



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

**37**

**Харчова**  
**ПРОМИСЛОВІСТЬ**

Заснований у 1965 р.

Київ НУХТ 2025

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: [hpuht@ukr.net](mailto:hpuht@ukr.net)**

Recommended for publication by the Academic Council of the National University of Food Technologies.  
Protocol # 9 from 24 th of April, 2025

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: [hpuht@ukr.net](mailto:hpuht@ukr.net)**

Рекомендовано вченою радою Національного університету харчових технологій.  
Протокол № 9 від 24 квітня 2025 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 ПОЛЩУК**  
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-  
LYTVYENENKO

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**

Макаренко О. Г., Чебаненко Х. В. Стан законодавства Європейського союзу та України на початок 2025 року стосовно матеріалів і предметів, призначених для контакту з харчовими продуктами

Ищенко В. М., Квітковська Н. П., Кочубей-Литвиненко О. В., Чебаненко Х. В., Ищенко М. В. Аналітичні методи оцінки ступеня термічного оброблення молока

Абкадиоров Ф. Р., Мукоїд Р. М. Основні підходи до екологізації вирощування винограду для виноробства в Криму

Макаренко О. Г., Чебаненко Х. В. Глікоалкоїди картоплі  $\alpha$ -соланін та  $\alpha$ -чаконін. Огляд.

**Технології: дослідження, застосування та впровадження**

Камбулова Ю. В., Кохан О. О., Дудзінський О. В., Солошенко В. Ю. Інноваційні рішення в управлінні якістю глазурованих цукерок з корпусом на основі помади крем-брюле при переробці їх зворотних відходів

Бартошак І. В., Поліщук Г. С. Порівняльний аналіз технологічної ефективності різних способів зсідання вершкових сумішей

Сімахіна Г. О. Пріоритетне значення біофлавоноїдів у раціонах харчування при кризових ситуаціях

Строкач Є. В., Ковбаса В. М. Дослідження зміни кількості редукуючих цукрів картоплі в процесі зберігання та їх вплив на колір чипсів

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

Клещук О. О., Шутюк В. В. Особливості екстрагування вичавок ягід бузини чорної

Осьмак О. О., Серьогін О. О., Блаженко С. І. Аналіз методів чисельного моделювання процесу термічної конверсії біомаси рослинного походження

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

7 Makarenko O., Chebanenko K. State of legislation in the European union and ukraine at the beginning of 2025 on materials and articles in contact with food

16 Ischenko V., Kvirkovska N., Kochubei-Lytvynenko O., Chebanenko K., Ischenko N. Analytical methods for assessing the degree of heat treatment of milk

30 Abkadyrov F., Mukoid R. Main approaches to the ecologization of grape cultivation for winemaking in Crimea

39 Makarenko O., Chebanenko K. Glycoalkaloids of potatoes:  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine. A review

**Technologies: Researches, Application and Introduction**

48 Kambulova Yu., Kokhan O., Dudzinskyi O., Soloshenko V. Innovative solutions in the quality management of glazed sweets based on creme-brulee in the processing of their return waste

59 Bartoshak I., Polishchuk G. Comparative analysis of technological efficiency of various methods of formulating cream mixtures

70 Simakhina G. The priority importance of bioflavonoids in diets to use under the crisis situations

81 Strokach Y., Kovbasa V. Research into changes the amount of reducing sugars in potatoes during storage and their effect on the color of chips

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

88 Kleshchuk O., Shutyuk V. Features of extraction of black elderberry pomace

96 Osmak O., Seriyogin O., Blazhenko S. Analysis of numerical modeling methods of the thermal conversion of biomass of plant origin

- Погорілий Т. М., Рожко Ю. В., Олішевський В. В., Бабко Є. М., Николаєва О. А. Математичне моделювання впливу різних факторів на ефективність осадження крохмалю типу «А» у відцентровому полі 107 *Pohorilyi T., Rozhko Yu., Olishevskiy V., Babko E., Nikolaieva O.* Mathematical modeling of the various factors influence on the efficiency of type "A" starch precipitation in a centrifugal field

