¹Національний університет харчових технологій

²Інститут продовольчих ресурсів

У статті наведено результати досліджень структурно-механічних характеристик тіста з пшеничного борошна з додаванням борошна зеленої і темної гречки. За допомогою фаринографа та альвеографа було визначено водопоглинальну здатність, стійкість, тривалість утворення, еластичність, пружність, розтяжність, розрідження тіста. Визначено формоутримувальну та газоутримувальну здатності тіста. Встановлено, що борошно зеленої гречки в меншій мірі впливає на реологічні характеристики тіста, ніж борошно темної гречки. Отримані результати є підґрунтям для розробки технологічних заходів для покращення якості хліба з додаванням гречаного борошна.

Ключові слова: борошно, зелена гречка, структурно-механічні властивості, хлібобулочні вироби.

Постановка проблеми. Підвищення якості та конкурентоспроможності хлібобулочних виробів є одним із пріоритетних завдань хлібопекарської галузі. Виробники хлібобулочних виробів все частіше використовують інноваційні технології та інгредієнти в рецептурному складі, проте формування споживчих властивостей залежить від технологічних властивостей сировини, що використовується, зокрема борошна.

Сьогодні є актуальним включення до рецептур хлібних виробів, в тому числі і виробів тривалого зберігання (сухарів і бубличних виробів), продуктів переробки круп'яних і олійних культур — борошна, пластівців, зародків, висівків тощо. Серед різних видів борошна з круп'яних культур на особливу увагу заслуговує гречане, яке порівняно із сортовим пшеничним має вищий вміст білків зі збалансованим амінокислотним складом, мінеральних речовин, вітамінів, харчових волокон. Також це борошно має знижений глікемічний індекс, що є підставою для використання його в різних технологіях дієтичних і оздоровчих виробів. Виробники виготовляють борошно з темної та зеленої (термічно необробленої) гречки. Вивчення структурно-механічних властивостей тіста з пшеничного борошна з додаванням цих видів гречаного борошна дасть змогу спрогнозувати характер змін під час дозрівання тіста, формування і вистоювання тістових заготовок, які безпосередньо впливають на якість виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технології виробів функціонального та спеціального призначення стрімко розвиваються як в Україні, так і за кордоном. У торговельних мережах поряд із традиційними широко представлені оздоровчі хлібні вироби, збагачені продуктами переробки круп'яних, овочевих культур, сухофруктами, ядрами горіхів, насінням олійних культур тощо [1].

Для підвищення споживчих властивостей хліба доцільно частину пшеничного борошна замінити борошном круп'яних культур, яке дає змогу збалансувати вміст у виробках найважливіших макро- та мікронутрієнтів.

Перспективними видами борошна з точки зору харчової та біологічної цінності, вартості та доступності на ринку є борошно з темної і зеленої гречки.

Білки гречаного борошна характеризуються високим ступенем збалансованості за вмістом незамінних амінокислот, більшість з яких присутні в достатній кількості, але варто виділити лейцин, ізолейцин, сумарну кількість тирозину та фенілаланіну, валін і лізин. Завдяки значному вмісту лейцину білки гречаного борошна відносяться до багатих природних джерел цієї амінокислоти поряд з яєчним білком, казеїном, білком лісового горіха тощо [2].

Особливість гречаного борошна полягає також у тому, що воно не містить білка глютену, в ньому переважають альбуміни і глобуліни, які легко засвоюються організмом, що робить це борошно особливо цінним дієтичним продуктом. Коричневе (термооброблене) гречане борошно містить близько 13,6% білків, 1,2% жирів, 72,0% вуглеводів, які представлені переважною кількістю крохмалю та близько 2% цукрів, харчових волокон — до 9,0%, що позитивно впливає на шлунково-кишковий тракт організму людини. Жирнокислотний склад гречаного борошна характеризується наявністю поліненасичених жирних кислот (омега-3, омега-6). З мікро- та макроелементів міститься велика кількість фосфору, магнію, заліза та селену. Вітамінний склад різноманітний: більшість вітамінів групи В (В₁, В₂, В₄, В₅) та РР, дещо менше вітаміну Е та К. В гречаному борошні присутній рутин з групи флавоноїдів, який здатний поліпшувати роботу серцево-судинної системи організму людини, сприяючи зниженню артеріального тиску. Борошно характеризується високою водопоглинальною здатністю та здатністю до набухання, що потрібно враховувати при розробці нових рецептур.

Відсутність операції термооброблення у виробництві борошна зеленої гречки дає змогу максимально зберегти весь спектр макро- та мікронутрієнтів, біологічно активних речовин і ферментного комплексу. За хімічним складом борошно коричневої та зеленої гречки близькі, але в борошні зеленої гречки вищий вміст всіх вітамінів і мінеральних речовин. Борошно зеленої гречки містить дещо вищу кількість білка — 13—16%, вищу антиоксидантну активність (близько 155 мг/100г), більшу кількість харчових волокон (11—13%) [2—6].

Запропоновано рецептуру сухарів, яка складається з борошна житнього цільнозернового, борошна зеленої гречки, пшеничного борошна 1-го сорту, сухої пшеничної клейковини, висівки вівсяних, жмиху стевії, екстракту стевії та фруктози. Проведені медико-біологічні дослідження показали, що розроблені вироби скоректованого нутрієвтичного рецептурного складу можна рекомендувати для харчування у разі проведення антибіотикотерапії [7].

Встановлено, що різні фракції помелу і дозування гречаного борошна значно впливають на реологічні властивості тіста, які були представлені за допомогою регресійних моделей. Оптимальні реологічні властивості без зміни матриці тіста досягаються при використанні композитного борошна, що складається з 10,75% гречаного борошна з розміром частинок до 280 мкм та 89,25% пшеничного борошна [8].

Визначали вплив додавання до пшеничного борошна різної кількості гречаного (5, 10 і 15%) на фізичні показники тіста та споживчі властивості виробів. Результати показали, що додавання гречаного борошна до пшеничного борошна знижує розтяжність тіста, зменшує питомий об'єм, збільшує жорсткість і липкість м'якушки, погіршує розжовуваність, водночас знижується глікемічний індекс хліба [9].

Додавання цільнозернового гречаного борошна до білого пшеничного значно впливає на технологічні властивості тіста та може коригувати активність α -амілази в

пшеничному борошні, що сприяє покращенню якості випічки. Оптимальні показники числа падіння досягаються при додаванні 30—40% гречаного борошна. Однак збільшення вмісту гречаного борошна знижує вміст глютенівих білків і якість клейковини, підвищує поглинання води та значно збільшує час розвитку тіста, водночас знижуючи його стабільність. Технологічні параметри залежать від пропорції гречаного та пшеничного борошна [10].

Продукти переробки гречки (борошно і пластівці) призводять до незначного зниження реологічних властивостей тіста з пшеничного борошна та споживчих характеристик готових хлібобулочних виробів. Тісто з гречаними пластівцями, порівняно з тістом з гречаним борошном, має кращу формостійкість, більший питомий об'єм, а хліб відзначається більш еластичною м'якушкою з добре розвинутою і рівномірною пористістю [4].

Переважаюча кількість досліджень присвячена вивченню впливу борошна з темної гречки на перебіг технологічного процесу і структурно-механічні властивості тіста. Оскільки сьогодні поряд з борошном з темної гречки набуває популярності використання борошна зеленої гречки, доцільно дослідити і порівняти структурно-механічні властивості тіста з пшеничного борошна з додаванням цих видів гречаного борошна.

Метою досліджень є вивчення структурно-механічних властивостей тіста з пшеничного борошна з додаванням борошна темної та зеленої гречки.

Матеріали і методи. Використовували таку сировину: борошно пшеничне вищого сорту (ТМ «Київмлин») — контрольний зразок, борошно темної гречки (ТМ «Сто пудів»), борошно зеленої гречки (ТМ «Сто пудів»). В більшості технологічних рекомендацій для виробництва хлібобулочних виробів дозування продуктів переробки круп'яних культур становить 10—20% замість маси пшеничного борошна, тому для досліджень готували суміші з пшеничного борошна з додаванням борошна темної і зеленої гречки у співвідношенні 80:20%. Для визначення формотримувальної і газоутримувальної здатностей тіста готували дріжджове тісто з дозуванням пресованих дріжджів (ТМ «Львівські») в кількості 3% та солі кухонної харчової (ТМ «Добробут») в кількості 1,5% до маси борошна.

Структурно-механічні властивості тіста з пшеничного борошна та з суміші пшеничного і гречаного визначали за допомогою фаринографа Брабендера та альвеографа Шопена згідно з інструкціями до приладів в методиками, наведеними в джерелах [4, 11].

Фаринограф реєструє утворення тіста і його поведінку в умовах постійного механічного навантаження у вигляді безперервної кривої на діаграмному папері. Альвеограф призначений для визначення фізичних властивостей тіста за опором кульки тіста нагнітальному повітрю за розтягування його в бульбашку аж до розриву.

Газоутримувальну здатність тіста визначали, спостерігаючи за питомим об'ємом тіста під час його бродіння. У мірний циліндр 250 см³ поміщали 50 г тіста та витримували в термостаті при температурі 30 °С протягом 3 годин. Кожні 30 хв від початку замішування фіксували об'єм тіста [4, 12].

Формотримувальну здатність тіста характеризували за показником розпливання кульки тіста масою 100 г в процесі його бродіння за температури 30 °С протягом 180 хв. Кожні 30 хв фіксують середній діаметр кульки тіста [4, 12].

Результати досліджень. Визначення структурно-механічних властивостей тіста проводили для трьох зразків: 1 — контрольний зразок з пшеничного борошна вищого

сорту, 2 — зразок з додаванням 20% борошна зеленої гречки та 3 — зразок з додаванням 20% борошна темної гречки замість маси пшеничного.

На рис. 1 наведено фаринограми досліджуваних зразків.

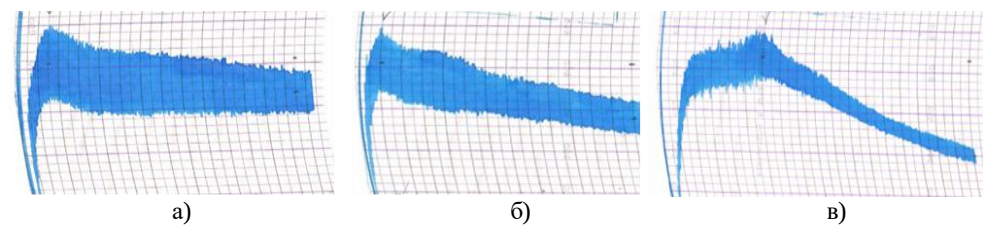


Рис. 1. Фаринограми: а) контроль; б) з 20% борошна зеленої гречки; в) з 20% борошна темної гречки

Результати розшифрування фаринограм (табл. 1) показали, що зразок з додаванням борошна темної гречки має більшу водопоглинальну здатність і подовжену тривалість утворення тіста, ніж контрольний зразок. Це відбувається внаслідок того, що технологія виготовлення цього борошна передбачає гідротермічну обробку, в результаті якої крохмаль частково клейстеризується та набуває високих гідрофільних властивостей. При цьому спостерігається зростання стійкості тіста, що можна пояснити підвищеною, порівняно з іншими зразками, водопоглинальною та водоутримувальною здатністю.

Таблиця 1. Властивості тіста, визначені за допомогою фаринографа

Показник	Пшеничне борошно вищого сорту	Внесено 20% замість маси пшеничного борошна	
		борошна зеленої гречки	борошна темної гречки
Водопоглинальна здатність, %	56,2—56,8	54,6—55,8	73,1—75,0
Тривалість утворення тіста, хв	1,5	1,0	6,0
Стійкість тіста, хв	0,5	0,2	1,0
Розрідження, од. ф.	75	130	230
Еластичність, од. ф.	140	130	80

Зразки з гречаним борошном мають вищу величину розрідження, що, ймовірно, пов’язано з піддатливістю складових цих видів борошна дії амілолітичних і протеолітичних ферментів, але при цьому показник розрідження в зразку з борошном темної гречки втричі вищий, ніж у контрольному зразку. Еластичність тіста в зразку з борошном зеленої гречки близька до контролю, а в зразку з борошном темної гречки погіршилась на 60 од. приладу.

На рис. 2 зображено альвеограми тіста з пшеничного борошна та із сумішей пшеничного з гречаними видами борошна.

Результати розшифрування альвеограм показали (табл. 2), що найбільшу пружність має зразок з борошном темної гречки. Поряд з цим цей зразок має найменший показник розтяжності і, відповідно, найбільше відношення Р/Л.

У зразку з борошном зеленої гречки відношення Р/Л близьке до відповідного показника в контрольному зразку з пшеничного борошна вищого сорту, що свідчить про утворення більш зв’язаної та еластичної тістової маси.

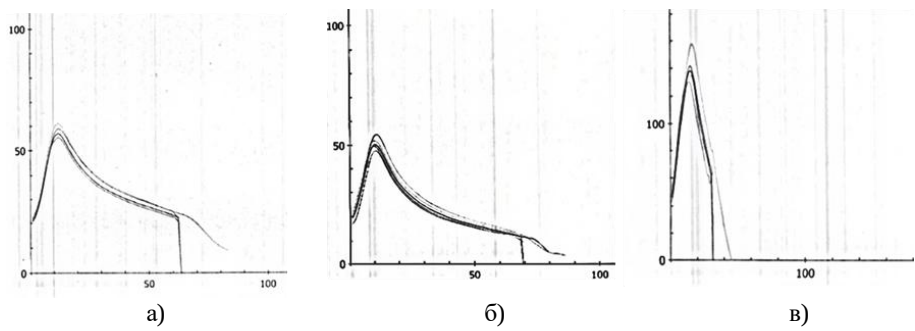


Рис. 2. Альвеограми: а) контроль; б) з 20% борошна зеленої гречки; в) з 20% борошна темної гречки

Таблиця 2. Властивості тіста, визначені за допомогою альвеографа

Показник	Пшеничне борошно вищого сорту	Внесено 20% замість маси пшеничного борошна	
		борошна зеленої гречки	борошна темної гречки
Пружність, Р, мм	81	55	152
Розтяжність, L, мм	90	68	30
Індекс розширення, G	21,1	18,4	12,2
Робота деформації, W, Дж	260×10^{-4}	110×10^{-4}	194×10^{-4}
Відношення P/L	0,9	0,81	5,07

Індекс розширення, що характеризує об’єм повітря, витраченого на надування кульки тіста, найбільший у контрольному зразку, дещо менше значення має зразок з борошном зеленої гречки.

При замішуванні тіста з пшеничного борошна питомі витрати енергії на його деформацію склали 261×10^{-4} Дж, тоді як додавання борошна з темної гречки знижує цей показник в 1,3 раза, а борошна з зеленої гречки — в 2,4 раза, що характерно для борошна, слабкого за силою.

Отже, внесення гречаного борошна погіршує структурно-механічні властивості тіста, ймовірно, внаслідок відсутності в цьому борошні клейковинних білків, відмінностей у вуглеводному складі і розмірах та стані крохмальних зерен. Але слід зауважити, що тісто з додаванням борошна зеленої гречки більш близьке до контролю за тривалістю утворення, стійкістю, еластичністю, пружністю та розтяжністю. Додавання борошна з темної гречки суттєво відображається на всіх реологічних показниках, визначених за допомогою фаринографа та альвеографа, що потребує впровадження заходів, які б забезпечили покращення пружно-еластичних властивостей.

Визначення формоутримувальної здатності тіста показало (рис. 3), що порівняно з контролем кулька з додаванням борошна темної гречки має менший відсоток розпливання, ймовірно, внаслідок високої водопоглинальної і водоутримувальної здатності цього борошна. Кулька з борошна зеленої гречки характеризується майже в півтора раза більшим відсотком розпливання. Можна припустити, що це пов’язано з ферментним комплексом цього борошна.

Вивчення газоутримувальної здатності тіста свідчить (рис. 4), що через 120 хв бродіння в циліндрі зразок з борошном зеленої гречки має на 8%, а зразок з борошном

темної гречки — на 30% менший об'єм порівняно з контролем. При цьому тісто із зеленою гречкою починає опадати через 150 хв бродіння, а контроль і тісто з темною гречкою зберігають максимальний об'єм навіть через 180 хв бродіння, що узгоджується з показниками стійкості тіста, отриманими за допомогою фаринограм.

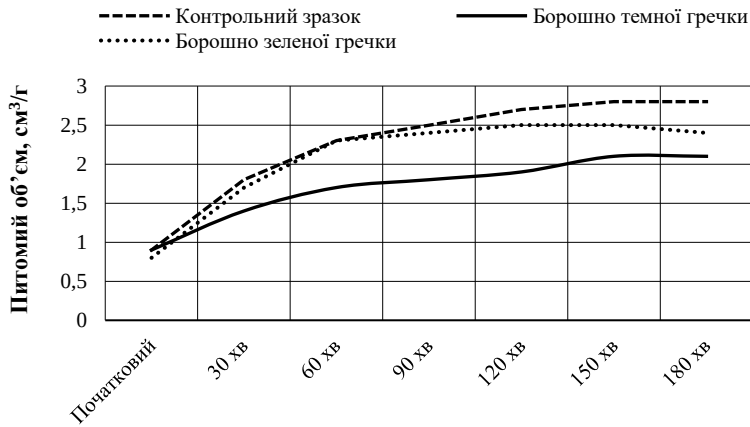


Рис. 3. Розпливання кульки тіста з додаванням 20% гречаного борошна

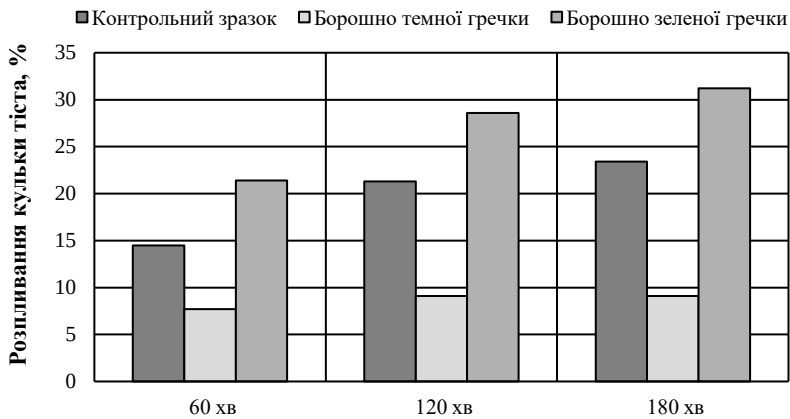


Рис. 4. Питомий об'єм тіста з додаванням 20% гречаного борошна

Отже, за результатами досліджень формотримувальної і газотримувальної здатностей можна прогнозувати, що тістові заготовки з борошном зеленої гречки будуть мати більший об'єм, ніж заготовки з борошном темної гречки, але при цьому швидше опадатимуть і втрачатимуть форму.

Висновки. Використання гречаного борошна в технології хлібобулочних виробів дає змогу отримати вироби з підвищеною харчовою і біологічною цінністю, зниженим глікемічним індексом. Сьогодні на ринку представлено два види цього борошна — з темної і зеленої гречки. З метою раціонального застосування цієї сировини необхідно вивчати її технологічні властивості, зокрема і структурно-механічні характеристики тіста з неї.

Вивчення реологічних властивостей тіста з пшеничного борошна з внесенням 20% гречаного борошна показало, що борошно з темної гречки підвищує водопоглинальну здатність і тривалість утворення тіста, збільшує його розрідження, пружність і знижує розтяжність, але при цьому його стійкість зростає. Реологічні характеристики тіста з борошном зеленої гречки, зокрема його питомий об'єм, тривалість утворення, стійкість, еластичність, відношення P/L, індекс розширення (G), близькі до відповідних значень контрольного зразка, що свідчить про менший негативний вплив цього борошна на структурно-механічні властивості тіста.

Проведені дослідження потребують подальшого вивчення впливу гречаного борошна на перебіг технологічного процесу і якість виробів з метою розробки технологічних рекомендацій і оптимальних рецептур для одержання виробів з високими споживчими властивостями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дробот, В. І. (2020). *Хліб і здоров'я населення. Інноваційні технології у хлібопекарському виробництві: матеріали міжнародних науково-практичних конференцій*, 17—24 листопада, Київ: НУХТ, 37—38.
2. Дубініна, А., Попова, Т., Ленерт, С. (2014). Вітамінний і мінеральний склад крупи із гречки різних сортів. *Товари і ринки*, 2, 106—115.
3. Дзюндзя, О., Звагольська, К. (2021). Аналіз нетрадиційної борошняної сировини для виробництва хлібобулочних виробів. *Таєрійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 1, 22—29.
4. Drobot, V., Semenova, A., Smirnova, J., Mykhonik, L. (2014). Effect of Buckwheat Processing Products on Dough and Bread Quality Made from Whole-Wheat Flour. *International Journal of Food Studies*, 3(1), 1—12.
5. Tang, C. H., Wang, X. Y. (2010). Physicochemical and structural characterisation of globulin and albumin from common buckwheat seeds. *Food Chemistry*, 121(1), 119—126. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.016>.
6. Dziadeka, K., Kopeć, A., Pastucha, E., Piątkowska, E., Leszczyńska, T., Pisulewska, E., Witkiewicz, R., Francik, R. (2016). Basic chemical composition and bioactive compounds content in selected cultivars of buckwheat whole seeds, dehulled seeds and hulls. *Journal of Cereal Science*, 69, 1—8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.02.004>.
7. Сімонова, А. О., Соколова, Н. Ю. (2018). Використання борошна зеленої гречки в технології хлібобулочних виробів пониженої вологості для зниження їх глікемічного індексу. *Проблеми формування здорового способу життя у молоді: зб. матеріалів XI Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студ. з міжнар. участю. Одеса*. 76—77.
8. Coțovanu, I., & Mironeasa, S. (2021). Buckwheat seeds: Impact of milling fractions and addition level on wheat bread dough rheology. *Applied Sciences*, 11(4), 1731.
9. Liu, W., Brennan, M., Serventi, L., & Brennan, C. (2017). Buckwheat flour inclusion in Chinese steamed bread: Potential reduction in glycemic response and effects on dough quality. *European Food Research and Technology*, 243, 727—734.
10. Stefan, E. M., Voicu, G., Constantin, G. A., Ipate, G., & Munteanu, M. (2018). Effect of whole buckwheat flour on technological properties of wheat flour and dough. *Conference: 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, Jelgava, Lotwa, 23, 1533—1538.
11. Shevchenko, A., Galenko, O. (2021). Citrates of mineral substances in the technological process of manufacturing bakery products. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 27(1), 182—187.
12. Шевченко, А. О., Літвинчук, С. І., Галенко, О. О. (2023). Структурно-механічні та конформаційні зміни в процесі виготовлення пшеничного хліба з концентратом рисового протеїну. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 29(4), 176—184.

УДК 637.146.34

SCIENTIFIC RATIONALE FOR THE FORMULATION OF YOGURTS WITH STARCH DERIVATIVES

H. Polishchuk, O. Ivashchenko
National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
yogurt dry skimmed milk residue protein glucose syrup maltodextrin quality indicators	The article analyzes the current requirements for the chemical composition of yogurt with fillers, particularly in terms of the content of milk-solids-nonfat (MSNF) and protein. According to existing regulatory requirements in various countries, the minimum MSNF content in yogurt should range from 8.2% to 8.6%, with protein content not less than 2.7—2.8%. The calculation method confirmed that without the additional inclusion of dry dairy products (with a high MSNF content) into the standardized mixture based on skimmed milk and cream (where the MSNF content does not exceed 8.7%), it is impossible to produce dessert yogurt with starch derivatives (maltodextrin and dry glucose syrup) in a technologically feasible amount of 9%. To standardize the chemical composition of yogurt with fillers, dry demineralized whey with a 40% demineralization level was selected as a source of MSNF. The formulations of yogurt with a minimally required MSNF content varying between 8.2% and 8.6% were calculated. It was demonstrated that the organoleptic and physicochemical characteristics of yogurt samples with starch derivatives and dry demineralized whey in amounts ranging from 0.32% to 0.77% change insignificantly. The protein content in the studied yogurt samples ranges from 2.91% to 2.99%, fully complying with regulatory requirements. Based on basic formulations of yogurt with starch derivatives and dry demineralized whey, original formulations were developed with chicory extract and sesame tahini. Formulations of yogurt with flavor fillers containing 1% chicory extract and 4% sesame tahini are recommended for implementation to expand the range of fermented beverages with enhanced nutritional value.
Article history:	
Received 28.11.2024 Received in revised form 30.11.2024 Accepted 07.12.2024	
Corresponding author: milknuft@i.ua	

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-5

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЦЕПТУРНОГО СКЛАДУ ЙОГУРТУ З КРОХМАЛЕПРОДУКТАМИ

Г. Є. Поліщук, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-3013-3245

О. М. Іващенко, аспірант, ORCID ID: 0000-0001-9477-619X

Національний університет харчових технологій

У статті проаналізовано вимоги до вмісту сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ) і білка в йогурті з наповнювачами. Виявлено, що мінімальний вміст СЗМЗ в йогурті з наповнювачами становить від 8,2 до 8,6%, а білка — від 2,7 до 2,8%. Для нормалізації йогурту за вмістом СЗМЗ з мальтодекстрином і глюкозним сиропом у кількості 9% обрано суху демінералізовану сироватку. Розраховано базові рецептури йогурту з унормованим вмістом СЗМЗ та оригінальні рецептури йогурту зі смако-ароматичними інгредієнтами.

Ключові слова: йогурт, сухий знежирений молочний залишок, білок, глюкозний сироп, мальтодекстрин, показники якості.

Вступ. Йогурт є популярним ферментованим молочним напоєм з характерною густою консистенцією, що обумовлено підвищеним вмістом сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ) [1]. Однак у різних країнах світу вимоги до хімічного складу йогурту, зокрема з наповнювачами, доволі суттєво відрізняються. Так, у деяких країнах пострадянського простору згідно з чинним міждержавним стандартом (ГОСТ 31981-2013) масова частка білка в йогуртах з наповнювачами повинна складати не менше 2,8%, а масова частка СЗМЗ — не менше 8,5%. Для досягнення вказаних вимог масову частку СЗМЗ у молоці рекомендовано нормалізувати до вмісту не менше 9,5%, зокрема до вмісту білка не нижче 3,2%.

В Україні чинний ДСТУ 4343:2004 «Йогурти. Загальні технічні умови» регламентує у складі йогурту масову частку «сухих знежирених речовин» не менше 9,5%, що викликає низку питань. По-перше, у цьому стандарті не уточнено, про які «сухі знежирені речовини» йдеться — сухі речовини молока чи їх сукупний вміст разом з сухими речовинами цукру і наповнювачів у складі йогуртів десертного призначення? По-друге, відсутня інформація про вміст «сухих знежирених речовин» для йогуртів з наповнювачами, але вказана масова частка цукру (не менше 5%) для йогурту або з цукром, або з фруктовими наповнювачами. Інші види підсолоджувачів не вказані, хоча, відповідно до вимог Управління з контролю за продуктами й ліками США (FDA) (CFR — Code of Federal Regulations, Title 21), до складу йогурту можна додавати всі безпечні вуглеводні та непоживні підсолоджувачі за мінімального вмісту СЗМЗ 8,25%, з яких білка має бути не менше 2,7%, що ідентичне його значенню у натуральному молоці. Codex Alimentarius [2] і Національне агентство з контролю за якістю харчових продуктів і ліків (NAFDAC) [3] також регламентують мінімальний вміст білка в молоці для виробництва йогурту, який має бути не меншим за 2,7%.

Всесвітньо відомий вчений А. Таміме [4] наводить узагальнений діапазон мінімального вмісту СЗМЗ у йогурті, що коливається у межах від 8,2 до 8,6 г/100 відповідно до вимог стандартів у різних країнах світу.

Зважаючи на зазначене вище, під час розроблення рецептур йогурту, зокрема десертного призначення, що містить підсолоджувачі та наповнювачі, необхідно враховувати вказані вище діапазони вмісту СЗМЗ та білка згідно із загальноприйнятими нормативними вимогами.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Для підтримки балансу щодо вмісту СЗМЗ і білка в рецептурах йогурту зазвичай передбачають застосування сухого знежиреного молока і сухих білкових концентратів [5]. Для додаткового структурування йогурту часто застосовують харчові натуральні або хімічно модифіковані гідролоїди, але вони можуть спричинювати вади консистенції продукту за надмірного (желеподібна) або недостатнього (текуча) структурування [6].

У Національному університеті харчових технологій (м. Київ) розроблено технологію йогурту питного із сухими структуруючими та підсолоджуючими крохмалепродуктами — мальтодекстрином і глюкозним сиропом [7]. Доведено можливість повної заміни цукру і сухого знежиреного молока у складі йогурту жирністю 1% на крохмалепродукти в кількості 9%. Вказаний вміст крохмалепродуктів у йогурті науково обґрунтований авторами і дає змогу одержувати продукт високої якості за органолептичними, фізико-хімічними та мікробіологічними показниками [8, 9]. У разі низького вмісту СЗМЗ у вихідному молоці цей показник підвищували шляхом нормалізації молочної суміші з крохмалепродуктами до показника не нижче 8,2%, у тому числі за вмістом білка не менше 2,7%.

Згідно з «Положенням про молоко та молочні продукти, 2005», розробленим Національним агентством з контролю за якістю харчових продуктів і ліків (NAFDAC) [10], для нормалізації вихідного молока за вмістом СЗМЗ у технології йогурту дозволено застосовувати такі білково-вуглеводні та білкові молочні концентрати: сухе молоко, сухе знежирене молоко, згущену сироватку, суху сироватку, сироваткові протеїни, концентрати сироваткового білка, харчовий казеїн та казеїнати. З наведеного переліку найдешевшою є згущена та суха сироватка. Зокрема, суха демінералізована сироватка (СДС) як джерело СЗМЗ більше, ніж удвічі дешевша, порівняно із сухим знежиреним молоком, а демінералізація сироватки дає змогу уникати надлишкового відчуття солоності в йогурті, тому саме цей сухий продукт переробки сироватки було обрано як найбільш перспективне та економічно вигідне джерело СЗМЗ з метою нормалізації молочних сумішей для виробництва йогурту з крохмалепродуктами.

Для нормалізації молока сухою демінералізованою сироваткою в більш широкому діапазоні рекомендованих у різних країнах світу значень СЗМЗ (від 8,2 до 8,6%) для йогурту жирністю 1% з вмістом 9% крохмалепродуктів та з новими смако-ароматичними інгредієнтами необхідно провести відповідні розрахунки, розробити базові рецептури та перевірити вплив варійованого вмісту СЗМЗ на якість готового продукту.

Для надання йогурту з крохмалепродуктами привабливих кольору, смаку та аромату, а також для збагачення біологічно цінними сполуками [11, 12], доцільним є розроблення оригінальних рецептур продукту на основі базових (типових) рецептур із застосуванням натуральних смако-ароматичних інгредієнтів. Одним з найбільш прийнятних для поєднання з кисломолочною основою є екстракт цикорію, який як смако-ароматичний і барвний інгредієнт застосовують у складі різноманітних напоїв [13], а також як харчову добавку у медичній практиці [14]. Цикорій є імуномодуючим, протипухлинним, антиоксидантним і пребіотичним інгредієнтом, рекомендованим для дієтичного і лікувально-профілактичного харчування [15]. Прийнятність застосування екстракту цикорію у кількості 1% у складі йогурту, що містить % сухого знежиреного молока, 0,2% пектину та 1,5% цукру доведено Дж. Дана та ін. [16]. Принципово новим наповнювачем у складі йогурту також може бути кунжутна паста тахіні, виготовлена з очищеного смаженого насіння білого кунжута. Хімічний складу пасти тахіні: 22,9—24,7% білка, 58,9—59,2% жирів, 2,3%

клітковини, 3,0% золи та < 1,0% вологи. 85% жирних кислот кунжуту відносяться до поліненасичених. Олеїнової кислоти міститься 42,4%, лінолевої — 39,7%, пальмітинової — 9,8%, стеаринової — 6,4%. Паста також містить, (мг/100 г): фосфор (692), магній (362), ферум (7,19), купрум (1,96), манган (1,46) і цинк (7,82) [17]. Інформація про застосування кунжутної пасти тахіні у складі йогурту відсутня. Вказані натуральні інгредієнти, які виготовляють в Україні і позитивно впливають на організм людини, цілком можливо застосувати для розробки нових оригінальних рецептур йогурту з крохмалепродуктами та унормованим вмістом СЗМЗ.

Отже, за результатами проведеного теоретичного аналізу сучасного стану питання щодо вимог до складу йогуртів, зокрема вмісту СЗМЗ, та наявних на вітчизняному ринку перспективних і натуральних наповнювачів, визначено критерії та рецептурні складові для розроблення оригінальних рецептур йогурту з крохмалепродуктами і смако-ароматичними інгредієнтами.

Метою дослідження є розроблення нових рецептур йогурту з крохмалепродуктами та наповнювачами з урахуванням нормативних вимог до його хімічного складу, зокрема за вмістом сухого знежиреного молочного залишку і білка.

Матеріали і методи. Зразки йогурту готували із застосуванням таких крохмалепродуктів:

- сиропу глюкозного сухого, виготовленого відповідно до ТУ 10.6-00383372-023:2022 «Сиропа глюкозні сухі. Технічні умови» (ТОВ Інестарч Україна), декстрозний еквівалент якого становить 40;
- мальтодекстрину МД-18, виготовленого відповідно до ТУ У 10.6-00383372-015:2018 «Мальтодекстрин. Технічні умови» (ТОВ Інестарч Україна), декстрозний еквівалент якого 20.

Для нормалізації молочних сумішей за вмістом СЗМЗ використовували суху демінералізовану сироватку з рівнем демінералізації 40% (ТУ У 15.5-00419880-089:2009 «Сироватка молочна демінералізована суха (СД-НФ). Технічні умови»), виготовлену на ТОВ «Літинський молочний завод» (Україна).

Як наповнювачі використовували екстракт цикорію, виготовлений відповідно до ТУ У 15.8-02133509-001-2002 «Цикорій розчинний. Технічні умови» на ТДВ «Славутський цикорієсушильний завод» і кунжутну пасту тахіні з очищеного смаженого насіння білого кунжута преміального сорту Humera (ТУ У 10.3-41471489-001:2017, виробник «SigNature», Україна).

У нормалізовані пастеризовані та охолоджені до температури 40—42 °С молочні суміші з крохмалепродуктами вносили активовану закваску для йогурту (*Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus*) і ферментували їх за температури 41±1 °С до досягнення значень титрованої кислотності згустку не нижче 80 °Т. Екстракт цикорію вносили в нормалізовану молочну суміш з крохмалепродуктами до пастеризації, а пасту тахіні — у згусток під час перемішування перед фасуванням.

Активну кислотність визначати потенціометричним методом за допомогою лабораторного вимірювача pH/MV/ISE/Temp ADWA AD1200 ATC. Умовну в'язкість перемішаних до гомогенного стану зразків йогурту за температури 20 °С вимірювали за допомогою віскозиметра ВЗ-246.

Ступінь синерезису визначали фільтруванням 100 см³ кисломолочних згустків через паперовий фільтр вимірюванням об'єму відділеної сироватки у см³ впродовж 30 хв.

Органолептичні властивості зразків йогурту оцінювали шляхом сенсорного профілювання за п'ятибальною описовою шкалою відповідно до стандартного методу ISO [EN ISO 13299:2016] за сенсорними атрибутами: зовнішній вигляд, консистенція, колір, смак, запах. Одержані за кожною з п'яти характеристик бали перераховували з урахуванням коефіцієнтів вагомості: смак — 0,3, консистенція — 0,3, аромат — 0,2, зовнішній вигляд — 0,1, колір — 0,1. Оцінку рівня якості кожного зразка йогурту проводили за таким диференціюванням: 21—25 балів відмінний; 16—20,9 бала — добрий; 11—15,9 бала — задовільний; 6—10,9 бала — поганий (практично неприйнятний); менше 6 балів — дуже поганий (неприйнятний).

Показники якості зразків йогурту аналізували відразу після виготовлення і після 7 та 14 діб зберігання.

Обробку статистичних даних проведено за допомогою програми Statistika 10 за заданої три-, п'ятикратної повторюваності.

Результати досліджень. З метою вивчення впливу СЗМЗ у кількості від 8,2 до 8,6% на показники якості йогурту було проведено розрахунки рецептурного складу молочних сумішей з крохмалепродуктами. Кількісний діапазон вмісту СЗМЗ було обрано відповідно до даних А. Таміме [4]. Для розрахунку було прийнято такий усереднений склад молочних складових [18].

- нормалізоване молоко для виробництва 1% йогурту: білки — 3,2%, молочний жир — 1,1%, вуглеводи (лактоза) — 4,8%, мінеральні сполуки — 0,7%, СЗМЗ — 8,7%;

- суха сироватка зі ступенем демінералізації 40%: СЗМЗ — 97%, білка — 11,5%, лактози — 73,0%, мінеральних речовин — 6,3%.

Для розрахунку кількості СДС, призначеної для нормалізації молочних сумішей з крохмалепродуктами за вмістом СЗМЗ, були задані такі базові показники йогурту:

- масова частка жиру — 1,0%;
- масова частка СЗМЗ — 8,2% (зразок 1), 8,4% (зразок 2) і 8,6% (зразок 3);
- масова частка сухого крохмалепродукту (мальтодекстрину МД-18 або сухого глюкозного сиропу) — 9%.

Результати розрахунку рецептур і хімічного складу двох варіантів йогурту з крохмалепродуктами, що містять 8,2% і 8,6% СЗМЗ, наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Рецептурний і хімічний склад нормалізованих за вмістом СЗМЗ молочних сумішей для виробництва йогурту м. ч. ж. 1% з крохмалепродуктами

Рецептурні компоненти та хімічні складові	Контрольний зразок	Зразок 1 (нижня межа вмісту СЗМЗ)	Зразок 2 (середній вміст СЗМЗ)	Зразок 3 (верхня межа вмісту СЗМЗ)
Рецептурний склад, %				
Молоко	91,0	90,68	90,47	90,23
СДС	—	0,32	0,53	0,77
Сухий крохмалепродукт	9,0	9,0	9	9,0
Всього:	100,0	100,0	100	100,0
Хімічний склад, %				
Білок	2,91	2,95	2,97	2,99
Лактоза	4,37	4,59	4,75	4,91
Вуглеводи крохмалепродукту	8,73	8,73	8,73	8,73
Мінеральні сполуки	0,64	0,66	0,68	0,70
СЗМЗ	7,92	8,2	8,4	8,6

Отже, розрахунковим методом підтверджено, що без додаткового внесення сухих молочних продуктів у молоко з масовою часткою СЗМЗ не більше 8,7%, неможливо виготовити йогурт десертного призначення з унормованим вмістом СЗМЗ і заданою масовою часткою крохмалепродуктів, що становить 9%.

Відповідно до складу рецептур масова частка білка в контрольному і досліджуваних зразках знаходиться у межах від 2,91 до 2,99%, що повністю відповідає вимогам Codex Alimentarius (не менше 2,7%) [2]. Для унормування хімічного складу йогурту за вмістом СЗМЗ у межах від 8,2 до 8,6% до складу рецептур достатньо увести від 0,32 до 0,77% СДС, що є цілком виправданим як з технологічної, так і економічної точки зору.

Розраховані базові рецептури були використані для виготовлення зразків йогурту з варійованим вмістом СЗМЗ та двома видами сухих крохмалепродуктів — мальтодекстрином і глюкозним сиропом у кількості 9%. Зразки йогурту досліджували за органолептичними та фізико-хімічними показниками.

Фізико-хімічні показники йогурту з крохмалепродуктами та варійованим вмістом СЗМЗ наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Фізико-хімічні показники йогурту з крохмалепродуктами та варійованим вмістом СЗМЗ (n = 3, P ≥ 0,95)

Досліджувані зразки йогурту	Активна кислотність, од. рН	Ступінь синерезису, см ³	Умовна в'язкість, с
М. ч. СЗМЗ 7,92%			
Контроль з МД-18	4,74±0,05	0,75±0,01	24,5±1,2
Контроль з СГС	4,58±0,04	1,10±0,04	18,3±0,9
М. ч. СЗМЗ 8,2%			
Зразок з МД-18	4,72±0,07	0,50±0,01	26,0±1,0
Зразок з СГС	4,55±0,07	0,93±0,03	20,7±0,9
М. ч. СЗМЗ 8,4%			
Зразок з МД-18	4,70±0,04	0,45±0,01	27,5±1,1
Зразок з СГС	4,53±0,06	0,87±0,03	21,5±0,9
М. ч. СЗМЗ 8,6%			
Зразок з МД-18	4,70±0,06	0,40±0,01	29,5±1,3
Зразок з СГС	4,53±0,06	0,75±0,02	22,0±1,0

За даними табл. 2 можна відзначити певне зниження ступеня синерезису та незначне підвищення умовної в'язкості йогурту за збільшення вмісту СЗМЗ, що пояснюється додатковим внесенням у зразки сухих речовин молока. Активна кислотність зразків дещо знижується внаслідок активізації молочнокислих бактерій в присутності доданої кількості лактози і мінеральних речовин у складі СДС. Сухий мальтодекстрин і сухий глюкозний сироп по-різному впливають на фізико-хімічні показники йогурту, зважаючи на особливості хімічного складу, обумовленого ступенем деструкції макромолекул крохмалю (декстрозним еквівалентом), що було доведено в попередніх дослідженнях [7]. За результатами дослідження органолептичних характеристик зразків йогурту суттєвих відмінностей не виявлено.

Отже, можна зробити висновок, що присутність структуруючих і підсолоджуючих крохмалепродуктів різного хімічного складу у кількості 9% більшою мірою впливають на фізико-хімічні та органолептичні показники йогурту, ніж підвищення вмісту СЗМЗ на 0,28—0,68%. Тож цілком можливо одержувати продукт достатньо

високої споживчої якості навіть за найнижчого унормованого вмісту СЗМЗ (8,2%) у йогурті з крохмалепродуктами без смако-ароматичних наповнювачів.

На основі базових рецептур з унормованим вмістом СЗМЗ було розроблено декілька оригінальних рецептур зі смако-ароматичними інгредієнтами — екстрактом цикорію і пастою тахіні. Масову частку екстракту цикорію було обрано, зважаючи на його рекомендований вміст у йогурті — до 1,0% [16], а вміст пасти тахіні обрано, зважаючи на її рекомендований вміст у молочних крохмальних кремах і молочних пастах для дитячого харчування — до 4% [19, 20]. Для визначення раціонального вмісту інгредієнтів досліджували дві групи зразків — з екстрактом цикорію (0,6—1,0%) і пастою тахіні (2—4%).

Для розроблення рецептури з цикорієм, зважаючи на незначне зниження вмісту молока, за базову було обрано суміш з м. ч. СЗМЗ 8,4%, а для рецептури з тахіні, за більшого вмісту цієї пасти, обрано базову суміш з м. ч. СЗМЗ 8,6%.

Рецептури зразків йогурту з екстрактом цикорію і пастою тахіні наведені у табл. 3—4.

Таблиця 3. Рецептури йогурту з мальтодекстрином МД-18 та екстрактом цикорієм

Рецептурні компоненти	Масова частка екстракту цикорію, %			
	0 (контроль 1)	0,6 (зразок 1)	0,8 (зразок 2)	1,0 (зразок 3)
Молоко 1,11%	90,47	89,87	89,67	89,47
СДС	0,53	0,53	0,53	0,53
Сухий крохмалепродукт	9	9,0	9,0	9,0
Екстракт цикорію	—	0,6	0,8	1,0
Всього:	100,0	100,0	100,0	100,0
СЗМЗ	8,4	8,33	8,31	8,29

Таблиця 4. Рецептури йогурту з сухим глюкозним сиропом і пастою тахіні

Рецептурні компоненти	Масова частка пасти тахіні, %			
	0 (контроль 2)	2 (зразок 4)	3 (зразок 5)	4 (зразок 6)
Молоко 1,11%	90,23	88,23	87,23	86,23
СДС	0,77	0,77	0,77	0,77
Сухий крохмалепродукт	9,0	9,0	9,0	9,0
Паста тахіні	—	2	3	4
Всього:	100,0	100,0	100,0	100,0
СЗМЗ	8,6	8,43	8,34	8,25

Результати визначення фізико-хімічних показників йогурту з цикорієм і йогурту з тахіні, у тому числі впродовж зберігання терміном до 14 діб, наведено на рис. 1—3. Позначення зразків на рисунках відповідають позначенням, наведеним у табл. 3—4.

Відповідно до рис. 1 активна кислотність зразків з екстрактом цикорію дещо нижча, порівняно з контрольним зразком, за наявності кислотних сполук в екстракті, що підтверджується результатами досліджень Г. Фещенко [21]. Впродовж зберігання екстракт цикорію певною мірою стримує зниження кислотності, що можна пояснити високим вмістом в екстракті вологозв’язуючого полісахариду — інуліну, який відіграє роль стабілізатора. Екстракт цикорію у йогурті дещо гальмує синерезис і підвищує умовну в’язкість йогурту за рахунок ймовірної взаємодії між молочними білками та інуліном [22].

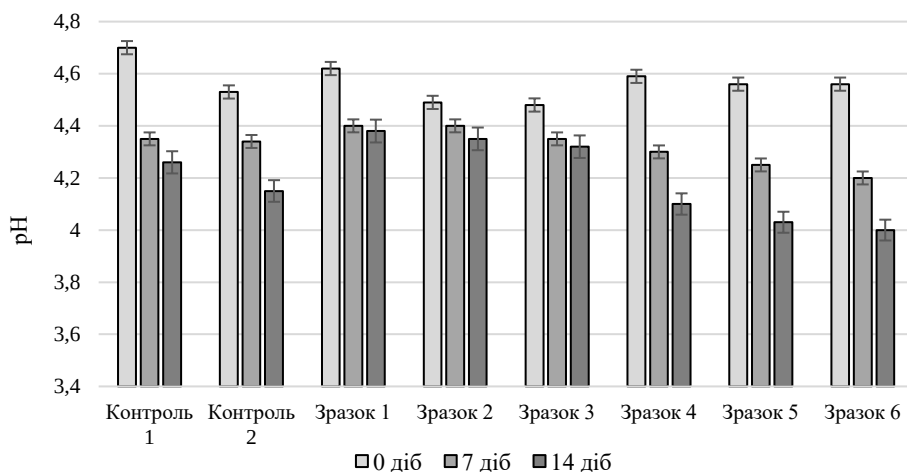


Рис. 1. Динаміка зміни активної кислотності зразків йогурту впродовж зберігання

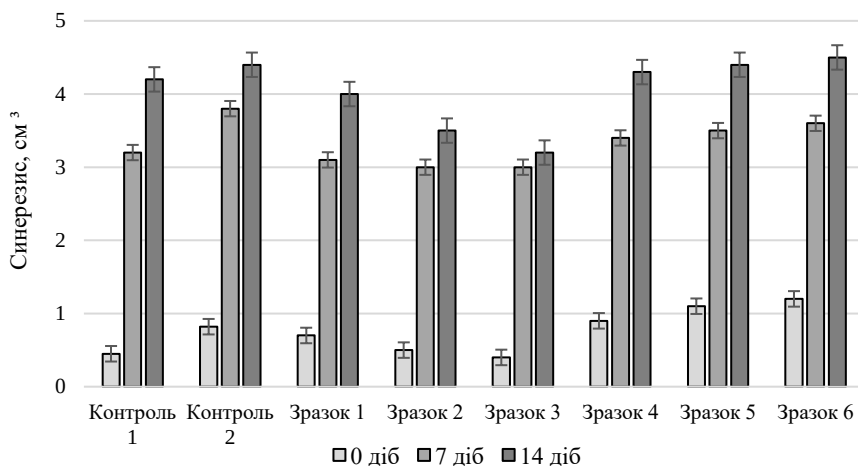


Рис. 2. Динаміка зміни синерезису зразків йогурту впродовж зберігання

Що стосується здатності згустку йогурту утримувати вологу (рис. 2), то слід відмітити суттєве покращання цього показника, порівняно з контрольним зразком, для продукту з екстрактом цикорію. Цей ефект може бути результатом утворення комплексів «інулін-сироваткові білки» [23], які зміцнюють тримірну сітку молочно-білкового гелю. На відміну від екстракту цикорію, паста тахіні навіть дещо підвищує синерезис йогурту зі збільшенням вмісту цього наповнювача на тлі зниження вмісту СЗМЗ від 8,43 до 8,25% та відповідного порушення цілісності згустку твердими рослинними часточками пасты.

За даними, наведеними на рис. 3, очевидним є те, що умовна в'язкість зразків йогурту (рис. 3) залежить від таких чинників: виду крохмалепродукту (мальтодекстрин має вищу структуруючу здатність, порівняно з глюкозним сиропом), вмісту сухих речовин, у тому числі наповнювача, утворення комплексів між інуліном і білками (для зразків з екстрактом цикорію).

За результатами комплексної органолептичної оцінки було одержано загальний зважений бал зразків йогурту, за яким було визначено їхній рівень якості (табл. 5).

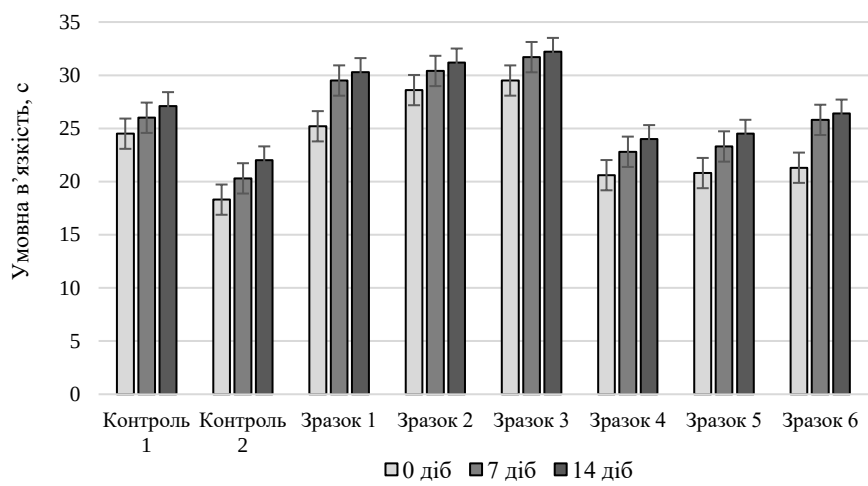


Рис. 3. Динаміка зміни умовної в’язкості зразків йогурту впродовж зберігання

Таблиця 5. Загальний зважений бал і рівень якості зразків йогурту з наповнювачами за результатами органолептичної оцінки

Зразки йогурту	Загальний зважений бал	Рівень якості
Зразок 1	20,7	добрий
Зразок 2	25,0	відмінний
Зразок 3	22,1	відмінний
Зразок 4	20,5	добрий
Зразок 5	23,5	відмінний
Зразок 6	19,8	добрий

Згідно з даними табл. 5, відмінний рівень якості одержали зразки 2, 3 і 5. Зразок 1 одержав нижчий бал унаслідок недостатньо вираженого смаку та аромату, а зразки 4 і 6 — через негармонійне поєднання наповнювача з кисломолочною основою. Оскільки за вмісту цикорію у йогурті 0,8 та 1,0% було одержано практично однаковий результат, то для впровадження рекомендовано зразок 2, з масовою часткою екстракту 0,8%. Серед зразків йогурту з пастою тахіні відрізняється зразок 5, який містить 3% наповнювача.

За комплексом органолептичних і фізико-хімічних показників визначено найкращі зразки йогурту з крохмалепродуктами та смако-ароматичними інгредієнтами:

- йогурт з мальтодекстрином МД-18 і пастою тахіні у кількості 3%;
- йогурт з сухим глюкозним сиропом та екстрактом цикорію у кількості 0,8%.

Висновки. За результатами аналізу існуючих у світі нормативних вимог до хімічного складу йогурту з наповнювачами уточнено вміст у йогурті сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ), який повинен становити не менше 8,2—8,6%, у тому числі білка — не менше 2,7—2,8%.

Шляхом розрахунку нормалізації молочних сумішей за сухими знежиреними речовинами доведено можливість застосування сухої демінералізованої сироватки як джерела СЗМЗ у складі йогурту з 9% мальтодекстрину або сухого глюкозного сиропу, яка у кількості від 0,32 до 0,77% забезпечує унормований вміст сухих знежирених молочних складових у готовому продукті.

Встановлено незначні зміни фізико-хімічних та органолептичних характеристик йогурту з крохмалепродуктами і сухою демінералізованою сироваткою у кількості від 0,32 до 0,77% за підвищення вмісту білка в продукті від 2,91 до 2,99%.

На основі розроблених базових рецептур йогурту розроблено оригінальні рецептури з екстрактом цикорію (0,8%) та кунжутною пастою тахіні (3%), які рекомендовані до впровадження з метою розширення асортиментного ряду питного ферментованого напою підвищеної харчової цінності.

У подальшому планується вивчити здатність нових видів йогурту з наповнювачами та унормованим вмістом СЗМЗ до зберігання за динамікою зміни їхніх показників якості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Savaiano, D., Hutkins, R. (2021). Yogurt, Cultured Fermented Milk, and Health: A Systematic Review. *Nutrition Reviews*, 79(5), 599—614. URL: <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuaa013>.
2. Codex Alimentarius. Milk and Milk Products. World Health Organization food and agriculture. Organization of the United Nations. Fermented milks (CODEX STAN 243-2003). FAO and WHO 2011. P. 244. URL: <https://www.fao.org/4/i2085e/i2085e00.pdf>.
3. National Agency for food and drug administration and control Act 1993 (AS AMENDED) Milk and Dairy Products Regulations 2005. URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/nig92375.pdf>.
4. Robinson, R. K., Tamime, A. Y. (1976). QUALITY APPRAISAL OF YOGHURT. *International Journal of Dairy Technology*, 29(3), 148—155. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.1976.tb00422.x>.
5. Karam, M. C., Gaiani, C., Hosri, C., Burgain, J., Scher, J. (2013). Effect of dairy powders fortification on yogurt textural and sensorial properties: A review. *The Journal of dairy research*, 80(4), 400—409. URL: <https://doi.org/10.1017/s0022029913000514>.
6. Lee, W. J., Lucey, J. A. (2010). Formation and Physical Properties of Yogurt. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 23(9), 1127—1136. URL: <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.r.05>.
7. Ivashchenko, O., Polishchuk, G. (2023). Research of quality indicators of yogurts with maltodextrin and dry glucose syrup. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 29(4). URL: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2023-29-4-15>.
8. Polishchuk, G., Sharakhmatova, T., Marinin, A., Ivashchenko, O., & Svyatnenko, R. (2024). The influence of starch products on the rheological, physical and chemical properties of yogurt. *Food science and technology*, 18(1). URL: <https://doi.org/10.15673/fst.v18i1.2846>.
9. Ivashchenko, O., Khonkiv, M., Stabnikov, V., Polishchuk, G., Marynin, A., Buniowska-Olejnik, M. (2024). Influence of starch products on the vitality and activity of lactic acid bacteria in yogurt. *Ukrainian Food Journal*, 13(1), 162—174. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/06b5e10d-ff6a-41f6-b1e4-48d9bba90091>.
10. National Agency for food and drug administration and control Act 1993 (AS AMENDED) Milk and Dairy Products Regulations 2005. URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/nig92375.pdf>.
11. Ovsienko, S. M., Bernyk, I. M., Novgorodska, N. V. (2023). Yoghurt quality when using probiotic starter cultures and vegetable filler. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 25(100), 53—59. URL: <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f10009>.
12. Atallah, A., Ismail, E., Yehia, H., Elkhadragey, M., Aloufi, A., Gemiel, D. (2022). Physicochemical, Microbiological and Microstructural Characteristics of Sucrose-Free Probiotic-Frozen Yogurt during Storage. *Foods*, 11(8), 1099. URL: <https://doi.org/10.3390/foods11081099>.
13. Рудавська, Г., Хахалева, І. Проблеми якості та безпечності розчинних напоїв на основі цикорію. (2015). Матеріали міжнар. міждисциплінарної наук.-практ. конф. «Сучасні аспекти збереження здоров'я людини», Ужгородський нац. ун-т, 109—113. URL: <http://tr.knute.edu.ua/files/2016/21/15.pdf>.
14. Богуцька, О., Буянова, В. (2021, жовт.). *Аспекти застосування цикорію в медицині. Topical issues of pharmacology, clinical pharmacology and clinical pharmacy*: матеріали наук.-практ. internet-конф. з міжнар. участю, присвяченої десятиріччю кафедри клінічної фармакології ІПКФ НФаУ, м. Харків, НФаУ, 108. URL: <https://dspace.nuph.edu.ua/bitstream/123456789/27657/1/108.pdf>.
15. Pouille, C. L., Ouaza, S., Roels, E., Behra, J., Turret, M., Molinié, R., Fontaine, J.-X., Mathiron, D., Gagneul, D., Taminiau, B., Daube, G., Ravallec, R., Rambaud, C., Hilbert, J.-L., Cudennec, B.,

Lucau-Danila, A. (2022). Chicory: Understanding the Effects and Effectors of This Functional Food. *Nutrients*, 14(5), 957. URL: <https://doi.org/10.3390/nu14050957>.

16. Jeong, D., Kim, D. H., Oh, Y. T., Chon, J. W., Kim, H., Jeong, D. K. et al. (2017). Production of Bioactive Yoghurt Containing Cichorium Intybus L. (Chicory) Extract — Preliminary Study. *Journal of Milk Science and Biotechnology*, 35(1), 9—15. URL: <https://doi.org/10.22424/jmsb.2017.35.1.009>.

17. Wajih, N. Sawaya, Muhammad, Ayaz, Jehangir, K. Khalil, Abdallah, F. Al-Shalhat. (1985). Chemical composition and nutritional quality of tehineh (sesame butter). *Food Chemistry*, 18(1), 35—45. URL: [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(85\)90101-3](https://doi.org/10.1016/0308-8146(85)90101-3).

18. Richmond, H. D. (1993). The composition of milk and milk products. *The Analyst*, 118, 50. URL: <https://doi.org/10.1039/an8931800050>.

19. Dzhivoderova-Zarcheva, M., K. Nikovska, S. Ivanova, and E. Dimitrova. (2024). Sensory profiling of dairy starch dessert creams enhanced with various types and concentrations of tahini. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 100925. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.100925>.

20. Dzyuba, N., Valevskaya, L., Atanasova, V., Sokolovskaya, A. (2017). Elaboration of the recipe of the fermented milk dessert for child food. *EUREKA: Life Sciences*, 4. 3—9. URL: <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2017.00371>.

21. Фещенко, Г., Поліщук, Г. (2005). Дослідження фізико-хімічних властивостей молочно-цикорійних напоїв. *Молочна промисловість*, 1(16), 20—22.

22. Попова, І. В., Фещенко, Г. П., Поліщук, Г. Є., Лезенко, Г. О. (2005). Дослідження взаємодії білкових речовин з вуглеводами у молочно-цикорієвих сумішах. *Наукові праці НУХТ*, 16, 52—55.

23. Guo, M., Wang, H., Wang C. (2018). Interactions between whey protein and inulin in a model system. *Journal of Food Science and Technology*, 55(10), 4051—4058. URL: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3331-7>.

УДК 664.14

RESEARCH ON THE IMPACT OF REUSING REVERSE WASTE ON THE QUALITY OF CANDIES MADE ON THE BASIS OF FRUIT FONDANT MASS IN STARCH FORMS

O. Dudzinskyi, O. Kokhan, Yu. Kambulova

National University of Food Technologies

Key words:

fondant mass,
candies,
reverse waste

Article history:

Received 04.11.2024
Received in revised form
18.11.2024
Accepted 05.12.2024

Corresponding author:

Kambulova.julya@ukr.net

ABSTRACT

A set of studies on the impact of reverse waste from fondant production on the formation of the quality of candies made on the basis of fruit fondant mass is presented in the article. Reverse waste includes those that arise at different stages of the production process, namely irregularly shaped bodies, defects during forming, candy bodies that do not meet the requirements for taste, color and smell, as well as defective glazed candies damaged during glazing or wrapping. Reverse waste from fondant production is used to a limited extent in the formulations of the fondant masses, since even the slightest changes in composition can significantly affect the quality of fondant formation. Defective products and semi-finished products of fondant production are introduced into the formulations of praline, toffee and other masses. However, these technological lines also generate reverse waste that requires processing, and therefore for large enterprises, the processing of reverse waste is a rather serious problem.

It was found that the reverse waste — glazed candies cannot be used in fruit fondant mass formulations. They give a gray-brown shade to the finished product, which does not meet the requirements of regulatory documentation for color. Only the return waste — candy shells that were formed before the stage of applying the confectionery glaze are recommended for use. The two ways of adding reverse waste were established. According to the first method, it was possible to introduce part of the return waste in the form of a semi-finished product — fudge shell syrup at the stage of obtaining sugar-molasses syrup and part - at the stage of tempering the fondant mass. The total amount of returned waste was 6.5%. According to the second method, it was possible to introduce the entire part of the return waste at the stage of tempering the candy mass. High quality fruit fondant mass was obtained using waste in an amount of 7.3%.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-6

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЗВОРОТНИХ ВІДХОДІВ НА ЯКІСТЬ ЦУКЕРОК, ВИГОТОВЛЕНИХ НА ОСНОВІ ФРУКТОВОГО ПОМАДНОГО КОРПУСУ В КРОХМАЛЬНИХ ФОРМАХ

О. В. Дудзінський, аспірант

О. О. Кохан, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-4582-0814

Ю. В. Камбулова, д-р техн. наук ORCID ID: 0000-0001-7897-8533

Національний університет харчових технологій

У статті наведено результати досліджень впливу зворотних відходів (або санітарно допустимого браку) на формування якості цукерок з фруктовим помадним корпусом. До використання рекомендовано лише зворотні відходи «Корпуси цукерок», що утворюються до технологічної стадії нанесення кондитерської глазури. Внесення можливе двома способами. За першим способом — частину вносять у вигляді напівфабрикату «Сироп з помадних корпусів» на стадії отримання цукрово-патокового сиропу і частину — на стадії темперування помадної маси загальною кількістю 6,5%. За другим способом всю кількість (7,3%) вносять на стадії темперування цукрової маси.

Ключові слова: помадна маса, цукерки, зворотні відходи.

Вступ. При виробництві помадних цукерок на різних етапах технологічного процесу утворюється значна кількість зворотних відходів або санітарно допустимого браку, який може бути повторно використаний у технологічних процесах. Це корпуси неправильної форми, дефекти при відливанні, корпуси цукерок, які не відповідають вимогам щодо смаку, кольору та запаху, а також дефектні глазуровані цукерки, пошкоджені під час глазурування чи загортання. Зворотні відходи помадного виробництва обмежено використовуються безпосередньо в рецептурах самих помадних мас, оскільки навіть найменші зміни в складі можуть суттєво вплинути на якість помадоутворення. Браковані вироби і напівфабрикати помадного виробництва вводяться в рецептури мас праліне, тофі тощо. Проте на цих технологічних лініях також утворюються зворотні відходи, які потребують перероблення і тому для великих підприємств перероблення зворотних відходів є досить серйозною проблемою. З огляду на вищесказане проблема підвищення відсотка використання санітарно допустимого браку помадного виробництва в технології виготовлення помадних цукерок з метою зниження собівартості і збереження якості готової продукції є важливим науковим і практичним завданням.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Кондитерські маси кристалічної структури — це напівфабрикати, в яких цукор знаходиться у вигляді дрібних кристалів, рівномірно розподілених в об'ємі насиченого цукрового розчину. До таких мас належать різноманітні цукрові, фруктові та молочні помадні цукерки, а також кристалічні ірисні маси [1].

Цукерки з помадними корпусами є одними з найбільш поширених. Помадна маса, яку використовують для формування корпусів цукерок, є гетерогенною системою, що складається з трьох фаз: твердої, рідкої та газоподібної. Тверду фазу помадної маси (55—60%) утворюють мікрокристали сахарози розміром 10...20 мкм, рідку фазу (40—45%) — насичений цукрово-патоковий розчин сахарози, а газоподібну — бульбашки повітря у кількості 2—4%. Тверда фаза помадних мас, які відливають у

крохмальні форми, утворюється завдяки регульованому процесу кристалізації сахарози [2—3].

Кристалізація сахарози в помадному виробництві відбувається при поєднанні охолодження та інтенсивного перемішування перенасиченого цукрово-патокового сиропу з вмістом сухих речовин (СР) 80...81%. Процес відбувається у два етапи: утворення центрів кристалізації сахарози та ріст кристалів цукру. На обидва етапи впливатиме низка факторів, які і підлягають суворому контролю в технологічному процесі.

Для отримання фруктової помадної маси на помадоутворення подається складний багатокомпонентний сироп сахарози, крохмальної патоки і фруктового пюре, який уварювався при температурі 104—105 °С. Унаслідок гідролітичних процесів під час уварювання накопичились і інші низькомолекулярні сполуки — цукри (глюкоза і фруктоза), пектинові речовини, які впливатимуть на якість кристалоутворення сахарози. Процес помадоутворення відбувається в безперервному потоці на помадозбивальній машині ШАС-800 з числом обертів 320 у хв при вхідній температурі сиропу 109...121 °С. Завдяки охолодженню водою з температурою 15—17 °С у трьох секціях машини готова фруктова помадна маса на виході має температуру 70...80 °С, масова частка СР в ній складає 88...91%, розмір кристалів — 10...12 мкм.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що українські та зарубіжні вчені вирішували питання підвищення якості помадних цукерок і збільшення строків їх зберігання [2—8]. Вивченню проблеми підвищення реалізації санітарно доброякісних відходів при виробництві помадних цукерок приділено недостатньо уваги. Проте з'ясовано вплив багатьох факторів на кристалоутворення сахарози, а аналіз отриманої інформації може допомогти передбачити або пояснити вплив компонентів на процес кристалоутворення.

Так, з'ясовано, що всі розчинені речовини адсорбуються на гранях кристалів сахарози. При цьому вони не лише сповільнюють швидкість кристалізації, але й змінюють форму кристалів. Може відбуватись включення нецукрів і міжкристалевої рідини в кристалічну решітку. У крупних кристалів вміст внутрішньої води може сягати 0,5%, тоді як у звичайних кристалів — не більше 0,03%. Автори [9] запропонували присутні в розчині домішки розділити на дві категорії: ті, які здійснюють вплив на перенесення маси сахарози з об'єму розчину до місця включення на кристалі сахарози, і ті, які впливають шляхом поверхневої адсорбції, перешкоджаючи включенню сахарози в кристалічну решітку. Домінуючим фактором у впливі домішок на відносну швидкість росту граней кристалу сахарози та супутньому впливі на форму кристалу сахарози є стереоспецифічна адсорбція цих домішок у місцях перегинів на поверхні кристалу, що росте.

Також відомо, що додавання крохмальної патоки (глюкозних сиропів) уповільнює початок кристалізації сахарози, що пояснюється підвищенням в'язкості розчину. Наприклад, додавання понад 30% крохмальної патоки (глюкозного сиропу) сповільнює кристалізацію сахарози у понад 30 разів. У рецептурах помадних цукерок кількість патоки закладається з урахуванням способу їх формування і коливається в межах 5...25% до маси цукру, а тому процес кристалоутворення сахарози в різних рецептурах помадної маси відбувається з різною швидкістю. При цьому, на думку авторів [9], на швидкість більшою мірою чинять вплив декстрини крохмальної патоки (глюкозного сиропу), які здатні суттєво збільшувати в'язкість.

Співвідношення цукру та декстринів крохмальної патоки (глюкозного сиропу) впливає і на дисперсність помадної маси. Як було зазначено вище, при застосуванні

більшого вмісту патоки уповільнюється кристалоутворення, а тому при інтенсивному перемішуванні утворюються більш дрібні кристали. Такий вплив може бути пояснений підвищенням в'язкості сиропу і підвищенням ступеня пересичення помадного сиропу, тому дуже великий вміст крохмальної патоки (глюкозного сиропу) може привести до того, що помада взагалі не буде утворюватись. І, навпаки, при зменшенні частки крохмальної патоки (глюкозного сиропу) за 5% утворюються великі кристали сахарози й виходить помада низької якості [6, 10].

Важливе значення має хімічний склад і співвідношення декстрини — редукуючі цукри (РЦ) крохмальної патоки. Окрім підвищення в'язкості, всі складові патоки закономірно знижують розчинність сахарози внаслідок зменшення її гідратації. Глюкоза, мальтоза, фруктоза в розчині зменшують кількість високогідратованої сахарози при підвищеній концентрації сухих речовин [11—13]. Але при підвищеній кількості фруктози у складі редукуючих речовин сиропу, яка утворюється внаслідок інверсії сахарози при уварюванні сиропів, збільшується вміст рідкої фази, що сприяє підвищенню розчинності сахарози. З одного боку, це можна розцінювати як позитивний фактор, оскільки в подальшому зменшується черствіння помади, з іншого — підвищується гігроскопічність помади, що може призводити до деформації корпусів цукерок, тому нормативною документацією не допускається вміст редукуючих речовин (РР) у помадних цукерках вищий за 14% [1].

Фізику процесу кристалізації сахарози в неврівноважених умовах помадного виробництва вивчали у [14], де проаналізовано процес кристалізації сахарози із сильно перенасичених розчинів сахарози при перемішуванні з різними концентраціями і різними температурами. Автори стверджують, що дія концентрацій і температур обернено пропорційна підвищенню вмісту кристалів. Так, зменшення концентрації розчину призведе до швидшої кристалізації. Мікроскопічні зображення показують велику кількість кристалічних конгломератів, що утворюються під час кристалізації і кількість яких значно зменшується після подальшого перемішування, що вказує на їх руйнування внаслідок прикладеного зсуву сили тертя. Зміна тривалості цього процесу залежить від температури та складу середовища.

У [10, 15] висвітлено вплив часу перемішування, якості охолодження та вмісту редукуючих цукрів на кристалізацію та розподіл кристалів за розмірами. Аналіз показав інтенсивне, але рівномірне нарощування кристалів в процесі саме швидкого охолодження. Також доведено, що за різного вмісту сухих речовин помадної маси (82,15% і 69,26%) та різної масової частки редукуючих речовин (5,9% і 11,6%) за однакових умов швидкого охолодження нарощуються відносно дрібні кристали.

Час перемішування є важливим параметром, який визначає ступінь кристалізації, випаровування вологи та затвердіння. Було досліджено, що при перемішуванні гарячого сиропу з одночасним швидким охолодженням протягом 3—4 хв він досягає напівтвердості. При цьому процес його остаточного затвердіння можна отримати і при подальшому природному охолодженні без перемішування (типові умови навколишнього повітря, $W \approx 60\%$, температура $\approx 30^\circ\text{C}$). У той час як сироп, який перемішується менше ніж 3—4 хв, не застигає і залишається у в'язкій рідкій фазі навіть після охолодження.

Мета досліджень: вивчення впливу зворотних відходів помадного виробництва на формування якості цукерок з фруктовою помадною масою.

Відповідно до мети було сформульовано такі завдання:

- довести актуальність перероблення доброякісних відходів у технології цукерок на основі помадних мас: проаналізувати основи кристалоутворення сахарози та вплив

на цей процес різних технологічних факторів, визначити практичні підходи до формування якості помадної маси для цукерок, означити шляхи утворення зворотних відходів при виробництві помадних цукерок;

- провести експериментальні дослідження якості фруктової помадної маси для цукерок «Сеньйорита полуниця» з введенням зворотних відходів;
- надати практичні рекомендації щодо максимально можливої кількості внесення зворотних відходів;
- визначити якість корпусів цукерок з фруктовою помадною масою за органолептичними і фізико-хімічними показниками.

Матеріали і методи. Для приготування фруктової помадної маси використано цукор білий, патоку крохмальну, фруктове пюре, жир рослинний, кислоту лимонну, барвник. Сировину, напівфабрикати і готову продукцію досліджували органолептично [16], масову частку вологи у сировині, напівфабрикатах та готовій продукції визначали прискореним методом за допомогою сушильної шафи СЕШ-1 та рефрактометричним методом [16].

Визначення можливості застосування зворотних відходів у складі фруктової помадної маси визначали при виробництві цукерок «Сеньйорита полуниця» на Костянтинівській кондитерській фабриці на лінії DRDH відливкою у крохмальні форми.

При проведенні експерименту використовували доброякісні зворотні відходи виробництва цукерок «Сеньйорита полуниця». Переробка зворотних відходів здійснювалась протягом зміни. Зібрані відходи збирались у спеціальні контейнери з маркуванням «Технологічний брак» і зберігались у спеціально відведеному місці.

Органолептичні показники якості досліджуваних помадних цукерок визначали згідно з ДСТУ 4683:2006 [16, 17], залучаючи для оцінки експертів. Визначення масової частки вологи та сухих речовин здійснювали згідно з ДСТУ 4910:2008 [16, 18], визначення масової частки редуруючих речовин у напівфабрикатах і готовій продукції здійснювали фериціанідним методом за ДСТУ 5059:2008 [19], який ґрунтується на окисленні редууючих цукрів лужним розчином заліzosинеродистого калію з подальшим вимірюванням інтенсивності забарвлення окислювача фотоелектроколориметром.

Результати досліджень. Як було зазначено вище, доброякісний брак може бути у вигляді глазурованих корпусів, власне глазурованих цукерок і неглазурованих корпусів, власне корпусів або дефективних корпусів цукерок. Обидва види потребують подальшої переробки. Проте наявність глазури на цукерках буде додатково впливати на формування якості нової фруктової помадної маси, тому дослідження щодо використання обох груп вирішено проводити окремо.

Для досліджень було взято дві групи зворотних відходів:

- цукерки помадні «Сеньйорита полуниця», глазуровані кондитерською глазур'ю — ЗВ «Цукерки глазуровані»;
- корпуси помадних цукерок «Сеньйорита полуниця» до глазурування — ЗВ «Корпуси цукерок».

Відпрацювання зворотних відходів здійснювалось двома способами. За першим способом ЗВ вводили у розчиненому стані на етапі приготування цукрового сиропу. Для розчинення у зворотні відходи додавали незначну частину води, нагрівали і уварювали до вмісту СР 70...75%. За другим способом зворотні відходи вводили на етапі темперування цукеркової помадної маси, без попередньої підготовки.

Показники якості зворотних відходів і напівфабрикатів, використаних для досліджень, наведені у табл. 1.

Всі напівфабрикати, використані в дослідженнях, за фізико-хімічними показниками відповідають вимогам технологічних інструкцій на приготування цукерок з помадними корпусами.

Таблиця 1. Показники якості зворотних відходів, використаних для досліджень

Об'єкт контролю	Контрольований показник	Значення показника
ЗВ «Цукерки глазуровані»	Масова частка РР, %	11,4
ЗВ «Корпуси цукерок»	Масова частка РР, %	11,6
Н/ф «Сироп з корпусів»	Масова частка СР, %	74,8
	Масова частка РР, %	10,9

Зворотні відходи додавали двома частинами. Одну частину зворотних відходів додавали у вигляді сиропу на етапі приготування цукрово-патокового сиропу, другу частину — на етапі темперування цукеркової маси. Сформували два паралельних дослідних зразки. В одному зразку використали поєднання рівних частин ЗВ «Корпуси цукерок» і ЗВ «Цукерки глазуровані», а в другому зразку — застосували лише ЗВ «Корпуси цукерок». Норматив використання ЗВ при виробничій необхідності не більше 9,4% (6,4±3).

Дослідний напівфабрикат «Сироп з корпусів» додавали на стадії виготовлення цукрово-патокового сиропу при температурі 105 °С в кількості 24 кг напівфабрикату «Сироп з корпусів» (10 кг ЗВ «Корпуси цукерок» і 10 ЗВ «Цукерки глазуровані») і 48 кг (40 кг ЗВ «Корпуси цукерок») і уварювали протягом 60 хв до вмісту СР 80,5% (для першого зразка) і 81% (для другого зразка).

Другу частину вводили на стадії темперування цукеркової маси при температурі 83,5...85 °С з подальшим формуванням корпусів цукерок. При цьому в перший дослідний зразок ввели 7 кг ЗВ «Корпуси цукерок» і 7 кг ЗВ «Цукерки глазуровані», у другий зразок вводили 8 кг ЗВ «Корпуси цукерок». Режимми проведення основних технологічних операцій та показники якості напівфабрикатів з різних технологічних стадій виробництва наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Технологічні режими і якість напівфабрикатів виробництва помадних цукерок «Сеньора полуниця» з введенням зворотних відходів

Етапи	Об'єкт контролю	Контрольований показник	Граничне значення показника	Фактичні значення	
				Зразок №1, 6,5% на 1т ГП	Зразок №2, 7,0% на 1т ГП
Виготовлення цукеркового сиропу	Цукрово-патоково-фруктовий сироп	t сиропу, °С	104—106	105	105
		Час приготування сиропу, хв.	60	60	60
		Масова частка СР, %	78—82 (опт. 81)	80,5	81,0
		Масова частка РР, %	7,0—8,5 (опт. 8)	8,4	8,5
		н/ф Сироп з глазурованих і неглазурованих корпусів, кг		24,0 (20 кг ЗВ)	48,0 (40 кг ЗВ)
		Кінцева t уварювання, °С	109-126	120	114
		Показник кулісного механізму	6-9	8	9

Продовження таблиці 2

Приготування помадної маси	Помадна маса	t помадної маси, °C	не більш 80	78,0	78,0
		Масова частка вологи, %	9—12 (опт.10,5)	10,6	10,5
Приготування цукеркової маси (темперування)	Цукеркова маса	t цукеркової маси, °C	не більше 85	83,5	85,0
		Масова частка РР, %	не більше 16 (опт.11)	11,4	<u>13,2</u>
		ЗВ «Цукерки глазуровані»/ ЗВ «Корпуси неглазуровані», кг		7/7	0/8
Формування та вистоювання корпусів	Цукеркова маса	t цукеркової маси, °C	не більше 85	83,1	84,2
		Масова частка вологи, %	10,0—12,5 (опт. 11)	10,8	11,5
		Масова частка РР, %	не більше 16 (опт.11)	11,8	<u>14,8</u>
Контроль якості готової продукції	Цукерка помадна	Смак, колір, запах, зовнішній вигляд		Виражений смак, структура однорідна, колір цукеркової маси не відповідає контрольному зразку — замість рожевого брудно рожевий, що є неприпустимим	Процес накопичення РР постійно зростає, після шафи вистоювання спостерігали м'який корпус цукерок
		Масова частка РР, %	Не більш 16	11,9	<u>15,9</u>

Як свідчать результати, представлені в табл. 2, введення зворотних відходів впливає на кінцеву температуру уварювання сиропів, яка забезпечує оптимальний вміст СР. Так, уварювання першого зразка з вмістом 20 кг ЗВ (10 кг «Корпуси цукерок» і 10 кг ЗВ «Цукерки глазуровані») відбулось до температури 120 °C до вмісту СР 80,5%. А додавання 40 кг зворотних відходів «Цукерки глазуровані» у другому зразку дало змогу отримати необхідний вміст СР 81% вже при температурі 114 °C. Це означає, що додавання вдвічі більшого вмісту зворотних відходів закономірно суттєво збільшує вміст СР в сиропі і скорочує процес уварювання.

Важливим є показник вмісту в сиропі РР, який повинний знаходитись у межах 7,0—8,5%. Результати показали, що при додаванні н/ф «Сироп з корпусів» вміст РР цукрово-патокового сиропу підвищується. За оптимальних значень показника 8% вміст РР для першого дослідного зразка досяг значення 8,4%, для другого — 8,5%. Це закономірно пов'язано із заміною цукру білого на зворотні відходи, які містять у своєму складі РЦ: глюкозу, фруктозу, мальтозу — цукри, що утворились при основному виробництві дослідних напівфабрикатів. І, незважаючи на те, що значення показника відповідають межах рекомендованих технологічною інструкцією, вони знаходяться на найвищих позиціях і перевищують оптимальне значення.

Також для другого дослідного зразка з більшим вмістом зворотних відходів збільшується показник кулісного механізму (шарнірного механізму, що перетворює обертовий у зворотно-поступальний). Цей показник характеризує навантаження на насоси при перекачуванні мас і його підвищення непрямым чином свідчить про дещо більшу в'язкість маси.

Подальше уварювання сиропу до вмісту СР 88,4...88,5% призводить до отримання помадного сиропу, який подається на збивання у помадозбивальну машину. За безперервного охолодження і збивання помадна маса набуває кристалічності, білого кольору, має пластичну структуру. Органолептично кристали цукру не відчуваються, тому що вони мають необхідний розмір.

Отримана помадна маса направлялась на темперування, при якому нагрівалася до температури близько 83...84 °С, при цьому до неї додають різноманітні смакові добавки. Як було зазначено вище, на етапі темперування до обох зразків було додано другу частину зворотних відходів. Вони рівномірно перемішувались і за температури маси розчинялись. Із табличних даних видно, що масова частка вологи цукеркової маси при додаванні зворотних відходів і смакових добавок збільшилась до 10,8% в першому дослідному зразку і до 11,5% — у другому дослідному зразку, проте значення находились на рівні оптимальних.

Поряд з цим спостерігалось нарощування вмісту РР, що також пояснюється внесенням додаткових РЦ (глюкози, фруктози, мальтози) із зворотними відходами. За нормативною документацією визначається максимальний вміст РР на рівні 16%, для зразка з введенням меншої частини зворотних відходів він складає 11,4%, для зразка із збільшеним вмістом зворотних відходів — він складає 13,2%. Це значення є неприйнятним, оскільки в подальшому цукеркова маса витримується при температурі 83...84 °С до відливання у крохмальні форми, процес гідролізу сахарози не припиняється і вміст РР нарощується. Готові вироби за цим показником можуть не відповідати вимогам державного стандарту. Дійсно, ми бачимо, що на етапі відливання цукеркова маса з другого зразка має ще більший вміст РР — 14,8%, що набагато перевищує рекомендовані значення.

Готова продукція контролювалась органолептично. За держаним стандартом цукерки з помадними корпусами повинні мати продовгугату прямокутну форму, бути глазурованими кондитерською глазур'ю, без добавок. Масова частка редукуючих речовин не повинна перевищувати 16%. Із табл. 2 видно, що обидва зразки цукерок мають невідповідності за органолептичними показниками. Зразок перший, до складу якого були введено 3В (10 кг «Корпусів цукерок» і 10 кг 3В «Цукерки глазуровані» на етапі у вигляді сиропу та 7 кг «Корпусів цукерок» і 7 кг 3В «Цукерки глазуровані» на етапі темперування) мають виражений смак, однорідну структуру, але колір не відповідає контрольному зразку — замість рожевого отримали брудно-рожевий, що є неприпустимим. Вочевидь, це пов'язано із впливом кольору кондитерської глазури, яка вносились у складі цукерок глазурованих. Тобто внесення 3В «Цукерки помадні» із глазуруванням повинно здійснюватись лише в темні сорти цукерок і є недопустимим для фруктових помадних мас.

Для другого зразка, до складу якого внесено 3В «Корпуси цукерок» в кількості 48 кг (40 кг 3В «Корпуси цукерок») у вигляді сиропу і 8 кг 3В «Корпуси цукерок», на стадії темперування було відмічено постійне нарощування РР. У готовій продукції також відмічено граничне значення вмісту РР, дозволене нормативною документацією, — 15,9%. Також відмічено дуже м'який корпус цукерок, що пов'язано, на нашу думку, із перерозподілом частки твердої та рідкої фаз помадної маси. Напевно,

додавання зворотних відходів і нарощування РР збільшує кількість водорозчинних цукрів у системі, чим обумовлює зменшення частки кристалічної фази і збільшення кількості насиченого розчину.

Отже, у результаті проведеного дослідження було доведено можливість додавання зворотних відходів помадного виробництва у фруктову помадну масу для цукерок «Сеньйорита полуниця» лише у вигляді корпусів цукерок неглазурованих. Також при збереженні способу введення, зокрема на стадії приготування цукрово-патокового сиропу у вигляді напівфабрикату «Сироп з корпусів» та на стадії темперування у звичайному вигляді, максимально допустима норма введення зворотних відходів складає 6,5%. За технологічними інструкціями норматив використання ЗВ при виробничій необхідності складає не більше 9,4% ($6,4 \pm 3\%$). Це означає, що досягнути таким способом кращих результатів неможливо і подальше збільшення кількості зворотних відходів, що можуть бути внесені до фруктової помадної маси, потребуватиме інших підходів.

З метою удосконалення було застосовано інший спосіб отримання цукеркової маси для фруктових помадних цукерок, в якому зворотні відходи додавались у неглазурованому вигляді, тобто ЗВ «Корпуси цукерок» лише на стадії темперування. Показники якості ЗВ і напівфабрикатів, які були використані для досліджень, наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Показники якості зворотних відходів, використаних для досліджень

Об'єкт контролю	Контрольований показник	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
		4,8%	7,3%	9,4%
ЗВ «Корпуси цукерок»	Масова частка РР, %	11,7	11,9	11,8

Із табл. 3 видно, що дослідження буде проведено у трьох варіантах. Згідно з першим варіантом у зразок буде додано зворотних відходів в кількості 4,8%, згідно з другим — до зразка буде введено 7,3% зворотних відходів. Для третього зразка — 9,4%. Масова частка редукуючих речовин в усіх корпусах приблизно однакова і складає 11,7...11,9%. Режими проведення основних технологічних операцій та показники якості напівфабрикатів з різних технологічних стадій виробництва наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Технологічні режими і якість напівфабрикатів виробництва помадних цукерок «Синьйора полуниця» з введенням зворотних відходів

Етапи	Об'єкт контролю	Контрольований показник	Граничне значення показника	Фактичні значення		
				для зразка		
				4,8%	7,3%	9,4%
Приготування цукеркового сиропу	Цукрово-патоково-фруктовий сироп	t сиропу, °C	104—106	106	105	106
		Час приготування сиропу, хв	35—45	60	60	60
		Масова частка СР, %	78—82 (опт. 80)	80,0	80,0	80,0
		Масова частка РР, %	7,0—8,5 (опт. 8,0)	8,2	8,2	8,4
		Кінцева t уварювання, °C	109—126	120	120	120
Приготування помадної маси	Помадна маса	t помадної маси, °C	не більше 80	79,8	79,9	80,0
		Масова частка вологи, %	9—12 (опт. 10,5)	10,4	10,6	10,6

Продовження таблиці 4

Приготування цукеркової маси (темперування)	Цукеркова маса	t цукеркової маси, °C	не більше 85	84,0	84,0	85,0
		Масова частка РР, %	не більше 16	11,2	11,5	11,4
		ЗВ «Корпуси цукерок» неглазуровані, кг		0/16	0/25	0/32
Формування та вистоювання корпусів глазурування корпусів	Цукеркова маса	t цукеркової маси, °C	не більше 85	84,1	83,8	84,7
		Масова частка вологи, %	10,0—12,5 (опт.11)	11,0	10,8	10,9
		Масова частка РР, %	не більше 16 (опт. 11)	11,5	11,7	11,7
		Масова частка РР, %	не більше 16	11,6	11,8	11,7

Із табличних значень параметрів можна відмітити декілька важливих технологічних аспектів, які відрізняються від попередньо проведених досліджень. Насамперед ми бачимо, що відсутність зворотних відходів у складі цукрово-патокового сиропу забезпечує відповідність усіх показників вимогам технологічної інструкції, більшою мірою — в оптимальних значеннях. Це стосується масової частки сухих речовин сиропу, кінцевої температури його уварювання, показника кулісного механізму. Дійсно, всі зразки цукрово-патокового сиропу були уварені до температури 120 °C і вмісту сухих речовин 80%.

На другому технологічному етапі приготування помадної маси її температура складала 79,8...80,0 °C, масова частка вологи дорівнювала майже оптимальним значенням — 10,4...10,6%.

Після отримання помадну масу перекачували на темперування, де її підігрівали до температури 84...85 °C і вводили смакові та ароматичні добавки. На цьому ж етапі вводили зворотні відходи в кількості 16, 25 і 32 кг і масу ретельно перемішували. Результати досліджень показують, що цукеркова маса всіх трьох зразків за всіма фізико-хімічними показниками відповідає вимогам технологічних інструкцій. Так, температура цукеркової маси не перевищує 85 °C, масова частка вологи має 11,0, 10,8, 10,9% (за оптимальної 11,0%), масова частка редуруючих речовин також наближається до оптимального значення в 11,0%. Це доводить правильність обраного способу введення зворотних відходів.