#### **Обладнання та устаткування**

Гавва О. О., Кривопляс-Володіна Л. О. Синтез конструктивних параметрів пристрою фасування сипкої продукції адаптронного модуля дозування безперервної дії стаканчикového типу

Ощипок І. М. Підвищення ефективності технологічного устаткування харчових виробництв застосуванням титану та його сплавів

Ченцов О. В., Якимчук М. В. Розробка адаптивного біонічного пристрою захоплення на основі коаксіальних оболонок

Мусійчук В. М., Гавва О. М., Чепелик О. М., Чепелик О. О. Обґрунтування параметрів дозувального модуля з поршнеvim нагнітанням для в'язких харчових продуктів

Бондарчук Д. С., Якобчук Р. Л. Аналіз конструкцій пристроїв розпилення апаратів для сушіння рідких харчових продуктів

Козак О. С., Десик М. Г., Теличкун В. І. Визначення раціональної будови вакуумної камери апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва

Касинюк М. О., Грінінг К. Р., Пономаренко А. М., Губеня О. О., Омеляненко К. А. Бісерні млини для руйнування клітин мікроорганізмів у виробництві продукції мікробного синтезу

#### **Equipment and machinery**

118 *Gavva O., Kryvoplias-Volodina L.* Synthesis of design parameters of a device for packaging loose products with a continuous cup-type adaptronic dosing module

132 *Oshchypok I.* Increasing the efficiency of technological equipment in food production using titanium and its alloys

143 *Chentsov O., Iakymchuk M.* Development of an adaptive bionic gripping device based on coaxial shells

153 *Musiichuk V., Gavva O., Chepeliuk O., Chepeliuk O.* Substantiation of the dosing module parameters with piston injection for viscous food products

163 *Bondarchuk D., Yakobchuk R.* Analysis of spraying devices designs for drying liquid food products

176 *Kozak O., Desyk M., Telychkun V.* Determination of the rational design of a vacuum chamber of a device for vacuum cooling of bakery products under continuous production conditions

190 *Kasyniuk M., Hrininh K., Ponomarenko A., Gubenia O., Omelianenko K.* Bead mills for destruction of microbial cells in production of microbial synthesis products

УДК 543.6:664:34

# STATE OF LEGISLATION IN THE EUROPEAN UNION AND UKRAINE AT THE BEGINNING OF 2025 ON MATERIALS AND ARTICLES IN CONTACT WITH FOOD

**O. Makarenko, K. Chebanenko***National University of Food Technologies***Key words:**

materials and articles intended for contact with food, good manufacturing practice, plastic materials and articles, regulatory legal framework

**Article history:**

Received 27.03.2025

Received in revised form 30.03.2025

Accepted 08.04.2025

**Corresponding author:**

chebanenkohv@nuft.edu.ua

**ABSTRACT**

The article examines the legislation of the European Union and Ukraine regarding materials and articles intended for contact with food. It provides a list of key EU legislative acts that establish requirements for materials and articles in contact with food. It is noted that EU legislation is undergoing changes, as new scientific studies indicate potential human safety risks even at low levels of chemical exposure. One of the latest changes includes the decision to completely ban bisphenol A.

The article highlights EU legislative acts that define specific testing methods and migration analysis for materials and articles in contact with food. Information is provided on different types of contact materials and objects, as well as specific substances covered by their own harmonized regulations. Some features of national legislation in EU member states are also considered.

It is shown that Ukrainian legislation is based on existing European standards but has its own specific features. As of early 2025, all necessary regulatory legal acts have not yet been developed or adopted for the full implementation of Law No. 2718-IX. Among other regulatory legal acts, unresolved issues remain regarding the study of the migration of plastic material components and the restrictions on the use of epoxy derivatives.

The article examines the specifics of substance registration used in the production of packaging materials in the European Union compared to the proposed regulations in Ukraine, as well as the implementation of good manufacturing practices. It highlights the active participation of associations of manufacturers of materials and articles in contact with food in the EU legislative processes and suggests adopting their experience in Ukraine.