Проте основними є показники якості готової продукції. Масова частка РР і масова частка вологи цукерок на основі фруктових помадних мас не перевищують вимоги документації, що є значущим досягненням. Органолептичні ж показники готової продукції відрізняються. Зразки цукерок, в яких було використано 4,8% і 7,3% зворотних відходів за формою, смаком, ароматом і консистенцією повністю відповідають вимогам чинної документації. Помадна маса «тане» у ротовій порожнині, що свідчить про її високу якість та утворення кристалів цукру в межах 10...20 мкм.

Для зразка, де використано 9,4% зворотних відходів, відмічено виражений смак, але структуру менш однорідна. Також спостерігається нерівномірне розподілення барвника по всій цукерковій масі, що пов'язано з досить значною кількістю щільних зворотних відходів. Час на змішування цукеркової маси зі зворотними відходами в машині ТМ-350 збільшився на 5—6 хв і склав 30—31 хв замість 24—26 хв.

Висновки. Отже, вивчення можливості застосування зворотних відходів у складі фруктової помадної маси на прикладі цукерок «Сеньйорита полуниця» дає змогу надати такі рекомендації.

1. Зворотні відходи «Цукерки глазуровані» не можуть бути використані в рецептурах фруктових помадних мас, оскільки надають сіро-бурого відтінку кольору готової продукції, що не відповідає вимогам нормативної документації. До використання рекомендовано лише зворотні відходи «Корпуси цукерок», що утворились до стадії нанесення кондитерської глазури.

2. Додавання зворотних відходів можливе двома способами. За першим способом внесення частини зворотних відходів відбувається у вигляді напівфабрикату «Сироп з помадних корпусів» на стадії отримання цукрово-патокового сиропу і частину — на стадії темперування помадної маси. Було отримано можливість внесення 6,5%. За другим способом можливе внесення всієї частини зворотних відходів на стадії темперування цукеркової маси. Високу якість фруктової помадної маси отримано з використанням відходів у кількості 7,3%. Найвища межа допустимого внесення зворотних відходів — саме 9,4% не була досягнута, що спонукає до продовження досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 4135:2014. Цукерки. Загальні технічні умови. Київ. 2014. 27 с.
2. Гавва, О. О. (2006). Удосконалення технологій неглазурованих цукерок з метою подовження терміну їх зберігання: дис. канд. техн. наук: 05.18.01. Нац. ун.-т харч. технол. Київ.
3. Коркач, Г. В. (2012). Науково-практичне обґрунтування та розроблення технологій кондитерських виробів з синбіотиками: дис. ... канд. техн. наук : 05.18.01. Одеська нац. акад. харч. технол. Одеса.
4. Іоргачова, К. Г. (2004). Наукові основи технологій кондитерських виробів з використанням функціональних рослинних добавок: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.01. Одеська нац. акад. харч. технол. Одеса.
5. Beilein, J., Logan et al. (2018). Candy Chemistry: A Sweet Approach to Teaching Non-Science Majors. *Journal of Chemical Education*, 8(95), 1307—1315.
6. Dorozhynska, O. C., Kokhan, O. O. (2021). Changing the quality of unglazed candies with a crystalline structure based on a combination of lactose and fructose sugars during storage. *Харчова промисловість*, 30, 18—28.
7. Dorozhynska, O., Kokhan, O., Kambulova, Yu. (2021). Sorption characteristics of fondant candies based on tagatose. *Ukrainian Food Journal*, 10(4), 786—796.
8. Korkach, H., Krusir, G. (2017). Development of innovative technologies of fondant candies with synbiotics. *Technological audit and production reserves*, 1(3(33)), 50—55.
9. McGill, J., Hartel, R. W. (2020). Water relations in confections. *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*, 483—500.
10. Hartel, R. W. (2002). Crystallization in foods. *Handbook of Industrial Crystallization. Second Edition*, 287—304.
11. Verma, P., Shah, N. G., Mahajani, S. M. (2020). A novel technique to characterize and quantify crystalline and amorphous matter in complex sugar mixtures. *Food Analytical Methods*, 13(11), 2087—2101.
12. Verma, P. et al. (2021). Insights into the crystallization phenomenon in the production of non-centrifugal sugar. *Journal of Food Engineering*, 290, 110259.
13. Ouiazzane, S. et al. (2008). Modeling of sucrose crystallization kinetics: The influence of glucose and fructose. *Journal of Crystal Growth*, 310(15), 3498—3503.
14. Gholamhosseinpour, A. et al. (2008). Evaluation of the traditional caramel production process and optimization of sucrose crystallization (part 1). *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 4(1), 72—75.
15. Bhandari, B. R., Hartel, R. W. (2002). Co-crystallization of sucrose at high concentration in the presence of glucose and fructose. *Journal of Food Science*, 67(5), 1797—1802.

16. *Технологія та лабораторний практикум кондитерських виробів і харчових концентратів*: навч. посіб. / за ред. проф. А.М. Дорохович і проф. В.М. Ковбаси. Київ: НУХТ, 2015.
17. ДСТУ 4683:2006. Вироби кондитерські. Методи визначення органолептичних показників якості, розмірів, маси нетто і складових частин. Київ. 2006.
18. ДСТУ 4910:2008. Вироби кондитерські. Методи визначення масових часток вологи та сухих речовин. Київ. 2008.
19. ДСТУ 5059:2008. Вироби кондитерські. Методи визначання цукрів. Київ. 2008.

УДК 663.03/664.6

INFLUENCE OF MAGNESIUM AND ZINC ON THE
TECHNOLOGICAL PROCESS AND QUALITY OF BAKERY
PRODUCTS: COMPARATIVE STUDY

V. Olishkevskiy, E. Babko, Yu. Bondarenko, T. Pogorilyi, M. Tsyurpyta, D. Tsyurpyta
National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
minerals, bakery products, fermentation, dough, colloidal particles of biogenic metals Mg and Zn	The nutrition of the population of Ukraine today is characterized by the so-called "hidden hunger" caused by a deficiency of both vitamins and minerals. Enrichment of bakery products with bioavailable forms of biogenic metals magnesium and zinc will make it possible to give products an increased biological value without increasing their caloric content and provide these minerals to a wide range of people.
Article history: Received 01.12.2024 Received in revised form 03.12.2024 Accepted 16.12.2024	The paper presents the results of a study of the use of colloidal solutions of magnesium and zinc obtained by the electric spark method in the formulation of wheat bread. The calculated amount of colloidal solutions of magnesium and zinc was added to the dough instead of the prescription amount of water.
Corresponding author: bjuly@ukr.net	It was found that magnesium and zinc, at the established dosages, caused the intensification of the fermentation process in the dough, and to a greater extent in the case of zinc. This made it possible to reduce the duration of proofing of dough pieces. The finished products enriched with magnesium and zinc were characterized by a more intense color of the crust, especially in the sample with zinc, and a larger volume. Despite the greater effect on improving the fermentation processes and the formation of the color of the crust of the products in the case of zinc, a larger volume of products was obtained in the sample with the addition of magnesium. This is due to the different effects of biogenic metals on the formation of the dough structure. In the case of zinc, the dough became stronger, and in the case of magnesium, the dough became more elastic. Improved elasticity of the dough with magnesium, at a lower fermentation intensity than in the sample with zinc, led to the formation of a larger volume of bread. It was assumed that the influence of magnesium and zinc on the course of biochemical processes in the dough system and the formation of rheological properties of the dough is associated with the ability of magnesium and zinc to be cofactors of enzymes involved in the metabolism of yeast and flour enzymes; with their ability to form bonds of different strengths with gluten proteins.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-7

ВПЛИВ МАГНІЮ ТА ЦИНКУ НА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС І ЯКІСТЬ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ: ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В. В. Олішевський, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-6972-6799

Є. М. Бабко, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-2389-007X

Ю. В. Бондаренко, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-3781-5604

Т. М. Погорілий, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-6435-1198

М. Є. Цюрпи́та, аспірант, ORCID ID: 0009-0002-2922-3518

Д. Є. Цюрпи́та, аспірант, ORCID ID: 0009-0007-3825-9631

Національний університет харчових технологій

У статті наведено результати дослідження використання в рецептурі пшеничного хліба колоїдних розчинів наноформ Mg і Zn, отриманих електроіскровим методом. Розраховану кількість колоїдних розчинів Mg і Zn вводили в тісто замість рецептурної кількості води.

Встановлено, що Mg і Zn зумовлювали інтенсифікацію процесу бродіння у тісті, особливо у разі внесення цинку. Це дало змогу скоротити тривалість вистоювання тістових заготовок. Готові вироби, збагачені Mg і Zn, характеризувалися яскравішим забарвленням скоринки, що було найбільш помітним у зразках із цинком, і більшим об'ємом, особливо у виробах із додаванням магнію.

Ключові слова: мінеральні речовини, хлібобулочні вироби, бродіння, тісто, колоїдні частинки біогенних металів Mg і Zn.

Вступ. Харчування визнано Всесвітньою організацією охорони здоров'я важливим фактором, що забезпечує збереження здоров'я людини та запобігає розвитку неінфекційних захворювань, які охопили всі країни сучасного світу [1]. Сьогодні в харчуванні населення багатьох країн, в тому числі й України, постала проблема «прихованого голоду». «Прихований голод» — це дефіцит у раціоні одного або більше мікроелементів (мінеральних речовин і вітамінів), який виникає при достатній або навіть надмірній енергетичній цінності раціону. Дефіцит мікроелементів часто залишається непоміченим протягом тривалого часу, однак він має довгострокові незворотні наслідки для здоров'я людини, що, у свою чергу, впливає на соціально-економічний розвиток суспільства. У всьому світі понад 2 млрд людей страждають від дефіциту поживних мікроелементів [2—4].

Для вирішення проблеми недостатнього надходження мікроелементів з раціоном людини ВООЗ і ФАО рекомендовано застосовувати стратегію збагачення харчових продуктів та біозбагачення сировини [5].

Огляд останніх досліджень і публікацій. Дефіцит мікроелементів є серйозною проблемою для здоров'я населення у всьому світі. У країнах, що розвиваються, дефіцит мікроелементів, як правило, пов'язаний з недостатнім споживанням їжі та низькою біодоступністю мікроелементів. Проблема дефіциту мікроелементів у сучасному харчовому середовищі розвинених країн головним чином обумовлена споживанням великої кількості оброблених та ультраоброблених харчових продуктів. Процеси виготовлення харчових продуктів в індустріальних умовах, унаслідок складної промислової обробки сировини та напівфабрикатів, зумовлюють зниження вмісту або втрату незамінних мікроелементів, зокрема мінеральних речовин [6—8].

Мінеральні речовини є важливими складовими щоденного раціону людини, що забезпечують належний перебіг метаболічних процесів в організмі. За даними ВООЗ, у

всьому світі серед мінеральних речовин найпоширенішим є дефіцит заліза, йоду та цинку. Так, до 33% населення світу має дефіцит Fe, 30% населення світу недостатньо споживають I, а 25% мають ризик хронічного дефіциту Zn [9, 10].

Збагачення харчових продуктів є розповсюдженим способом у всьому світі для збалансування раціону, що дає змогу відновити втрачені під час обробки речовини або створити харчові продукти з підвищеною харчовою цінністю та функціональними властивостями. Ефективність цього підходу обґрунтована тим, що приймання препарату або харчової добавки, яка містить дефіцитний мікроелемент, може призводити до тимчасового швидкого підвищення концентрації цієї речовини в плазмі крові, тоді як споживання продуктів, збагачених тією ж поживною речовиною, обумовлює поступове її надходження в організм. При цьому ефективним є підхід збагачення харчових продуктів, що споживаються населенням регулярно, оскільки це дає змогу охопити великі групи населення без внесення змін у структуру їх харчування, забезпечуючи підтримання постійних фізіологічних запасів мікроелемента [11].

Наразі понад 140 країн у всьому світі мають програми збагачення харчових продуктів або фортифікації сировини дефіцитними мікроелементами. Позитивна практика збагачення харчових продуктів дефіцитними мінеральними речовинами дала змогу знизити захворюваність на анемію та зоб серед населення багатьох країн [12].

Незважаючи на постійні дебати в усьому світі щодо ефективності та безпечності збагачення харчових продуктів, цей підхід дав змогу досягти зниження поширеності аліментарних захворювань. Проте збагачення харчових продуктів мікронутрієнтами повинно здійснюватися тільки на основі науково обґрунтованих, перевірених практикою медико-біологічних і технологічних принципів і вимог. Для того, щоб збагачення харчових продуктів було безпечним і регульованим, воно повинно реалізовуватися відповідно до прийнятих національних програм та бути під увагою уряду, як це відбувається в більшості країн Європи, Канаді, США, Австралії [12–14].

У харчуванні населення України сьогодні також спостерігається так званий «прихований голод», спричинений дефіцитом як вітамінів, так і мінеральних речовин. За даними національного дослідження структури харчування українців, це зумовлено тим, що більшість населення споживає недорогі продукти з низькою біологічною цінністю, але високою енергетичною насиченістю [14–16].

Наразі в Україні відсутня обов'язкова фортифікація. Натомість за ініціативою виробників харчової продукції впроваджується добровільна фортифікація деяких продуктів з метою надання їм конкурентної переваги. У зв'язку з цим на загальнодержавному рівні було затверджено спеціальні норми для вітамінів і мінеральних речовин, що використовуються як інгредієнти продуктів харчування [17]. Для розроблення законодавчих засад щодо збагачення харчових продуктів мікронутрієнтами з метою забезпечення захисту і зміцнення здоров'я населення України, запобігання хворобам, покращення якості та збільшення тривалості життя Кабінетом Міністрів України у березні 2024 р. до громадського обговорення представлено постанову «Про затвердження Порядку фортифікації харчових продуктів», яка визначатиме підстави та процедуру запровадження обов'язкової фортифікації харчових продуктів окремими вітамінами та/або мінеральними речовинами [18].

В умовах воєнного стану населення України зазнає підвищеного нервово-емоційного навантаження та стресу, що обумовлює підвищену потребу в мінеральних речовинах, зокрема в магнії. Недостатнє надходження цього мікроелемента призводить до зниження стресостійкості, м'язової слабкості та порушення серцевого ритму. Іони Mg беруть участь у передачі нервових імпульсів, активації ферментів, формуванні

третинної структури ДНК чим обумовлюють перебіг в організмі 350 біохімічних процесів, забезпечуючи енергетичний обмін і підтримуючи функціонування м'язів, нервової системи, імунної системи. Магній також бере участь у регулюванні рівня глюкози в крові. Особлива потреба в цьому елементі у військовослужбовців, які постійно зазнають підвищеного стресу та фізичних навантажень [19, 20].

Світова увага до дефіциту цинку стрімко зростає за останні 15 років. Цинк є важливим компонентом більш ніж 300 ферментів, обумовлює метаболізм нуклеїнових кислот і білків, ріст, поділ і функціонування клітин. Завдяки цьому цинк сприяє прискоренню загоєння ран і регенерації шкіри, покращує фізичну витривалість і прискорює відновлення. Цинк бере участь у розщепленні вуглеводів, посилює дію інсуліну, підтримуючи нормальний рівень цукру в крові, сприяє збереженню психічного здоров'я і підтримці психоемоційного стану. Також цинк бере участь в синтезі серотоніну — «гормону радості», який покращує настрій, сон і допомагає протистояти стресу [21, 22].

Забезпечення достатнього надходження цих мінеральних речовин у раціоні українців є особливо важливим, враховуючи напружені умови життя, зумовлені воєнними діями на території України.

Для збагачення харчових продуктів мінеральними речовинами переважно використовують солі неорганічних кислот — карбонати, сульфати, фосфати тощо. Однак мінерали в цій формі мають низьку біологічну доступність. Перспективним є проведення досліджень щодо використання біодоступних форм мінеральних речовин у виробництві харчових продуктів.

У раціоні населення України статус основного продукту харчування мають хлібобулочні вироби. Подолання «прихованого голоду» збагаченням хлібобулочних виробів біодоступними формами біогенних металів магнію та цинку надасть виробам підвищеної біологічної цінності без збільшення їх калорійності та забезпечить цими мінеральними речовинами широкі верстви населення.

Метою дослідження є встановлення впливу біогенних металів Mg і Zn, включених у рецептуру пшеничного тіста у вигляді колоїдних розчинів, на параметри технологічного процесу та якість хліба.

Матеріали і методи. Для збагачення мінеральними речовинами було обрано хліб з пшеничного борошна вищого сорту, що має таку рецептуру: борошно пшеничне вищого сорту 1000 г, дріжджі пресовані 30 г, сіль кухонна харчова 15 г. Вологість хліба 42%. Це був контрольний зразок. Для встановлення впливу Mg і Zn на хід технологічного процесу та формування якості виробів готували дослідні зразки, в яких рецептурну кількість води замінювали на розчини металів.

Біогенні метали Mg і Zn використовували у вигляді седиментаційно-стабільних водних колоїдних розчинів (рис. 1), отриманих методом об'ємного електроіскрового диспергування струмопровідних гранул металів у рідині внаслідок електричної ерозії поверхні гранул металів Mg і Zn у водному середовищі з подальшим їх випаровуванням і конденсацією у рідині [23, 24]. Для приготування робочих розчинів біогенних металів використовувалася бідистильована вода.

Проведена ТЕМ мікроскопія водних колоїдних розчинів металів Mg і Zn, отриманих електроіскровим способом, показує, що величина розмірності частинок металів знаходиться відповідно в межах: для Mg — 30...85 нм, Zn — 90...300 нм (рис. 2). Їх нанорозмірність забезпечує високу біодоступність.

Характеристики отриманих водних колоїдних розчинів магнію та цинку наведено в табл. 1.

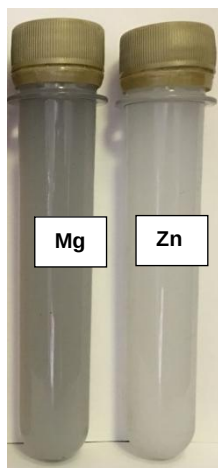


Рис. 1. Зовнішній вигляд водних колоїдних розчинів металів електроіскрового способу

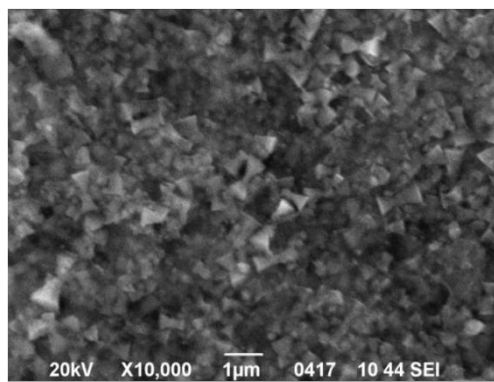
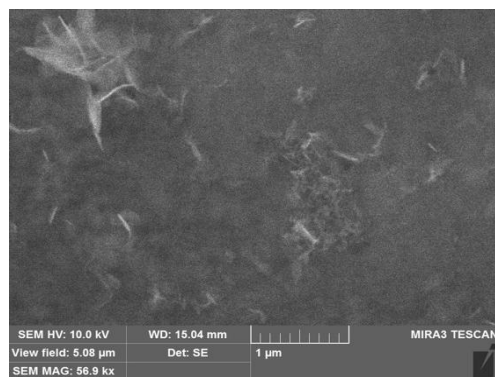


Рис. 2. Водні колоїдні розчини металів електроіскрового способу:
а, б — відповідно до мікрофотографії ТЕМ частинок металів Mg та Zn

Таблиця 1. Характеристики водних колоїдних розчинів металів, отриманих електроіскровим способом

№ п.п.	Наночастинки металу	Концентрація металу в розчині, г/дм ³	Електрокінетичний потенціал, мВ	Електро-провідність, мСм/см	pH
1.	Mg	1,2	+ 12,1	0,347	8,6
2.	Zn	1,1	- 10,1	0,98	9,0

Дозування розчинів металів для заміни рецептурної кількості води для замішування тіста встановлювали розрахунковим методом. При цьому враховували норму добової потреби магнію та цинку для людини, вміст цих мікроелементів у сировині, з якої готували хліб, концентрацію цинку та магнію у розчинах, а також керувалися підходом, що дозування колоїдного розчину металу повинне забезпечити вміст мінеральної речовини у добовій нормі споживання хліба (277 г), що задовольнятиме 50%

добову потребу людини в магнії або цинку. Було встановлено, що у разі збагачення хліба магнієм необхідно всю воду, передбачену для замішування тіста, замінити на розчин магнію. У випадку збагачення цинком було розраховано, що при замішуванні тіста зі 1000 г борошна достатньо замінити 50 см³ розрахованої кількості води колоїдним розчином цинку.

Колоїдні розчини біогенних металів вносили під час замішування тіста. Тісто готували безопарним способом. Замішування тіста проводили в тістомісильній машині ESHER (Італія) на першій швидкості 4—6 хв та 6—8 хв на другій швидкості. Початкова температура тіста становила 25—26 °С. Тісто залишали на бродіння протягом 90 хв (з однією обминкою через 60 хв) за температури 30—32 °С. Після бродіння тісто ділили на шматки масою по 450 г, з яких формували тістові заготовки для двох формових виробів та одного подового, які поміщали на вистоювання у шафу вистоювання Sveba Dahlin AB DC-21 (Швеція) за температури 35—38 °С. Кінець вистоювання встановлювали органолептично. Вистояні тістові заготовки випікали в секційній печі Sveba Dahlin AB DC-21 (Швеція) при подачі пари (6 сек) за температури 210—230 °С протягом 35—40 хвилин.

Кислотність, вологість тіста та його підймальну силу оцінювали загальноприйнятими методами [25]. Дослідження процесу бродіння у тісті проводили за аналізом динаміки виділення вуглекислого газу зі 100 г тіста за температури 30 °С [26].

Готовий хліб аналізували через 3 год після випікання за органолептичними (стан поверхні, правильність форми, структуру пористості, еластичність, колір і розжовуваність м'якушки, аромат і смак), фізико-хімічними показниками (питомий об'єм хліба, кислотність, пористість) та комплексним показником якості [25, 26].

Достовірність отриманих результатів забезпечувалася повторенням експериментів тричі. Отримані та представлені результати враховують середньоквадратичне відхилення; графічне представлення експериментальних даних проводили з використанням стандартних програм статистичної обробки — Microsoft Excel 2010.

Результати досліджень. За результатами пробного лабораторного випікання (табл. 2) встановлено, що внесення в тісто замість рецептурної кількості води колоїдних розчинів біогенних металів зумовлює підвищення, порівняно з контролем, кінцевої кислотності тіста на 0,8 та 1,0 град, відповідно, для зразків з магнієм та цинком, а також збільшення у цих зразках кількості виділеного вуглекислого газу за період бродіння тіста та вистоювання тістових заготовок на 6 та 10%. Це свідчить про більшу інтенсивність бродіння у зразках тіста, що містять додатково внесені магній і цинк. У цих зразках скорочується тривалість вистоювання тістових заготовок на 7—10 хв.

Таблиця 2. Показники технологічного процесу та якості хліба

Показник	Дослідні зразки		
	Контроль (без добавок)	З додаванням колоїд- ного розчину магнію	З додаванням колоїд- ного розчину цинку
Тісто			
Вологість тіста, %	43,9	43,7	43,9
Кінцева кислотність тіста, град	2,5	3,3	3,5
Тривалість вистоювання тістових заготовок, хв	67	60	57
Загальне газотворення за період бродіння та	615	652	677

вистоювання, см ³ /100 г тіста			
Продовження таблиці 2			
Характеристика тіста	Пружно-еластичне	Більш еластичне, ніж контроль	Більш пружне, ніж контроль
Хліб			
Стан поверхні	Гладенька		
Колір скоринки	Світло жовтий	Жовто- золотистий	Золотистий
Колір м'якушки	Світлий		
Стан пористості	Розвинена, середня	Розвинена, розміри пор більші, ніж у контролі	Розвинена, розміри пор більші, ніж у контролі
Еластичність м'якушки	Еластична		
Смак та аромат	Властиві пшеничному хлібу		
Питомий об'єм, см ³ /г	2,46	2,63	2,56
Формостійкість, Н/D	0,42	0,42	0,40
Пористість, %	69,0	72,0	71,0
Кислотність, град	2,1	2,8	2,8
Комплексний показник якості, бали	80,8	90,4	89,2

Для більш детального аналізу процесу бродіння у дослідних зразках було проаналізовано динаміку виділення вуглекислого газу (рис. 3).

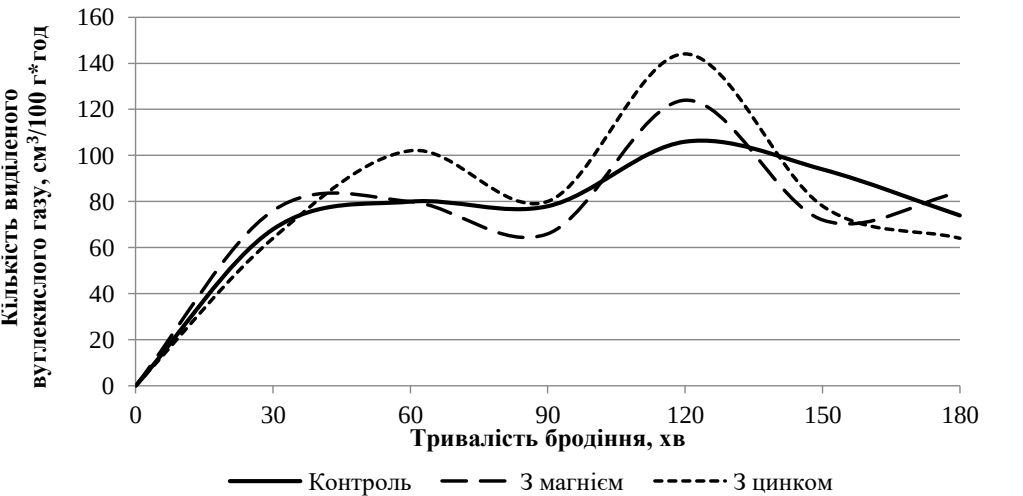


Рис. 3. Графік динаміки виділення вуглекислого газу в тісті

Встановлено, що у зразках з магнієм і цинком спостерігається двостадійний процес бродіння, як і в контрольному зразку. При цьому перебудова дріжджів на зброджування мальтози відбувається на 90 хв як для контролю, так і дослідних зразків. Однак кількість виділеного вуглекислого газу як при досягненні першого піку бродіння, так і другого більша у зразках з внесенням колоїдних розчинів магнію та цинку. При досягненні другого піку бродіння, що відзначається на 120 хв, у зразку з магнієм кількість виділеного вуглекислого газу була більшою, ніж у контролі, на 17%, а у

зразку з цинком — на 35%. Найбільш виразний ефект щодо інтенсифікації процесу бродіння спостерігається у зразку з цинком.

За зовнішнім виглядом готові вироби (рис. 4, табл. 2) з магнієм і цинком характеризувалися більш насиченим кольором скоринки виробів, ніж контроль, при цьому найбільше покращання забарвлення було відзначено у зразку хліба, збагаченого цинком, скоринка якого набувала яскравого золотистого кольору.



Рис. 4. Фото формових виробів:

а — хліб без добавок (контроль); *б* — хліб, збагачений магнієм; *в* — хліб, збагачений цинком

Збагачення пшеничного хліба колоїдними розчинами магнію та цинку сприяло збільшенню питомого об'єму виробів на 7% та 4% відповідно та його пористості. На формування смаку й аромату виробів внесення біогенних металів не вплинуло, вони були властиві пшеничному хлібу, без присмаків і сторонніх запахів.

Узагальнена оцінка органолептичних і фізико-хімічних показників якості виробів за комплексним показником якості показала, що внесення магнію та цинку в рецептуру пшеничного хліба у наноформі сприяло покращанню їх якості, адже комплексний показник якості виробів з магнієм був більшим, порівняно з контролем, на 9,6 бала, а виробів з цинком — на 8,4 бала.

Отримані результати щодо покращання якості виробів, збагачених магнієм і цинком, імовірно, зумовлені впливом біогенних металів на перебіг ферментативних процесів у тістовій системі та їх взаємодією з основними біополімерами борошна. Зокрема, магній і цинк є кофакторами ферментів, що беруть участь у метаболізмі дріжджів, підвищуючи енергетичний обмін у дріжджовій клітині, що сприяє підвищенню швидкості бродіння. Як свідчать наші дані, і магній, і цинк, за встановлених дозувань зумовлювали певну інтенсифікацію процесу бродіння у тісті, і в більшій мірі у разі внесення цинку. У розчині цинку, що вносили в тісто, вищий рівень електропровідності, ніж у магнію, що свідчить про його вищу іонну активність, що може сприяти його більшій хімічній активності та біологічній доступності в перебігу біотехнологічних процесів у тісті. Крім того, магній і цинк можуть проявляти свою активність як кофактори ферментів борошна, зокрема амілолітичних, що зумовлюють розщеплення крохмалю з накопиченням цукрів. Підтвердженням припущення щодо збільшення накопичення в тістовій системі цукрів є не тільки інтенсифікація процесів бродіння внаслідок покращання живлення дріжджів, але й формування більш забарвленої скоринки виробів завдяки інтенсифікації реакції меланоїдиноутворення.

Однак, незважаючи на виявлений більший ефект щодо покращання процесів бродіння та формування забарвлення скоринки виробів у разі застосування цинку, більший об'єм виробів було отримано у зразку з внесенням магнію. Ймовірно, це зумовлено також впливом металів на клейковину тіста. Іони цинку мають високу афінність до сульфгідрильних (-SH) і карбоксильних (-COO⁻) груп білків, які присутні в клейковині тіста, утворюючи з ними сильні зв'язки, що сприятиме зміцненню клейковинної структури. Магній, у свою чергу, утворює переважно іонні зв'язки з полярними групами білків, що менш стійкі, ніж ті, що формує цинк. Однак здатність магнію формувати містки між молекулами білків, з'єднуючи різні ділянки білкових ланцюгів, забезпечує покращання еластичності тіста та його здатності утримувати вуглекислий газ під час бродіння. Відмінна здатність магнію та цинку взаємодіяти з білками тіста обумовила формування більш пружної, порівняно з контролем, структури тіста з цинком, та більшої еластичної у зразку з магнієм. Властивості тіста оцінювалися органолептично на стадії оброблення тістових заготовок. Покращання еластичності тіста з магнієм при меншій, ніж у зразку з цинком, інтенсивності бродіння зумовило формування більшого об'єму хліба. Наведені припущення щодо впливу магнію та цинку, внесених у тістову систему у вигляді колоїдних розчинів, на біохімічні процеси у тістовій системі потребують подальших досліджень.

Висновок. Встановлено, що збагачення пшеничного хліба наноформами магнію та цинку, внесених у тісто у вигляді колоїдних водних розчинів, замість рецептурної кількості води, зумовлює інтенсифікацію процесів бродіння у тістовій системі, певне скорочення тривалості вистоювання тістових заготовок та отримання виробів більшого об'єму з кращими органолептичними показниками, зокрема, щодо забарвлення скоринки. Додавання Mg та Zn у хлібобулочні вироби може мати значний потенціал для покращення раціону харчування різних груп населення, особливо тих, хто перебуває у стресових або фізично навантажених умовах, таких як військовослужбовці, спортсмени або люди, які виконують важку фізичну працю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гуліч, М. П., Петренко, О. Д. (2023). Здорове харчування як фактор запобігання захворювань: політика ВООЗ та вітчизняний досвід (до 75-річчя діяльності ВООЗ в Україні). *Медицинські перспективи*, 28(3), 152—162. <https://doi.org/10.26641/2307-0404.2023.3.289218>.
2. Weffort, V. R. S., Lamounier, J. A. (2024). Hidden hunger — a narrative review. *Jornal de Pediatria*, 100, 10—17. <https://doi.org/10.1016/j.jped.2023.08.009>.
3. Малахова, Л. В. (2013). Шляхи подолання «прихованого» голоду як складової глобальної продовольчої проблеми. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна*, 1086, 86—89.
4. Lowe, N. M. (2021). The global challenge of hidden hunger: perspectives from the field. *Proceedings of the Nutrition Society*, 80(3), 283—289. <https://doi.org/10.1017/s0029665121000902>.
5. Osendarp, S. J. M. et al. (2018). Large-Scale Food Fortification and Biofortification in Low- and Middle-Income Countries: A Review of Programs, Trends, Challenges, and Evidence Gaps. *Food and Nutrition Bulletin*, 39(2), 315—331. <https://doi.org/10.1177/0379572118774229>.
6. Martini, D. et al. (2021). Ultra-Processed Foods and Nutritional Dietary Profile: A Meta-Analysis of Nationally Representative Samples. *Nutrients*, 13(10), 3390. <https://doi.org/10.3390/nu13103390>.
7. Monteiro, C. A. et al. (2019). Ultra-processed foods: what they are and how to identify them. *Public Health Nutrition*, 22(5), 936—941. <https://doi.org/10.1017/s1368980018003762>.
8. Costa, R. M. et al. (2024). Quantitative Assessment of the Inadequate Intake of Macronutrients, Minerals, and Vitamins Associated with Ultra-Processed Food Consumption. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(7), 888. <https://doi.org/10.3390/ijerph21070888>.

9. Das, J. K., Padhani, Z. A. (2022). Alleviating hidden hunger: an infallible bridge to improved health and nutrition. *The Lancet Global Health*, 10(11), 1539—1540. [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(22\)00421-1](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(22)00421-1).
10. Manzoor, M. F. et al. (2024). Bioaccessibility mechanisms, fortification strategies, processing impact on bioavailability, and therapeutic potentials of minerals in cereals. *Future Foods*, 10, 100425. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100425>.
11. Hennessy, Á., Walton, J., Flynn, A. (2013). The impact of voluntary food fortification on micronutrient intakes and status in European countries: a review. *Proceedings of the Nutrition Society*, 72(4), 433—440. <https://doi.org/10.1017/s002966511300339x>.
12. Olson, R. et al. (2021). Food Fortification: The Advantages, Disadvantages and Lessons from Sight and Life Programs. *Nutrients*, 13(4), 1118. <https://doi.org/10.3390/nu13041118>.
13. Luthringer, C. L. et al. (2015). Regulatory Monitoring of Fortified Foods: Identifying Barriers and Good Practices. *Global Health: Science and Practice*, 3(3), 446—461. <https://doi.org/10.9745/ghsp-d-15-00171>.
14. Аналіз регуляторного впливу до проекту наказу Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження Правил додавання вітамінів, мінеральних речовин та деяких інших речовин до харчових продуктів». URL: <http://surl.li/gdazqp> (дата звернення: 18.10.2024).
15. Петренко, О. Д., Гуліч, М. П. (2024). Ретроспективний аналіз споживання основних груп харчових продуктів населенням України. *Environment & Health*, 2(111), 48—53. <https://doi.org/10.32402/dovkil2024.02.048>.
16. Поручинська, І. та ін. (2022). Статистичний аналіз споживання продуктів харчування в Україні. *Науковий вісник Чернівецького університету*, 838, 13—19 <https://doi.org/10.31861/geo.2022.838.13-19>.
17. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 16.07.2020 р. № 1613 «Про затвердження Правил додавання вітамінів, мінеральних речовин та деяких інших речовин до харчових продуктів». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0891-20#Text> (дата звернення: 18.10.2024).
18. Проект постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку фортифікації харчових продуктів». URL: <http://surl.li/jayxdz> (дата звернення: 18.10.2024).
19. Shahi, A. et al. (2019). The role of magnesium in different inflammatory diseases. *Inflammopharmacology*, 27(4), 649—661. <https://doi.org/10.1007/s10787-019-00603-7>.
20. Pickering, G. et al. (2020). Magnesium Status and Stress: The Vicious Circle Concept Revisited. *Nutrients*, 12(12), 3672. <https://doi.org/10.3390/nu12123672>.
21. Prasad, A. S. (2014). Impact of the discovery of human zinc deficiency on health. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 28(4), 357—363. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.09.002>.
22. Cabrera, Á. J. R. (2015). Zinc, aging, and immunosenescence: an overview. *Pathobiology of Aging & Age-related Diseases*, 5(1), 25592. <https://doi.org/10.3402/pba.v5.25592>.
23. Олішевський, В. В. (2021). Науково-технічні засади застосування наноматеріалів для інтенсифікації масообмінних процесів харчових виробництв: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. Київ.
24. Пристрій для отримання колоїду металу: патент на корисну модель 130939 Україна. № u201809540; заявл. 21.09.2018; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 3 с.
25. Дробот, В. І. (2019). Довідник з технології хлібопекарського виробництва. Київ: ПрофКнига.
26. Технохімічний контроль сировини та хлібобулочних і макаронних виробів: навчальний посібник / за ред. чл.-кор. В. І. Дробот. Київ: Кондор-Видавництво, 2015.

УДК 006.013, 637.03

INSTITUTIONAL AND NORMATIVE ISSUES OF TECHNICAL REGULATION OF REQUIREMENTS FOR ECO-FRIENDLY PACKAGING OF FOODS

S. Verbytskyi, A. Minorova, N. Patsera, O. Kozachenko, L. Nedorizanyuk*Institute of Food Resources***S. Muižniece-Brasava***Latvian University of Life Sciences and Technologies*

Key words:

food products,
greening,
biodegradable plastics,
standards,
specifications.

Article history:

Received 01.11.2024

Received in revised form

15.11.2024

Accepted 18.12.2024

Corresponding author:

tk140@hotmail.com

ABSTRACT

Food packaging, including dairy packaging, made of biodegradable materials has not yet been adequately reflected in technical regulations. Ecological, including biodegradable, packaging materials must have adequate mechanical capacity, permeability, migration and other critical characteristic properties for food packaging. The specified requirements for eco-friendly packaging of food products as a process and for packaging materials used for this purpose should be reflected in regulatory documents of different levels — technical regulations, standards and specifications— by updating these documents or creating special regulatory documents on eco-friendly packaging. The purpose of the research, the results of which are reflected in this article, is to assess the possibility and feasibility of adding requirements for packaging of dairy and other food products using modern eco-friendly biodegradable materials to standards, specifications and documents of another level, which, taken together, represent the documentary basis of technical regulation. The above stated objective of the conducted research and the article based on its results required a comprehensive and consistent consideration of the features and scientific approaches to the issues of food packaging in general and biological packaging of the said products, as well as a study of the requirements for the implementation of technical regulation in the specified area. The study of the problem gives grounds for the conclusion that it is possible to include the requirements for eco-packaging in all regulatory documents that make up the documentary array of technical regulation — technical regulations, standards and specifications. A typical template for modifying standards to include the requirements for eco-packaging of food products is proposed. It may also be advisable to develop special regulatory documents, the scope of which will be the requirements for eco-packaging both in terms of packaging technologies and in terms of the biodegradable and other eco-packaging materials used. A scheme for involving the issues of eco-packaging of food products in the documentary base of technical regulation is proposed.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-8

ІНСТИТУЦІЙНІ ТА НОРМАТИВНІ ПИТАННЯ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВИМОГ ДО ЕКОЛОГІЧНОГО ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

С. Б. Вербицький, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-4211-3789

А. В. Мінорова, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-7557-1444

Н. М. Пацера, ORCID ID: 0000-0001-8737-9997

О. Б. Козаченко, ORCID ID: 0000-0002-2189-9583

Л. П. Недорізанюк, ORCID ID: 0000-0002-2190-5648

Інститут продовольчих ресурсів НААН, Київ, Україна

С. Муйжнієце-Брасава, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-6033-6241

Латвійський університет наук про життя та технології, Єлгава, Латвія

Біорозкладні пакування харчових продуктів наразі не знайшли належного відображення в технічному регулюванні. У нових і змінюваних нормативних документах повинні зазначатися вимоги щодо екологічності упаковки, її зручності для споживачів, ресурсоефективності, механічної міцності, проникності, міграції та інших властивостей, критичних у сенсі харчової безпеки. Доцільним є долучення, у межах технічного регулювання, вимог щодо екологічного пакування до технічних регламентів, стандартів і технічних умов.

Ключові слова: *продовольство, екологізація, біорозкладні пластики, стандарти, технічні умови.*

Вступ. Належне пакування є одним з найважливіших чинників гарантування харчової безпеки продовольства, дуже часто швидкопсувного і потенційно небезпечного для життя та здоров'я споживачів [1]. Нормативні документи містять, у цілому, подібні визначення терміна «пакування», що означає процес, технологічну операцію, на відміну від терміна «пакування», який визначають як засіб або комплекс засобів, що забезпечують захист продукції від пошкоджень і втрат навколишнього середовища від забруднень. Тара — основний елемент пакування, що являє собою виріб для розміщення і просторового переміщення продукції [2]. У сучасних умовах питомі вимоги до пакувань харчових продуктів, як-от: надійність захисту продукції від несприятливих зовнішніх впливів, подовження терміну зберігання, інформування споживачів про склад продукту та реквізити виробника тощо, доповнено вимогами щодо належної відповідності екологічним вимогам. Очевидною глобальною тенденцією є значне збільшення частки продукції, яку виробляють у споживчій тарі, причому роздрібний ринок вимагає подальшого збільшення пропозиції малогазових і малогабаритних пакувань. Отже, фактом стає лавиноподібне навантаження на довілля, оскільки переважна частина пакувальних матеріалів (полімерні плівки, полімерна тара для рідких продуктів, скляна тара тощо) фактично не зазнають біорозкладення за природних умов [2, 3].

У Європейському Союзі є чинною Директива (ЄС) 2015/720 Європейського Парламенту і Ради від 29 квітня 2015 р. про скорочення використання тонких пластикових пакетів, яка доповнила базову Директиву 94/62/ЄС Європейського Парламенту і Ради від 20 грудня 1994 р. про упаковку і відходи від упаковки [4]. Директиву Директива (ЄС) 2015/720 [4] в Україні належним чином гармонізовано, для чого було прийнято Закон України «Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України» [5]. У зазначеному Законі України містяться нормативні обмеження на

використання пластикових пакетів, крім біорозкладних пластикових і надлегких, визначено вимоги до біорозкладних пластикових пакетів, а також їх маркування.

Часто використовуваний на практиці термін «біопластмаси» не є застандартованим і може застосовуватися як для позначення біорозкладних матеріалів, придатних для компостування, так і для всіх пластмас, вироблених на основі відновлюваних природних ресурсів [6]. Власне, і термін «біорозкладний» не є однозначно визначеним, оскільки умови біорозкладення не запроваджені нормативно. На практиці доказом біорозкладення є викиди CO_2 унаслідок біологічних процесів перетворення. Визначення біорозкладення через емісію вуглекислого газу чітко відрізняє його від процесу розкладу, ініційованого спеціальними добавками, що приводять лише до фрагментації звичайного полімеру [7]. Біопластмаси, вироблені на основі відновлюваних природних ресурсів, можуть містити до 100% натуральних компонентів, проте не бути придатними до біологічного розкладу [3].

Пакування харчових, зокрема й молочних продуктів, виготовлені з біорозкладних матеріалів, у тому числі нормованих Законом України [5], є обов'язковими для застосування, проте у більш широкому сенсі технічного регулювання не знайшли ще свого належного відображення. Таке відображення може і повинне бути здійснено в ході розроблення нових та актуалізації чинних нормативних документів.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Відомою є дуалістична суперечність, властива проблемі сучасного масового пакування харчових продуктів, яка полягає в тому, що і основи безпечності харчових продуктів, і сучасні засади ресурсозбереження, тобто вимоги до продовження дозволених термінів придатності харчових продуктів, формують потребу в пакуваннях, механічно міцних і стійких у хімічному та біохімічному сенсі. Втім матеріали з такими характеристиками вкрай важко піддаються розкладанню в природних умовах. Розуміння актуальності вирішення цієї проблеми стимулює пошук матеріалів, що ефективно розкладаються в природному середовищі після використання, та належне нормативне оформлення використання упаковки продовольства, виготовленої з цих матеріалів [2]. Методи і матеріали, що використовуються для пакування харчових продуктів, шляхи підвищення екологічності упаковки, її зручності для споживачів тощо повинні оцінюватися за такими критеріями, як ресурсоефективність і вплив на економічні показники виробництва загалом. Зазначеним вимогам повною мірою відповідають біорозкладні пакування, полегшені та малогабаритні пакування, пакування з покриттями біологічного походження [8].