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-3

# СТАН ЗАКОНОДАВСТВА ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ ТА УКРАЇНИ НА ПОЧАТОК 2025 РОКУ СТОСОВНО МАТЕРІАЛІВ І ПРЕДМЕТІВ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ КОНТАКТУ З ХАРЧОВИМИ ПРОДУКТАМИ

О. Г. Макаренко, канд. хім. наук, ORCID ID 0000-0002-9472-3546

Х. В. Чебаненко, ORCID ID: 0000-0001-5002-1393

Національний університет харчових технологій

*У статті розглянуто законодавство Європейського Союзу та України стосовно матеріалів і предметів, призначених для контакту з харчовими продуктами. Зазначено, що законодавство Європейського Союзу, перебуває в процесі змін. Нові наукові дослідження вказують на потенційні ризики для безпеки людини навіть при впливі низьких рівнів хімічних речовин.*

*Показано, що українське законодавство базується на чинних європейських нормах, однак має свої особливості, і станом на початок 2025 року всі необхідні нормативно-правові акти ще не розроблені або не прийняті для повної імплементації Закону № 2718-ІХ.*

**Ключові слова:** матеріали і предмети, призначені для контакту з харчовими продуктами, належна виробнича практика, пластикові матеріали та виробнича, нормативно-правова база.

**Вступ.** В листопаді 2025 року набирає чинності Закон України «Про матеріали і предмети, призначені для контакту з харчовими продуктами» № 2718-ІХ [1], який було прийнято ще у листопаді 2022 року. Відтермінування введення норм Закону було необхідним кроком для формування нормативно-правових актів у сфері безпечності харчових продуктів та надання необхідного часу виробникам пакувальних матеріалів і харчових продуктів для імплементації норм названого Закону. Його прийняття є ще одним кроком гармонізації українського законодавства з міжнародним, зокрема із законодавством Європейського Союзу (ЄС) згідно з «Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами» [2]. В основі прийнятого Закону № 2718-ІХ кілька законодавчих актів ЄС, що регулюють зазначену сферу застосування, зокрема:

1. Регламент (ЄС) 1935/2004 Європейського Парламенту та Ради від 27 жовтня 2004 р. щодо матеріалів і предметів, призначених для контакту з харчовими продуктами [3].

2. Регламент (ЄС) 450/2009 від 29 травня 2009 р. про активні та інтелектуальні матеріали та виробнича практика, призначені для контакту з харчовими продуктами [4].

3. Регламент (ЄС) 2023/2006 від 22 грудня 2006 р. про належну виробничу практику виробництва матеріалів і виробів, призначених для контакту з харчовими продуктами [5].

4. Регламент (ЄС) 282/2008 від 27 березня 2008 р. про перероблені пластикові матеріали та виробнича практика, призначені для контакту з харчовими продуктами, та про внесення змін до Регламенту (ЄС) № 2023/2006 [6].

В Україні відповідальність за безпеку та якість харчових продуктів несуть органи державної влади, які визначені Розділом II Закону України «Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів» [7], як-от: Державна служба

України з питань безпечності харчових продуктів та захисту споживачів (Держпродспоживслужба), Міністерство охорони здоров'я України (МОЗ), Міністерство аграрної політики та продовольства України. Також до сфери безпеки та якості харчових продуктів відноситься діяльність Державної екологічної інспекції України, Державної митної служби України та Антимонопольного комітету України.

Аналізу стану законодавства ЄС та України стосовно матеріалів та предметів, які контактують із харчовими продуктами, є актуальним з огляду на його динамічні зміни та важливості для харчової промисловості.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Ґрунтовний аналіз змін законодавства України в сфері безпечності харчових продуктів наведено в праці [8], де було окремо наголошено, що «постійне оновлення асортименту харчових продуктів та пакувальних матеріалів і тари для них та методів дослідження їх якості і безпечності буде обумовлювати постійні зміни харчового законодавства».

Важливу оцінку змісту і практичного механізму застосування Закону України № 2718-IX розглянуто авторами наукового дослідження [9], де зазначено особливості, пов'язані з функціями органів виконавчої влади у цій сфері, вимогами до об'єктів, процедурою їх державної реєстрації, маркування, декларування відповідності й забезпечення простежуваності та належної виробничої практики (GMP).

На прикладі виробництва харчових продуктів спеціального медичного призначення в праці [10] відзначають важливість ризик-орієнтованого мислення, заснованого на контролі сировини, упаковки, тестуванні у виробництві та випуску товарів на заявлені характеристики, забезпеченні високої компетентності персоналу, процесу та аналітичної валідації.

Особливості механізму державної реєстрації речовин та процесів переробки пластику, що використовуються у виробництві матеріалів і предметів, призначених для контакту з харчовими продуктами, розглянуто в публікації [11]. Було зазначено, що застосування тих чи інших засобів державного регулювання, передбачених зазначеним законодавством, вимагає пошуку оптимального балансу між досягненням цілей безпечності харчових продуктів та продовольчої безпеки.

**Метою дослідження** є аналіз сучасної нормативно-правової бази країн Європейського Союзу, України та інших країн в сфері матеріалів і предметів, що контактують з харчовими продуктами. Важливо проаналізувати готовність введення в дію Закону України № 2718-IX та визначити проблеми, що виникають в перехідний період.

**Викладення основних результатів дослідження.** У межах ЄС законодавство в сфері безпеки харчових продуктів оцінює Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA). В країнах, що входять до складу Європейського Союзу, всі матеріали, що контактують з харчовими продуктами, повинні відповідати Регламенту (ЄС) № 1935/2004 (Рамкове законодавство) про матеріали та вироби, призначені для контакту з харчовими продуктами [3]. Серед інших вимог Регламент вимагає, щоб контактні матеріали та вироби не переміщували свої складові компоненти в продукти харчування в кількостях, які можуть загрожувати здоров'ю людини, призводити до неприйнятної зміни складу харчових продуктів або призводити до погіршення їх органолептичних характеристик. На додаток до цього Регламенту всі такі матеріали мають бути виготовлені відповідно до належної виробничої практики (GMP, Регламент Комісії (ЄС) 2023/2006 [5]) та конкретного законодавства Союзу за певними матеріалами, у тому числі пластику та кераміки, а також національних законодавств про інші матеріали.

З травня 2020 року триває перегляд законодавства ЄС щодо матеріалів і предметів, що контактують з харчовими продуктами. Станом на сьогодні проводиться подальша консультативна діяльність і дослідницька робота з метою розробки повної оцінки впливу для перегляду та можливої законодавчої пропозиції [12]. Зокрема, розглядаються питання потенційного розвитку IT-інфраструктури для обміну інформацією та перевірки відповідності вздовж ланцюга постачання, а також сталого використання контактних матеріалів і виробів. Щоб розвинути цей останній аспект, Комісія ЄС працює над дослідженням їх стійкості [13]. 12 червня 2024 року було прийнято рішення щодо заборони бісфенолу А (BPA) у матеріалах, які контактують з харчовими продуктами. Це означає, що після періоду поступової відмови названу хімічну речовину більше не буде дозволено використовувати в цих продуктах в ЄС. Рішення ґрунтується на науковій оцінці EFSA 2023 року, яке дійшло висновку, що BPA має «потенційний шкідливий вплив на імунну систему» [13].

Регламент ЄС № 10/2011 [14] встановлює конкретні вимоги до виробництва пластикових матеріалів і виробів, призначених для контакту з харчовими продуктами, загальні та спеціальні межі міграції. В цьому ж Регламенті описані конкретні методи тестування й аналізу міграції щодо матеріалів і виробів, які контактують з харчовими продуктами. Пластикові матеріали й вироби повинні відповідати Регламенту щодо пластмас і межам специфічної міграції (SML) для певних речовин, зазначених у Списку Союзу. Навіть якщо немає офіційних обмежень для деяких речовин, усі речовини, що мігрують із пластикових матеріалів, які контактують з харчовими продуктами, повинні відповідати загальним вимогам безпеки Рамкового регламенту.