Критичними щодо впливу навколишнього середовища та забезпечення збереження якості у процесі транспортування та зберігання аспектами є механічні та бар'єрні властивості кисню, вуглекислого газу, води, світла та запахів. Крім того, при виборі пакувальних матеріалів продуктів слід враховувати безпечність (міграція, ріст мікроорганізмів), стійкість (термостійкість і хімічна стійкість), вимоги до оброблення (зварюваність та придатність для формування), зручність і маркетингові вимоги (комунікація, можливості друку) [8—12].

Механічні властивості мають вирішальне значення і повинні бути адаптовані в такий спосіб, щоб продукт був захищений навіть при тривалому зберіганні й транспортуванні. Полімери можна адаптувати, до певної міри, для відповідності певним механічним властивостям, наприклад, шляхом вибору сировини або змішування з іншими полімерами чи наповнювачами, або шляхом додавання волокон, зшивання, пластифікації. Позитивною є кореляція між кількістю пластифікатора в полімері та міцністю на розрив. Для полілактиду (PLA) орієнтація полімеру під час обробки може покращити механічну міцність й термічну стабільність [8, 9, 13—16].

Пакувальні матеріали за період свого життєвого циклу протистоять деформації за високих температур протягом певного періоду часу, проте стабільність біопластиків знижується зі зростанням температури, як це спостерігається для PLA [9, 14], особливо в разі впливу високої вологості [17]. Тара, виконана зі звичайного PLA, є стабільною лише до 55 °C, але орієнтовану плівку PLA (OPLA) використовують за температур до 150 °C [18].

Бар'єрні властивості щодо водяної пари залежать від типу продукту. Це особливо важливо, наприклад, у разі пакування таких продуктів, як масло та сир, де запобігання втраті вологи та висихання поверхні є ключовим питанням. Крім того, пакування продуктів з коротким терміном зберігання є менш критичним, оскільки температура є низькою, а термін зберігання становить менше 10 днів [8].

Бар'єрні характеристики щодо газів також залежать від природи продукту. Наприклад, високі бар'єрні властивості потрібні для пакування продуктів у модифікованих середовищах (нарізані сири та сухе молоко), менш щільний газовий бар'єр достатній для пакування продуктів з коротким терміном зберігання (питне молоко та йогурти) [20].

Існують методологічні та технічні складнощі стосовно порівняння бар'єрних властивостей різних біопакувань, оскільки порівняння між різними матеріалами ускладнене або навіть неможливе через використання різного технологічного обладнання, відмінності у параметрах сировини та різні умови вимірювання. Рішення залежить від результатів досліджень терміну придатності продукту та пакувального матеріалу. Важливо враховувати розміри пакування та уникати великих площ поверхні по всьому його об'єму. Причина полягає в тому, що біополімери часто є гідрофільними і, отже, не є цілком надійними бар'єрами щодо водяної пари [8, 16].

Стосовно пакувань харчових продуктів термін «міграція» використовують для означення процесу перенесення речовин з пакування на упакований продукт. Відповідно до стандартів Європейського Союзу, загальна міграція не повинна перевищувати межі 10 мг/дм². Мігрантами з біологічних пакувальних матеріалів біопакування можуть бути, наприклад, молочна кислота, лінійний і циклічний димер лактиду, олігомери PLA, харчовий та гідролізований крохмаль. Ці мігранти можуть природно бути присутніми в харчових продуктах і, отже, можуть вважатися безпечними для цілей пакування харчових продуктів [19]. Додаткові дослідження показали, що міграція різних полімерів PLA у воду, октинову кислоту, ізооктан, оливкову олію і твердий стимулятор — модифікований феніленоксид, є значно нижчою ніж 10 мг/дм² [8,20].

Окреслені вище вимоги мають бути враховані при викладенні вимог до біорозкладних пакувань харчових, зокрема молочних, продуктів у стандартах [21] та інших нормативних документах.

Мета дослідження. Оцінювання можливості та доцільності долучення вимог щодо пакування молочних та інших харчових продуктів із застосуванням сучасних екологічних біорозкладних матеріалів до стандартів, технічних умов та документів іншого рівня, які, у своїй сукупності, являють собою документальну базу технічного регулювання.

Матеріали і методи. Для виконання дослідження використано засади системного підходу до вивчення фактичних матеріалів, зокрема наукової та науково-практичної літератури, нормативних актів, нормативних документів тощо, а також абстрактно-логічного підходу до узагальнення результатів дослідження та формулювання висновків.

Результати досліджень. Зазначена вище мета проведених досліджень та оформленої за їхніми результатами статті вимагала комплексного та несуперечливого врахування особливостей та наукових підходів до питань пакування харчових продуктів взагалі та біологічного щадного до довкілля пакування зазначених продуктів, а також вивчення вимог до реалізації технічного регулювання в зазначеній царині. Слід зауважити, що окреслені питання частково були предметом проведеного авторами дослідження, результати якого висвітлено у [21], де пропонувалося модифікувати чинні національні стандарти з метою залучення вимог екологічного пакування продовольства шляхом розроблення поправок до них чи, за необхідності, їхнього перегляду. Рекомендувалося складник «Терміни та визначення» доповнити такими термінами та визначеннями понять у сенсі внесення до нього вимог екологічного пакування харчових продуктів:

х.1 екологічне пакування. Пакування харчових продуктів у такий спосіб, щоб унеможливити або принаймні мінімізувати шкідливий вплив пакувань і пакувальних матеріалів на довкілля, зокрема внаслідок утилізації та/або знищення використаних пакувань;

х.2 екологічні пакування. Вироби та матеріали, використовувані для пакування харчових продуктів, відповідні умовам екологічного пакування;

х.3 розкладення. Зміна первісних властивостей макромолекул полімерного матеріалу, що призводять до руйнації його структури, незважаючи на характер цієї руйнації;

х.4 біорозкладення. Зміна первісних властивостей макромолекул полімерного матеріалу, що призводить до руйнації його структури за природних умов;

х.5 біорозкладні пакування. Матеріали, що повністю біорозкладаються, або пакувальні вироби, продукуювані з таких матеріалів;

х.6 харчове (їстівне) покриття. Шар їстівного матеріалу, нанесений на поверхню харчового продукту в технологічних цілях, який може бути спожитий з цим продуктом.

Разом з переліченими вище може бути наведено й інші терміни та визначення відповідно до цілей і змісту стандартів, які піддають модифікуванню. Складник «Вимоги до об'єкта стандартизації» у сенсі відповідності вимогам екологічного пакування слід доповнити вимогами та положеннями щодо конкретної номенклатури харчових продуктів, які можуть/повинні бути упаковані з використанням екологічного пакування; фізичних, хімічних, структурно-механічних та інших відповідних параметрів харчових продуктів, на які поширюються стандарти екологічного пакування; термінів, температури, вологості та інших відповідних параметрів зберігання харчових продуктів, упакованих з використанням екологічного пакування; умов перевезення та реалізації харчових продуктів, упакованих з використанням екологічних пакувань; інших доречних параметрів. Зазначені вимоги, крім структурного елемента «Вимоги до об'єкта стандартизації», також наведено у структурних елементах «Пакування», «Правила транспортування та зберігання», «Методи контролю» та «Правила приймання». Структурний елемент «Пакування» доповнюють положеннями про порядок екологічного пакування харчових продуктів щодо номенклатури можливих способів екологічного пакування; номенклатуру матеріалів і пакувальних виробів, що використовуються для екологічного пакування; технічні та технологічні вимоги до процесу екологічного пакування; інші відповідні параметри тощо [21].

На відміну від національних стандартів, розроблення та модифікування, яких ретельно нормовано основоположними стандартами ДСТУ 1.2:2024 [22] та ДСТУ

1.5:2015 [23], актуалізація технічних регламентів повинна здійснюватися з дотриманням положень Закону України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» [24]. Важливими і дуже часто використовуваними на практиці, зокрема в харчовій промисловості, є нормативні документи виду технічних умов (ТУ), в яких цілком доречно викладати вимоги до екологічного пакування. Втім наразі не є чинним ДСТУ 1.3:2004 [25], яким раніше користувалися для розроблення технічних умов, і ці нормативні документи регламентують на рівні установ і організацій. Прикладом такого документа є стандарт СОУ КЗПС 74.9-02568182-003:2016 «Технічні умови України. Настанови щодо типової побудови, викладення, позначення, прийняття та надання чинності» [25].

Альтернативою модифікуванню чинних нормативних документів щодо екологічного пакування харчових продуктів може бути розроблення нових спеціалізованих нормативних документів усіх згаданих вище рівнів — від технічних регламентів до технічних умов. Вважаємо, що таке розв'язання проблеми було б ефективнішим, оскільки введення в обіг нових харчових продуктів могло б здійснюватися на базі вже наявних і відпрацьованих вимог. Загальну схему залучення питань екологічного пакування харчових продуктів до документальної бази технічного регулювання зображено на рис. 1.



Рис. 1. Схема залучення питань екологічного пакування харчових продуктів до документальної бази технічного регулювання

Отже, у всьому світі питання виробництва екологічних, у тому числі біорозкладних, пакувань харчових продуктів є важливими у сенсі зменшення навантаження на довкілля. Вчені та фахівці у всьому світі розробляють прийнятні техніко-технологічні рішення для розв'язання зазначених проблем [27, 28], і ми сподіваємося, що цей матеріал буде корисним у сенсі створення надійної нормативної бази екологічного пакування харчових продуктів в Україні та в інших країнах.

Висновки. Актуальні тенденції щодо екологізації виробництв, зокрема агропромислового комплексу та його важливої складової — харчової промисловості, вимагають щонайширшого впровадження щадних щодо довкілля екологічних пакувань харчових продуктів. Різноманітні біорозкладні пакувальні матеріали продовольчих

товарів продовжують набувати розповсюдження, відповідно зростає актуальність питання нормативного регулювання зазначених питань. Вивчення проблеми дає підстави для висновку про те, що існує можливість долучення вимог до екологічного пакування до всіх нормативних документів, що складають документальний масив технічного регулювання — технічних регламентів, стандартів і технічних умов. Може також бути доцільним розроблення спеціальних нормативних документів, сферою застосування яких будуть вимоги до екологічних пакувань і в сенсі технологій пакування, і в сенсі застосовуваних біорозкладних та інших екологічних пакувальних матеріалів.

Фінансування. Дослідження фінансувалися у рамках спільного українсько-латвійського наукового проєкту «Удосконалене використання щадних до довкілля біорозкладних пакувань для молочних продуктів (BIOPACK Dairy)» згідно з наказом Міністерства освіти та науки України від 15.03.2024 р. «Про фінансування спільних українсько-латвійських науково-дослідних проєктів у 2024 р.».

ЛІТЕРАТУРА

1. Халайджі, В. В., Кривошей, В. М. (2018). *Упаковка для харчових продуктів та напоїв*. Київ: ІАЦ «Упаковка».
2. Вербицький, С. Б., Копилова, К. В., Козаченко, О. Б., Вербова, О. В., Кос, Т. С. (2019). Екологічна упаковка харчових продуктів (від теорії до практики). *Упаковка*, 4. 30—34.
3. Копилова, К. В., Вербицький, С. Б., Кос, Т. С., Вербова, О. В., Козаченко, О. Б. (2018). Оцінювання можливості та доцільності використання екологічних пластмас для пакування харчових продуктів. *Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки: збірник наукових праць за матеріалами XI Міжнародної наук.-практ. конф., м. Полтава, 20—21 грудня 2018 р.*, Полтава, 140—145.
4. Directive (EU) 2015/720 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 amending Directive 94/62/EC as regards reducing the consumption of lightweight plastic carrier bags.
5. України, Закон. «Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України». *Відомості Верховної Ради України*, 2021. № 31. 1489—20.
6. Енгельс, Д., Марта, Д., Лор, С., Ціммерманн, П. (2012). Пластмаси, створені природою: від мрії до реальності. *Упаковка*, 6. 14—15.
7. Narayan, R. (2010). Misleading claims and misuse. Proliferate in the Nascent. *Bioplastics Magazine*, 1(5), 38—41.
8. Muižniece-Brasava, S., Verbytskyi, S., Kuts, O., Minorova, A., Patsera, N., Kozachenko, O., Nedorizanyuk, L. (2023). Overview of the current state of scientific research and practical access in the areas of biological dairy packaging. *Food Resources*, 11(21). 9—23. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-01>.
9. Jakobsen, M., Holm, V., Mortensen, G. (2008). Biobased packaging of dairy products. *Environmentally Compatible Food Packaging*, 478—495. doi:10.1533/9781845694784.3.478.
10. Marca Alderete, N. Y. (2015). Envases y embalajes para la industria láctea.
11. Haugaard, V. K., Udsen, A.-M., Mortensen, G., Høgh, L., Petersen, K., Monahan, F. (2001). Potential food applications of biobased materials. An EU-Concerted Action Project. *Starch/Starke*, 53(5), 189—200. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200105\)53:5<189::AID-STAR189>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200105)53:5<189::AID-STAR189>3.0.CO;2-3).
12. Robertson, G. L. (2006). *Edible and biobased food packaging materials*. In Food Packaging: Principles and Practice. Taylor & Francis. New York, Chapter 3.
13. Van Tuil, R., Fowler, P., Lawther, M., Weber, C. J. (2000). Properties of biobased materials. In: Weber, C. J. (Ed.). *Biobased Packaging Materials for the Food Industry. Status and Perspectives*. KVL Department of Dairy and Food Science, Frederiksberg, 13—41.
14. Södergård, A., Stolt, M. (2002). Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition. *Prog Polym Sci.*, 27, 1123—1163. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(02\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(02)00012-6).
15. Parris, N., Coffin, D. R., Joubran, R. F., Pessen, H. (1995). Composition factors affecting the water vapour permeability and tensile properties of hydrophilic films. *J. Agric. Food Chem.*, 43. 1432—1435.

16. Sinclair, R. G. (1996). The case for polylactic acid as a commodity packaging plastic. *JMS — Pure Appl Client*, A33(5), 585—597. <https://doi.org/10.1080/10601329608010880>.
17. Visakh, P.M. (2014). Polyhydroxyalkanoates (PHAs), their Blends, Composites and Nanocomposites: State of the Art, New Challenges and Opportunities, Polyhydroxyalkanoates (PHAs) based Blends, Composites and Nanocomposites. <https://doi.org/10.1039/9781782622314-00001>.
18. Копилова, К., Вербицький, С., Козаченко, О., Вербова, О. (2019). Основні засади сучасного біологічного пакування молочних продуктів. *Продовольчі ресурси*, 7(13), 69—86. <https://doi.org/10.31073/foodresources2019-13-07>.
19. Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food Text with EEA relevance.
20. Plackett, D. V., Holm, V. K., Johansen, P., Ndoni, S., Nielsen, P. V., Sipilainen-Malm, T., Södergård, A., Vertichel, S. (2006). Characterization of i-poly lactide and l-poly lactide-polycaprolactone copolymer films for use in cheese-packaging applications, *Pack Technol. Sci.*, 19, 1—24. <https://doi.org/10.1002/pts.704>.
21. Kopylova, K., Verbytskyi, S., Kos, T., Verbova, O., Kozachenko, O., Patsera, N. (2020). Scientific bases of standardization of requirements for ecological packaging of food products. *Food Resources*, 15, 114—123. <https://doi.org/10.31073/foodresources2020-15-12>.
22. ДСТУ 1.2:2024. Національна стандартизація. Правила проведення робіт з національної стандартизації. [Чинний від 2024-09-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2024. 40 с.
23. ДСТУ 1.5:2015. Національна стандартизація. Правила розроблення, викладання та оформлення. [Чинний від 2017-02-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 65 с.
24. Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» від 15.01. 2015 р. № 124-VIII. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/124-19, \(100\), 2011](https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/124-19_(100)_2011).
25. ДСТУ 1.3:2004 Національна стандартизація. Правила побудови, викладання, оформлення, погодження, прийняття та позначення технічних умов. [Чинний від 2005-01-01]. Вид. офіц. Київ.: ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2004.
26. СОУ КЗПС 74.9-02568182-003:2016 «Технічні умови України. Настанови щодо типової побудови, викладення, позначення, прийняття та надання чинності». [Чинний від 2016-01-13]. К.: ДП «Укрметртестстандарт», 2016.
27. Cornejo Reyes, G. V., Marinero Orantes, E. A., Funes Guadrón, C. R., Toruño, P. J., Zúniga-González, C. A. (2020). Biopolímeros para uso agro industrial: Alternativa sostenible para la elaboración de una película de almidón termo plástico biodegradable. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 11(6). <https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i11.9824>.
28. Ramírez, A., Hernández, J., Villanueva, S. (2019). Nota Técnica: Tecnologías para la obtención de bioplásticos a partir de diferentes materias primas: Recibido:/octubre 2019; Aceptado:/diciembre 2019. *Ciencia en Revolución*, 5(16), 140—149.

УДК 663.5:004.896

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR
VIRTUAL SENSORS TO MONITOR DYNAMIC
PROCESSES IN THE DISTILLATION DEPARTMENT OF
ETHANOL PRODUCTION

O. Omelchenko, N. Lutska
National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
virtual sensors, modeling, machine learning models, ethanol industry, distillation	The article investigates the development and comparison of mathematical models' effectiveness for virtual sensors used in monitoring processes of the distillation department in ethanol production. The research relevance is determined by the complexity of controlling distillation parameters due to nonlinear and inertial relationships between technological variables that affect the final product quality and production energy efficiency. Effective control of these parameters is critical for optimizing production, minimizing energy consumption, and ensuring consistent product quality. An analysis of current research regarding the application of virtual sensors in industry and machine learning methods for time series data processing has been conducted. Virtual sensors offer a flexible and adaptive solution for enhancing process control by providing real-time monitoring, predictive capabilities, and fault-tolerant operation. Based on the production data from the distillation department over 12 hours of operation, a comparative analysis of five machine learning models was performed: XGBoost, Decision Tree, NARX, Gradient Boosting, and RNN. The models' effectiveness was evaluated using MSE, R^2 metrics, and the Akaike information criterion. This approach ensures a comprehensive evaluation of both the predictive accuracy and the complexity of the models. For cross-validation, the TimeSeriesSplit method was applied, taking into account the temporal sequence of data. According to the research results, the Gradient Boosting model demonstrates the best balance between prediction accuracy ($MSE = 0.00048$, $R^2 = 0.972$) and model complexity according to the Akaike criterion. Its performance stability across various evaluation datasets further validates its robustness and suitability for practical applications in an industrial setting. The model showed stable performance on all test datasets and is recommended for implementation in the distillation department's monitoring system as a component of the digital twin. By integrating this model into the digital twin framework, the distillation process can benefit from enhanced monitoring, optimization, and decision-making capabilities, ultimately improving operational efficiency and product quality.
Article history: Received 26.11.2024 Received in revised form 28.11.2024 Accepted 16.12.2024	
Corresponding author: alexmir_98@ukr.net	
DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-9	

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВІРТУАЛЬНИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ДИСТИЛЯЦІЙНОМУ ВІДДІЛЕННІ СПИРТОВОГО ВИРОБНИЦТВА

О. С. Омельченко, аспірант

Н. М. Луцька, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-8593-0431

Національний університет харчових технологій

У статті досліджується розробка та порівняння ефективності математичних моделей віртуальних сенсорів для моніторингу процесів дистиляційного відділення спиртового виробництва.

На основі виробничих даних дистиляційного відділення за 12 год роботи здійснено порівняльний аналіз п'яти моделей машинного навчання: XGBoost, DecisionTree, NARX, GradientBoosting та RNN. Для оцінки ефективності моделей використано метрики MSE, R^2 та інформаційний критерій Акаїке.

За результатами дослідження встановлено, що модель GradientBoosting демонструє найкращий баланс між точністю прогнозування ($MSE=0,00048$, $R^2=0,972$) та складністю моделі згідно з критерієм Акаїке.

Ключові слова: віртуальні сенсори, моделювання, моделі машинного навчання, спиртова промисловість, дистиляція.

Постановка проблеми. Дистиляція є одним із фундаментальних етапів спиртового виробництва, що визначає якість, чистоту та міцність кінцевого продукту, впливаючи на ефективність виробництва спирту в цілому. Процес дистиляції характеризується наявністю складних, нелінійних та інерційних взаємозв'язків між технологічними змінними, що ускладнює традиційним методам аналізу контроль над стабільністю і точністю контролю параметрів процесу, які визначають якість кінцевого продукту, енергетичну ефективність та загальну продуктивність системи. Застосування віртуальних сенсорів (ВС) покращує контроль за перебігом процесів шляхом моніторингу роботи фізичних сенсорів, компенсації їх функціоналу внаслідок збоїв або відмов, отримання точних значень параметрів, які важко або неможливо виміряти безпосередньо, прогнозування оптимальних режимів роботи обладнання та змін параметрів у реальному часі. Гнучкість та адаптивність ВС дає їм змогу забезпечувати стабільну роботу навіть при зміні виробничих умов, наприклад, при зміні сировини. Крім цього, вони є важливою складовою цифрових двійників, які допомагають моделювати, оптимізувати та керувати виробничими процесами у віртуальному середовищі.

Ефективність ВС значною мірою залежить від точності й адекватності математичних моделей, на основі яких вони функціонують. Ці моделі повинні враховувати складні нелінійні взаємозв'язки між параметрами процесу дистиляції, а також динамічні зміни, які виникають під час роботи обладнання. Проблема моделювання ВС для дистиляційного відділення спиртового виробництва недостатньо представлена в науковій літературі та потребує додаткового вивчення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічний розвиток значно розширив можливості використання віртуальних сенсорів (ВС) завдяки вдосконаленню апаратного забезпечення, алгоритмів обробки даних і доступності технологій моделювання. Це сприяло підвищенню точності, адаптивності та швидкості їх роботи, а

також активному дослідженню й впровадженню ВС у склад інформаційних систем (ІС) [1].

У працях [3—5] розглядаються ефективність та переваги ВС, у [6—11] описується їх інтеграція в різноманітні системи для покращення моніторингу та аналізу даних. Зокрема, у [2] акцентується увага на ролі ВС у подоланні розриву між фізичним і цифровим світом. ВС визначаються як програмні об'єкти, що збирають, об'єднують і агрегують дані з фізичних чи віртуальних датчиків для забезпечення інформацією, що може бути використана в ІС.

Одним із ключових аспектів функціонування ВС є застосування функції злиття даних (data fusion function), яка перетворює вихідні сигнали на потрібні змінні з використанням математичних моделей. При виборі моделей для ВС важливо забезпечити баланс між відповідністю характеристикам об'єкта керування та складністю моделі, адже простіші моделі забезпечують вищу надійність і менші витрати на їх підтримку [1].

Окрему увагу приділено використанню моделей машинного навчання у складі ВС. У [10—12] досліджується їх впровадження для підвищення можливостей ВС, зокрема для обробки часових рядів [10]. Дослідження [13] описує застосування регресійних моделей для аналізу масових витрат і температур у системах кондиціонування, що дає змогу ефективно виявляти несправності обладнання.

Всупереч значному прогресу у використанні віртуальних сенсорів у різних галузях проблеми, пов'язані із застосуванням та моделюванням ВС для дистиляційного відділення, залишаються недостатньо вивченими та потребують подальшого дослідження.

Мета дослідження: розробити та порівняти ефективність математичних моделей віртуальних аналізаторів для моніторингу процесів дистиляційного відділення спиртового виробництва в умовах динамічних змін процесу.

Матеріали і методи. ВС відкривають нові можливості для моніторингу та управління дистиляційними процесами, дають змогу підвищити точність вимірювання важливих параметрів, компенсувати збої фізичних сенсорів, прогнозувати оптимальні режими роботи та забезпечувати адаптацію до змін виробничих умов. Важливим аспектом їх успішного функціонування є вибір математичних моделей, здатних адекватно враховувати нелінійні зв'язки та динаміку системи.

Методи машинного навчання є перспективним інструментом для вирішення цих проблем завдяки можливості виявляти приховані залежності між параметрами процесу і точно прогнозувати вихідні величини на основі вхідних даних часових рядів. Використання алгоритмів, здатних ефективно працювати з нелінійними взаємозв'язками, часовими залежностями та багатовимірними даними, відкриває можливості для точного моделювання складних систем і врахування багатofакторних впливів.

Для порівняння результатів передбачення математичних моделей було використано такі показники:

1. MSE (Mean Squared Error) — метрика, яка використовується для оцінки якості прогнозу моделі, особливо в задачах регресії. MSE показує середнє значення квадратів помилок між фактичними значеннями (y_i) і прогнозованими значеннями ($\hat{y}_i$):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

де n — кількість спостережень, y_i — фактичне (реальне) значення, $\hat{y}_i$ — прогнозоване значення, $(y_i - \hat{y}_i)^2$ — квадрат помилки для кожного спостереження.

2. R^2 (коефіцієнт детермінації) — статистична метрика, яка показує, наскільки добре модель пояснює варіацію цільової змінної порівняно з її середнім значенням:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS},$$

де $RSS = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ — залишкова сума квадратів (помилки моделі), $TSS = \sum (y_i - \bar{y})^2$ — загальна сума квадратів (варіація фактичних значень навколо середнього), y_i — фактичне значення, $\hat{y}_i$ — прогнозоване значення, $\bar{y}$ — середнє значення фактичних значень.

3. AIC (Akaike Information Criterion) — оцінювач похибки поза вибіркового передбачування і, відтак, відносної якості статистичних моделей для заданого набору даних. AIC дає змогу порівнювати моделі та обирати ту, яка найкраще збалансовує точність (якість підгонки) та простоту (число параметрів):

$$AIC = 2k - 2\ln(L),$$

де k — кількість параметрів у моделі, L — максимальне значення функції правдоподібності моделі (міра того, наскільки добре модель описує дані).

Для підвищення якості перевірки роботи моделей в роботі застосовується Time Series Split — техніка перехресної перевірки (cross-validation), яка спеціально адаптована для роботи з часовими рядами. Її використання допомагає забезпечити коректне розбиття даних з урахуванням їх послідовності, що важливо для даних часових рядів, які залежать від часу. На відміну від стандартного k-fold cross-validation, де дані діляться випадковим чином, у Time Series Split дані розділяються таким чином, щоб більш ранні часові точки використовувалися для тренування, а більш пізні — для тестування. Це імітує реальний сценарій, коли прогнозується майбутнє на основі минулого.

Викладення основних результатів дослідження. На основі даних роботи дистиляційного відділення спиртового заводу (рис. 1) було проведено дослідження та порівняльний аналіз моделей для ВС. Цільовим показником обрано точність передбачення поведінки змінної за допомогою математичної моделі.

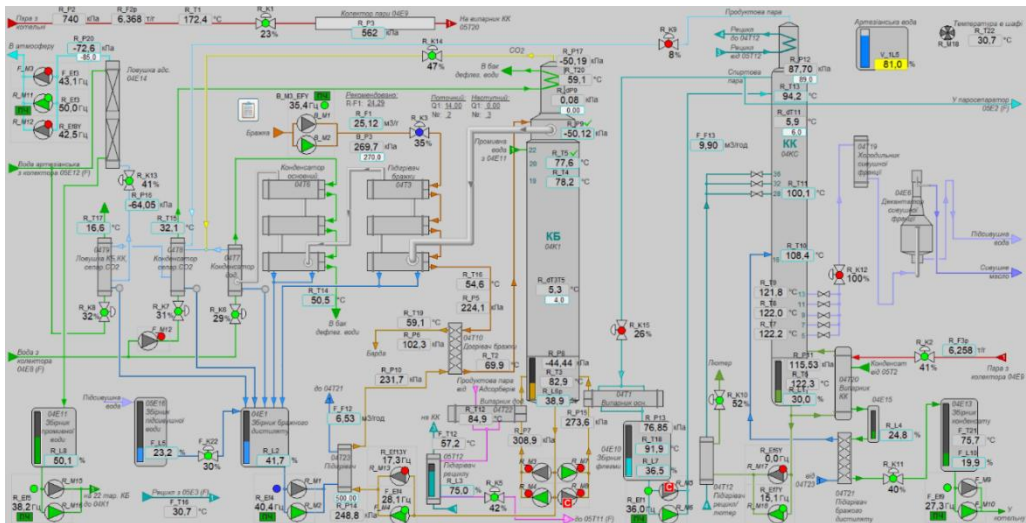


Рис. 1. Мнемосхема дистиляційного відділення

1. Дані та мета прогнозування. Розробка ВС базується на аналізі даних часових рядів, отриманих від датчиків дистиляційного відділення, які включають вимірювання температури, тиску, рівнів і витрат за 12 год роботи в стаціонарному режимі. Метою є створення моделі, здатної передбачати температуру над тринадцятою тарілкою колони концентрації (рис. 2), враховуючи високу кореляцію між змінними та наявність нестационарних ефектів у часових рядах. Віртуальний сенсор дає змогу доповнити фізичні датчики, а також забезпечує безперервний моніторинг та прогнозування у реальному часі, що підвищує ефективність управління технологічними процесами та якість продукції. Доповнення фізичних датчиків віртуальними дає змогу контролювати технологічні змінні у разі зникнення лінії зв'язку або поломки датчика, підвищуючи надійність системи за рахунок резервування та перехресної перевірки даних.

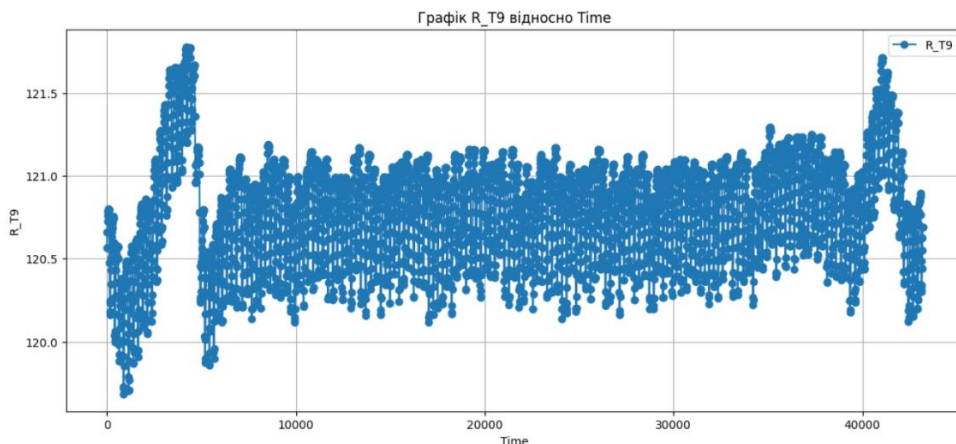


Рис. 2. Графік зміни температури над тринадцятою тарілкою колони концентрації

2. Перевірка концепції. Для перевірки працездатності моделі ВС на наявних даних та оцінки базових результатів було проведено попередню перевірку концепції (Proof of Concept) за допомогою пакета MATLAB. MATLAB — це пакет прикладних програм для числового аналізу, створений компанією Math Works. Вибір цього інструменту був зумовлений тим, що MATLAB володіє низкою необхідних для виконання цієї задачі функцій:

- є зручним інструментом для швидкої побудови й тестування моделей завдяки великій кількості вбудованих функцій, зокрема для роботи з нейронними мережами;
- дає змогу легко експериментувати з архітектурою моделі, кількістю затримок, кількістю нейронів у прихованому шарі та іншими параметрами моделі;
- має потужні інструменти для роботи з Time Series Split та іншими методами крос-валідації, що дає змогу перевірити стійкість моделі на різних наборах даних.

Реалізація NARX моделі в середовищі MATLAB із застосуванням Time Series Split для 5-fold cross-validation показала результати (рис. 3—5), на основі яких можна зробити такі висновки: усі чотири оброблені фолди демонструють низькі значення Train Performance (варіант критерію 1), що вказує на ефективне навчання моделі на тренувальних даних. Графіки Performance (рис. 4) відображають залежність значення MSE (по вертикалі) від кількості епох (по горизонталі) для навчальних і тестових вибірок в кожному фолді. Графіки регресії (рис. 5) показують реальні значення цільової змінної по вертикалі та передбачені по горизонталі. MATLAB порівнює їх кореляцію та розраховує коефіцієнт кореляції дійсних і передбачених значень для оцінки

адекватності моделі: близькість точок до лінії $Y = T$ і високий коефіцієнт кореляції вказують на якість моделі. Результати Test Performance значно варіюються, значення похибки на першому фолді є значно вищими за значення в наступних фолдах, що може бути наслідком появи нових трендів на тестових даних, вплив яких зменшується зі збільшенням кількості навчальних даних моделі.

```
>> NARX_TimeSeriesSplit
Processing fold 1...
Fold 1 -> Train Performance: 0.000064, Test Performance: 0.075339
Processing fold 2...
Fold 2 -> Train Performance: 0.000063, Test Performance: 0.006470
Processing fold 3...
Fold 3 -> Train Performance: 0.000047, Test Performance: 0.006698
Processing fold 4...
Fold 4 -> Train Performance: 0.000081, Test Performance: 0.001071
Processing fold 5...
Not enough data points left for this fold. Skipping...
Average Train Performance: 0.000064
Average Test Performance: 0.022394
```

Рис. 3. Результати роботи NARX з Time Series Split для 5-fold cross-validation в MATLAB

Загалом, середнє значення Test Performance становить 0,022394, що вказує на задовільне узагальнення моделі, але з потенційними варіаціями залежно від частини даних. На четвертому фолді, коли модель отримала достатню варіативність даних для навчання, похибка на тестових даних становить всього 0,001, з коефіцієнтом кореляції 0,995, що вказує на те, що модель дуже добре відображає зв'язок між вхідними даними та цільовими значеннями.

Отримані результати вказують на перспективність подальшого моделювання.

3. Моделювання. Моделювання здійснювалося з використанням мови Python та його бібліотек в середовищі Google Colab. Було здійснено порівняння ефективності прогнозування таких моделей: XGBoost, Decision Tree, NARX, Gradient Boosting та RNN. Всі вони відповідають таким критеріям:

- можливість роботи з даними часових рядів;
- здатність працювати з нелінійними залежностями в даних;
- здатність виявляти складні залежності між вхідними змінними та цільовими показниками;
- можливість роботи з багатовимірними даними.

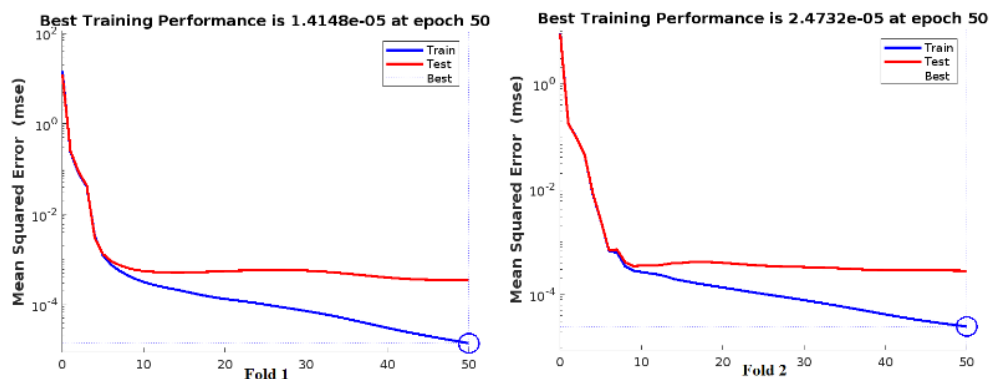


Рис. 4. Графіки Performance для NARX в MATLAB

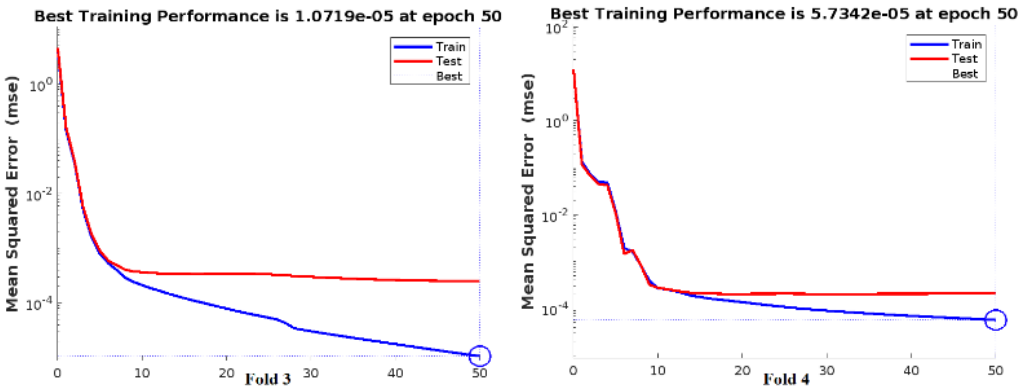


Рис. 4 (продовження). Графіки Performance для NARX в MATLAB

Відповідно до методу Time Series Split дані були розділені на п'ять навчальних і тестових вибірок зі збереженням часових послідовностей. З кожним fold кількість даних для навчання моделі збільшується, забезпечуючи донавчання моделі (табл. 1). Кожна з наведених моделей була навчена та оцінена відповідно до даних з Time Series Split.

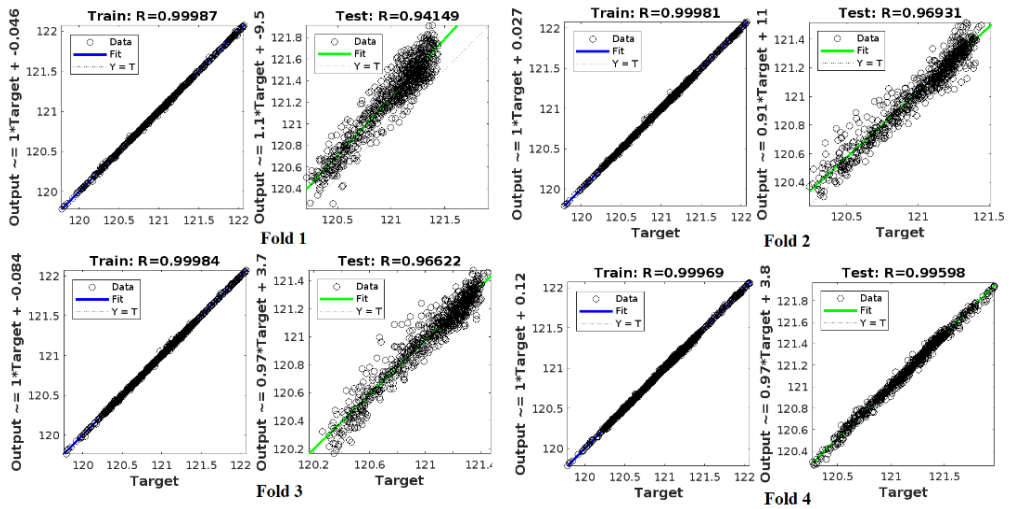


Рис. 5. Графіки регресії для NARX в MATLAB

Таблиця 1. Розбиття даних на folds

	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5
Розмір навчального набору	603	1202	1801	2400	2999
Розмір валідаційного набору	599	599	599	599	599

XGBoost. XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) — це бібліотека з відкритим вихідним кодом, яка використовується в машинному навчанні та надає функціональність для вирішення завдань, пов’язаних із регуляризацією градієнтного бустингу. Бібліотека показала такі результати на тестових даних (табл. 2).

Таблиця 2. Результати передбачення XGBoost на тестових даних

	MSE	R ²	AIC
Fold 1	0,00048707	0,9719	46431,37
Fold 2	0,00081122	0,9523	46086,68
Fold 3	0,00014358	0,9913	45699,66
Fold 4	0,00019493	0,9876	45882,83
Fold 5	0,00021514	0,9917	45941,92

Для відображення та порівняння взаємної динаміки всіх представлених метрик моделі було побудовано нормалізований графік за різними критеріями — це графічне представлення даних, де кожен критерій (або змінна) приведений до єдиної шкали, зазвичай у діапазоні від 0 до 1. Такий підхід дає змогу порівнювати величини, які мають різні одиниці вимірювання, масштаби або діапазони.

Нормалізований графік метрик показує їх відносні значення для кожного показника (рис. 6). Висока точність (низький MSE та високий R²) вказує на те, що XGBoost змогла виявити складні патерни в даних. Проте високі значення AIC показують значну складність моделі.

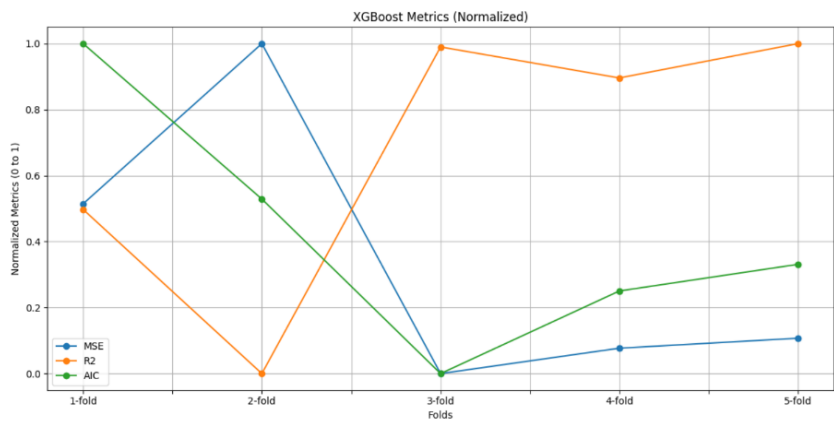


Рис. 6. Нормалізований графік метрик XGBoost

Порівняння фактичних і прогнозованих значень для тестових та валідаційних даних моделлю XGBoost (рис. 7) показує значний рівень відповідності. На навчальних даних прогнозовані результати відображають майже ідеальне передбачення, що проявляється перекриттям графіка фактичних значень графіком передбачених.

Decision Tree. Decision Tree (Decision Tree Regressor) — це модель регресії на основі рішення дерев (decision trees), яка використовується для прогнозування безперервних цільових змінних. Вона належить до класу жадібних алгоритмів (greedy algorithm), які будують дерево, розділяючи дані на підмножини, що мінімізують помилку в кожному вузлі. Decision Tree Regressor реалізовано у бібліотеці scikit-learn.

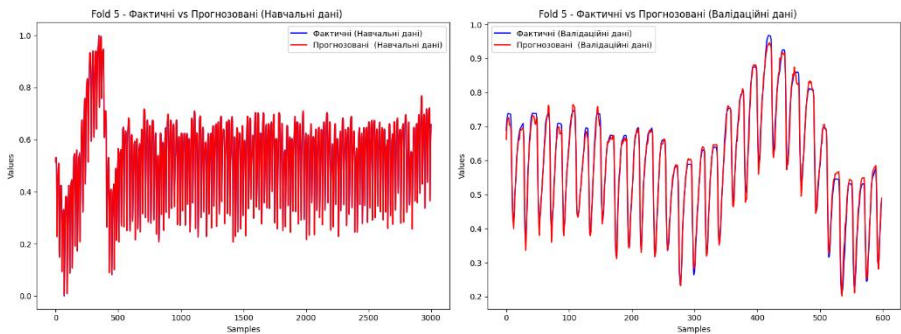


Рис. 7. Порівняння фактичних і прогнозованих значень для тестових та валідаційних даних моделлю XGBoost

Аналіз результатів роботи Decision Tree на тестових даних (табл. 3) вказує на її нижчу точність порівняно з XGBoost (рис. 8, 9), а від’ємні значення критерію AIC можуть свідчити про непридатність цього критерію для оцінки моделі такого типу, оскільки дерева рішень не є ймовірнісними моделями.

Таблиця 3. Результати передбачення Decision Tree на тестових даних

	MSE	R ²	AIC
Fold 1	0,00143358	0,9174	– 3852,00
Fold 2	0,00098765	0,9433	– 4075,19
Fold 3	0,00061588	0,9625	– 4358,08
Fold 4	0,00059168	0,9625	– 4382,09
Fold 5	0,00113648	0,9561	– 3991,11

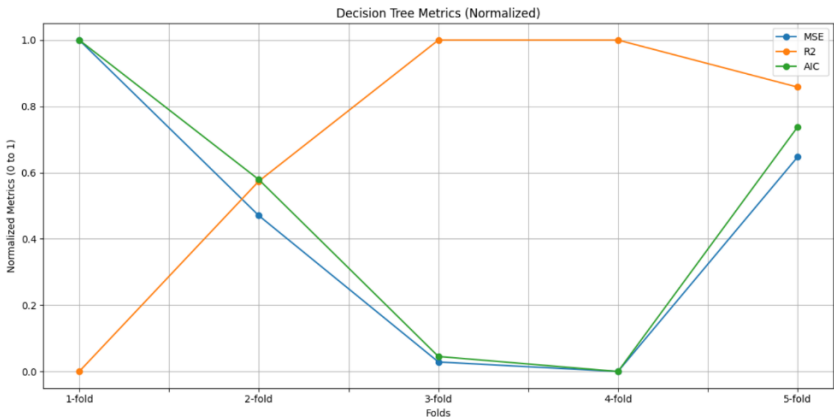


Рис. 8. Нормалізований графік метрик Decision Tree

NARX. NARX (Nonlinear Autoregressive with Exogenous Inputs) — це нелінійна модель авторегресії із зовнішніми входами, яка використовується для прогнозування часових рядів. Вона базується на припущенні, що поточне значення залежить від попередніх значень цільової змінної (авторегресія) та від попередніх значень зовнішніх вхідних змінних (екзогенні входи).