Коли вперше були розроблені правила щодо матеріалів, які контактують з харчовими продуктами, загалом вважалося, що низький рівень хімічного впливу, тобто впливу нижче токсикологічно встановленого рівня без ефекту, складає незначний ризик для споживачів, за винятком канцерогенів. Проте новіша наукова інформація демонструє, що це припущення загалом хибне, оскільки наявні докази показують, що вплив низьких рівнів хімічних речовин, які порушують роботу ендокринної системи, може призводити до несприятливих наслідків для здоров'я [15]. У грудні 2024 року понад 50 організацій звернулися з відкритим листом до президента Європейської комісії Урсули фон дер Ляєн із проханням переглянути Регламент ЄС щодо матеріалів, що контактують з харчовими продуктами (ЄС 1935/2004). У листі зазначено ризики для здоров'я від хімічних речовин в упаковці харчових продуктів, включаючи понад 70 канцерогенів та ендокринних руйнівників, і запропоновано оновити правила ЄС протягом поточного законодавчого терміну. За оцінками, витрати, пов'язані із шкідливим впливом хімічних речовин становлять 157 млрд євро щорічно, також відзначається зростання проблем зі здоров'ям, особливо дітей і вагітних жінок [16].

Попри гармонізовану правову базу, ЄС не має єдиного нормативного акта для всіх контактних матеріалів і виробів, що контактують з харчовими продуктами. Так, різні типи контактних матеріалів і виробів та специфічні речовини також охоплюються їхніми власними гармонізованими правилами: Директива 84/500/ЄЕС — кераміка [17]; Директива 93/11/ЄЕС щодо виділення N-нітрозамінів і N-нітрозуючих речовин з еластомерних або гумових сосків і пустушок [18]; Директива 2007/42/ЄС про матеріали та вироби з регенерованої целюлозної плівки, призначені для контакту з харчовими продуктами [19]; Регламент (ЄС) 1895/2005 про обмеження використання певних епоксидних похідних у матеріалах і виробах, призначених для контакту з

харчовими продуктами [20]; Рекомендація Комісії (ЄС) 2019/794 щодо скоординованого плану контролю з метою встановлення поширеності певних речовин, що мігрують з матеріалів і предметів, призначених для контакту з харчовими продуктами [21], тощо.

Хоча гармонізовані нормативні акти були посилені, багато матеріалів, таких як папір, скло та метал, не мають спеціальних вимог на рівні ЄС. Рада Європи підготувала кілька резолюцій для усунення цієї прогалини [22].

Багато країн ЄС, на додаток до гармонізованого законодавства, вводять власні вимоги до матеріалів і предметів, що контактують з харчовими продуктами. Правила ЄС для кераміки обмежують міграцію свинцю і кадмію, а Франція додає обмеження на алюміній, кобальт і миш'як через DGCCRF (Генеральний директорат з питань конкурентної політики, захисту прав споживачів і боротьби з шахрайством). Французьке законодавство також вимагає для нержавіючої сталі вміст не менше 13% хрому [23].

Швейцарія має власний національний закон про матеріали та вироби, які контактують з харчовими продуктами. Таке урізноманітнення законодавства викликає певні проблеми у виробників, що спонукало уряд Швейцарії вести доповнення «Materials and Articles Ordinance, 817.023.21» [24], основна мета якого — гармонізувати національний закон про матеріали та вироби, що контактують з харчовими продуктами із законодавством Європейського Союзу. Нові зміни та доповнення діють з 1 лютого 2024 року.

31 грудня 2020 року Велика Британія вийшла з ЄС. В контексті зміни законодавства ця країна прийняла документ «The Materials and Articles in Contact with Food (Amendment) (EU Exit) Regulations 2019» [25], і з того часу законодавство ЄС стало частиною законодавства, яке збереглося у Великій Британії. Існує також положення про взаємне визнання, яке дозволяє вільну торгівлю. Торгівля з Північною Ірландією спочатку охоплювалася Протоколом Північної Ірландії (NIP), а пізніше, з осені 2023 року, Віндзорською рамковою угодою [26].

Законодавство ЄС щодо матеріалів і виробів, що контактують з харчовими продуктами динамічно змінюється, що може призвести в близькій перспективі до перегляду Закону № 2718-IX. Для введення його в дію проводиться значна робота уповноважених органів державної влади. В грудні 2023 року МОЗ України видало Наказ від 11.12.2023 № 2104 «Про затвердження Спеціальних вимог до пластикових матеріалів і предметів, призначених для контакту з харчовими продуктами» [27].

Наказ МОЗ від 18.03.2024 за № 460 вводить Спеціальні вимоги та детальні правила введення в обіг пластикового посуду з поліаміду та меламіну [28]. Наказ МОЗ від 29.12.2022 № 2374 «Про затвердження Вимог до матеріалів і предметів, виготовлених з плівки з регенованої целюлози, призначених для контакту з харчовими продуктами» [29] наводить перелік речовин та груп речовин, дозволених у виробництві плівки з регенованої целюлози, з обмеженнями у використанні, та визначає вимоги до речовин покриття плівок з регенованої целюлози.

Міністерство Аграрної політики та продовольства України видало Наказ від 02.10.2023 № 1743 «Про затвердження Вимог до письмової декларації про відповідність матеріалів і предметів, призначених для контакту з харчовими продуктами, та переліку документів, які підтверджують відомості, зазначені в декларації» [30]. Для декларування, зокрема, оператор ринку повинен мати документи, які містять відомості про:

1) правила та умови проведення лабораторних досліджень (випробувань) з метою перевірки дотримання встановлених меж міграції, а також їх результати;

2) найменування та адресу лабораторії, яка проводила відповідні дослідження (випробування);

3) докази щодо безпечності матеріалів і предметів або обґрунтування, що демонструє їх відповідність вимогам законодавства [30].

Очевидно, має бути або створена або вже функціонувати мережа лабораторій, які здатні проводити вказані дослідження. В Європейському Союзі діє Референтна лабораторія Європейського Союзу для матеріалів, що контактують з харчовими продуктами (EURL-FCM), яка надає наукову та технічну допомогу ЄС та державам-членам. Лабораторія організовує міжлабораторні порівняння, проводить навчальні курси для Національних референс-лабораторій (NRL) та експертів з країн, що розвиваються [31].

Згідно з Планом діяльності МОЗ в 2024 році мали бути затверджені накази «Про обмеження застосування епоксидних похідних в матеріалах і предметах, призначених для контакту з харчовими продуктами» та «Про затвердження Правил дослідження міграції компонентів пластикових матеріалів і предметів, призначених для контакту з харчовими продуктами» [32]. На сьогодні інформація на сайті МОЗ про їх прийняття відсутня.

Закон № 2718-IX вимагає введення процедури реєстрації речовин, які використовуватимуться у процесі виробництва пакувальних матеріалів. Однак поки не зрозуміло, хто і як буде проводити цю процедуру. В Європейському Союзі обіг хімічних речовин регулює Регламент (ЄС) № 1907/2006 від 18.12.2006 «Про реєстрацію, оцінку, авторизацію і обмеження хімічних речовин та препаратів (REACH)» [33]. Хімічних речовин, які використовуються у виробництві матеріалів, які контактують із харчовими продуктами, налічується кілька тисяч, враховуючи як навмисно додані, так і відомі та невідомі ненавмисно додані речовини [34]. Для наукової оцінки речовини необхідно надати досьє в EFSA, яке має відповідати певним вимогам, зазначеним у «Настанові щодо підготовки заявки на оцінку безпеки речовини, яка буде використовуватися в пластикових матеріалах для контакту з харчовими продуктами» [35]. Вже перевірені речовини внесені в «Науковий висновок щодо списку речовин для матеріалів, які контактують з харчовими продуктами» [36]. Наразі Директива ЄС ЕЕС2002/72 встановлює «позитивні списки» мономерів і добавок, які можна використовувати у виробництві пластмас, що контактують з харчовими продуктами [37].

Закон № 2718-IX наголошує, що процеси переробки пластику необхідно реєструвати, якщо продукти, які утворились у процесі переробки пластику в подальшому будуть контактувати з харчовими продуктами. Проблема в тому, що перероблений пластик може містити сторонні речовини, наприклад чорнила від маркування, клеї, різноманітні покриття, тому і при зареєстрованому процесі потрібен періодичний контроль щодо виконання його умов. На сьогодні нормативно-правові акти в цій сфері відсутні, як і відсутні спеціальні вимоги до окремих груп і матеріалів, що контактують із харчовими продуктами.