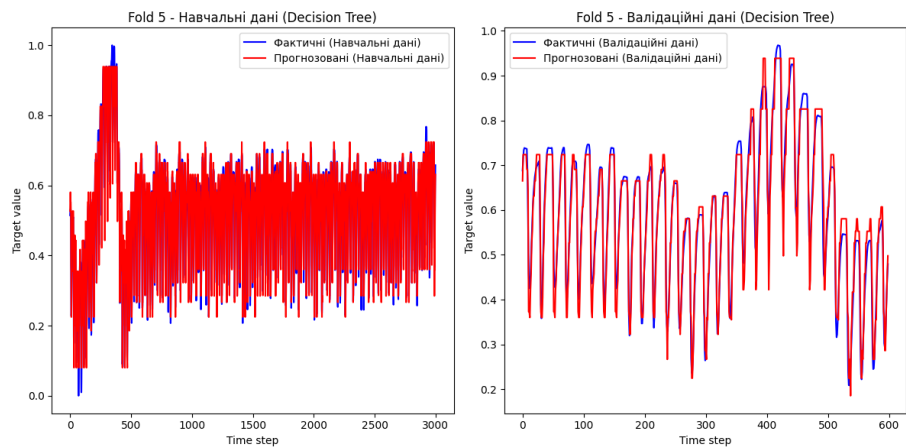


Рис. 9. Порівняння фактичних і прогнозованих значень для тестових та валідаційних даних моделлю Decision Tree

Низький MSE та високий R^2 в усіх фолдах передбачення NARX моделі (табл. 4) свідчать про хорошу здатність моделі до передбачення, з незначною варіабельністю між фолдами. Дані у Fold 5 містять специфічні аномалії, до яких NARX не змогла адаптуватися через тренувальні залежності, що спричинило незначне зниження точності моделі на цьому проміжку.

Таблиця 4. Результати передбачення NARX на тестових даних

	MSE	R^2	AIC
Fold 1	0,00130916	0,9246	19577,62
Fold 2	0,00105109	0,9396	19446,10
Fold 3	0,00098448	0,9401	19406,88
Fold 4	0,00080229	0,9491	19284,30
Fold 5	0,00162684	0,9372	19707,75

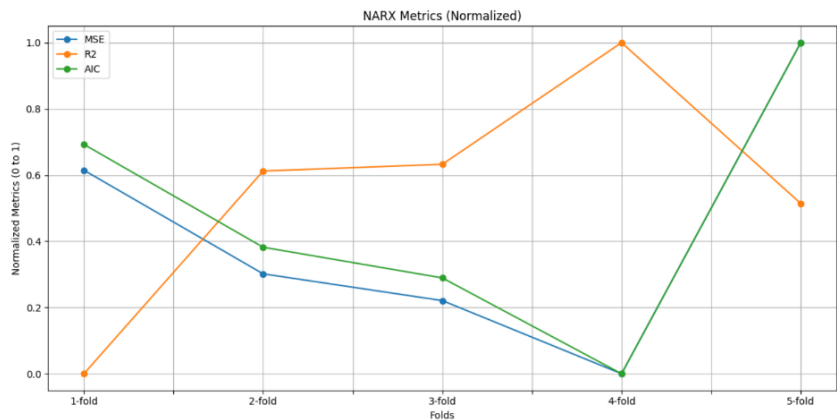


Рис. 10. Нормалізований графік метрик NARX

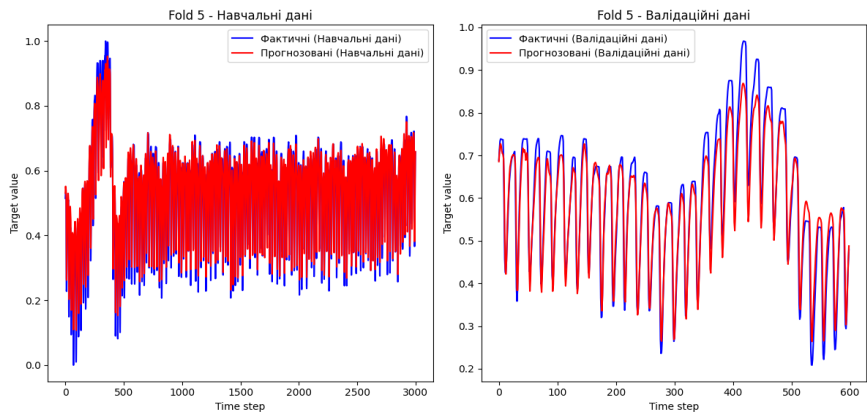


Рис. 11. Порівняння фактичних і прогнозованих значень для тестових та валідаційних даних моделлю NARX

RNN. RNN (Recurrent Neural Networks) — це тип нейронних мереж, які використовуються для обробки послідовних даних (наприклад, часових рядів, тексту, аудіо). Основна особливість RNN полягає в тому, що вони мають петлі зворотного зв’язку, які дають змогу моделі «запам’ятовувати» інформацію про попередні елементи послідовності. У Keras модуль SimpleRNN є базовим типом рекурентного шару. Кожен його нейрон має зв’язок із попереднім станом. SimpleRNN на кожному кроці часу враховує поточний вхід і попередній стан, оновлюючи інформацію про внутрішній стан, що дає змогу моделі враховувати часову залежність.

Модель показує значне покращення результатів на кожному наступному фолді. Це може свідчити про навчання на різних частинах даних і покращення здатності моделі до узагальнення. Незважаючи на різницю в результатах між фолдами, всі метрики показують досить хороші значення, що свідчить про стабільність моделі.

Таблиця 5. Результати передбачення RNN на тестових даних

	MSE	R ²	AIC
Fold 1	0,00129290	0,9269	1324,78
Fold 2	0,00068793	0,9611	1046,05
Fold 3	0,00055452	0,9663	818,55
Fold 4	0,00041292	0,9739	642,23
Fold 5	0,00036811	0,9858	573,53

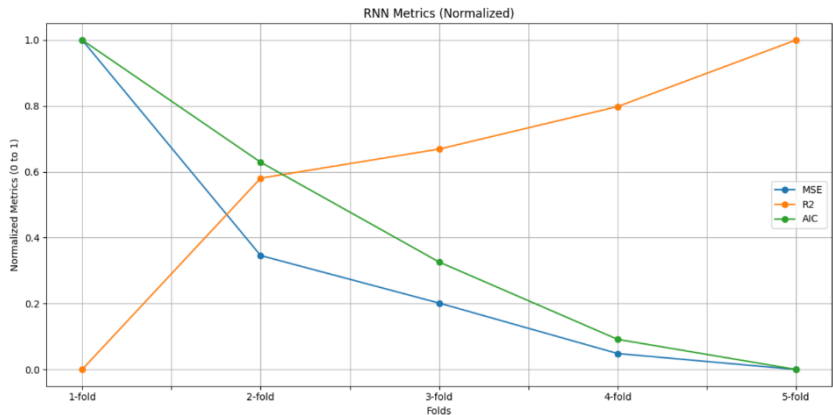


Рис. 12. Нормалізований графік метрик RNN

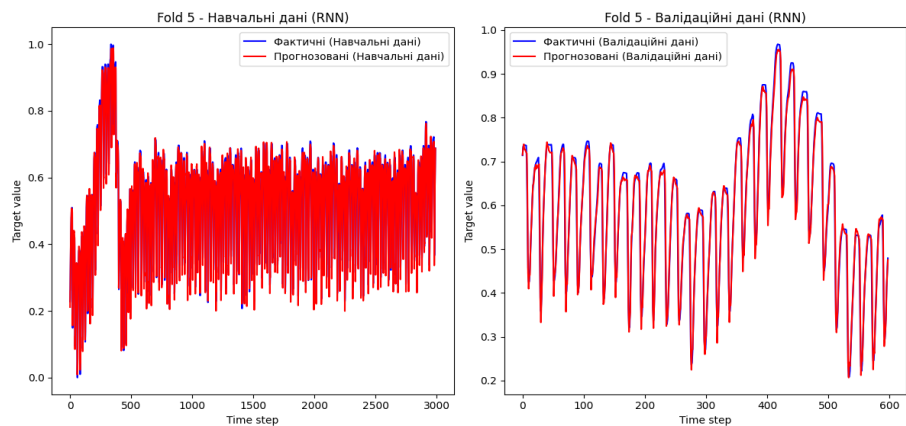


Рис. 13. Порівняння фактичних і прогнозованих значень для тестових та валідаційних даних моделлю RNN

Gradient Boosting. Gradient Boosting — це модель для регресії, що базується на техніці градієнтного бустингу. Вона використовується для побудови моделей регресії через послідовне тренування слабких моделей (зазвичай дерев рішень) на помилках попередніх моделей. На кожному кроці тренується нове дерево рішень, яке намагається зменшити помилку попередніх дерев. Це робиться шляхом оптимізації градієнта функції втрат.

Модель демонструє покращення результатів за MSE і R^2 в більшості фолдів, що свідчить про покращення якості передбачень на кожному наступному кроці. Як і в ситуації з NARX-моделлю, специфічні аномалії у Fold 5 дещо знижують точність прогнозування моделі.

Таблиця 6. Результати передбачення Gradient Boosting на тестових даних

	MSE	R ²	AIC
Fold 1	0,00048217	0,9722	3258,95
Fold 2	0,00024659	0,9858	3215,35
Fold 3	0,00021137	0,9871	3188,75
Fold 4	0,00015264	0,9903	3176,04
Fold 5	0,00027960	0,9892	3448,75

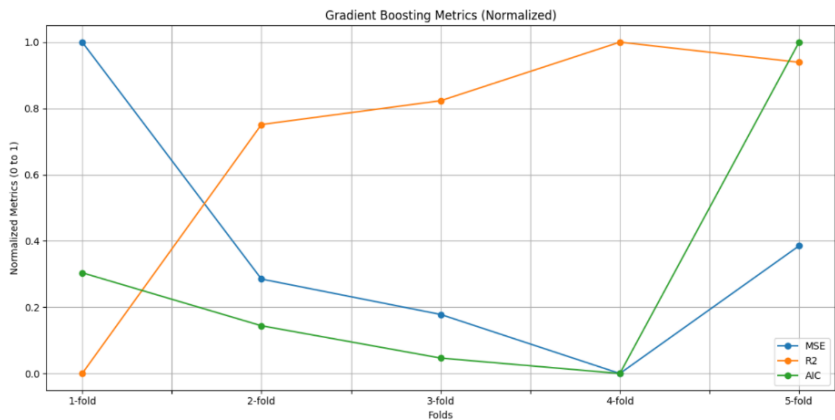


Рис. 14. Нормалізований графік метрик Gradient Boosting

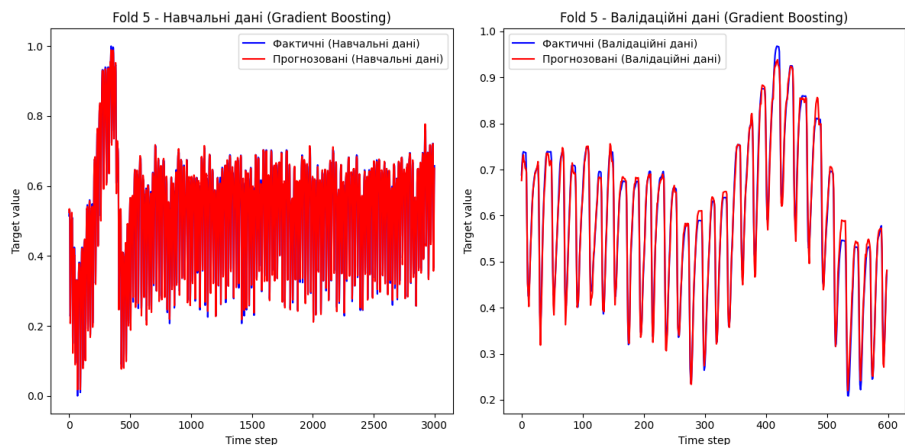


Рис. 15. Порівняння фактичних і прогнозованих значень для тестових та валідаційних даних моделлю Gradient Boosting

4. Порівняння результатів. Усереднені результати всіх моделей за всіма фолдами представлені в табл. 7. Незважаючи на те, що всі представлені моделі показали позитивні результати передбачення, деякі з них продемонстрували значну різницю в точності. Так, моделі XGBoost, Gradient Boosting та RNN мають на порядок нижчу середньоквадратичну похибку (рис.16), та вищу здатність моделей пояснювати варіацію даних (рис.17), ніж Decision Tree та NARX.

Таблиця 7. Усереднені порівняльні результати моделей за всіма фолдами

	MSE	R ²	AIC
Gradient Boosting	0,00027447	0,9849	3257,57
XGBoost	0,00026294	0,9853	46008,49
RNN	0,00068793	0,9611	881,03
DecisionTree	0,00095305	0,9484	– 4131,70
NARX	0,00115477	0,9381	19484,53

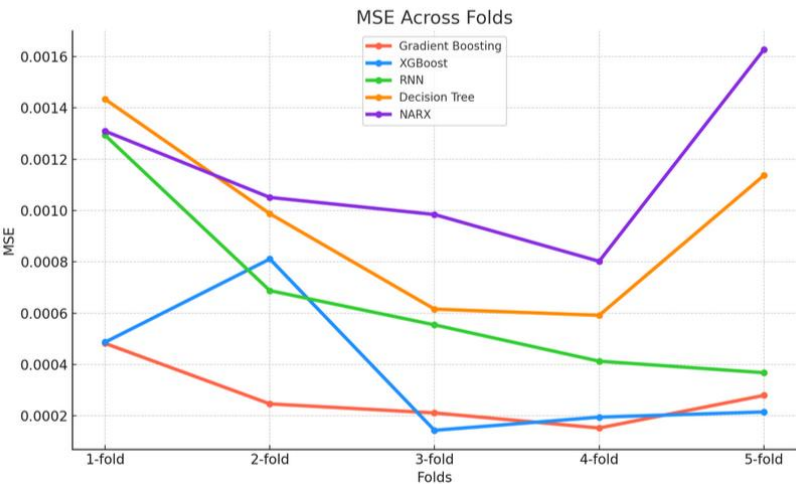


Рис. 16. Порівняння значень MSE для всіх моделей

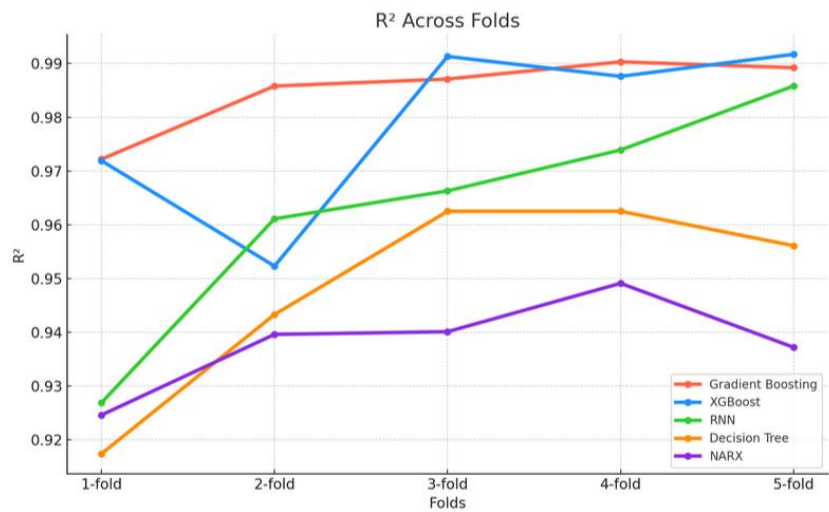


Рис. 17. Порівняння значень R^2 для всіх моделей

Порівняння балансу між точністю і складністю в моделях за допомогою інформаційного критерію Акаїке показує підвищену складність моделей XGBoost та NARX. Враховуючи те, що Decision Tree не відповідає вимогам використання AIC, пов'язаним з імовірнісною природою моделі, що спотворює результати його аналізу наявністю від'ємних значень. Найкращими за цим показником моделями є Gradient Boosting та RNN (рис. 18).

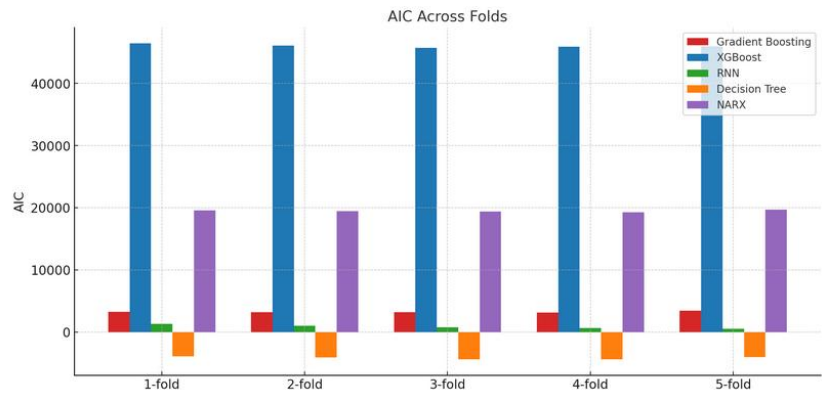


Рис. 18. Порівняння значень AIC для всіх моделей

Висновки. У ході дослідження було розроблено моделі віртуальних сенсорів на базі методів машинного навчання та проведено попередню перевірку працездатності розробленої концепції за допомогою засобів MATLAB. Використовуючи бібліотеки Python, було реалізовано навчання і тестування моделей XGBoost, Decision Tree, NARX, Gradient Boosting та RNN. Для оцінки їх ефективності здійснено порівняльний аналіз за допомогою метрик якості моделей: середньоквадратичної похибки, коефіцієнта детермінації та інформаційного критерію Акаїке.

Відповідно до результатів дослідження найкращою моделлю для аналізу перебігу процесів дистиляційного відділення спиртового виробництва в складі ВС є Gradient

Boosting. Вона показала стабільну роботу на всіх тестових наборах даних, використаних для валідації. При цьому її максимальна середньоквадратична похибка склала 0,00048, при якій модель здатна пояснити 97,2% варіації цільової змінної. Водночас Gradient Boosting показує оптимальні значення складності порівняно з іншими моделями згідно з критерієм Акаїке.

Обрану модель ВС планується інтегрувати в систему моніторингу дистиляційного відділення як компонент цифрового двійника, що дасть змогу підвищити ефективність управління технологічним процесом і забезпечити надійний інтелектуальний аналіз даних у реальному часі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kano, M., & Fujiwara, K. (2013). Virtual sensing technology in process industries: trends and challenges revealed by recent industrial applications. *Journal of chemical engineering of Japan*, 46(1), 1—17.
2. Martin, D., Kühn, N., & Satzger, G. (2021). Virtual sensors. *Business & Information Systems Engineering*, 63, 315—323.
3. Cristaldi, L., Ferrero, A., Macchi, M., Mehrafshan, A., & Arpaia, P. (2020, June). Virtual sensors: a tool to improve reliability. In 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (pp. 142—145). IEEE.
4. Goodwin, G. C. (1999, February). Evaluating the performance of virtual sensors. In 1999 Information, Decision and Control. Data and Information Fusion Symposium, Signal Processing and Communications Symposium and Decision and Control Symposium. Proceedings (Cat. No. 99EX251) (pp. 5—12). IEEE.
5. Li, H., Yu, D., & Braun, J. E. (2011). A review of virtual sensing technology and application in building systems. *Hvac&R Research*, 17(5), 619—645.
6. Zhang, M. Z., Wang, L. M., & Xiong, S. M. (2020). Using machine learning methods to provision virtual sensors in sensor-cloud. *Sensors*, 20(7), 1836.
7. Hirsenkorn, N., Hanke, T., Rauch, A., Dehlink, B., Raschofer, R., & Biebl, E. (2016). Virtual sensor models for real-time applications. *Advances in Radio Science*, 14, 31—37.
8. Kullaa, J. (2017). Development of virtual sensors to increase the sensitivity to damage. *Procedia engineering*, 199, 1937—1942.
9. Liu, L., Kuo, S. M., & Zhou, M. (2009, March). Virtual sensing techniques and their applications. In 2009 International Conference on Networking, Sensing and Control (pp. 31—36). IEEE.
10. Dimitrov, N., & Göçmen, T. (2022). Virtual sensors for wind turbines with machine learning-based time series models. *Wind Energy*, 25(9), 1626—1645.
11. Stavropoulos, G., Violos, J., Tsanakas, S., & Leivadreas, A. (2023). Enabling artificial intelligent virtual sensors in an IoT environment. *Sensors*, 23(3), 1328.
12. Wei, C., Chen, J., Song, Z., & Chen, C. I. (2018). Development of self-learning kernel regression models for virtual sensors on nonlinear processes. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 16(1), 286—297.
13. Kim, W., & Braun, J. E. (2020). Development, implementation, and evaluation of a fault detection and diagnostics system based on integrated virtual sensors and fault impact models. *Energy and Buildings*, 228, 110368.

УДК : 615.453.6.014

IMPACT OF NUMBER OF COMPRESSION CYCLES AND ROTARY TABLE SPEED ON TABLETS STRENGTH AND FRIABILITY

O. Zomenko, O. Gubenia*National University of Food Technologies***Key words:**

tablet,
compression,
quality,
strength,
friability

Article history:

Received 06.09.2024

Received in revised form
09.09.2024

Accepted 10.10.2024

Corresponding author:

gubena@meta.ua

ABSTRACT

The aim of the research is to determine the impact of the number of compression cycles and rotary table speed on the strength and friability of tablets. It were investigated two tablet samples manufactured on an industrial rotary press with rotary table speed 30—80 rpm. Tablet strength was assessed by destructive stress in the diametrical direction, and friability was measured by the percentage of mass lost during processing in a rotating drum.

When the rotary table speed is increased from 30 to 80 rpm, tablet strength is decreased to 10%. The most significant reduction in strength was observed at the rotary table speed of 60—80 rpm. Friability in this range is increased intensively from 0.2% to 1.2%, exceeding both pharmacopoeial (1%) and recommended (0.5%) standards. After 300,000 compression cycles, tablets lost to 8% of their strength.

The decrease in tablet quality is attributed to product sticking to the press tool surface, increased surface roughness, friction coefficient, and adhesive strength. Consequently, the tablet's outer layer exhibits lower strength properties and is prone to rapid deterioration. The reduced strength at higher rotary table speed is explained by decreased dwell time in the die and higher ejection speed, which lowers the strength of its outer layers. Increased tablet friability affects subsequent manufacturing operations: dust accumulates in the tablet feed channels for blister packaging, hindering their movement, and the tablets lose mass during coating application in drum-type machines, among others. Decreased tablet strength leads to its fragmentation during various technological operations and storage.

For the tablets used in the study on the Korsch XL 400 tablet press, the optimal rotor rotation frequency was determined to be 50 rpm. Increasing the rotation frequency, and thus productivity, is achievable through more frequent polishing of die and punch surfaces.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-10

ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ЦИКЛІВ ПРЕСУВАННЯ І ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ РОТОРА ТАБЛЕТПРЕСА НА МІЦНІСТЬ І СТИРАННІСТЬ ТАБЛЕТОК

О. С. Зьоменко, ORCID ID: 0009-0002-7370-8870

О. О. Губеня, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-2773-4373

Національний університет харчових технологій

Метою досліджень є визначення впливу кількості циклів пресування і частоти обертання ротора таблетпреса на міцність і стиранийність таблеток. Досліджувалися два зразки таблеток, виготовлених на промисловому роторному пресі. Міцність таблеток визначалася за руйнівним напруженням у діаметральному напрямку, а стиранийність — за відсотком втраченої маси. Зі збільшенням частоти обертання ротора таблетпреса від 30 до 80 об/хв міцність таблеток знижується до 10%, а стиранийність збільшується від 0,2 до 1,2%, що більше за регламентовані норми. Після 300 тисяч циклів виготовлення таблетки втрачають до 8% міцності. Погіршення якісних показників накладає обмеження на частоту обертання преса і вимагає періодичного очищення та полірування пресінструменту.

Ключові слова: таблетка, пресування, якість, міцність, стиранийність.

Вступ. Якість таблеток після пресування впливає на наступні етапи виробництва, зберігання і транспортування з точки зору механічної цілісності [15] та безпеки [1, 7]. Відповідно, забезпечення високих показників якості таблетки на цьому етапі впливає на рентабельність їх виробництва.

Під час пресування можуть виникнути відхилення у показниках міцності та стиранийності таблеток, що призводить до порушення їх показників технологічності [2, 14], зокрема цілісності в наступних операціях покриття, пакування, транспортування та зберігання [10, 18], може вплинути на безпечність продукції [7] і, відповідно, на рентабельність виробництва.

Очевидно, основний вплив на міцність і стиранийність таблеток мають їх рецептура та ступінь (зусилля) пресування. Проте на ці показники також можуть впливати режимні параметри роботи пресувального обладнання, зокрема частота обертання ротора таблетпреса і кількість циклів пресування [9]. Вплив цих факторів недостатньо описаний у науковій і довідковій літературі, тому питання потребує додаткових досліджень.

Огляд останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі немає одностайності щодо термінів, які характеризують міцність таблетки. Зустрічаються терміни «твердість» (дослівний переклад від англ. «hardness»), «міцність», «межа міцності», «руйнівне напруження» тощо [3]. Найбільше розбіжностей зустрічається у перекладах наукової літератури. Автори цієї статті вважають, що коректним є часто вживаний спрощений термін «міцність», що характеризує напруження, при якому таблетка руйнується під час бокового (діаметрального) стискання. Зауважимо, міцність не можна ототожнювати з твердістю, адже з механічної точки зору це різні величини, які визначаються на різних приладах за різними методиками.

Для характеристики такого явища, як відокремлення від таблетки дрібних пилоподібних частинок, використовуються терміни «викришування», «стирання», «стиранність», а у перекладах трапляється некоректний термін «крихкість». Крихкість —

це властивість продукту руйнуватися без значних пластичних деформацій [6], яка може характеризувати структурно-механічні властивості керамічних виробів, скла, бетону тощо, але не втрату маси таблетки внаслідок відокремлення її дрібних частинок. Коректним для української мови може бути термін «стиранність», який фіксується в нормативних актах [20].

Значення міцності таблетки не регулюється зовнішніми нормативними документами (не є «фармакопейним» [11]), і встановлюється виробником лікарських засобів. Проте відхилення від прийнятої міцності не має перевищувати 5%. Зазвичай, бокове (діаметральне) зусилля, при якому таблетка руйнується, складає від 40 до 100 Н, а міцність як похідна від нього залежить від розміру таблетки [11].

Значення стиранності згідно з гармонізованою європейською фармакопеею не має перевищувати 1% [4], проте деякі дослідники вважають цю цифру завищеною і рекомендують допустимі значення стиранності в межах 0,3—0,5% [12].

Зважаючи на значну кількість випадкових факторів, міцність і стиранність таблеток підтримуються технологічно — рецептурою, та інструментально — налаштуванням пресувального інструменту і режимів роботи обладнання.

Більшість дослідників звертають увагу на залежність міцності та стиранності таблеток лише від їх рецептури, зусилля стискання або ступеня пресування. Наприклад, зі збільшенням зусилля стискання (і, відповідно, ступеня пресування) від 8 до 30 кН міцність таблетки збільшується від 0,2 до 1,4 кПа; при великих зусиллях стискання міцність таблетки змінюється незначно. Проте досвід інженерів і налагоджувальників пресувального обладнання вказує, що на міцність, стираність та інші показники якості впливають кінематичні параметри роботи преса та час його роботи. Протягом декількох змін роботи преса міцність таблеток може знизитися на понад 10%, а стираність перевищити 1% [9]. Схожі показники браку виникають при великих швидкостях обертання ротора таблетпреса [5]. Вплив цих параметрів на якість є незначним порівняно з рецептурою і ступенем пресування, проте питання є актуальним з наукової та практичної точки зору, тому проблема регулювання структурно-механічних і якісних показників таблеток за рахунок зміни режимних параметрів роботи обладнання і стану поверхні пресувального інструменту потребує додаткових досліджень.

Мета дослідження: визначити вплив кількості циклів пресування і частоти обертання ротора таблетпреса на міцність і стиранність таблеток.

Матеріали і методи. Об'єктом досліджень є показники міцності та стиранності таблеток. Дослідження не є медичним, не містить медичних заяв і направлене на визначення лише впливу режимних параметрів процесу пресування на показники міцності і стиранності таблеток.

Досліджувалися показники міцності двох загальновідомих в Україні лікарських засобів у вигляді таблеток:

- *зразок 1* виготовлявся на основі ексципієнтів: моногідрату лимонної кислоти, картопляного крохмалю, повідону, какао, кальцію стеарату та АФІ: ацетилсаліцилової кислоти, парацетамолу, кофеїну;
- *зразок 2* виготовлявся на основі ексципієнтів: крохмалю картопляного, тальку, кальцію стеарату та АФІ метамізолу натрію.

Таблетки виготовлялися у виробничих умовах на базі компанії «АТ Інженерія» з використанням таблетпреса Korsch XL 400 (рис. 1).

Таблетпрес Korsch XL 400 забезпечує можливість роботи зі значенням попереднього пресування 20 кН і основного пресування 100 кН, максимальну продуктивність

338000 таблеток за годину при максимальній швидкості обертання ротора 120 об/хв.



Рис. 1. Таблетпрес Korsch XL 400: а — загальний вигляд; б — вузли дозування і пресування

Під час дослідження таблеток на міцність зразки відбиралися кожні вісім годин безпервної роботи преса (або кожні 28,2 тисячі готових таблеток на одну матрицю). Для кожного дослідження відбиралося 10 таблеток.

Під час дослідження таблеток на стиранність частота обертання ротора становила 35, 50, 65 і 80 об/хв. Для кожного дослідження на стиранність використовувалося 12 таблеток.

Визначення міцності таблетки. Міцність (або межу міцності) [17] таблетки визначали загальноприйнятим у фармацевтичній діяльності методом: таблетка сти скалася в діаметральному напрямі, визначалося зусилля P , при якому таблетка руйнується, а за руйнівним зусиллям — межа міцності σ_p .

Межа міцності таблетки σ_p — відношення руйнівного зусилля до площі перерізу таблетки:

$$\sigma_p = \frac{P}{d \cdot h}, \text{ Па}, \quad (1)$$

де P — руйнівне зусилля, Н; d — діаметр таблетки, м; h — висота таблетки, м.

Руйнівне зусилля $P_{\text{руйн}}$ таблетки — це зусилля, прикладене в діаметральному напрямі, при якому таблетка руйнується (рис. 2).

У цьому дослідженні руйнівне зусилля і міцність таблетки визначалося на приладі для визначення міцності РТВ-М 300 N Pharma Test (рис. 3) у лабораторії ТОВ «ХІМЛАБОРРЕАКТИВ», м. Бровари, Україна. Точність приладу — 1 Н. Кожне тестування повторювалося 10 разів.

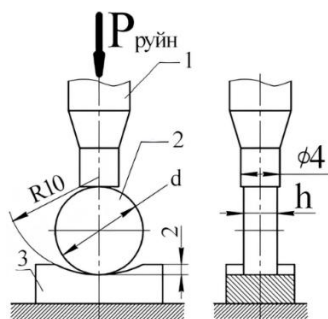


Рис. 2. Схема прикладання навантажень під час визначення міцності таблеток



Рис. 3. Прилад для визначення міцності РТВ-М 300 N Pharma Test

Визначення стиранності таблеток. Дослідження таблеток на стиранність визначали на приладі «ERWEKA TAR II» (рис. 4) у вигляді обертового колеса з однією лопаттю [4].



Рис. 4. Прилад для визначення стиранності таблеток ERWEKA TAR II

Робочим органом приладу є циліндричний барабан із прозорого полімерного матеріалу. Внутрішній діаметр ротора — 283—291 мм. Швидкість обертання — 25 ± 1 об/хв. У камері встановлена лопать визначеної форми, яка створює піднімання і опускання таблетки всередині камери. Під час обертання барабана таблетки падають з висоти 156 ± 2 мм або 6 дюймів [4].

10 таблеток спочатку знепилюють, зважують і кладуть у барабан, закривають кришку і включають прилад на 4 хвилини. Після цього повторно проводять процедуру їх зважування.

Показник стиранності П, % визначаємо за формулою:

$$П = 100 - \frac{P_{\text{поч}} - P_{\text{кін}}}{P_{\text{поч}}} \cdot 100, \quad (2)$$

де $P_{\text{поч}}$, $P_{\text{кін}}$ — маса таблеток до і після стирання;

Результати досліджень. Припущення, зроблені під час планування експерименту та аналізу результатів:

- АФІ не значно впливає на показники міцності та стиранності;
- зміна міцності та стиранності таблеток залежить від кількості циклів пресування, тобто скільки таблеток виготовила одна прес-пара (пуансон-матриця). Показник «Кількість циклів пресування» зручно використовувати під час аналізу результатів та їх порівняння, наприклад, якщо експеримент проводився на інших пресах з іншою частотою обертання ротора або статичних (кривошипних) пресах. Проте показник «Частота обертання ротора» іноді може бути зручним в умовах виробництва для уявлення процесу;

- на показники міцності і стиранності впливає швидкість руху пуансонів і, відповідно, швидкість пресування та виштовхування таблетки. Зазначимо, у роторних таблетпресах ці показники визначаються частотою обертання ротора;

- частота обертання ротора таблетпреса теж впливає на кінцеву якість таблеток. Наприклад, зі зміною частоти змінюється час витримування таблетки між пуансонами в момент пресування, закон руху пуансонів у матриці, показники вібрації в обладнанні та прес-парі тощо.

Вплив кількості циклів пресування на міцність таблеток. Для двох зразків таблеток спостерігалось зниження їх міцності до 10% протягом трьохсот тисяч циклів роботи прес-пари, що складає 80 год роботи таблетпреса.

Зі збільшенням кількості циклів таблетування від 28 до 280 тисяч, що становить приблизно від 8 до 80 год роботи преса, міцність *зразка 1* знижується від 2,18 до 1,97, а *зразка 2* — від 3,35 до 2,98 МПа (рис. 5). Зниження міцності таблеток відбувається за параболічною залежністю — перші 100—150 тисяч циклів (30—35 год роботи преса) воно незначне, а далі прискорюється. Із часом міцність таблеток знижується на понад 5%, тому для гарантування постійної якості продукції процес потрібно зупинити та вжити заходів для відновлення початкової міцності. У цьому дослідженні процес варто зупинити на 200—250 тисячах циклів, тобто орієнтовно на 60—70-й годині роботи преса.

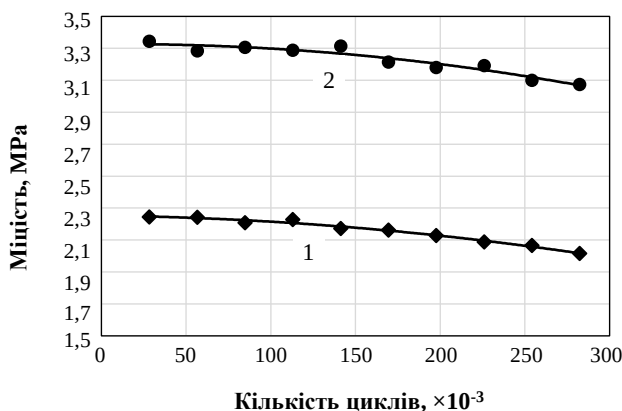


Рис. 5. Вплив кількості циклів на міцність таблетки: 1 — зразок 1; 2 — зразок 2

Один з відомих на практиці методів підтримання стабільної міцності — слідкувати за станом поверхні матриць та пуансонів, зокрема проводити періодичне полірування [10].

Попередні спостереження в цьому експерименті показали, що після полірування робочих поверхонь пуансонів і матриць міцність таблетки повертається до початкових показників протягом 7—10 разів, проте далі виникають інші збурювальні фактори, які призводять до зниження початкової міцності таблеток. Це питання потребує додаткових досліджень.

У процесі цього дослідження пропонується полірувати пресувальний інструмент після 48 год робочого часу за умови безперервної роботи з одним препаратом.

Зниження міцності таблетки під час тривалої роботи преса можна пояснити тим, що утворюється налиплий шар на поверхні пресінструменту, і, відповідно, збільшується зусилля (напруження) тертя і виштовхування таблетки в матриці (рис. 6). У результаті поверхневі шари таблетки стають менш міцними, а розподіл густини таблетки за висотою і шириною — непостійний.

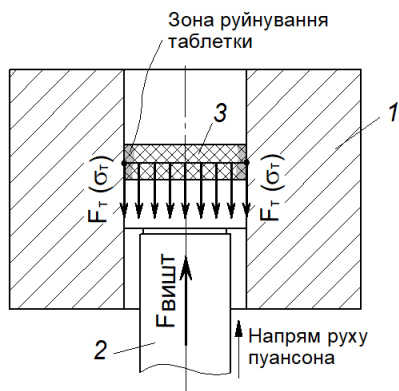


Рис. 6. Зусилля, що діють на бокові поверхні таблетки під час її виштовхування із матриці: 1 — матриця; 2 — пуансон; 3 — таблетка; $F_{\text{т}}$ — зусилля тертя; H ; σ — напруження тертя, Па; сіра зона — зона інтенсивного руйнування бокових поверхонь таблетки

Вплив частоти обертання ротора таблетпреса на стиранність таблеток.

Інформація, отримана від фахівців, які обслуговують обладнання для виготовлення таблеток, та особисті спостереження показали, що таблетки, виготовлені при високих швидкостях обертання ротора, мають нижчу міцність та вищі показники стиранності. Рациональна швидкість обертання ротора таблетпреса, зазвичай, визначається на основі виробничого досвіду та протоколів валідації процесу виробництва препарату [21].

Зі збільшенням частоти обертання ротора таблетпреса від 35 до 80 об/хв відсоток стиранності *зразка 1* збільшується від 0,15 до 1,24% (рис. 7).

За вищенаведеним припущенням, на стиранність впливає не частота обертання ротора, а похідна від неї — швидкість руху пуансонів у матриці, і, відповідно, швидкість виштовхування таблетки з матриці.

Як і у випадку для міцності таблетки, отримана залежність (рис. 8) пояснюється тим, що за високої швидкості виштовхування таблетки з матриці внаслідок великих сил тертя руйнується зовнішній шар таблетки. Цей шар надмірно стирається у наступних технологічних і фінішних операціях. Такий вид браку негативно проявляється під час нанесення покриття в машинах барабанного типу та з киплячим шаром

[13], транспортування між обладнанням і під час пакування таблеток у блистерну упаковку.

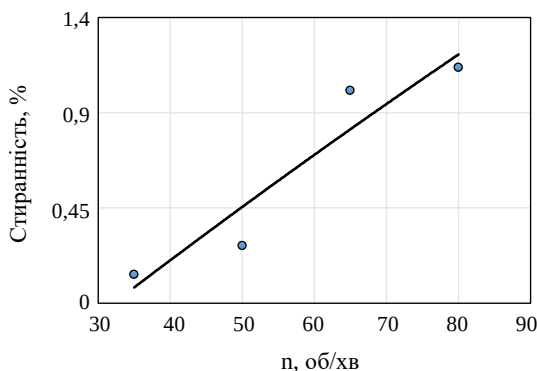


Рис. 7. Вплив частоти обертання таблетпреса на стираність таблетки

Про вплив швидкості ковзання на коефіцієнт або напруження тертя повідомляється в інших дослідженнях. Наприклад, для продуктів із високими показниками міцності адгезії (хліба, м'ясних виробів, сирів) напруження тертя (або адгезії) значно зростає при великих швидкостях ковзання, і це впливає на їх механічне оброблення різанням. Для продуктів із низьким вмістом води вплив швидкості ковзання на напруження тертя (адгезії) несуттєвий [8].

Потребують додаткових досліджень інші фактори впливу на стираність, зокрема, вібрація у прес-інструменті, шорсткість поверхні матриці і пуансона, методи та глибина періодичного полірування тощо.

Вплив кількості циклів пресування на стираність таблеток. Спостерігалось збільшення значення стираності зі збільшенням робочих циклів: на початку експерименту відсоток стирання становив 0,18—0,30%, в кінці експерименту — 1,19—1,24% (рис. 8).

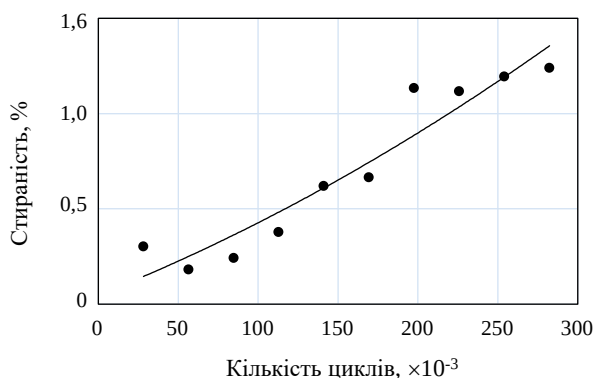


Рис. 8. Вплив кількості робочих циклів на стираність таблеток

Вплив частоти обертання ротора таблетпреса на міцність таблеток. У виробничих умовах для кожного виду таблеток, зазвичай, налаштовується раціональна швидкість пресування, яка залежить від частоти обертання ротора таблетпреса [19]. За високих швидкостей пресування міцність таблеток знижується [16].

Під час експерименту у межах частоти обертання ротора від 35 до 80 об/хв спостерігалась майже прямолінійна залежність міцності таблеток (рис. 9).

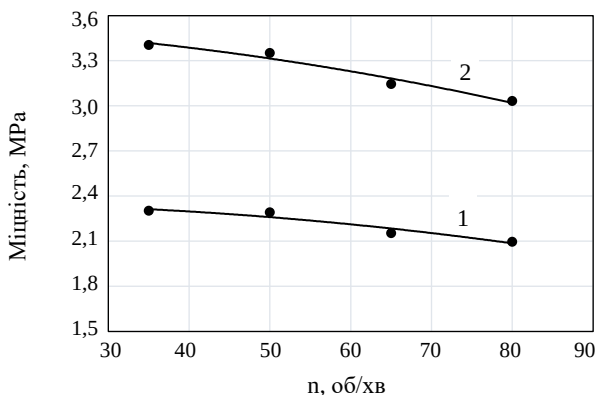


Рис. 9. Вплив частоти обертання ротора таблетпреса на міцність таблеток:
1 — зразок 1; 2 — зразок 2

Це пояснюється тим, що за високих швидкостей пресування структура таблетки не встигає сформуватися, а високі швидкості виштовхування призводять до підвищення сил тертя і руйнування зовнішніх шарів таблеток.

У межах досліджуваного діапазону частоти обертання міцність таблеток знижується до 20%. Зважаючи на необхідність забезпечення стабільних показників якості таблеток, недоцільно перевищувати швидкість обертання ротора понад 50 об/хв.

Імовірно, на міцність таблетки також впливає час витримування таблетки (релаксації напружень), коли верхній і нижній пуансони нерухомі. На час витримування впливає збільшення розміру рівної поверхні головки пуансона, яка контактує з прижимним роликом [16]. Проте слід звернути увагу, що криволінійна частина головки, яка відповідає за рух пуансона, зменшується, і, відповідно, швидкість і прискорення пуансона будуть зростати. Більша швидкість пресування може негативно вплинути на якість таблетки [5].

Висновки. 1. Режимні параметри роботи таблетпреса впливають на міцність таблетки. У межах робочого діапазону частоти обертання ротора таблетпреса від 30 до 80 об/хв міцність таблеток може знизитися до 10%. Це пояснюється зміною швидкості пресування і зниженням часу витримування таблетки в матриці.