Фактично Розділ V Закону № 2718-IX зазначає, що «вимоги належної виробничої практики (GMP) також поширюються до використання друкарських фарб та до системи забезпечення якості процесів переробки пластику» [1]. Впровадження GMP, як правило, вимагає значних фінансових витрат, пов'язаних із модернізацією виробництва, створення системи забезпечення якості та системи контролю якості, зокрема

така система неможлива без якісного аналітичного обладнання та навченого персоналу.

В Європейському Союзі асоціації виробників матеріалів і предметів, які контактують із харчовими продуктами, використовуючи Регламент (ЄС) 2023/2006 [5] як базовий, розробили свої галузеві правила GMP. Так, наприклад, діють правила належної виробничої практики, які були розроблені Європейською асоціацією друкарських чорнил (EuPIA), сектором Європейської ради фарби, друкарської фарби та художніх кольорів (SEPE) [38]; правила GMP асоціації Plastics Europe, які були розроблені, щоб допомогти окремим компаніям власні виробничі процеси та процедури зробити відповідними до вимог належної виробничої практики, але ці вимоги не замінюють встановлені Регламентами Комісії [39]. Варто було б вітати подібну ініціативу і серед українських виробників.

**Висновок.** Законодавство Європейського Союзу, що стосується матеріалів і предметів, які контактують із харчовими продуктами, наразі перебуває в стані трансформації. ЄС не має єдиного нормативного акта для всіх контактних матеріалів і виробів, що контактують з харчовими продуктами. Новіша наукова інформація демонструє, що вплив низьких рівнів хімічних речовин, які є потенційно небезпечними, можуть спричиняти негативні наслідки для здоров'я. Це має врахувати нове законодавство ЄС. Прийняте українське законодавство ґрунтується на чинних європейських законодавчих актах, однак до моменту вступу Закону № 2718-IX в дію станом на початок 2025 року всі необхідні нормативно-правові акти не розроблені. Закон № 2718-IX вводить необхідність реєстрації речовин, які використовуватимуться в процесі виробництва пакувальних матеріалів, необхідність реєстрації процесів перероблення пластику, можливість встановлення спеціальних вимог для окремих груп і предметів та вимога проводити виробництво та переробку пластику згідно з належною виробничою практикою. Зміна законодавства ЄС в галузі виробництва пакувальних матеріалів і виробів, які контактують із харчовими продуктами, може призвести до зміни законодавства України.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України «Про матеріали і предмети, призначені для контакту з харчовими продуктами» № 2718-IX. Редакція від 15.11.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2718-20> (дата звернення: 12.02.2025).
2. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони № 984\_011. Редакція від 30.11.2023. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text) (дата звернення: 12.02.2025).
3. Regulation (EC) No 1935/2004. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2004/1935/oj/eng> (дата звернення: 12.02.2025).
4. Commission Regulation (EC) No 450/2009. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32009R0450&qid=1739129449197> (дата звернення: 12.02.2025).
5. Commission Regulation (EC) No 2023/2006. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32006R2023&qid=1739129563133> (дата звернення: 12.02.2025).
6. Commission Regulation (EC) No 282/2008. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32008R0282&qid=1739129660733> (дата звернення: 12.02.2025).
7. Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів № 771/97-ВР. Редакція від 18.12.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 12.02.2025).
8. Шульга, О. С., Шульга С. І. (2023). Постійне оновлення харчового законодавства України — запорука безпечності харчових продуктів. *Маркетингові стратегії, підприємництво і торгівля*.

сучасний стан, напрямки розвитку: матеріали IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. Київ: КНУБА.

9. Антюшко, Д., Осика, В., Сеногонова, Г. (2023). Законодавчі новації щодо пакування спеціальних харчових продуктів. *Міжнародний науково-практичний журнал «Товари і ринки»*, 3(47). 65—78. [https://doi.org/10.31617/2.2023\(47\)05](https://doi.org/10.31617/2.2023(47)05).

10. Prysulska, N., et al. (2023). Application of good manufacturing practices in the production of food products for special medical purposes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(13(123)), 52—58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.279371>.