2. Кількість циклів пресування (кількості виготовлених таблеток) у преспарі матриця-пуансон впливає на міцність таблетки: через 300 тисяч циклів таблетка втрачає в середньому до 8% міцності. Це пояснюється налипанням продукту на поверхні матриці і пуансона, збільшенням шорсткості їх поверхні і, відповідно, збільшенням коефіцієнта тертя і міцності адгезії. Внаслідок цього зовнішній шар таблетки має нижчі показники міцності та інтенсивно руйнується.

3. Зі збільшенням частоти обертання ротора таблетпреса від 30 до 80 об/хв стиранність таблетки збільшується від 0,2 до 1,2%, що перевищує фармакопейні (1%) та рекомендовані (0,5) норми. Це пояснюється зниженням часу витримування таблетки в матриці та більшою швидкістю виштовхування, що знижує міцність зовнішніх шарів таблетки. Висока стиранність призводить до гіршої якості нанесення захисного покриття на таблетку, збільшення кількості браку на етапі покриття, запиленості живильника білстерної машини.

4. Збільшення показників міцності та стиранності накладає обмеження на частоту обертання ротора таблетпреса. Для використаних у дослідженнях таблеток і таб-

летпреса Korsch XL 400 раціональна частота обертання ротора — 50 об/хв. Збільшення частоти обертання, і, відповідно, продуктивності можливе за рахунок частішого полірування поверхні матриць і пуансонів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Adeleye, O. (2019). Relationship between compression pressure, mechanical strength and release properties of tablets. *Polymers in medicine*, 49(1), 27—33. URL: <https://doi.org/10.17219/pim/111888>.
2. Augsburger, L. L., Hoag, S. W. (2008). *Pharmaceutical dosage forms — tablets, third edition*. Taylor & Francis Group.
3. Etzler, F. M., Bramante, T., Deanne, R., Sienkiewicz, S., Chen, F. J. (2011). Tablet tensile strength: an adhesion science perspective. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(4—5), 501—519. DOI: 10.1163/016942410X525687.
4. European pharmacopoeia. URL: <https://www.edqm.eu/en/web/edqm/european-pharmacopoeia/> (date of access: 07.06.2024).
5. Goh, H., Sia Heng, P., Liew, C. (2019). The effects of feed frame parameters and turret speed on mini-tablet compression. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 108(3), 1161—1171. DOI: 10.1016/j.xphs.2018.09.005.
6. Goots, V., Guts, O., Gubenia, O. (2016). Reodynamical theory of viscous-elastic system deforming. *Proceedings of University of Ruse*, 55, 18—22.
7. Gordiienko, O. I., Vronska, L., Melnyk, O. A., Groshovi, T. A. (2015). Current state of creation, production and research of tablet medicinal products. *Pharmaceutical Review*, 1. DOI: 10.11603/2312-0967.2015.1.3780.
8. Gubenia, O., Goots, O. (2010). Modeling of cutting of food products. *Journal of EcoAgriTourism*, 1, 67—71.
9. Herasymenko, D., Zomenko, O., Gubenia, O. (2024). Influence of tablet press rotor speed on tablet abrasion performance. *90th International scientific conference of young scientist and students "Youth scientific achievements to the 21st century nutrition problem solution"*, Kyiv, 11—12 April. Kyiv: NUFT.
10. Natoli, D., Levin, M., Tsygan, L., Liu, L. (2017). Development, optimization, and scale-up of process parameters, In: *Developing Solid Oral Dosage Forms*, Ed.: Yihong Qiu, Yisheng Chen, Geoff G. Z. Zhang, Lawrence Yu., Rao V. Mantri, 917—951. DOI: 10.1016/B978-0-12-802447-8.00033-9.
11. Pharmaeducation. Quality control tests of tablets or Evaluation of tablets, Available at: <https://pharmaeducation.net/quality-control-tests-of-tablets-or-evaluation-of-tablets/>. (date of access: 07.06.2024).
12. Podczek, F. (2007). Methods for the practical determination of the mechanical strength of tablets — From empiricism to science. *International Journal of Pharmaceutics*, 214—232. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2012.06.059.
13. Salawi, A. (2022). Pharmaceutical coating and its different approaches, a review. *Polymers*, 14(16), 3318. DOI: 10.3390/polym14163318.
14. Siirä, S. M., Antikainen, O., Heinämäki, J., Yliruusi, J. (2011). 3D simulation of internal tablet strength during tableting. *AAPS PharmSciTech*, 12(2), 593—603. DOI: 10.1208/s12249-011-9623-0.
15. Sinka, I. C., Pitt, K. G., Cocks, A. C. F. (2007). Chapter 22. The strength of pharmaceutical tablets. *Particle Breakage*, 941—970. DOI: 10.1016/s0167-3785(07)12025-x.
16. Swarbrick, J. (2007). *Encyclopedia of Pharmaceutical Technology*, 6. Taylor & Francis Group.
17. TAR II — advanced friability and abrasion tester — ERWEKA GmbH. Home — ERWEKA GmbH. URL: <https://www.erweka.com/products/physical-testers/friability-tester.html/> (date of access: 07.06.2024).
18. Trudko, S. S., Gubenia, O. O., Desyk, M. G., Gavva, O. M. (2024). Packaging of medicines in blister packs. *Packaging*, 3, 28—31.
19. Tye, C. K., Sun, C., Amidon, G. E. (2005). Evaluation of the effects of tableting speed on the relationships between compaction pressure, tablet tensile strength, and tablet solid fraction. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 94(3), 465—472. DOI: 10.1002/jps.20262.
20. Державна фармакопея України, 2-е вид., доповнення 6. Харків: Держ. підприємство «Укр. наук. фармакоп. центр якості лік. засобів», 2023.
21. Тригубчак, О. (2018). Дослідження оптимальних умов виготовлення таблеток кислоти ацетилсаліцилової з аторвастатином. *Ліки України*, 2, 7—10.

УДК 628.16

DEVELOPMENT OF A MODULAR PLANT FOR THE PURIFICATION OF GROUNDWATER WITH HIGH MINERALIZATION

D. Stryzhak, N. Husiatynska*National University of Food Technologies***Key words:**

drinking water,
groundwater,
total salt content,
purification,
desalination,
filtration,
filter loads

Article history:

Received 17.09.2024
Received in revised form
28.09.2024
Accepted 14.10.2024

Corresponding author:

ngusyatynska@ukr.net

ABSTRACT

The issue of proper provision of drinking water supply in Ukraine is relevant, which is confirmed by the constant attention of state bodies and the development and implementation of a number of important documents. Ukraine, like many other countries, faces a number of challenges in the field of water supply, including aging infrastructure, pollution of water sources and insufficient wastewater treatment. Traditional water treatment systems are not always effective, in particular, in remote settlements and during emergencies, such as floods, military conflicts or man-made disasters. In these conditions, the need for local solutions for water treatment becomes especially relevant, which necessitates further research to develop domestically produced mobile plants for obtaining drinking water from various alternative sources.

Based on the analysis of modern solutions for the creation of modular plants for the purification of drinking water from natural sources, the main technological stages that can be used in such systems have been identified. A basic hardware and technological scheme for purifying water of different chemical composition has been proposed and an industrial sample of a modular installation has been manufactured.

The results of the study of the influence of the total salt content in the incoming water, the temperature regime and the membrane fouling coefficient on the indicators of the total salt content of purified water and specific electricity consumption are presented.

Experimental studies have been conducted and it has been shown that in the case of purifying water of high mineralization (up to 3000 mg/l), the efficiency of removing the main chemical components from water was within 90—97%, which ensures compliance with these indicators of drinking water quality. The efficiency of removing total iron (80%) and permanganate oxidation compounds (50%) was somewhat lower.

From a technological point of view, the use of modular installations allows optimizing the stages of water purification taking into account the features of the chemical composition of the incoming water, provided that the water purification system is compact, mobile and autonomous.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-11

РОЗРОБЛЕННЯ МОДУЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД З ВИСОКОЮ МІНЕРАЛІЗАЦІЄЮ

Д. В. Стрижак, аспірант, ORCID ID: 0009-0008-5562-7253

Н. А. Гусятинська, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-9999-6650

Національний університет харчових технологій

Визначено основні технологічні стадії та розроблено апаратурно-технологічну схему для промислового зразка модульної установки. Наведено результати дослідження впливу загального солевмісту у вхідній воді, температурного режиму і коефіцієнта забруднення мембрани зворотного осмосу на показники солевмісту очищеної води та питоме споживання електроенергії. У разі очищення води високої мінералізації ефективність видалення хімічних сполук з води становила 90—97%, що забезпечує її відповідність якості питної води.

Ключові слова: питна вода, підземна вода, загальний солевміст, очищення, зне-солоння, фільтрування, фільтрувальні завантаження.

Вступ. Забезпечення чистою водою є важливим фактором здоров'я населення. У 2022 р. була прийнята «Водна стратегія України на період до 2050 року», де зазначається, що стан якості поверхневих вод, які є джерелом питної води для 80% населення України, є незадовільним і характеризується підвищеним вмістом органічних та біогенних речовин, а підземні води, відповідно, підвищеною жорсткістю і мінералізацією, а також наднормативним вмістом сполук заліза і марганцю [1]. Узагальнена на національному та обласному рівнях інформація щодо доступу і якості питної води щорічно публікується в Національній доповіді про якість питної води та стан питного водопостачання і водовідведення. Так, за даними «Національної доповіді про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2022 р.» зазначалося, що за період 2016—2021 рр. збільшився доступ населення до централізованого водопостачання у селища міського типу: з 87,2% (2016 р.) до 91,2% (2020 р.); в містах рівень охоплення централізованим водопостачанням трохи зменшився: з 99,3% (2016 р.) до 99,0% (2020 р.). В той же час доступ сіл до централізованого водопостачання має регресійний характер зниження з 29,2% у 2016 р. до 26,8% у 2020 р., до того ж станом на 2020 р. у 8 областях 252,7 тис. осіб у 790 населених пунктах користувалось привізною водою [2]. Протягом 2023 р., за даними [3], внаслідок атак на критичну інфраструктуру, зазнали руйнувань об'єкти водопостачання та водовідведення у 8 областях України.

Отже, в умовах зростаючої урбанізації, глобальних змін клімату, екологічних проблем, викликів воєнних дій, забезпечення населення якісною питною водою стає однією з найгостріших глобальних проблем. Україна, як і багато інших країн, стикається з низкою викликів у сфері водозабезпечення, включаючи старіння інфраструктури, забруднення джерел води та недостатнє очищення стічних вод. Традиційні водоочисні системи не завжди ефективні через їх високу вартість, складність у транспортуванні та необхідність використання великої кількості ресурсів. Зокрема, у віддалених населених пунктах та під час надзвичайних ситуацій, таких як паводки, військові конфлікти або техногенні катастрофи, відбувається погіршення якості води, що загрожує здоров'ю населення. В цих умовах необхідність у локальних рішеннях для очищення води стає особливо актуальною, що зумовлює необхідність подальших

досліджень з метою розробки мобільних установок вітчизняного виробництва для одержання питної води з різних джерел.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Мінералізація води безпосередньо пов'язана з рівнем розчинених в ній солей. Останнім часом дослідники реєструють збільшення солоності води артезіанських свердловин, що є наслідком засолення ґрунтів мінеральними добривами та іншими хімічними речовинами внаслідок антропогенної діяльності людини. Постійне вживання води з підвищеною мінералізацією, зокрема зумовленої вмістом сульфатів, призводить до розвитку і прогресування ряду захворювань [4]. Характерним для води з артезіанських свердловин є підвищений вміст заліза, який може сягати до 10—15 мг/дм³ (при допустимому показнику за ДСанПін 0,02 мг/дм³), що вимагає застосування спеціальних методів з метою його видалення до нормативних значень [5].

На сьогодні зворотний осмос (RO) є найпоширенішим і широко використовуваним методом знесолення води. В науковій праці [6] наведено результати досліджень очищення води методами зворотного осмосу (RO) та перапарації (PV), зокрема визначено ефективність і селективність мембран PERVAP 2210, 4510 для PV та AG-RO для експериментів RO. Показано, що зниження температури процесу може бути важливим фактором у зменшенні споживання енергії.

Слід зазначити, що робота установок RO значно ускладнюється у разі забруднення мембрани RO. Науковцями [7] досліджувався вплив умов експлуатації на продуктивність мембрани при різних рівнях забруднення. Використовувалися два типи мембран: мембрана SW30ULE-440 від Filmtec і мембрана SW-440R від LG. Продуктивність мембрани Filmtec аналізували за допомогою прикладної комп'ютерної програми системного аналізу зворотного осмосу (ROSA 9.1), а для оцінки мембрани LG використовували програмне забезпечення LG Q-V2.3.2. Результати показали, що забруднення мало значний вплив на швидкість потоку пермеату, солоність і питоме споживання енергії (SEC).

Наразі виробниками систем водоочищення пропонується ряд мобільних установок для очищення вод. Так, виробниками [8] пропонується чотириступенева установка фільтрації Membrane Solutions WS02 Survival Emergency Straw Water Filter, яка поєднує стадії: грубого очищення, мікрофільтрації із застосуванням поліпропіленового картриджу, адсорбційного очищення у вугільному фільтрі, фільтрування з використанням ультрафільтраційної мембрани. Така система забезпечує практично повне видалення бактеріальної мікрофлори та каламуті, зумовленої речовинами колоїдної дисперсності, з води. Продуктивність установки становить 500 см³/хв, вона є портативною та не потребує додаткового джерела живлення. Фільтр грубої очистки призначений для видалення бруду, піску та інших твердих частинок. Активоване вугілля є ефективним для зменшення неприємних смаків, запахів, видалення органічних сполук з води. Застосування порожнисто-волокнистої ультрафільтраційної мембрани забезпечує видалення домішок з розмірами більше 0,1 мікрона [6]. Поряд з перевагами запропонованого модуля для очищення води слід визначити ряд проблем, що потребують подальшого вирішення при їх експлуатації, зокрема: обмеженість у використанні для потреб водозабезпечення у більших обсягах; труднощі з обслуговуванням та регенерацією; відсутність захисту від вірусів, що обмежує його безпеку для різних типів води і є надзвичайно актуальним у випадку надзвичайних ситуацій.

Представляє практичний інтерес мобільна установка Kärcher WTC 700, яка забезпечує можливість очищення води на основі зворотного осмосу, затримуючи час-

тинки, бактерії, віруси, а розчинені солі і хімічні речовини, потужність якої забезпечує очищення до 700 дм³/год питної води. Серед позитивних характеристик установки слід визнати можливість очищати воду різного хімічного складу (прісну, солону, хімічно забруднену воду); використання високоякісних матеріалів, що гарантує її високу надійність. У процесі очищення не використовують хімічні речовини, а хлор додається лише до очищеної води, щоб мінімізувати ризик повторного забруднення під час зберігання [9]. Установка може представляти як окремий модуль або на причепі з електрогенератором.

Серед подібних установок слід виділити гібридну мобільну систему очищення води WTC 8000/15000 RO/UF C, в якій передбачено можливість очищення води з урахуванням особливості її складу та якості за рахунок використання мембран ультрафільтрації та/або зворотного осмосу.

Використання мембран ультрафільтрації забезпечує продуктивність до 15000 дм³ питної води на годину. У разі роботи установки із використанням мембрани зворотного осмосу продуктивність становить до 8000 дм³ питної води на годину. Поєднання методів баромембранної фільтрації забезпечує високу ефективність очищення води за мікробіологічними показниками, з високим солевмістом (солонуватої та солоної води), а також хімічно забрудненої води. Серед переваг слід відзначити високу адаптивність системи до різної якості вхідної води, зручність і безпечність експлуатації [10].

Серед вітчизняних розробок слід відзначити мобільну установку «ОАЗИС С-300» продуктивністю до 5000 дм³ на добу. Установка включає такі стадії очищення води: груба механічна фільтрація; первинне хлорування з метою окиснення органічних і неорганічних домішок та знезараження води; фільтрування на фільтрі тонкої очистки для видалення завислих речовин, освітлення води; двоступенева фільтрація на вугільних фільтрах забезпечує видалення органічних сполук, дехлорування та видалення хлорпохідних речовин; вторинне хлорування за потреби зберігання води та забезпечення тривалої дезінфекції очищеної води; заключна фільтрація на картриджному фільтрі [11]. В той же час запропонована установка, у разі використання вхідної води з високим ступенем забруднення або солевмісту, може потребувати додаткової попередньої фільтрації.

На основі аналізу сучасних підходів до розроблення модульних систем очищення води можна зробити висновок, що вони ґрунтуються на застосуванні ряду основних стадій, які комбінують залежно від якості вихідної води та особливостей технологічних вимог:

- застосування хімічних реагентів для окиснення та коагуляції речовин колоїдної дисперсності;
- застосування сучасних фільтрувальних завантажень для видалення з води заліза, марганцю, осаду тощо;
- пом'якшення води з використанням іонного обміну для видалення солей магнію, кальцію;
- мембранне фільтрування (мікрофільтрація, ультрафільтрація, зворотний осмос);
- сорбційне очищення з використанням активованого вугілля для видалення органічних сполук і знебарвлення води;
- знезараження води (УФ-знезараження, хлорування, озонування тощо).

Отже, на основі аналізу існуючих методів очищення води можна зробити висновок, що на сьогодні існує висока потреба в удосконаленні та розробленні сучасних

модульних установок, які б забезпечували можливість високої продуктивності та ефективності очищення вихідної води різного хімічного складу та ступеня забрудненості.

Мета досліджень: на основі визначення світових і вітчизняних тенденцій щодо застосування модульних установок для очищення питної води з природних джерел, а також експериментальних досліджень знесолення води з використанням мембран зворотного осмосу розробити та апробувати установку для очищення підземних вод з високою мінералізацією для питних потреб.

Матеріали і методи. Методи досліджень — аналітичні, методи комп'ютерного моделювання, хімічні, фізико-хімічні з використанням приладів та методик досліджень якості води згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10 та ДСТУ 7525:2014.

Під час експериментальних досліджень використовували завантаження для фільтрування Turbidex, що складається з гранул силікату алюмінію (цеоліту) з високою пористістю [12].

Моделювання процесу зворотного осмосу проводили за допомогою програмного забезпечення Toraу DS2.0 для мембран ТМН20А-400С та ТМН20А-440С (TORAY). Питоме споживання енергії на опріснення води (SEC, кВт·год/м³) розраховували за формулою [6]:

$$SEC = \frac{P}{Q_p},$$

де P — споживання енергії для отримання пермеату, кВт·год; Q_p — об'єм отриманого пермеату за годину роботи установки, м³.

Математичну обробку результатів досліджень проведено за методиками [13] з використанням прикладних програм MathCad Professional. Для побудови графіків використовували програмне забезпечення Microsoft Excel.

Результати досліджень. З огляду на актуальність подальших досліджень ефективності застосування модульних систем водоочищення для забезпечення питною водою окремих населених пунктів чи територій в умовах надзвичайних ситуацій або неможливості забезпечення централізованим водопостачанням, запропоновано принципovu апаратурно-технологічну схему (рис. 1) очищення води, що характеризується високим показником солевмісту.

Вхідна вода подається з резервуару брудної води 1 за допомогою насосної станції 2 на блок дискових фільтрів 3 для видалення зважених домішок, мулу, піску, що частково забезпечує і зниження мутності води. Блок складається з двох дискових фільтрів з рейтингом фільтрації 125 мкм. Далі вода надходить на установку мультимедійної фільтрації 4, де з води видаляються окиснене залізо (ІІІ), частково органічні сполуки, а також сполуки, що обумовлюють кольоровість і каламутність води. Установка складається з двох фільтрів 16"х65" зі скловолокна PWG, завантажених мультимедійним матеріалом Turbidex, що забезпечує очищення води від осаду до рівня 3—5 мікронів. Всі фільтри працюють паралельно, на промивку виводяться по чергово. Установка управляється автоматично за програмою керуючих клапанів Ruptin. До переваг завантаження Turbidex слід віднести у 2—3 рази вищу брудоемність порівняно з кварцовим піском. Використання Turbidex в ланцюзі перед іншими методами фільтрації, такими як іонний обмін, зворотний осмос, ультрафільтрація, озонування тощо, дає змогу отримати значне поліпшення якості очищеної води [12].

Після фільтрування на завантаженні Turbidex вода надходить на установку зворотного осмосу (RO), де видаляються іони жорсткості, а також знижується загальна лужність і вміст сухого залишку. Для запобігання утворенню відкладень кальцію і

магнію на мембранних елементах установки зворотного осмосу здійснюється дозування антискалantu 5.

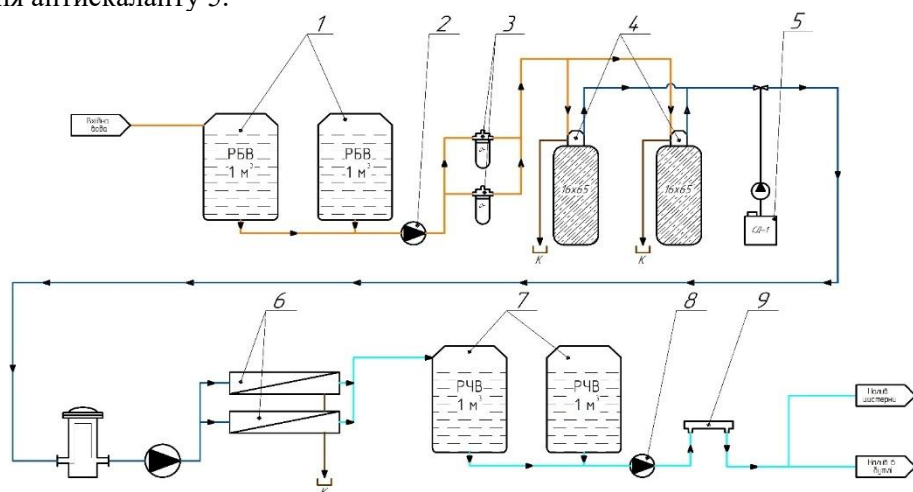


Рис. 1. Апаратурно-технологічна схема системи водоочищення модульної установки: 1 — резервуар брудної води; 2 — насосна станція подачі; 3 — дисковий фільтр; 4 — мультимедійний фільтр; 5 — станція дозування антискалantu; 6 — установка зворотного осмосу; 7 — резервуар чистої води; 8 — насосна станція подачі пермеату; 9 — ультрафіолетова лампа

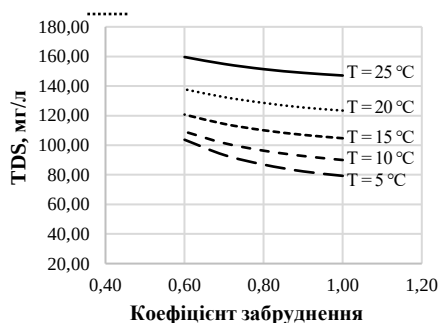
Установка (RO) складається з двох мембранних елементів ТМН20А, насоса високого тиску та контролера. Вода, проходячи через напівпроникні мембранні елементи, розділяється на два потоки: 25% концентрат (сконцентрований розчин вихідних солей) та 75% пермеат (очищена вода). Пермеат надходить в резервуар чистої води 7. У разі визначеного співвідношення 1:3 (концентрат-пермеат) досягається висока продуктивність роботи установки за меншої селективності щодо видалення розчинних мінеральних солей, що забезпечує її відповідність ДСанПін відповідно до повноцінності складу питної води. Очищена вода із резервуару за допомогою насосної станції 8 надходить на блок ультрафіолетового знезараження води 9 з метою її дезінфекції.

Важливим аспектом при моделюванні та виборі апаратурно-технологічної схеми для модульних систем очищення води з високим солевмістом є підбір мембран зворотного осмосу для забезпечення оптимальних параметрів роботи установки (RO), зокрема за показниками стабільності очищення води та споживання енергії протягом експлуатаційного періоду, що характеризується зміною ступеня забрудненості мембрани. Для досліджень обрано мембрани ТМН20А-400С та ТМН20А-440С (TORAY), які представлені на вітчизняному ринку та відповідають поставленому завданню знесолення води для отримання води питного гатунку.

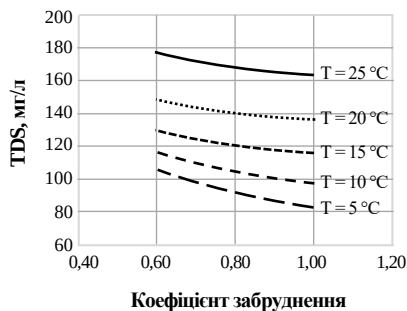
На рис. 2 наведено залежності загального солевмісту (TDS) в очищеній воді (пермеаті) та питомого споживання енергії (SEC) при зміні коефіцієнта забруднення мембран за температурного режиму 5—25 °С, що відповідає діапазону температури вхідної води. Коефіцієнт забруднення (KЗ) використовується для оцінки проникності мембрани та становить $KЗ = 1$ для умов повної проникності відповідно до технічної характеристики. Під час експлуатації KЗ знижується < 1 , що потребує очищення мембрани. Тривалість роботи мембрани визначається кількісними характеристиками

та типом забруднення води, яка надходить на зворотний осмос, а також від дотримання виробничого режиму очищення та обслуговування системи [6, 7].

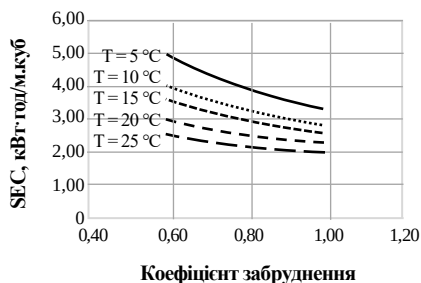
Залежність TDS від коефіцієнта забруднення для мембрани TMH20A-400C, LP



Залежність TDS від коефіцієнта забруднення для мембрани TMH20A-440C, LP



Залежність питомого споживання енергії від коефіцієнта забруднення для мембрани TMH20A-400C, LP



Залежність питомого споживання енергії від коефіцієнта забруднення для мембрани TMH20A-440C, LP

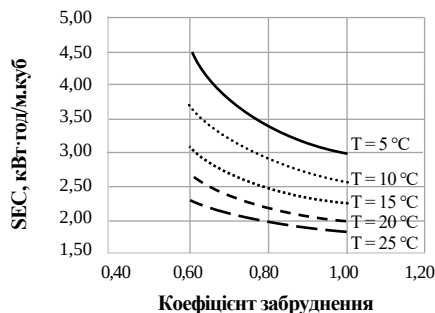


Рис. 2. Вплив фактора забруднення мембран зворотного осмосу (RO) на загальний солевміст пермеату (TDS) та питоме споживання енергії при різних температурних режимах (5—25 °C)

Моделювання процесу зворотного осмосу (RO) за допомогою програмного забезпечення Toray DS2.0 проводили за таких умов:

- 1) початковий загальний солевміст (TDS) води — 3680 мг/дм³;
- 1) вихід пермеату 65% (2 м³/год);
- 2) скид концентрату 35% (1,08 м³/год);
- 3) кількість рециклу 3 (м³/год).

Розрахунок проводився для установки, що складається з двох мембран, що встановлені послідовно.

На основі одержаних результатів показано, що зниження коефіцієнта забруднення від 1 до 0,6 під час експлуатації мембран зворотного осмосу значно впливає на ефективність роботи та енергоємність процесу. Зі зменшенням температури вихідної води покращується якість пермеату, в той же час збільшуються питоме споживання електроенергії.

Також проведено дослідження з використанням методів планування експерименту та математичного моделювання [13] для визначення сукупного впливу факторів

(початкового солесмісту, температури води і коефіцієнта забруднення мембрани) на показники процесу RO: загального солесмісту (TDS) в очищеній воді та питомого споживання енергії (SEC). В результаті математично-статистичного оброблення одержано такі рівняння регресії:

для мембрани ТМН20А-440С:

$$F1(x_1, x_2, x_3) = 9,44x_1^2 + 2,5x_1x_2 + 19,01x_1x_3 - 0,128x_1 + 0,0882x_2^2 + 0,49x_2x_3 - 5,125x_2 + 46,843x_3^2 - 71,6x_3 + 75,4;$$

$$F2(x_1, x_2, x_3) = 0,429x_1 + 0,0035x_1x_2 - 0,067x_1x_3 - 0,002x_1^2 + 0,0016x_2^2 + 0,0883x_2x_3 - 0,18x_2 + 2,74x_3^2 - 7,71x_3 + 6,98;$$

для мембрани ТМН20А-400С:

$$F1(x_1, x_2, x_3) = 8,89x_1^2 + 2,15x_1x_2 - 20,1x_1x_3 + 4,1x_1 + 0,082x_2^2 + 0,54x_2x_3 - 4,69x_2 + 50,23x_3^2 - 75,86x_3 + 71,2;$$

$$F2(x_1, x_2, x_3) = 0,483x_1 + 0,00437x_1x_2 - 0,075x_1x_3 - 0,002x_1^2 + 0,00186x_2^2 + 0,1042x_2x_3 - 0,209x_2 + 3,144x_3^2 - 8,9x_3 + 7,99,$$

де: $F1$ — функція загального солесмісту у пермеаті (мг/дм³); $F2$ — функція питомого споживання енергії установки зворотного осмосу, кВт·год/м³; x_1 — загальний солесміст у вхідній воді, (TDS), г/дм³ (0,3—3,6 г/дм³); x_2 — температура води, °С (5—35 °С); x_3 — коефіцієнт забруднення (0,5—1).

Отже, за результатами проведених досліджень показано, що мембрани ТМН20А-400С та ТМН20А-440С забезпечують високу ефективність знесолення, що дає змогу застосовувати їх для очищення підземних вод з високим солесмістом при підготовці питної води. В той же час слід зазначити, що мембрана марки ТМН20А-440С характеризується дещо нижчими експлуатаційними витратами електроенергії, однак і дещо меншою ефективністю щодо видалення загального вмісту солей порівняно з мембраною ТМН20А-400С.

Промислову реалізацію модульної установки для очищення води здійснено ТОВ «Смарт Вотер Груп». Розроблена установка для очищення води, що складається з головного модуля готової будівельної конструкції, з розміщеним усередині необхідним технологічним устаткуванням, та вузла водозабору вхідної води, здійснює повне очищення води та призначена для забезпечення населення питною водою. На рис. 3 представлено промисловий зразок модульної установки для очищення питної води (ТОВ «Смарт Вотер Груп»).

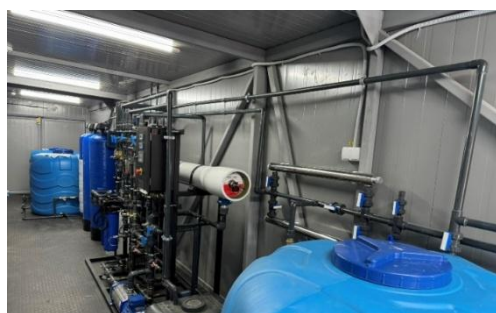


Рис. 3. Модульна установка водоочищення

У табл. 1 наведені показники якості води з артезіанського джерела та води, очищеної з використанням розробленої модульної установки. Вхідна вода відбиралась на території Снігурівської міської територіальної громади Миколаївської області.

Результати, наведені в табл. 1, свідчать, що вода після очищення відповідає нормативним показникам питної води за ДСанПіН2.2.4-171-10.

Таблиця 1. Показники якості води до та після очищення

Показники якості	Одиниці виміру	Вхідна вода	Очищена вода	Ефект очищення, %	Норма ДСанПіН2.2.4-171-10
Каламутність	мг/дм ³	15,7	0,5	96,8	≤0,58
Кольоровість	Градуси	12	3	75	≤10
Нітрати	мг/дм ³	35,00	0,01	99,9	<50
Загальна жорсткість	мг-екв/дм ³	31,00	1,10	96,7	<7
Сухий залишок	мг/дм ³	2931,00	150,00	94,8	<1000
Хлориди	мг/дм ³	804,00	85,45	89,3	≤250
Сульфати	мг/дм ³	1088,00	100,60	90,7	≤250
Залізо загальне	мг/дм ³	0,5	0,1	80,0	0,2
Перманганатна окиснюваність	мг/дм ³	8,00	4,00	50,0	5,0

Слід зазначити, що вода зі свердловини характеризувалася достатньо високим показником вмісту сухого залишку, що є свідченням її високої мінералізації. Зокрема, вміст сульфатів становив порядку 1088 мг/дм³, хлоридів 804 мг/дм³.

Важливим завданням при очищенні води є забезпечення нормативного вмісту жорсткості води, що зумовлюється наявністю в ній розчинених солей кальцію і магнію. За вимогами до фізіологічної повноцінності води величина цього показника варіює в межах 1,5—7 мг-екв/дм³. В природних водах, особливо з артезіанських свердловин, досить часто спостерігається перевищення нормативного значення за цим показником. Так, у наших дослідженнях жорсткість вихідної води становила 31 мг-екв/дм³. Застосування баромембранних фільтрів зворотного осмосу забезпечує практично повне видалення солей жорсткості, проте така вода не відповідає фізіологічній повноцінності для споживання людиною. Шляхом встановлення раціонального співвідношення пермеат-концентрат у межах 3:1 забезпечується жорсткість води порядку 1,1 мг-екв/дм³. При цьому досягаються нормативні показники за вмістом сульфатів і хлоридів у воді.

Доведено, що ефективність видалення основних хімічних складових з води, з використанням запропонованої апаратурно-технологічної схеми, знаходилась в межах 90—97%. Дещо нижчими були показники ефективності видалення загального заліза (80%) та сполук перманганатної окиснюваності (50%).

Проведені дослідження показали, що запропонована система з використанням комплексу фільтраційного обладнання з різним рейтингом фільтрації (дисковий фільтр, мультимедійний фільтр із завантаженням Turbidez, установка зворотного осмосу) дає змогу очищати малокаламутні води з солевмістом до 5000 мг/дм³ без застосування хімічних реагентів. У разі використання поверхневих вод установка потребує встановлення модуля хімічної обробки. У разі очищення підземних вод з високим вмістом заліза та сполук перманганатної окиснюваності рекомендується встановлення додаткових модулів для каталітичного окиснення заліза із застосуванням відповідних завантажень.

Водночас слід відзначити, що порівняно зі стаціонарними рішеннями такі модульні системи для очищення води характеризуються рядом переваг: гнучкістю використання технологічних стадій з урахуванням якості вхідної води, компактністю,

можливістю швидкого транспортування, що особливо важливо під час надзвичайних ситуацій або у віддалених регіонах.

Також слід звернути увагу на можливість працювати в автономному режимі, використовуючи генератори або сонячну енергію, що дає змогу забезпечувати очищення води навіть за відсутності централізованого енергопостачання. Розроблена система характеризується потребою у менших інвестиціях порівняно з великими стаціонарними установками, що особливо важливо для регіонів з обмеженим бюджетом. Встановлення мобільної системи може відбуватися швидко, що дає змогу реагувати на непередбачені ситуації та оперативно забезпечити населення питною водою. До переваг модульних установок також відноситься автоматизована система управління надходження, очищення та розподілу води населенню.

Висновки. Розробка мобільної установки вітчизняного виробництва для очищення води є важливим кроком для забезпечення населення чистою водою у будь-яких умовах, включаючи надзвичайні ситуації та віддалені регіони. Це рішення є економічно ефективним, екологічним і технологічно доцільним. Вітчизняне виробництво таких установок не лише підвищить рівень водозабезпечення в Україні, але й сприятиме розвитку промисловості та підвищенню експортного потенціалу країни.

Запропоновано апаратурно-технологічну схему для реалізації модульної системи очищення питної води, що включає дисковий фільтр, мультимедійний фільтр із завантаженням Turbidex, установка зворотного осмосу, ультрафіолетова лампа та дає змогу очищати малокаламутні води з солемістом до 5000 мг/дм³ без застосування хімічних реагентів. На основі комп'ютерного моделювання встановлено залежності показників роботи установок зворотного осмосу, зокрема загального солемісту в очищеній воді та питомого споживання енергії, від коефіцієнта забруднення для мембран марок ТМН20А-400С та ТМН20А-440С.

Промислові випробування запропонованої апаратурно-технологічної схеми показали високу ефективність видалення основних хімічних складових з підземних вод, що характеризувалися високим солемістом. З технологічної точки зору застосування модульних установок дає змогу оптимізувати стадії очищення води з урахуванням особливостей хімічного складу вхідної води за умови компактності, мобільності та автономності системи водоочищення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року: Розпорядж. Каб. Міністрів України від 09.12.2022 № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-p#Text> (дата звернення: 02.12.2024).
2. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2022 році. Київ, 2023.
3. Міністерство розвитку громад та територій України. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2023 році. Київ, 2024.
4. Андрусишина, І. М., Бурлакова, В. С., Василюк, С. Л., Дрікер, Ю. Д., Косогін, О. В., Косогіна, І. В., Мігченко, Т. Є., Мудрик, Р. Я., Орестов, Є. О., Поляков, В. Р., Стеценко, В. В., Шахновський, А. М. (2024). *Сучасні шляхи до чистої води: колективна монографія*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
5. Долінський, А. А., Ободович, О. М., Сидоренко, В. В., Гусятинська, Н. А. (2018). Реалії сьогодення та перспективи майбутнього підготовки питної і технологічної води. *Наукові праці НУХТ*, 24(2), 247—255.
6. Gortat, I., Marszałek, J., Wawrzyniak, P. (2024). Energy analysis of a laboratory process of water desalination by pervaporation and reverse osmosis. *Chemical and Process Engineering: New Frontiers*, 45(1), e48. <https://doi.org/10.24425/cpe.2023.147407>.

7. Loula, A. Shouman , Ramadan, M. Afify , Dalia A. Fadel , Mohamed, H. Esawy (2024). Fouling effect on Reverse Osmosis (RO) membranes performance in desalination plant. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100502. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100502>.
8. Membrane Solutions WS02 Survival Emergency Straw Water Filter. MS Pure By Membrane Solutions. URL: <https://www.msPURElife.com/products/personal-water-filter-straw-1> (дата звернення: 22.10.2024).
9. Kärcher WTC 700. Mobile Systeme für Ihren Einsatz | Kärcher Futuretech. URL: <https://www.karcher-futuretech.com/en/products/mobile-water-supply/mobile-water-treatment-plants/mobile-reverse-osmosis-systems/wtc-700-10372010.html> (дата звернення: 22.10.2024).
10. Kärcher WTC 8000/15000 RO/UF C. Mobile Systeme für Ihren Einsatz | Kärcher Futuretech. URL: <https://www.karcher-futuretech.com/en/products/mobile-water-supply/mobile-water-treatment-plants/mobile-reverse-osmosis-systems/wtc-8000-15000-ro-uf-c-13431300.html> (дата звернення: 22.10.2024).
11. Унікальна мобільна установка для очищення та незараження води «ОАЗИС С-300». Ecosoft Water Filters: Innovative and Sustainable Water Treatment Solutions for Homes and Businesses. URL: <https://www.ecosoft.com/product-uk/ms-oazisc300> (дата звернення: 08.11.2024).
12. Фільтрувальний матеріал Turbidex — матеріал для очищення води від механічних домішок. URL: <https://watersoft.com.ua/ua/p718709997-filtruyuschij-material-turbidex.html> (дата звернення: 02.12.2024).
13. Теорія планування експериментів: виконання розрахунково-графічної роботи [Ел. ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / С. М. Лапач. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020, 86. URL: <https://ela.kpi.ua/items/35197414-052b-403d-b108-8fe4ef49ec43>.

УДК 621.928.4

BEST PRACTICES AND TECHNICAL SOLUTIONS FOR REDUCING ENERGY CONSUMPTION DURING OPERATION OF CENTRIFUGAL SEPARATORS

O. Gavva¹, A. Chupryna², O. Chepeliuk¹, V. Stepanets¹, L. Martsynkevych¹

¹National University of Food Technologies

²DE "GEA Ukraine"

Key words:

centrifugal separator,
energy losses,
drive efficiency,
direct drive,
intelligent control,
food product

Article history:

Received 27.11.2024

Received in revised form
28.11.2024

Accepted 15.12.2024

Corresponding author:

martsinkevich.lesya@gmail.com

ABSTRACT

Main groups of energy consumption in centrifugal separators were analyzed, as well as methods and technical solutions from leading manufacturers of centrifugal separators for energy consumption reduction in processes of clarification/separation of liquid food products. During operation of centrifugal separators there are energy consumption contributors as the following: mechanical losses in the drive, electrical losses in the motor, energy consumption for hydraulic friction in the bowl, windage (air friction of the bowl) and energy consumption for product feed and discharge. Utilization of frequency inverters for separator drive control helped to simplify drive design and control but also reduced energy consumption. Changing from gear to belt drive offered considerable drive efficiency increase from 75—80% to 90%. Further implementation of integrated direct drive controlled with frequency converter allows to increase separator's drive efficiency to 93—95%. Optimization of impeller geometry of centripetal pumps for discharge of separated product allows to reduce the hydraulic friction losses in open-type separators with reduction in total energy consumption by 10%. Biggest energy losses in centrifugal separators are induced by air friction of the bowl. There are several technical solutions suggested for reducing air friction: creating vacuum in the bowl chamber or reducing the bowl rotation speed due to a decrease in the separator's capacity. Such solutions can help to save up to 40% of total energy consumption. Additional potential in reducing energy consumption and losses of other resources, such as water for operating the separator, as well as product losses reduction has implementation of intelligent centrifuge control. As examples: bowl speed control depending on product feed capacity or changed separation efficiency requirements; solids discharge control depending on separated product turbidity, etc. However, this requires separate research on each individual technological process and even at each enterprise with their unique production conditions.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-12

КРАЩІ ПРАКТИКИ І ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПІД ЧАС РОБОТИ ВІДЦЕНТРОВИХ СЕПАРАТОРІВ

О. М. Гавва¹, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-2938-0230

А. В. Чуприна², канд. техн. наук

О. М. Чепелюк¹, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-6295-6305

В. В. Степанець, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-2344-6668

Л. В. Марцинкевич¹, ORCID ID: 0000-0003-2215-9912

¹Національний університет харчових технологій

²ДП «ГЕА Україна»

У статті досліджено найбільш значимі групи витрат енергії у відцентрових сепараторах, а також методи і технічні рішення для їх зниження. Використання прямого інтегрованого приводу з управлінням від перетворювача частоти дає змогу підвищити ККД приводу до 93—95%, оптимізація геометрії крильчатки доцентрових насосів для вивантаження сепарованого продукту — зменшити споживання енергії на 10%, а технічні рішення для зниження тертя барабана об повітря — заощадити до 40% загальних витрат енергії. Додатковий потенціал у зниженні витрат енергії і інших ресурсів має впровадження інтелектуального управління обладнанням.

Ключові слова: відцентровий сепаратор, барабан, витрати енергії, ККД, прямий привід, інтелектуальне управління, харчовий продукт.

Вступ. Окрім того, що відцентрові сепаратори для очищення/розділення рідких харчових продуктів є технічно складним і дороговартісним обладнанням, вони також відносяться до обладнання з високим питомим споживанням електричної енергії на тонну обробленого продукту. Стрімке зростання тарифів, а інколи й дефіцит електроенергії порушує питання енергетичної ефективності всього обладнання загалом і відцентрових сепараторів зокрема. З часу винаходу відцентрового сепаратора для знежилення молока у XIX сторіччі постійно вдосконалювалась як конструкція робочого органу (барабана), так і приводу сепаратора. Однак незмінним залишається принцип роботи сепаратора: для ефективного розділення рідин/осаду різної густини відцентрова сила повинна в тисячі разів перевищувати силу тяжіння.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Для опису процесу відділення механічних домішок з рідин у центрифугах (технологічні процеси освітлення, кларифікації) використовується закон Стокса, оскільки розмір частинок осаду не великий, а структура їх потоку у відцентровому полі сепаратора, як правило, знаходиться в діапазоні низьких чисел Рейнольдса, тобто їх потік є ламінарним. Згідно з [1] швидкість осадження частинки:

$$V_z = \frac{D^2 \Delta \rho}{18 \eta} r \omega^2, \quad (1)$$

де V_z — швидкість осадження твердих частинок; D — діаметр частинки; $\Delta \rho$ — різниця густини між матеріалом частинки та рідиною; η — динамічна в'язкість рідини; $r\omega^2$ — відцентрове прискорення частинки під час обертання в барабані сепаратора.

Коефіцієнт сепарації відображає, у скільки разів відцентрове прискорення у центрифугі перевищує прискорення вільного падіння:

$$\zeta = r\omega^2/g. \quad (2)$$

Для ефективного процесу очищення рідини швидкість осадження V_z повинна бути більшою або рівною ефективній швидкості рідини в сепараторі:

$$V_e = Q/S, \quad (3)$$

де Q — об'єм рідини, що проходить через барабан за одиницю часу; S — ефективна площа очищення в барабані сепаратора.

Отже,

$$V_z = V_e = Q/S = \frac{D^2 \Delta \rho}{18 \eta} r \omega^2. \quad (4)$$

З цього рівняння визначається мінімальний розмір частинки, яку можна відділити у відцентровому полі барабана сепаратора з ефективною площею освітлення S та з продуктивністю освітлення Q :

$$D_{min} = \sqrt{\frac{18 \eta}{\Delta \rho} \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{Q}{S \zeta}}, \quad (5)$$

або визначити ефективну продуктивність сепаратора із заданими параметрами барабана та параметрами продукту:

$$Q_e = \frac{D^2 \Delta \rho}{18 \eta} g \zeta S. \quad (6)$$

Добуток коефіцієнта сепарації та ефективної площі освітлення утворює еквівалентну поверхню очищення:

$$S_\zeta = \zeta S, \quad (7)$$

який відображає площу поверхні ємкості, що забезпечить таку саму ефективність очищення, як і в сепараторі, але під дією сили тяжіння, та який може служити критерієм для порівняння ефективності розділення у відцентрових сепараторах.

З огляду на формулу (7) для підвищення ефективності розділення у відцентрових центрифугах потрібно підвищувати коефіцієнт сепарації та ефективну площу очищення. Максимальна швидкість обертання та радіус робочого органу центрифуги — ротора, обмежуються міцністю матеріалу, що використовується для його виготовлення. Час осідання частинки залежить від швидкості осідання V_z та від товщини шару рідини, який частинка має пройти до осідання. Відповідно, для забезпечення максимальної ефективної площі очищення товщина шару рідини в полі відцентрових сил повинна бути мінімальною. Так більша швидкість барабана забезпечується у центрифугах трубчастої конструкції (рис. 1, а). Коефіцієнт сепарації ζ в них складає 13000—17000 [1].

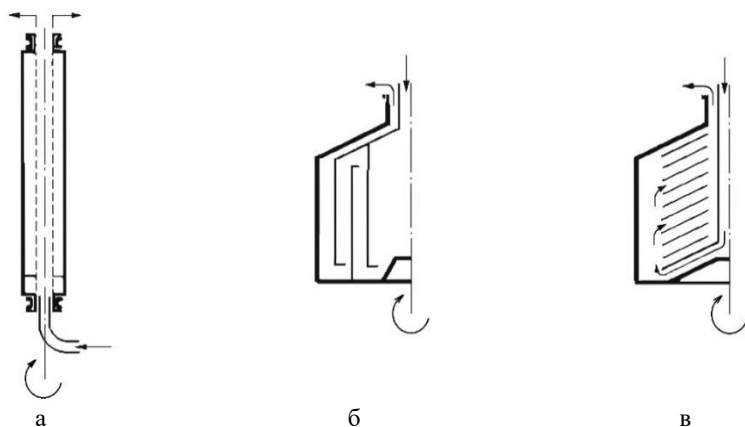


Рис. 1. Схеми роторів центрифуг різних типів:

а — трубчастій; б — барабан камерного типу; в — барабан із пакетом тарілок

Однак радіус ротора та ефективна площа очищення в трубчастих центрифугах незначні і суттєво знижують їх еквівалентну поверхню очищення.

Для очищення харчових рідин переважно використовують сепаратори-центрифуги, робочим органом яких є барабан. При більшому радіусі барабана швидкість обертання барабана в них, якщо порівняти з трубчастими центрифугами, менша. Коефіцієнт сепарації ζ в таких сепараторах складає 5000—13000 [1]. Однак ефективна площа очищення в сепараторів у десятки, а в деяких випадках у сотні разів вища.

Виділяють два типи барабанів сепараторів: камерної конструкції (рис. 1, б) та барабани з пакетом тарілок (рис. 1, в).

Камерні барабани мають простішу конструкцію, а тому дешевші у виготовленні. Підвищена ефективна площа очищення в таких барабанах забезпечується набором циліндричних вставок, що утворюють окремі камери в барабані та на яких під дією відцентрової сили осідають тверді частинки. Недоліком такої конструкції є неможливість автоматизації процедури очищення вставок від осаду, тому такі сепаратори мають періодичний принцип дії, а видалення осаду зі вставок виконується вручну. Ручне розбирання барабана, а також ручне видалення циліндричних вставок для очищення обмежують кількість камер (у середньому 2—6) та, відповідно, є лімітуючим фактором для збільшення ефективної площі очищення.

У барабанах з пакетом тарілок тарілки мають конічну форму та спресовуються в пакеті із зазором у частку міліметра. Кількість тарілок у пакеті може сягати кількох сотень. Рідина проходить через пакет тарілок тонкими шарами. Тверді частинки осідають на внутрішній поверхні тарілок та під дією відцентрової сили зісковзують на периферію барабана, де накопичуються в окремому просторі для осаду. Перевагою конструкції сепараторів із пакетом тарілок є те, що з'являється можливість автоматично вивантажувати осад через порти, розташовані по периметру барабана. Саме тому відцентрові сепаратори з пакетом тарілок знайшли найширше застосування у промисловому очищенні/розділенні рідин [2, 3].

Максимальна допустима швидкість обертання барабана для сепараторів з барабаном діаметром до 300 мм складає близько 11000 об/хв, для сепараторів з барабаном діаметром 800 мм і більше — 4500 об/хв [5, 6]. Враховуючи масу барабана сепаратора та необхідність прискорити рух продукту до швидкості обертання барабана, питома витрата енергії на оброблення продукту для більшості сепараторів складає від 1 до 1,4 кВт·год/м³ [7].

Мета дослідження: визначити та обґрунтувати найбільш значимі групи витрат енергії під час роботи відцентрових сепараторів із пакетом тарілок і дослідити можливість їх зменшення.

Результати дослідження. Витрати енергії в процесі розділення харчових продуктів на відцентрових сепараторах передбачають такі складові [5]:

$$P = P_{\text{мех}} + P_{\text{ел}} + P_{\text{гідр}} + P_{\text{пов}} + P_{\text{нас}}, \quad (8)$$

де P — загальні витрати енергії під час роботи сепаратора; $P_{\text{мех}}$ — витрати енергії в механічному приводі; $P_{\text{ел}}$ — електричні витрати енергії в приводі сепаратора; $P_{\text{гідр}}$ — витрати енергії на гідравлічне тертя рідини в барабані сепаратора; $P_{\text{пов}}$ — витрати енергії на тертя барабана об повітря; $P_{\text{нас}}$ — витрати енергії на подачу продукту на сепаратор.

Залежно від того, якою є конструкція сепаратора: герметичною (рис. 2, а) чи відкритою (рис. 2, б), величини $P_{\text{гідр}}$ та $P_{\text{нас}}$ розподіляються за різними залежностями. В

герметичних сепараторах насос подачі продукту в сепаратор повинен як безпосередньо подавати продукт у сепаратор, так і прокачати через нього, забезпечивши також потрібний тиск подачі на подальшу переробку. Тому такий насос повинен забезпечити тиск подачі близько 4—6 атмосфер. $P_{зідр}$ у таких сепараторах — це, власне, втрати на гідравлічне тертя під час розгону продукту в барабані та під час його вивантаження з барабана. В сепараторах відкритої конструкції насос подачі повинен забезпечити неперервне надходження продукту в барабан сепаратора, для чого достатньо забезпечити тиск 0,5—1 атмосфер. Однак для вивантаження продукту із сепаратора під тиском у такій конструкції використовується доцентровий насос, у якому кінетична енергія рідини, що обертається, перетворюється на потенціальну енергію тиску вивантаження. Ці витрати враховуються у величині $P_{зідр}$. Саме тому для об'єктивного порівняння витрат енергії в процесі розділення харчових продуктів на відцентрових сепараторах рекомендується враховувати споживання енергії насосом подачі продукту.

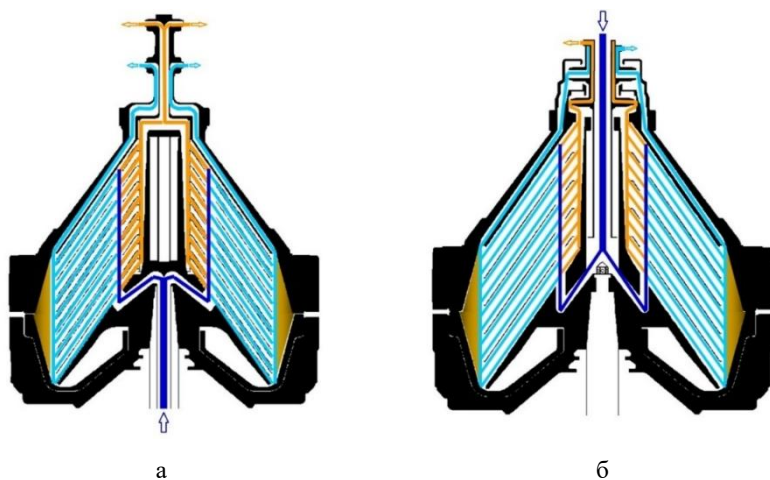


Рис. 2. Переріз барабана сепаратора:

а — герметичної конструкції; б — відкритої (гідрогерметичної) конструкції

У праці [7] досліджувались витрати енергії та методики їх зниження для сепаратора-кларифікатора 18-ї серії компанії Alfa Laval. Досліджуваний сепаратор мав продуктивність 160 м³/год. Оскільки цей сепаратор має герметичну конструкцію, розподілення витрат суттєво відрізняється від відкритих моделей: витрати на гідравлічну енергію — 41%; на тертя барабана об повітря — 39%; механічні втрати — 15%; електричні втрати — 5%. Однак треба відзначити, що для ефективної роботи сепаратора герметичної конструкції потрібно використовувати потужний насос зі споживанням енергії приблизно 54% від загальної енергії, що використовується сепаратором.

При дослідженнях [8] сепаратора відкритої конструкції, що використовується для знежирення молока продуктивністю до 26000 л/год (тип Махсгеат 30Т, виробник — компанія Haus) були отримані такі дані: 49% енергії споживається на прискорення продукту до швидкості обертання барабана, 32% — на подолання тертя поверхні барабана об повітря, 10% — електричні втрати; 9% — механічні втрати.

Втрати енергії можна поділити на втрати у приводі та втрати у робочому органі — барабані сепаратора.

Втрати енергії у приводі. За більш ніж сторічну історію відцентрових сепарато-

рів використовувались різноманітні конструкції приводів: від ручного приводу з ланцюговим мультиплікатором і парового двигуна з пасовими передачами до інтегрованого прямого приводу. Із середини минулого сторіччя і до 1990-х років найбільшою популярністю користувався привід з електродвигуном, муфтою та черв'ячним мультиплікатором. Наприкінці минулого сторіччя з удосконаленням плоскопасової передачі виробники почали переводити сепаратори на використання плоскопасового приводу. Близько 15 років тому почалось активне впровадження прямого приводу.

Компанія GEA Westfalia Separator провела дослідження коефіцієнта корисної дії приводів різної конструкції на сепараторах власного виробництва [9].

Так сумарний коефіцієнт корисної дії приводу з електродвигуном, муфтою та черв'ячним мультиплікатором складав:

$$KKД_{np} = KKД_{дв} \cdot KKД_{м} \cdot KKД_{ред} = 0,93 \cdot 0,97 \cdot 0,85 = 0,76, \quad (9)$$

де $KKД_{np}$ — коефіцієнт корисної дії приводу; $KKД_{дв}$ — коефіцієнт корисної дії електродвигуна; $KKД_{м}$ — коефіцієнт корисної дії муфти; $KKД_{ред}$ — коефіцієнт корисної дії черв'ячного мультиплікатора.

У сучасних сепараторах із найдосконалішою конструкцією черв'ячного мультиплікатора $KKД_{ред}$ не перевищує 0,8.

Сумарний коефіцієнт корисної дії приводу з плоскопасовою передачею складає:

$$KKД_{np} = KKД_{дв} \cdot KKД_{nn} = 0,93 \cdot 0,97 = 0,9. \quad (10)$$

Оскільки відсутні втрати енергії у муфті та передачах, коефіцієнт корисної дії прямого інтегрованого приводу складає:

$$KKД_{np} = KKД_{дв} = 0,93. \quad (11)$$

Впровадження прямого інтегрованого приводу стало можливим завдяки розробці електричних двигунів спеціальної конструкції та використанню перетворювачів частоти спеціальних серій. Вже, власне, саме застосування перетворювача частоти для управління електричним двигуном сепаратора забезпечує економію електричної енергії [10]. У дослідженні [9] було порівняно витрати енергії у приводі сепаратора для знежирення молока продуктивністю 10000 л/год, тип Есосгеат, обладнаного пускачем двигуна з перемиканням із зірки на трикутник, та сепаратора того ж типу, але обладнаного перетворювачем частоти для управління двигуном. На обох сепараторах було встановлено асинхронний двигун змінного струму номінальною потужністю 15 кВт. Незважаючи на те, що під час роботи приводу перетворювач частоти сам споживає 300 Вт (номінальна потужність при використанні пускача 12,5 кВт, та 12,8 кВт при використанні перетворювача частоти), за рахунок коригування зсуву фаз — коригування коефіцієнта потужності, фактичне споживання з використанням перетворювача частоти на 2,0 кВА нижче (14,9 кВА проти 12,9 кВА відповідно). Окрім цього, використання перетворювачів частоти дає змогу згладити пускові навантаження, а під час зупинки сепаратора — перевести двигун у генераторний режим.

Застосування перетворювача частоти дає змогу гнучко реагувати на зміну вимог технологічного процесу регулюванням швидкості обертання сепаратора із заощадженням електричної енергії. Зниження продуктивності сепаратора та/або пом'якшення вимог до ефективності сепарації (залишкового жиру у знежиреному молоці) знижує оберти барабана і, відповідно, споживання електричної енергії. Так, для тієї ж моделі сепаратора Есосгеат було отримано дані, наведені на рис. 3 та рис. 4.

Враховуючи отриманий коефіцієнт корисної дії прямого інтегрованого приводу сепаратора з перетворювачем частоти величиною 0,93, подальше зниження витрат електричної енергії в приводі можливе тільки завдяки удосконаленню конструкції електричного двигуна. Так, використання для сепараторів з прямим інтегрованим

приводом електричного двигуна класу IE4 замість електричного двигуна класу IE2 може підвищити коефіцієнт корисної дії всього приводу до 0,95 [12].

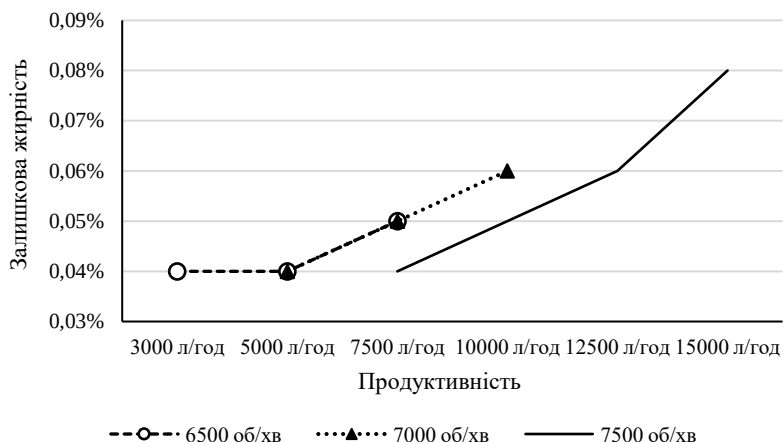


Рис. 3. Залежність залишкової жирності молока від продуктивності подачі та швидкості обертання барабана відцентрового сепаратора Есосреат для знежирення молока

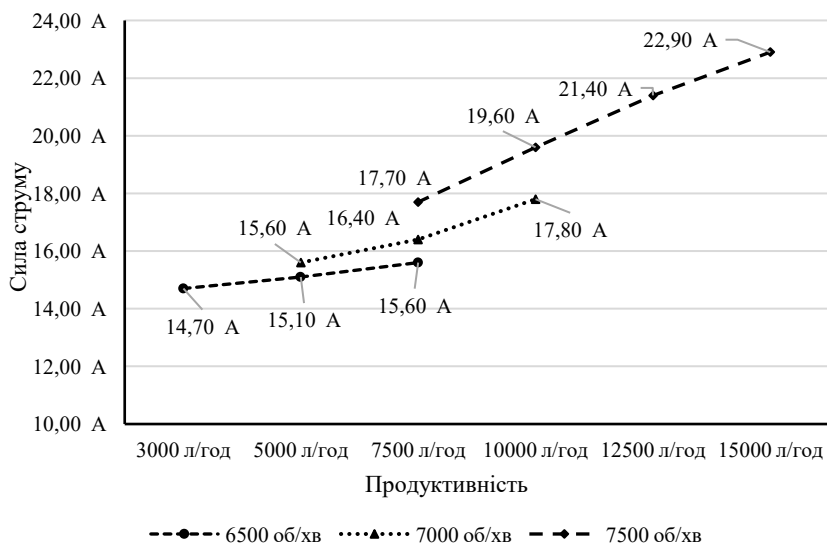


Рис. 4. Залежність сили струму на обмотках двигуна від продуктивності подачі та швидкості обертання барабана відцентрового сепаратора Есосреат для знежирення молока

Втрати енергії в барабані. При дослідженні витрат електричної енергії в барабані сепаратора для знежирення молока продуктивністю 30000 л/год, тип MSI 180-01-772 [11], було виділено три основні види витрат: на гідравлічну енергію — 16 кВт (48,5% від загальних витрат); на тертя барабана об повітря — 12 кВт (36%); на гідравлічне тертя у грейферах доцентрових насосів для вивантаження знежиреного молока і вершків під тиском — 3 кВт (9%).

Гідравлічна енергія використовується на виконання корисної роботи: прискорення рідини до швидкості обертання барабана — сепарації — вивантаження розділеного

продукту із сепаратора під тиском. А тертя барабана об повітря і гідравлічне тертя у грейферах доцентрових насосів — це втрати, які потрібно мінімізувати.

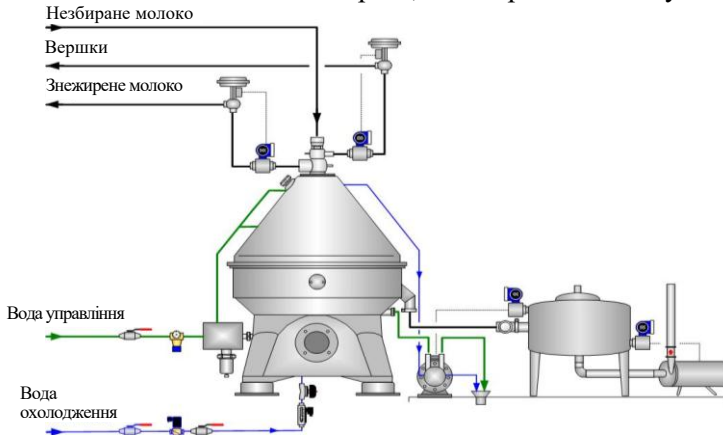


Рис. 5. Схема обв'язки сепаратора з вакуум-системою

Для зменшення втрат унаслідок тертя барабана об повітря в сепараторах Alfa Laval, а також в сепараторах GEA Westfalia Separator з найбільшими діаметрами барабана внутрішній простір сепаратора між барабаном і корпусом з кришкою герметизується і в ньому створюється розрідження з абсолютним тиском 0,32—0,5 бара (рис. 3). Так, у дослідженні [7] зниження абсолютного тиску в зоні навколо барабана сепаратора Alfa Laval до 0,26 бара забезпечило зниження загальних витрат енергії майже на 40%. Зменшення витрат енергії при зниженні абсолютного тиску в зоні навколо барабанів сепараторів GEA Westfalia Separator до 0,5 бара було визначено у дослідженні [11] та наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Зниження споживаної потужності в сепараторах GEA Westfalia Separator при створенні розрідження 0,5 бара в зоні навколо барабана сепаратора

Діаметр барабана, мм	Швидкість барабана, об/хв	Зниження потужності, кВт
730	5300	8,5
810	4800	12,6
1000	3900	19,4

У [8] наведено результати досліджень впливу діаметра грейферів доцентрових насосів сепараторів відкритої конструкції на відсоток використання гідравлічної енергії у вигляді корисного тиску продукту на виході сепаратора. Так, для сепаратора для знежирення молока продуктивністю до 26000 л/год (тип Maxcream 30T, виробник — компанія Haus) за умови використання як доцентрового насоса для знежиреного молока грейфера діаметром 150 мм з шістьма каналами і тиску вивантаження 4 бари частка використаної енергії для вивантаження знежиреного молока із сепаратора склала 20%.

У дослідженні [11], завдяки використанню спеціалізованого програмного середовища для розрахунку геометричних параметрів грейфера, було спроектовано доцентровий насос, у якому відсутня турбулентність, а гідравлічне тертя практично відсутнє. Це знизило витрати енергії у барабані сепаратора на 10%.

У статті [7] досліджувались втрати гідравлічної енергії в сепараторах Alfa Laval

герметичної конструкції. У герметичній конструкції патрубки подачі (знизу барабана) і вивантаження продукту (зверху) повинні знаходитись на осі обертання барабана. Таке технічне рішення забезпечує повернення системі енергії обертання рідини, що потрапила через нижній осьовий патрубок у барабан, прискорила до швидкості обертання у пакеті тарілок та була вивантажена з барабана сепаратора через верхній осьовий патрубок.

У сепараторах з гідрогерметичною конструкцією барабана зменшити витрати гідравлічної енергії можна завдяки зниженню швидкості обертання барабана. В такому випадку знижується тиск вивантаження продукту. Однак зниження швидкості також погіршує ефективність розділення в сепараторі, оскільки знижується відцентрова сила. Для компенсації зниження ефективності сепарації у дослідженні [11] пропонується збільшити час перебування продукту у полі відцентрових сил і збільшити ефективну площу сепарації — площу поверхні сепараційних тарілок. Тобто пропонується при підборі відцентрового сепаратора обирати наступний більший типорозмір і знизити швидкість обертання його барабана. Таке рішення не тільки знижує витрати гідравлічної енергії, але суттєво знижує втрати на тертя об повітря та гідравлічне тертя в грейфері. Приклад такого підбору наведений у табл. 2.

Таблиця 2. Зниження споживаної потужності в приводі сепаратора для знежирення молока за умови використання моделі з більшим діаметром барабана

Діаметр барабана, мм	540	660
Швидкість барабана, об/хв	7200	4700
Продуктивність сепарації, м ³ /год	25	25
Тиск вивантаження вершків, бари	8	3
Тиск вивантаження перегону, бари	5	4
Споживання енергії, кВт·год	27,7	16,9
Заощадження	—	39,1%

Інтелектуальне управління сепаратором. У багатьох технологічних процесах очищення/розділення харчових рідин можуть динамічно змінюватись умови, параметри процесу, рецептури тощо. Сучасні засоби автоматизації технологічних процесів дають змогу оперативно відстежувати такі зміни і інтелектуально управляти параметрами роботи сепаратора, знижуючи витрати енергії, втрати продукту та заощаджуючи інші ресурси [11, 13—17].

Так, у процесі очищення підсирної сироватки від сирного пилу безпосередньо після відділення її на сировиготовлювачі продуктивність подачі сироватки максимальна на початку її відбору. З часом потік поступово зменшується, збільшується час перебування продукту під дією відцентрових сил і для забезпечення потрібної ефективності очищення сироватки є можливість знизити швидкість обертання барабана сепаратора для зменшення витрат енергії.

У процесі виробництва нефільтрованого пива багато виробників продовжують роботу сепаратора на номінальній швидкості обертання барабана і досягають високої ефективності сепарації дріжджів. Для досягнення бажаного рівня мутності такого продукту в ефективно освітлене пиво такі виробники дозують не сепароване пиво, оминаючи сепаратор бай-пасом. З використанням приладів для вимірювання мутності продукту в потоці, встановлених у лінії подачі пива на сепаратор та лінії вивантаження пива з сепаратора, є можливість управляти швидкістю обертання барабана се-

паратора для зменшення витрат енергії при досягненні бажаної ефективності сепарації (мутності пива).

Під час освітлення продуктів бродіння на сепараторі вміст дріжджів, зазвичай, найвищий на початку викачування ферментаційної ємності і значно знижується під кінець викачування. У більшості відцентрових сепараторів вивантаження осаду управляється за таймером, а інтервали між вивантаженнями розраховуються, зважаючи на найнесприятливіші умови — концентрації дріжджів у продукті на початку процесу сепарації. Оскільки концентрація дріжджів з часом знижується, осад, який вивантажується через фіксовані проміжки часу, буде містити все менше дріжджів і все більше продукту. А це, з одного боку, невиправдано підвищує втрати продукту, що особливо важливо для продуктів з високою вартістю, як-от виноградне вино, а з іншого боку, підвищує витрати енергії в процесі сепарації. Під час кожного вивантаження осаду з сепаратора знижується швидкість обертання барабана і, відповідно, привід сепаратора збільшує споживання електричної енергії для досягнення заданої швидкості (під час вивантаження осаду сила струму на обмотках двигуна сепаратора може зростати на 10—30%). Сигналом для ініціації вивантаження осаду з барабана сепаратора може бути підвищення мутності продукту на виході сепаратора. Тому завдяки встановленню вимірювача мутності в лінії вивантаження продукту із сепаратора можна забезпечити інтелектуальне управління вивантаженнями осаду і зменшити таким чином витрати енергії, води, що використовується для управління вивантаженнями, та втрати продукту.

Крім того, параметри технологічного процесу можна оптимізувати для зниження витрат енергії. Так, оптимізація процесу концентрації плазми крові у центрифугу дає змогу знизити витрати енергії на 37% [18].

Під час підвищення рівня автоматизації технологічних процесів і застосування інтелектуального управління важливо забезпечити як виробництво, так і технологічний процес. Методи визначення стану та умов роботи відцентрового сепаратора з пакетом тарілок з вимірюванням вібрації в критичних точках були запропоновані у наукових працях [19, 20].

Висновки. З використанням конструкції прямого приводу, сучасних електродвигунів і перетворювачів частоти коефіцієнт корисної дії приводу відцентрових сепараторів підвищився до 0,93—0,95 і практично не залишає потенціалу для зменшення витрат у ньому. Водночас суттєвими залишаються втрати енергії на тертя барабана об повітря. Створення розрідження в зоні обертання барабана або зменшення частоти його обертання потенційно може знизити витрати енергії під час роботи сепаратора на 40%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dr.-Ing. Heinz Hemfort. (1984). Separatoren Zentrifugen für Klär-, Trenn- und Extraktionsprozesse. *Technisch-wissenschaftliche Dokumentation*, 3. Veröffentlichung der WestfaliaSeparator AG.
2. Gaaseidnes, K., Turbeville, J. (1999). Separation of oil and water in oil spill recovery operations. *Pure Appl. Chem.*, 71(1), 95—101.
3. Tarleton, E. S. (2011). Equipment selection and process design for solid/liquid separation. IN: *Proceedings of Filtech 2011: International Conference and Exhibition for F&S Technology*, Wiesbaden, Germany, March 22nd-24th, 61—77.
4. Purchas, D. B., and Wakeman, R. J. (1986). *Solid/Liquid Separation Equipment Scale-up*. Uplands Press Ltd, London.
5. Malliaroudaki, M. I., Gomes, R. L., Ferrari, R., Watson, N. (2020). Modelling energy consumption in the dairy supply chain. Single and Multi-product Manufacturing and Distribution, Project: Predictive modelling tools to evaluate the effects of climate change on food safety, Horizon 2020 research and

innovation programm under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 813329, EU, Ref. Ares(2020)7878745-22/12/2020.

6. Heymann, B. (2011). Plant and Equipment: Centrifuges and Separators — Types and Design. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2nd Edition, 166—174.

7. Szepessy, S., Thorwid, P. (2018). Low Energy Consumption of High-Speed Centrifuges. *Chemical Engineering Technology*. DOI: 10.1115/1.2817488.

8. Sağlam, E. (2020). Power consumption reduction studies and analysis for centrifugal separator, M. Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Aydin Adnan Menderes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences Mechanical Engineering, 2020-M.Sc.-007.

9. GEA Westfalia Separator Group GmbH, R&D dept. 2017. GEA Product Data.

10. Friso, D. (2017). Dynamic analysis of centrifugal separator in unsteady-state condition with and without variable-frequency drive. *Contemporary Engineering Sciences*, 10(2), 73—84.

11. GEA Westfalia Separator Group GmbH, R&D dept. 2022. GEA Product Data.

12. Furuta, K., Kosuge, K., Kobayashi, K. (1988). Self-tuning, sliding mode, and adaptive control for direct drive motor. IEEE IECON '88 conference record, 459—165.

13. Dumitrescu, R., Kühn, A., Steffen, D., Thielemann, F. (2018). Entwicklung intelligenter technischer Systeme. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(6), 420—425. <https://doi.org/10.3139/104.111937>.

14. Dumitrescu, R., Fleuter, M. (2019). *Intelligenter Separator: Optimale Veredelung von Lebensmitteln*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

15. Gausemeier, J., Tschirner, C., Dumitrescu, R. The path to intelligent technical systems. *Industry Management*, 29 (1), 49—52.

16. Tita, A., Mends, E., Hussaini, Sh., Thella, J., Smith, Y., Chu, P. (2024). Beneficiation of Li-bearing sedimentary claystone by centrifugation. *Minerals Engineering*, 218. 109042. 10.1016/j.mineng.2024.109042.

17. Batalović, V. (2011). Centrifugal separator, the new technical solution, application in mineral processing. *International Journal of Mineral Processing*, 100(3—4), 86—95. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.007>.

18. Sabri Salim, M., Malaysia, M. (2013). Optimization of Power Consumption for Centrifugation Process Based on Attenuation Measurements. *Journal of Physics: Conference Series*, 423, 012061. doi:10.1088/1742-6596/423/1/012061.

19. Merkelbach, S., Afroze, L., Janssen, N., von Enzberg, S., Kühn, A., and Dumitrescu, R. (2022). Using vibration data to classify conditions in disk stack separators. *Vibroengineering PROCEDIA*, 46, 21—26. <https://doi.org/10.21595/vp.2022.23000>.

20. Arnaut, A. (2021). *Centrifugal separator diagnosis*. M. Sc. Thesis, Rijeka: University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies. Retrieved from <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:957>.

УДК 621.869.8

RESEARCH OF THE WORKSPACE OF SPECIALIZED ROBOTIC COMPLEXES FOR GROUP PACKAGING OF FOOD PRODUCTS

I. Hlushchenko, M. Iakymchuk*National University of Food Technologies***Key words:**

specialized robotic complexes,
workspace,
articulated robots,
group packaging,
decomposition,
mathematical modeling,
MatLab,
Autodesk Inventor

Article history:

Received 05.09.2024
Received in revised form
18.09.2024
Accepted 24.09.2024

Corresponding author:

ivanhlush@ukr.net

ABSTRACT

The use of specialized robotic complexes (SRC) in packaging equipment has demonstrated its effectiveness and potential. However, the application of robotic complexes (RC) in packaging equipment remains at a relatively low level compared to other industries, and SRCs themselves require further optimization. One of the key parameters for optimization is the shape and size of the SRC's workspace. The purpose of this study is to examine modern SRCs in group packaging equipment and apply the proposed methodology for studying the workspace of existing SRCs as one of the key optimization parameters of RCs.

An analysis of scientific studies dedicated to researching the workspace of RCs revealed a significant number of such studies. However, most of these studies are conducted without considering the context of technological processes in packaging equipment. A market study of packaging equipment identified 10 different companies that manufacture and integrate SRCs into their own packaging equipment. An analysis of the use of such SRCs in packaging equipment identified typical technological processes where SRCs are utilized, as well as their technical characteristics.

Further research on the working zones of planar articulated SRCs was conducted using the proposed methodology, which is based on the decomposition of video materials of SRCs operation, modeling of the workspace, and verification of the obtained results using MatLab and Autodesk Inventor software. Thus, the proposed methodology allows for the study of existing SRCs and the modeling of workspace at the early stages of SRC design, and can be used for further research.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-13

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ГРУПОВОГО ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

І. С. Глущенко, аспірант, ORCID ID: 0009-0009-8303-5623
М. В. Якимчук, д-р. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-1905-3546
Національний університет харчових технологій

Використання спеціалізованих роботизованих комплексів (СРК) довело свою ефективність, однак використання роботизованих комплексів у пакувальному обладнанні все ще знаходиться на низькому рівні порівняно з іншими галузями промисловості, а самі СРК потребують подальшої оптимізації. Одним із ключових параметрів оптимізації є форма та розміри робочої зони СРК. На основі аналізу зразків сучасного пакувального обладнання та існуючих наукових праць, присвячених темі дослідження, пропонується методика, що дасть змогу моделювати та досліджувати робочі зони СРК ще на ранніх етапах їх проектування.

Ключові слова: спеціалізовані роботизовані комплекси, робоча зона, шарнірні роботи, групове пакування, декомпозиція, математичне моделювання, MatLab, Auto-desk Inventor.

Вступ. Промислові роботи вже зарекомендували себе, як невід’ємний елемент Індустрії 4.0 для харчової промисловості [1, 2]. Інтегрування промислових роботів у технологічні процеси харчової промисловості підвищує гігієнічність виробництва та його гнучкість, збільшує продуктивність і швидкість переналадження.

Попри перелічені переваги, інтегрування промислових роботів у харчову промисловість в Україні все ще знаходиться на низькому рівні [3] через ряд стримуючих факторів, серед яких брак висококваліфікованого обслуговуючого персоналу та висока вартість роботизованих комплексів (РК) [4].

Відповідно до проведеного аналізу відомих конструкцій РК у харчовій промисловості [2, 5] можна стверджувати, що широкі застосування знайшли шарнірні роботи, порталні роботи, роботи із замкнутим кінематичним ланцюгом (дельта-роботи) та SCARA-роботи [4]. Результат аналізу технічних характеристик таких роботів в обладнанні для групового пакування наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики різних типів промислових роботів для операцій групового пакування

Тип РК	Шарнірний	Дельта	Портальний	SCARA
Робоча зона	Сферична	Напів-сферична	Прямокутна	Циліндрична
Переваги	Швидкість Гнучкість Велика робоча зона Вантажо-підйомність	Швидкість Точність Гнучкість Мала вага	Вантажопідйомність Жорсткість конструкції Точність Низька вартість	Швидкість Точність Мала вага Малі габарити
Недоліки	Великі габарити Висока вартість	Обмежена робоча зона	Складне обслуговування Обмежена робоча зона Обмежена гнучкість	Обмежена вантажопідйомність Обмежена робоча зона

Продовження таблиці 1

Застосування	Укладання одиночної/ряду /шару споживчої упаковки	Укладання одиночної споживчої упаковки	Укладання одиночної/ряду /шару споживчої упаковки	Укладання одиночної споживчої упаковки
--------------	---	---	--	--

Варто підкреслити, що подальше використання СРК у технологічному обладнанні для групового пакування дасть змогу:

- здешевити технологічне обладнання для групового пакування за рахунок оптимізації кількості ступенів вільності порівняно з використанням універсальних РК;
- збільшити надійність і ремонтпридатність СРК на рівні підприємств;
- полегшити інтегрування СРК у технологічне обладнання.

Огляд останніх досліджень і публікацій. У праці [6] розглядаються проблеми оптимізації та максимізації робочої зони дволанкового плоского РК. Для вирішення цих проблем побудована математична модель на основі рішення прямої задачі кінематики РК за допомогою програмного забезпечення MatLab, після чого був визначений діапазон кутових переміщень і побудовані робочі зони для різних варіацій довжин ланок (рис. 1) [6]. У результаті було визначено, що розміри ланок плоского шарнірного РК в різній мірі впливають на розміри та форму робочої зони РК.

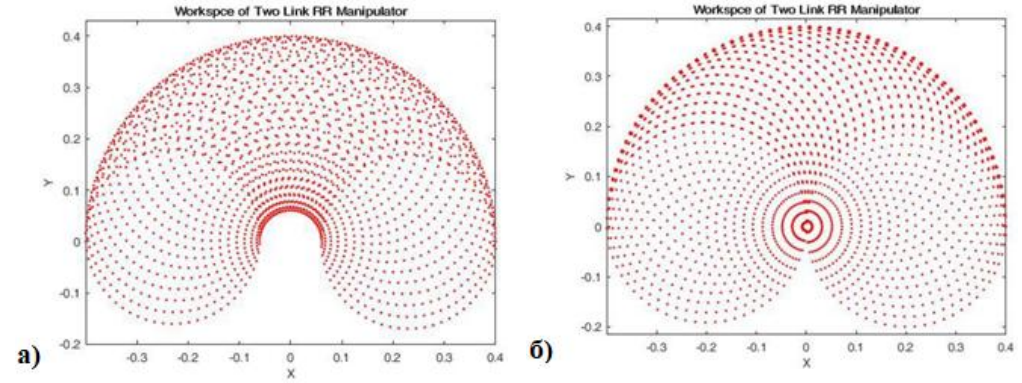


Рис. 1. Дослідження робочої зони плоского СРК із двома ступенями вільності для різних конфігурацій довжин ланок: а, б

У праці [7] досліджується одна із прикладних проблем використання РК, зокрема обмеження, що накладаються на теоретичну робочу зону залежно від орієнтування захоплюючого пристрою.

Автори розкривають необхідність врахування впливу орієнтувальних ступенів вільності на функціональну робочу зону, що відрізняється від теоретичної (рис. 2) [7]. Для вирішення цієї задачі пропонується використати аналітичний і геометричний метод.

Як показали результати дослідження, геометричний метод є більш простим для моделювання просторової робочої зони та проведення обробки отриманих результатів з використанням програмного забезпечення MatLab.

Досліджуючи робочу зону РК дельта типу із 6 ступенями вільності, автори наводять математичну модель, що дає змогу змінювати вхідні параметри для моделювання робочої зони та виводити результати у вигляді тривимірного масиву точок у програмному забезпеченні MatLab (рис. 3) [8].

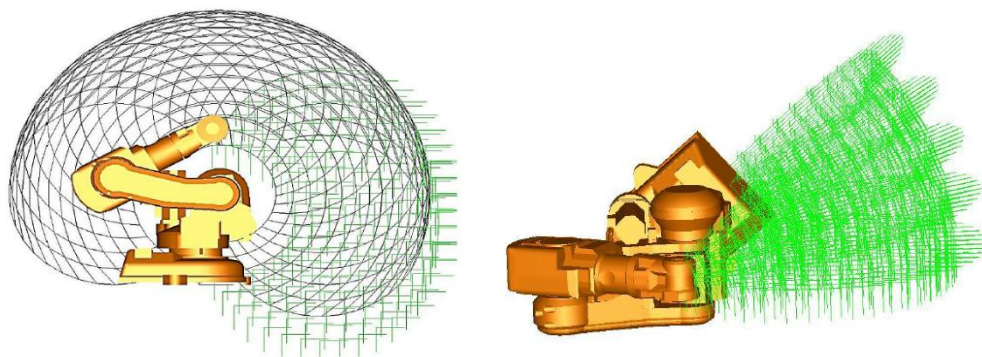


Рис. 2. Дослідження робочої зони універсального РК із 6 ступенями вільності

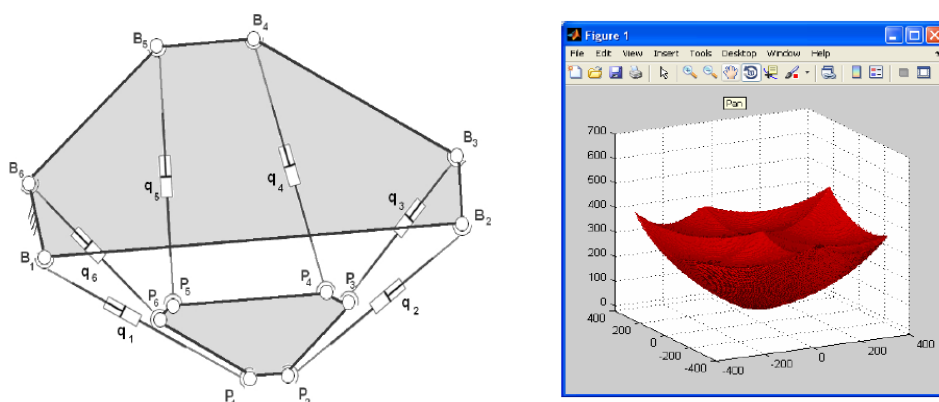


Рис. 3. Дослідження робочої зони універсального РК дельта типу із 6 ступенями вільності

Аналіз існуючих наукових досліджень показав, що в основному приділяється увага універсальним РК та, меншою мірою, спеціалізованим РК. Також варто відмітити, що більшість досліджень робочих зон РК використовували сучасні програмні комплекси для математичного та графічного моделювання. До основних недоліків можна віднести: дослідження робочої зони у відриві від контексту технологічного обладнання, а також відсутність методів верифікації отриманих результатів моделювання робочої зони. Також варто зауважити, що часто відсутність технічних даних про робочі зони СРК від виробників технологічного обладнання призводить до неможливості якісної оцінки СРК шляхом порівняння робочих зон різних СРК.

З огляду на це **метою пропонованої статті** є розробка методики для визначення робочої зони плоских спеціалізованих РК шарнірного типу.

Предметом дослідження є форма та розміри робочої зони спеціалізованих роботизованих комплексів (СРК) залежно від їх конструкції та розмірів ланок.

Методами дослідження є аналіз і декомпозиція відеоматеріалів роботи СРК, математичне та графічне моделювання в програмному забезпеченні MatLab і САПР Autodesk Inventor.

Дослідження та аналіз ринку обладнання для групового пакування дозволило виявити виробників, що виробляють СРК та інтегрують їх у власне пакувальне обладнання, серед яких варто відмітити: Schubert Group, Krones, Douglas Machinery, CAMA GROUP.

Характерною особливістю таких виробників є те, що вони розробляють лінійки СРК, які можна адаптувати під різноманітні технологічні операції.

Результати дослідження. За результатами аналітичного дослідження технічних характеристик СРК (табл. 2) можна стверджувати, що широке застосування знайшли СРК шарнірного типу, що працюють у площині та мають 2—3 ступені вільності, для операцій укладання одиничної/ряду/шару споживчої упаковки та виділення масиву плоскоскладених заготовок. Також широко використовуються РК дельта типу, що мають просторову робочу зону, що забезпечується чотирма ступенями вільності і, зазвичай, використовується для операцій поштучного укладання продукції за рахунок високої продуктивності.

Таблиця 2. Технічні характеристики СРК

№	Модель РК-обладнання	Загальний вигляд	Тип РК	Ступінь вільності	Технологічний процес	Метод встановлення
1.	Schubert F4		SCARA	4	Укладання одиничної споживчої упаковки	Підвісний
2.	Schubert F2		Шарнірний	2	Укладання одиничної/ряду/шару споживчої упаковки Виділення масиву плоскоскладених заготовок	Підвісний
3.	Krones Robobox T-GS		Дельта	4	Палетування	Підвісний
4.	Douglas CrONE		SCARA	3	Виділення плоскоскладених заготовок	На підлогу
5.	Cama Triaflex Delta Robot		Дельта	4	Укладання одиничної споживчої упаковки	Підвісний
6	Cama 2 Axis Robot		Шарнірний	2	Укладання одиничної/ряду/шару споживчої упаковки Виділення масиву плоскоскладених заготовок	Підвісний

Виробники перелічених СРК у складі пакувального обладнання, зазвичай, не вказують характеристики робочої зони, тому для визначення форми та розмірів робочої зони плоских СРК залежно від геометричних розмірів ланок і кутів їх повороту була запропонована методика (рис. 4).



Рис. 4. Методика визначення робочої зони СРК

Використання запропонованої методики для визначення робочої зони СРК показано на прикладі обладнання для групового пакування *TRIVEX® SL & Sli Douglas Machinery*.

Крок 1. Декомпозиція відеоматеріалів роботи СРК. Для виконання цього кроку слід зазначити, що за відеоматеріалами роботи технологічного обладнання неможливо визначити реальні лінійні розміри об'єкта, що допоміг би обрахувати масштабний коефіцієнт і дав змогу визначити лінійні розміри ланок СРК. Тож через відсутність реальних розмірів ланок пропонується прийняти умовний розмір ланок (рис. 5) зі збереженням їх пропорцій. Такий підхід дасть змогу описати характерну геометрію робочої зони РК без прив'язки до реальних розмірів.

Для визначення величин кутових переміщень ланок за відеоматеріалами роботи РК необхідний прямий кут спостереження, що мінімізує спотворення кутових величин необхідних для визначення кутових переміщень ланок. Отримані розміри ланок і значення кутових переміщень ланок використовуються для математичного моделювання робочої зони.

Крок 2. Створення розрахункової схеми СРК. Розрахункова схема представляє спрощену модель СРК, де зображуються ланки і кінематичні пари за попередньо визначеними розмірами. Далі ланки розташовуються в крайніх положеннях відповідно до значень кутів θ_1 , θ_2 та вимірюються координати точки кінцевої ланки. Для створення розрахункової схеми достатньо створити двовимірний ескіз в САПР Autodesk Inventor в САПР за визначеними параметрами кутових переміщень і довжин

ланок. Необхідність створення розрахункової схеми полягає у верифікації результатів моделювання робочої зони в програмному забезпеченні MatLab.



Рис. 5. Приклад декомпозиції відео роботи СРК TRIVEX® SL & Sli Douglas Machinery та визначення кутів повороту і розмірів ланок

Крок 3. Моделювання робочої зони СРК. Для моделювання робочої зони використаємо матрицю Денавіта-Хартенберга [9, 10] та за допомогою математичного апарату MatLab розв'яжемо пряму задачу кінематики робота.

Результатом розв'язку є функція зміни координат захоплювального пристрою СРК від кутових переміщень ланок, яку використаємо для отримання масиву точок захоплюючого пристрою в системі координат XZ (рис. 6).

Крок 4. Перевірка. Адекватність моделювання робочої зони СРК перевіряється шляхом порівняння координат точок захоплювального пристрою в крайніх положеннях робочої зони на отриманому графіку (рис. 6) в програмному забезпеченні MatLab та розрахунковій схемі в САПР Autodesk Inventor.

Результати моделювання робочих зон за запропонованою методикою для різних СРК подані в табл. 3.

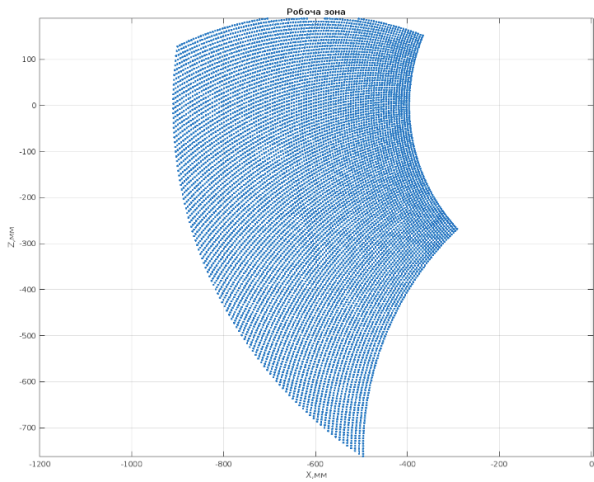
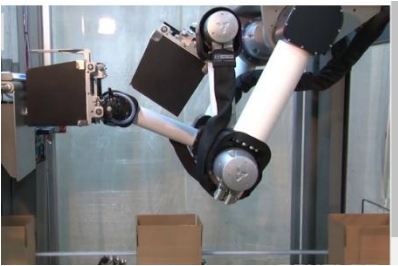
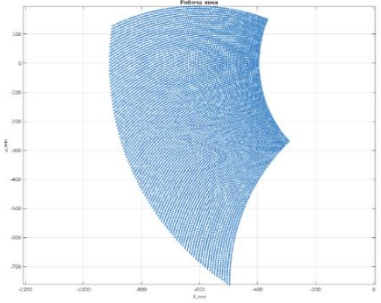
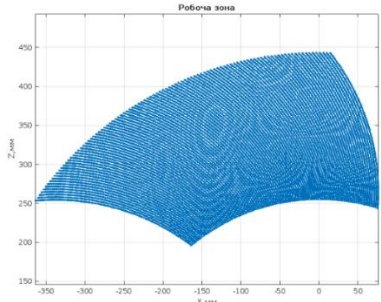
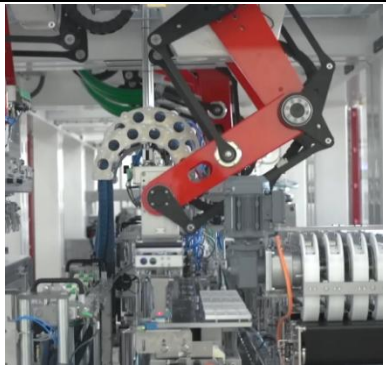
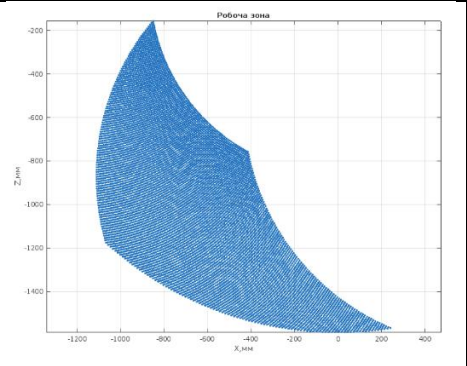
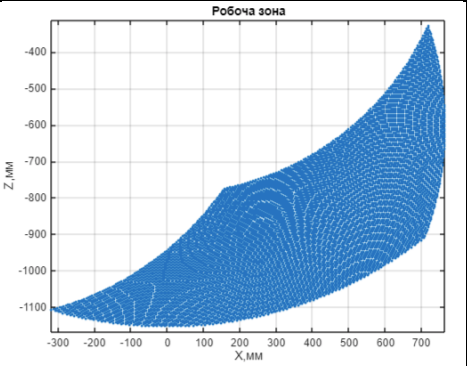
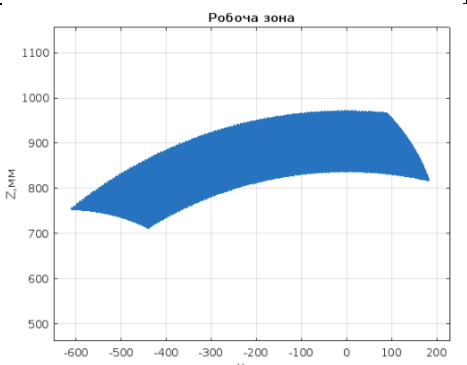
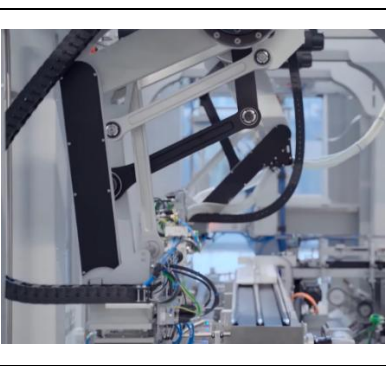
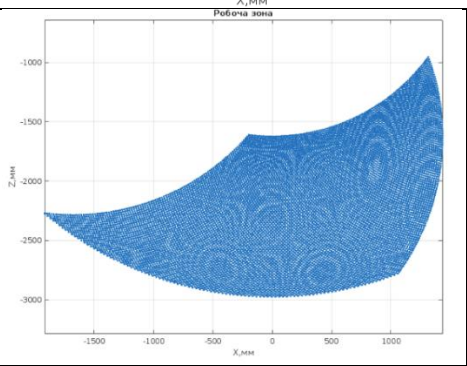


Рис. 6. Результат моделювання робочої зони CPK TRIVEX® SL & Sli Douglas Machinery в програмному забезпеченні MatLab

Таблиця 3. Результати моделювання робочої зони CPK

Модель РК-обладнання	Загальний вид CPK	Результати моделювання робочої зони в MatLab
TRIVEX® SL & Sli		
СрONE™		

Продовження таблиці 3

SCHUBERT TLM F2		
SCHUBERT TLM F2		
SCHUBERT TLM F3		
IG 273 CAMA GROUP		

Висновки. За результатом проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- існує тенденція до створення СРК для пакувального обладнання, що підтверджується постійним розвитком і вдосконаленням конструкцій таких СРК;
- аналіз існуючих досліджень робочих зон плоских СРК шарнірного типу виявив, що розміри ланок таких РК різною мірою впливають на форму та розміри робочої зони СРК;
- типовими технологічними процесами в пакувальному обладнанні, де використовуються СРК є поштучне, рядне та пошарове укладання продукції, поштучне та виділення шару плоскоскладених заготовок і палетування;
- встановлено, що найчастіше в обладнанні для групового пакування харчових продуктів застосовуються СРК шарнірного та SCARA типу;
- запропонована методика (рис. 4) дає змогу визначити форму та розміри робочої зони на основі декомпозиції відеоматеріалів роботи СРК і математичного моделювання в програмному забезпеченні Autodesk Inventor та MatLab;
- порівняння результатів графічного моделювання робочої зони СРК із вказаними робочими зонами виробників СРК показали відхилення в межах 5%

ЛІТЕРАТУРА

1. Bader, F., Rahimifard, S. (2020). A methodology for the selection of industrial robots in food handling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102379>.
2. Elferink, M., & Schierhorn, F. (2016, April 7). Global demand for food is rising. Can we meet it? *Harvard Business Review*, 94(4), 2—5.
3. Rene, J., Moreno Masey John, O., Gray Tony, J., Dodd Darwin, G., Caldwell. (2010). Guidelines for the design of low-cost robots for the food industry, *Industrial Robot: An International Journal*, 37(6), 509—517. <http://dx.doi.org/10.1108/01439911011081650>.
4. Bader, F., & Rahimifard, S. (2018). Challenges for Industrial Robot Applications in Food Manufacturing. 1—8. 10.1145/3284557.3284723.
5. Buckenhüskes, H. J., & Oppenhäuser, G. (2014). DLG-Trendmonitor: roboter in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie, DLG trend report: robots in the food and beverage industry. *DLG Lebensmittel*, 9(6), 16—17.
6. Thu, Z., Phyto Wai, L., Dr. Su Yin, W. (2019). Workspace Analysis of Two-link Planar Manipulator. 10.7753/IJSEA0808.1028.
7. Gudla, Arun Gowtham. (2012). A methodology to determine the functional workspace of a 6R robot using forward kinematics and geometrical methods. *Electronic Theses and Dissertations*. 4809. <https://scholar.uwindsor.ca/etd/4809>.
8. Lapusan, C., & Maties, V., & Olimpiu, H. (2009). Workspace analysis and design of a 6-DOF parallel robot.
9. Jazar, R. N. (2007). *Theory of Applied Robotics; Kinematics, Dynamics, and Control*, 1st ed., Springer US.
10. Вігуро, М., & Маляр, А. (2021). Розв'язання прямої задачі кінематики зварювального маніпулятора з шістьма ступенями свободи. *Журнал електроенергетичні та електромеханічні системи*. 27—34. 10.23939/sepes2021.01.027.
11. Ковальов, Ю. А., Кошель, С. О., Манойленко, О. П. (2020). *Проектування промислових роботів та маніпуляторів: навчальний посібник*. Київ: Центр учбової літератури.
12. Пелевін, Л. Є., Почка, К. І., Гаркавенко, О. М., Міщук, Д. О., Русан, І. В. (2016). *Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: підручник*. К.: ТОВ «НВП «Інтерсервіс».

УДК 621.869.8

KINEMATICS STUDY OF THE EXECUTIVE MECHANISM OF A BOTTLE MANIPULATOR FOR CASE PACKING (PART 1)

L. Kryvoplias -Volodina, V. Kostin, A. Derenivska, V. Kostiuk
National University of Food Technologies

Key words:

bottle manipulators for case packing,
gripping head,
kinematic parameters,
glass bottle arrays

Article history:

Received 25.04.2024
Received in revised form
05.05.2024
Accepted 15.06.2024

Corresponding author:

vkostin1951@gmail.com

ABSTRACT

The efficient operation of packaging lines is highly dependent on the performance of modules that handle the movement, reorientation, and positioning of packages. One of the critical types of equipment in the packaging line is manipulators for case packing, which are designed to reorient and place arrays of glass bottles into transport containers.

Glass bottles, due to their significant specific weight compared to their contents, require gripping heads and moving mechanisms capable of withstanding high dynamic loads. Ensuring reliable and precise operation involves optimizing kinematic parameters, allowing the forces between the mechanism links and the packaging objects to remain within acceptable limits. This optimization not only guarantees smooth operation but also enhances the efficiency and durability of the equipment.

The research focuses on the technological process of reorienting bottle arrays from an accumulator table to transport containers. Special attention is given to the temporal characteristics of motion stages and the kinematic parameters of the links moving along a predefined trajectory.

The methodology involves analysis, synthesis, and mathematical modeling of the gripping head joint's motion. The study identifies the characteristic angular positions of the crank, connecting rod, and roller during the manipulator's operation. For the studied design, the crank movement is divided into two phases: the first phase covers 0—29° (42—71° from the starting point), and the second phase spans 29—109°. Mathematical dependencies were developed to calculate displacements, velocities, and accelerations at each stage of the crank's movement.

The results provide insights into the kinematic performance of the bottle manipulator, offering a basis for optimizing its operation. These findings contribute to the design of more efficient and reliable equipment for the packaging industry.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-14

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ВИКОНАВЧОГО МЕХАНІЗМУ УКЛАДАЛЬНИКА ПЛЯШОК (ЧАСТИНА 1)

Л. О. Кривопляс-Володіна, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-1516-6381

В. Б. Костін, канд. техн. наук, ORCID ID: 0009-0006-6040-2476

А. В. Деренівська, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-0032-7583

В. С. Костюк, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-7938-6425

Національний університет харчових технологій

Безвідмовне функціонування пакувальних ліній залежить від ефективної роботи модулів, які виконують операції переміщення, переорієнтування та позиціонування упаковки. Об'єктом дослідження в статті є технологічний процес переорієнтування масиву скляних пляшок зі стола-накопичувача в транспортну тару. Отримано математичні залежності для характерних етапів переміщення, які описують кінематичні параметри руху підвіски захватної головки, що дає змогу оптимізувати конструкцію укладальника і технологічний процес переорієнтування масиву скляних пляшок.

Ключові слова: пристрій для укладання упаковок, механізм переміщення, захватна головка, кінематичні параметри

Вступ. Безвідмовне функціонування пакувальних ліній багато в чому залежить від ефективної роботи модулів, які виконують операції переміщення, переорієнтування та позиціонування упаковки. Ці процеси є критичними для забезпечення такту лінії, беззаторного переміщення упаковки (пакованої одиниці) у всіх модулях та машинах лінії, а їхня ефективність визначає загальну продуктивність і цілісність пакованої одиниці.

Одним із затребуваних видів пакувального обладнання є модулі для переорієнтування скляних пляшок та їх масивів — укладальники пляшок. Оскільки скляна пляшка має значну питому вагу порівняно з вміщеним продуктом, конструкції робочих органів, що використовуються, повинні витримувати високі динамічні навантаження. Під час визначення режимів роботи такого обладнання відбувається пошук оптимальних кінематичних параметрів, при використанні яких силова взаємодія між ланками механізму та об'єктами пакування знаходиться в допустимих межах.

Для забезпечення виконання процесу укладання (виймання) пляшок необхідно дотримуватись таких умов:

- виконавчі механізми мають містити максимальну кількість уніфікованих елементів, мати просту конструкцію та легкий доступ до складових вузлів;
- міцність і надійність конструкції робочих органів;
- виконавчі механізми повинні забезпечувати гнучкість і адаптивність для можливості переорієнтування різних типів упаковки та різною продуктивністю;
- переорієнтування пляшок відбувається із швидкістю, яка узгоджена з продуктивністю пакувальної (пакеторозформувальної) лінії;
- точність позиціонування та переорієнтування для зниження ризику пошкодження пляшок і забезпечення стабільності процесів.

Розробка та виготовлення укладальників пляшок, які забезпечують ці умови, неможливе без побудови імітаційних моделей і виконання розрахунків різного призначення: розробка структурних, кінематичних і силових параметрів[1—6].

Огляд останніх досліджень і публікацій. Стаття продовжує тему дослідження [7] про особливості синтезу виконавчого механізму укладальника пляшок.

При проектуванні укладальників для пляшок одним із важливих завдань, що постають перед розробниками, є досягнення високої продуктивності та оптимального режиму роботи [8]. На етапі проектування визначається, що параметри режимів роботи знаходяться в очікуваному діапазоні [9]. Відповідно до формули продуктивності укладальника:

$$П = \frac{3600G}{T_T} = \left[\frac{\text{кг}}{\text{год}} \quad \text{або} \quad \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \right],$$

де G — вага (об'єм) продукту, кг (м^3); T_T — технологічний цикл (тривалість операції переорієнтування масиву пляшок).

Параметри G та T_T , які входять до розрахунку продуктивності (1), досліджуються, групуються й аналізуються. Деякі з цих параметрів належать до груп, які підвищують продуктивність, а інші — до груп, які знижують продуктивність. З використанням методів оптимізації за умови забезпечення потрібної продуктивності визначаються необхідні значення раціональних кінематичних параметрів для переорієнтування певної вагової групи пакованої одиниці захватною головкою.

Важливо знати точні кінематичні характеристики руху робочих органів укладальника пляшок в тару і при потребі на визначених ділянках обмежувати їх [10, 11].

Мета статті полягає в дослідженні, визначенні й обґрунтуванні часових і кінематичних параметрів реалізації процесу вкладання масиву скляних пляшок у транспортну тару за допомогою захватної головки укладальника.

Матеріали і методи. *Об'єкт дослідження* — технологічний процес переорієнтування масиву скляних пляшок зі столу накопичувача в транспортну тару.

Предмет дослідження — часові характеристики етапів переміщення та кінематичні параметри руху за заданою траєкторією ланок під час роботи укладальника скляних пляшок.

Методами дослідження є аналіз, синтез, графічне та математичне моделювання переміщення шарніра кріплення захватної головки укладальника.

Результати дослідження. Як основу для дослідження прийнято кінематичну схему укладального пристрою (рис. 1), яка дає змогу спроектувати простий і надійний укладальний пристрій. Переміщення захватної головки складається з:

I — вертикальної ділянки підйому головки з масивом пляшок, $\varphi_{\text{поч1}} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{\text{поч2}}$;

II — радіальної ділянки переорієнтування масиву пляшок головою укладальника, $\varphi_{\text{поч2}} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{\text{поч3}}$;

III — вертикальної ділянки опускання головки з масивом пляшок, $\varphi_{\text{поч3}} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{\text{кін3}}$ [11].

Відповідно, і математичні моделі для визначення кінематичних параметрів на визначених ділянках будуть різні.

Етап підйому масиву пляшок. Для виведення потрібних аналітичних залежностей використаємо розрахункову схему, показану на рис. 2.

Необхідна умова перевантаження масиву пляшок — кутова швидкість кривошипа $\omega = \text{const}$.

Початкові умови I етапу переміщення на вертикальній ділянці підйому головки з масивом пляшок — кут повороту кривошипа: $\varphi_{\text{поч1}} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{\text{кін1}}$.

Робочі кути повороту кривошипа на кожному з етапів визначаються залежно від технологічних і геометричних параметрів роботи складових елементів вкладального модуля. Відповідно до представленої розрахункової схеми (рис. 2) початковий кут повороту кривошипа I для етапу I:

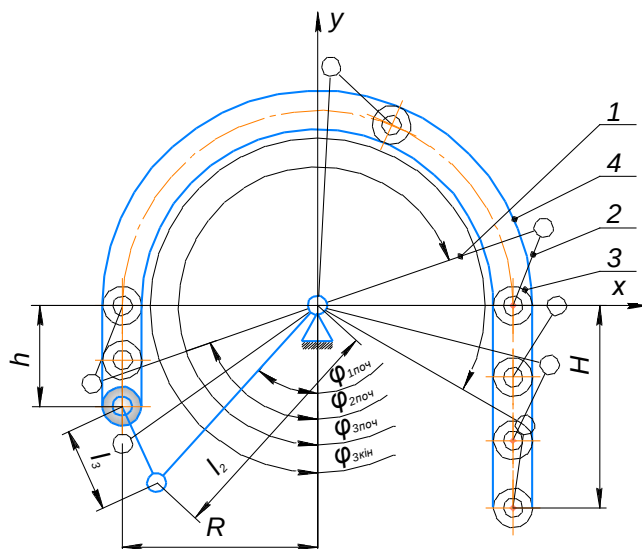


Рис. 1. Кінематична схема переміщення шарніра кріплення захватної головки: 1 — кривошип; 2 — шатун; 3 — шарнір кріплення захватної головки; 4 — напрямна

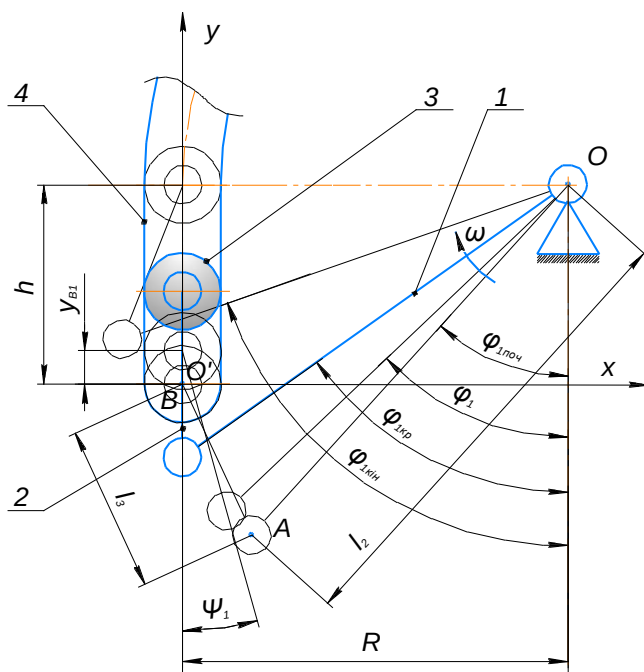


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення величини переміщення шарніра головки укладальника пляшок на першому етапі: 1 — кривошип; 2 — шатун; 3 — шарнір кріплення захватної головки; 4 — напрямна

$$\varphi_{1\text{поч}} = 90 - \arctg\left(\frac{h}{R}\right) - \arccos\left(\frac{h^2 + l_2^2 - l_3^2 + R^2}{2l_2\sqrt{h^2 + R^2}}\right), \quad (1)$$

де h — висота підйому масиву пляшок на першому етапі; R — радіус криволінійної траєкторії переміщення шарніра захватної головки на другому етапі; l_2 — довжина кривошипа 1; l_3 — довжина шатуну 2.

Перший етап закінчується, якщо головка укладальника досягає радіальної напрямної. За такої умови кут повороту кривошипа 1 в кінцевому положенні визначається за формулою:

$$\varphi_{\text{кін1}} = 90 - \arctg\left(\frac{h}{R}\right). \quad (2)$$

Зміну положення кута нахилу ψ_1 шатуну 2 відносно осі ОУ з урахуванням того, що в певний момент часу він займає вертикальне положення і продовжує рухатись далі, можна визначити:

1. Якщо $\varphi_{\text{поч1}} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{\text{кр1}}$, $\psi_{\text{поч1}} \leq \psi_1 \leq 0$:

$$\begin{cases} \psi_{\text{поч1}} = \arcsin\left(\frac{R-l_2 \cdot \sin(\varphi_{\text{поч1}})}{l_3}\right); \\ \psi_1 = \arcsin\left(\frac{R-l_2 \cdot \sin(\varphi_1)}{l_3}\right). \end{cases} \quad (3)$$

2. Якщо $\varphi_{\text{кр1}} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{\text{кін1}}$, $0 \leq \psi_1 \leq \psi_{\text{кін1}}$:

$$\begin{cases} \psi_1 = \arcsin\left(\frac{l_2 \cdot \sin(\varphi_1) - R}{l_3}\right); \\ \psi_{\text{кін1}} = \arcsin\left(\frac{l_2 \cdot \sin(\varphi_{\text{кін1}}) - R}{l_3}\right). \end{cases} \quad (4)$$

де $\varphi_{\text{кр1}}$ — кут повороту кривошипа, який відповідає вертикальному положенню шатуну 2 і визначається за формулою:

$$\varphi_{\text{кр1}} = 90 - \arccos\left(\frac{R}{l_2}\right). \quad (5)$$

Величина переміщення точки B , шарніра захватної головки, визначається ординатою за формулою:

$$y_B = h - l_2 \cdot \cos(\varphi_1) + l_3 \cdot \cos(\psi_1). \quad (6)$$

Підставивши в отримане рівняння (6) залежності (3), (4) та виконавши тригонометричні перетворення, можна визначити величину переміщення шарніра захватної головки на ділянці підйому залежно від кута повороту кривошипа:

$$y_{B1} = h - l_2 \cos(\varphi_1) + l_3 \sqrt{1 - \frac{(R-l_2 \sin(\varphi_1))^2}{l_3^2}}. \quad (7)$$

Подальше дослідження кінематичних параметрів переміщення проведено з використанням безрозмірних коефіцієнтів.

Кут повороту кривошипа визначається за формулою:

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{поч1}} + \omega \cdot k_t, \quad (8)$$

де ω — кутова швидкість кривошипа.

Безрозмірний коефіцієнт приросту часу $k_t \in [0,1]$:

$$k_t = \frac{t_{\text{пот1}}}{T_1}, \quad (9)$$

де $t_{\text{пот1}}$ — поточний час переміщення кривошипа на першому етапі; T_1 — загальний час переміщення кривошипа на першому етапі.

Залежність швидкості руху шарніра захватної головки отримаємо диференціюванням залежності (7), при цьому використаємо такі перетворення та припущення.

Так, для швидкості можна записати:

$$\dot{y}_{B1} = \frac{dy_{B1}}{dt_{\text{пот1}}} = \frac{dy_{B1}}{d\varphi_1} \cdot \frac{d\varphi_1}{dt_{\text{пот1}}} = \omega \cdot \frac{dy_{B1}}{d\varphi_1}, \quad (10)$$

де $\frac{d\varphi_1}{dt_{\text{пот1}}} = \omega$ — це задана кутова швидкість кривошипа.

Якщо вважати, що кривошип буде рухатися з постійною швидкістю, то кінцева залежність після диференціювання та відповідних перетворень для розрахунку швидкості буде мати вигляд:

$$\dot{y}_{B1} = \omega l_2 \left(\sin(\varphi_1) + \frac{\cos(\varphi_1)(R - l_2 \sin(\varphi_1))}{l_3 \sqrt{1 - \frac{(R - l_2 \sin(\varphi_1))^2}{l_3^2}}} \right). \quad (11)$$

Залежність зміни прискорення переміщення шарніра захватної головки можна отримати аналогічно, взявши першу похідну від швидкості (11):

$$\ddot{y}_{B1} = \frac{d\dot{y}_{B1}}{dt_{\text{пот1}}} = \frac{d\dot{y}_{B1}}{d\varphi_1} \cdot \frac{d\varphi_1}{dt_{\text{пот1}}} = \omega \cdot \frac{d\dot{y}_{B1}}{d\varphi_1}. \quad (12)$$

Після відповідних перетворень, диференціювання та проведення заміни $A = \frac{(R - l_2 \sin(\varphi_1))}{l_3}$ отримано залежність для визначення прискорення:

$$\ddot{y}_{B1} = l_2^2 \omega^2 \left\{ \frac{l_2 \cos^2(\varphi_1) + \sin(\varphi_1) A}{\sqrt{1 - A^2}} + \frac{l_2 \cos^2(\varphi_1) A^2}{\sqrt{1 - A^2}^3} - \cos(\varphi_1) \right\}. \quad (13)$$

Отримані залежності (7), (11) і (13) можна використати для визначення кінематичних параметрів і силового розрахунку укладальних пристроїв. Результати аналітичного моделювання кінематичних параметрів для першого етапу наведені на рис. 3 графіками зміни переміщення, швидкості та прискорення за одиницю часу залежно від безрозмірного коефіцієнта приросту часу.

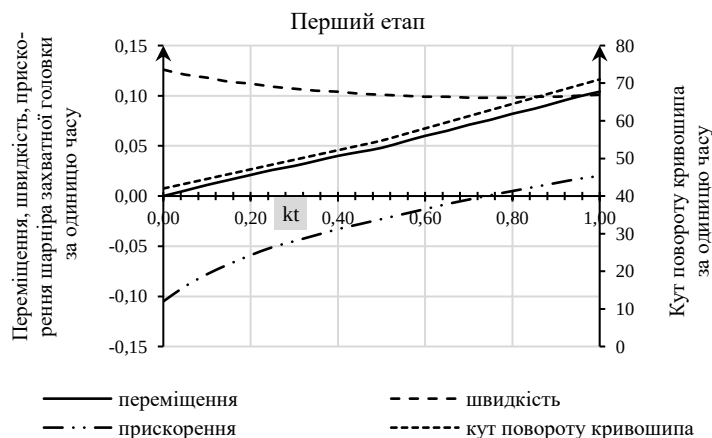


Рис. 3. Графіки зміни кінематичних параметрів переміщення шарніра захватної головки на другому етапі

Етап переорієнтування масиву пляшок (рис. 4). На криволінійній ділянці руху внаслідок того, що напрямна має постійний радіус кривизни, відстань між характерними точками B і O' залишається сталою і дорівнює R . Тому групу ланок, зокрема кривошип 1, шатун 2 і ролик 3, між якими в процесі переміщення вдовж криволінійної напрямної відносного руху не буде (будуть рухатись як одне ціле), можна умовно замінити однією жорсткою ланкою у формі трикутника OAB . Це суттєво спрощує дослідження кінематики на цьому етапі.

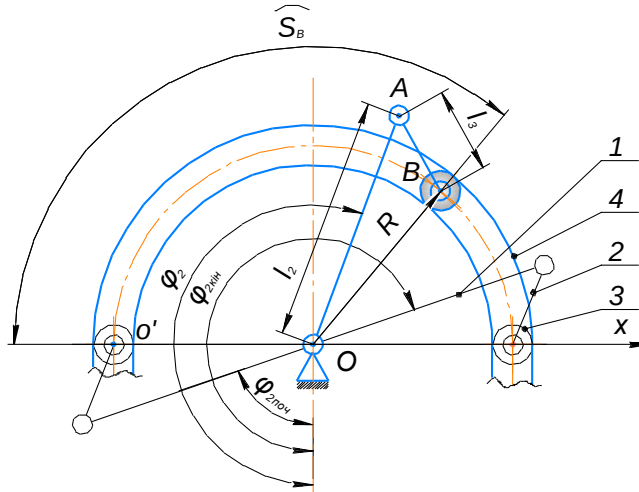


Рис. 4. Розрахункова схема для визначення величини переміщення шарніра головки укладальника пляшок на другому етапі: 1 — кривошип; 2 — шатун; 3 — шарнір кріплення захватної головки; 4 — напрямна

Умови початку та закінчення переміщення шарніра захватної головки на другому етапі:

$$\begin{cases} \varphi_{\text{поч}2} \leq \varphi_2 \leq \varphi_{\text{кін}2}; \\ \varphi_{\text{поч}2} = \varphi_{\text{кін}1}; \\ \varphi_{\text{кін}2} = \varphi_{\text{поч}2} + 180^\circ; \\ \omega = \text{const.} \end{cases} \quad (13)$$

Під час переміщення вдовж радіальної напрямної буде виникати лише нормальне прискорення, яке направлено до центру обертання т. O , а кінематичні параметри визначатимуться за формулою:

$$\begin{cases} y_{B2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{360} \cdot (\varphi_2 - \varphi_{\text{поч}2}); \\ \dot{y}_{B2} = V_B = \omega \cdot R; \\ \ddot{y}_{B2} = a_B^n = \omega^2 \cdot R, \end{cases} \quad (14)$$

де y_{B2} — переміщення; $\dot{y}_{B2}$ — швидкість; $\ddot{y}_{B2}$ — прискорення шарніра кріплення захватної головки.

Вектор швидкості шарніра буде вдовж дотичної до кола з радіусом R , напрямком прискорення буде вдовж лінії BO до центра обертання т. O (рис. 4).

На рис. 5 наведено результати проведеного математичного моделювання другого етапу. Представлені графіками зміни переміщення, швидкості та прискорення за одиницю часу залежно від безрозмірного коефіцієнта приросту часу.

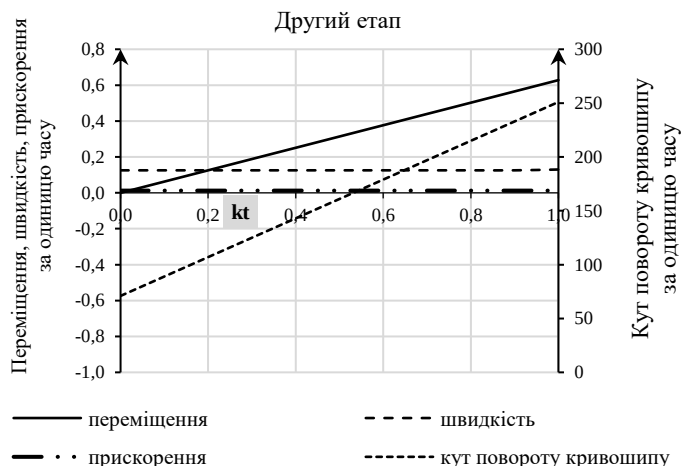


Рис. 5. Графіки зміни кінематичних параметрів переміщення шарніра захватної головки на другому етапі

Висновки. У результаті проведених досліджень кінематики укладального пристрою визначено відповідні характерні кути повороту групи ланок — кривошипа, шатуна і ролика. Для заданої конструкції укладальника робочий хід кривошипа становить для першого етапу — $0\text{—}29^\circ$ ($42\text{—}71^\circ$ від початку відліку), для другого етапу — $29\text{—}109^\circ$ (від початку відліку). Для визначених кутів переміщення кривошипа на кожному етапі були розроблені математичні залежності для розрахунків переміщень, швидкостей і прискорень точки кріплення шарніра захватної головки. Результати аналітичного дослідження кінематичних параметрів, які представлені на графіках, побудованих за допомогою методу використання безрозмірних коефіцієнтів, показали:

- на першому етапі переміщення шарніра захватної головки швидкість спадає з $0,13$ до $0,1$ м/(од. часу); прискорення зростає з $0,11$ до $0,02$ м/(од. часу)², змінюючи свій напрямок при повороті кривошипа на кут 24° від початкового положення;
- на другому етапі переміщення шарніра захватної головки швидкість і прискорення є незмінними величинами і складають відповідно $0,13$ м/(од. часу) та $0,0126$ м/(од. часу)².

Для необхідної продуктивності з подальшим визначенням тривалостей етапів переміщення можна визначити й проаналізувати реальні значення кінематичних параметрів кривошипа, шатуна і ролика, що накладе обмеження та забезпечить необхідні кінематичні характеристики за умови збереження цілісності споживчої упаковки, деталей рухомих елементів укладальника.

Третій етап дослідження — вкладання масиву пляшок в транспортну тару, буде висвітлено в наступному номері журналу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Михайлов, С. П., Лінгур, В. М. (2019). Навчальний посібник з дисципліни «Маніпулятори та промислові роботи»: для студентів-бакалаврів. Одеса: Одеський національний політехнічний університет.
2. Kaltsoukalas, K., Makris, S., Chryssolouris, G. (2015). On generating the motion of industrial robot manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 32, 65—71.

3. Abderrahim, M., Khamis, A., Garrido, S., Moreno, L. (2004). Accuracy and calibration issues of industrial manipulators. *Industrial robotics: programming, simulation and application*, 131—146.
4. Павленко, І. І. (2016). *Промислові роботи та РТК*: монографія. Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф.
5. Павленко, І. І., Годунко, М. О. (2014). *Захватні пристрої роботів*: навчальний посібник. Кіровоград: Лисенко В. Ф.
6. Губарев, О. П., Ганпанцурова, О. С. (2016). Мехатроніка: циклічно-методичний підхід до вирішення практичних задач автоматизації. Київ: КПІ.
7. Кривопляс-Володіна, Л. О., Костін, В. Б., Деренівська, А. В. (2019). Синтез виконавчого механізму укладальника пляшок. *Харчова промисловість*, 35, 120—127.
8. Azizov, A. A. (2015). Synchronization of movement of manipulator mechanisms. *Scientific and Technical Journal on "Engineering Mechanics"*, 5(13), 3—8.
9. Əzizov, Ə. A. (2014). Yeyinti istehsalı maşın və avtomatlarının layihələndirilməsi. Bakı.
10. Багатопараметричний оптимізаційний синтез важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки, що побудовані на основі напрямних механізмів [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://elar.khmnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/abacb0d4-47e9-4c0a-8f53-9cd985372182/content>.
11. Костін, В. Б., Ковальов, О. І. (2013). Програма кінематичного дослідження важільних виконавчих механізмів укладальників. *Ресурс- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції — основні засади її конкурентоздатності*: матеріали II Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 11 вересня, Київ: НУХТ, 94—96.

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Шановні колеги!

Редакційна колегія журналу «Харчова промисловість» запрошує вас до публікації наукових праць.

Засновник і видавець журналу: Національний університет харчових технологій.

Журнал затверджений наказом МОН України (постанова № 32 від 15.01.2018) як наукове видання з технічних наук.

У журналі висвітлюються результати науково-дослідних робіт з технології харчових продуктів, хімічних, біохімічних, мікробіологічних процесів, апаратів, обладнання, автоматизації харчових виробництв та економіки харчової промисловості.

Обсяг статей — до 15 машинописних аркушів (до 15000 друкованих знаків).

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Статті мають бути підготовлені з урахуванням Постанови Президії ВАК України № 7-05/6 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України». Друкуються наукові статті, які мають такі необхідні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання певної проблеми і на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з цього дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі.

До публікації приймаються не публіковані раніше статті, що містять результати фундаментальних теоретичних розробок та найзначніших прикладних досліджень викладачів, наукових співробітників, докторантів, аспірантів і студентів. Усі статті підлягають обов'язковому рецензуванню провідними спеціалістами у відповідній галузі харчових технологій, яких призначає науковий редактор журналу.

Рукопис статті надсилається у двох примірниках, українською мовою, включаючи таблиці, рисунки, список літератури.

Статті подаються у вигляді **вичитаних** роздруківок на папері формату А4 (поля з усіх сторін по 2 см, шрифт Arial або Time New Roman, кегль 14, інтервал 1,5) та електронної версії (редактор Microsoft Word) на електронному носії. На електронному носії не повинно бути інших версій та інших статей, у тексті статті — порожніх рядків. Між словами допускається лише один пробіл. Усі сторінки тексту мають бути пронумеровані.

На першій сторінці наводяться: у лівому верхньому куті — шифр УДК (напівжирним шрифтом), нижче ініціали і прізвища авторів (напівжирним шрифтом), наукові ступені авторів, назва установи, де працює автор; далі — назва статті великими напівжирними літерами, під назвою — анотація українською мовою з ключовими словами (5—6 слів/ключових словосполучень) набрана світлим курсивом; фраза «**Ключові слова**» — напівжирним шрифтом.

У кінці першої сторінки, під короткою рисою, ставиться знак авторського права, ініціали, прізвища авторів, рік.

Матеріали, представлені у статті, мають бути розділені на основні змістові розділи, такі як: постановка проблеми, огляд літератури, мета досліджень, матеріали та методи, результати досліджень, висновки. Кожен із наведених розділів статті починається з нового абзацу («**Постановка проблеми**», «**Огляд літератури**», «**Мета досліджень**», «**Матеріали і методи**», «**Результати досліджень**», «**Висновки**» — напівжирним шрифтом).

Після тексту статті в алфавітному або порядку згадування в тексті наводиться список літературних джерел (коже джерело з абзацу). Бібліографічні описи оформляються згідно з ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 «Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання». У тексті цитоване джерело позначається у квадратних дужках цифрою, під якою воно стоїть у списку літератури. Бібліографічний опис подається мовою видання. Не допускається посилання на неопубліковані матеріали. У переліку джерел мають переважати посилання на роботи останніх років.

Прізвища зарубіжних авторів у тексті статті треба наводити в українській транскрипції.

Після списку літератури наводиться: анотація та ключові слова (Summary) англійською мовою (розмір анотації не менше 1800 знаків, має містити коротку інформацію по кожному із основних змістових розділів); фраза «**Keywords**» — напівжирним шрифтом.

Усі анотації мають містити коротку інформацію щодо об'єкта та методик досліджень з наведенням основних результатів роботи та рекомендаціями щодо сфери їх застосування.

Після тексту анотацій та ключових слів наводиться фраза «Одержана редкологією (дата)» (набраним світлим курсивом). За дату одержання статті вважають дату надходження її до редакції.

Роздрукований варіант статті підписують усі автори.

У разі одержання статті, оформленої з порушенням запропонованих вимог, редакція статтю не реєструє. За необхідності доопрацювання статті відповідно до зауважень рецензента авторам направляється екземпляр рукопису, який разом із рецензією, відповіддю рецензентові, двома екземплярами виправленої статті та електронним носієм з виправленим текстом слід повернути до редакції.

Таблиці виконувати у Microsoft Office Word в форматі DOC. Кожна таблиця повинна мати тематичний заголовок, набраний напівжирним шрифтом, і порядковий номер (без знака №), якщо таблиць кілька. Якщо таблиця одна, то дається тільки заголовок (без слова «Таблиця»). Слово «Таблиця» і номер — курсивним шрифтом, заголовок — напівжирним. Таблиці мають бути закритими — з боковими, нижньою і горизонтальними лініями у полі таблиці.

Ілюстрації мають бути виконані ретельно, в програмі CorelDraw або будь-якому іншому графічному редакторі, на білому папері й розміщені в тексті та в окремих файлах (формати CDR, TIF, JPG; роздільна здатність не менше 300 dpi).

Фотографії друкуються лише у разі крайньої потреби, вони мають бути чіткими, контрастними, виконаними на білому фотопапері, розмірами 6×9 см.

Підписи до рисунків набираються на окремій сторінці або безпосередньо під рисунками прямим напівжирним шрифтом.

Повторення одних і тих самих даних у тексті, таблицях і на рисунках не допускаються.

Формули вставляються прямо в текст за допомогою редактора формул. Нумерація формул — арабськими цифрами у круглих дужках біля правого поля сторінки.

Використовувані в статті фізичні, хімічні, технічні та математичні терміни, одиниці фізичних величин та умовні позначення мають бути загальноприйнятими. Скорочення позначень одиниць фізичних величин мають відповідати Міжнародній системі одиниць (SI).

До статей додаються: виписка з протоколу засідання кафедри (підрозділу) з рекомендацією роботи до друку; відомості про авторів (прізвище, повне ім'я та по батькові, науковий ступінь, місце роботи, номери контактних телефонів, електронна адреса), кафедральний висновок/експертний висновок (для статей сторонніх організацій), заяву з підписами автора(-ів) про те, що надіслана стаття раніше не друкувалася і не подана до будь-яких інших видань.

Головний редактор журналу: доктор технічних наук, професор

Олександр ГАВВА

Відповідальний секретар журналу: кандидат технічних наук, доцент

Тетяна ОСЬМАК

Контактні телефони: міський — (044) 287-93-07, внутрішній — 93-07

E-mail: hpnuht@ukr.net

Наукове видання

ХАРЧОВА ПРОМИСЛОВІСТЬ

Науковий журнал

№ 36

Журнал «Харчова промисловість» затверджений наказом МОН України (постанова № 32 від 15.01.2018) як наукове видання з технічних наук.

Реєстраційне свідоцтво: серія КВ № 6890 від 23.01.2003.

Засновник і видавець: Національний університет харчових технологій.

Журнал є продовженням міжвідомчого тематичного збірника «Харчова промисловість», заснованого в 1965 р. Виходить двічі на рік.

Статті друкуються в авторській редакції.

Відповідальний редактор журналу О. Гавва

Відповідальний секретар Т. Осьмак

Комп'ютерна верстка: І. Максименко

Підп. до друку 22.12.2022 р. Формат 70×100/16.

Гарнітура Times New Roman. Друк цифровий.

Ум. друк. арк. 11,45. Обл.-вид. арк. 12,32.

Наклад 100 прим. Вид. № 07/16. Зам. № 23-16

НУХТ, 01601, Київ-33, вул. Володимирська, 68

Свідоцтво про реєстрацію серія ДК № 1786 від 18.05.2004