11. Бурило, Ю. П. (2023). Євроінтеграційне законодавство України про матеріали і предмети, призначені для контакту з харчовими продуктами, в контексті безпеки харчових продуктів та продовольчої безпеки. *Науковий вісник Ужгородського Національного Університету*, серія ПРАВО. Випуск 75: частина 2, 44—49. DOI <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2022.75.2.7>.

12. Revision of EU Rules on FCMs URL: [https://food.ec.europa.eu/food-safety/chemical-safety/food-contact-materials/revision-eu-rules\\_en](https://food.ec.europa.eu/food-safety/chemical-safety/food-contact-materials/revision-eu-rules_en) (дата звернення: 12.02.2025).

13. Food Contact Materials Legislation: Updates and Next Steps URL: <https://www.europa-packaging.eu/news/food-contact-materials-legislation-updates-and-next-steps/> (дата звернення: 12.02.2025).

14. Commission Regulation (EU) No 10/2011 URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32011R0010> (дата звернення: 12.02.2025).

15. Muncke, J. et al. (2020). Impacts of food contact chemicals on human health: a consensus statement. *Environ Health*, 19, 25. <https://doi.org/10.1186/s12940-020-0572-5>.

16. Open Letter. Brussels, 03 December 2024. URL: [https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2024/12/ZWE-Nov24\\_open-letter-re-delay-in-revision-of-FCM-law.pdf](https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2024/12/ZWE-Nov24_open-letter-re-delay-in-revision-of-FCM-law.pdf) (дата звернення: 12.02.2025).

17. Council Directive 84/500/EEC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1984/500/oj/eng>.

18. Commission Directive 93/11/EEC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31993L0011&qid=1739174572942> (дата звернення: 12.02.2025).

19. Commission Directive 2007/42/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32007L0042&qid=1739174773889> (дата звернення: 12.02.2025).

20. Commission Regulation (EC) No 1895/2005. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32005R1895&qid=1739174944566> (дата звернення: 12.02.2025).

21. Commission Recommendation (EU) 2019/794. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/2019/794/oj> (дата звернення: 12.02.2025).

22. Food Contact Material Regulations — Europe URL: <https://www.sgs.com/en/services/food-contact-material-regulations-europe> (дата звернення: 12.02.2025).

23. French DGCCRF, DM/4B/COM/002. URL: <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Materiaux-au-contact-des-denrees-alimentaires> (дата звернення: 12.02.2025).

24. 817.023.21 Ordonnance du DFI sur les matériaux et objets destinés à entrer en contact avec les denrées alimentaires. URL: <www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/164/fr> (дата звернення: 12.02.2025).

25. The Materials and Articles in Contact with Food (Amendment) (EU Exit) Regulations 2019. URL: <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2019/704/contents> (дата звернення: 12.02.2025).

26. Consultation Pack — Review of The Materials and Articles in Contact with Food (England) Regulations 2012. URL: <https://www.food.gov.uk/our-work/consultation-pack-review-of-the-materials-and-articles-in-contact-with-food-england-regulations-2012> (дата звернення: 12.02.2025).

27. Наказ МОЗ від 11.12.2023 р. № 2104 «Про затвердження Спеціальних вимог до пластикових матеріалів і предметів, призначених для контакту з харчовими продуктами».

28. Наказ МОЗ від 18.03.2024 р. № 460 «Про затвердження Спеціальних вимог та детальних правил введення в обіг пластикового посуду з поліаміду та меламіну».

29. Наказ МОЗ від 29.12.2022 № 2374 «Про затвердження Вимог до матеріалів і предметів, виготовлених з плівки з регенерованої целюлози, призначених для контакту з харчовими продуктами».

30. Міністерство Аграрної політики та продовольства України. Наказ від 02.10.2023 р. № 1743 «Про затвердження Вимог до письмової декларації про відповідність матеріалів і предметів, призначених для контакту з харчовими продуктами, та переліку документів, які підтверджують відомості, зазначені в декларації».

31. EURL Food Contact Materials. URL: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/eurl-food-contact-materials\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/eurl-food-contact-materials_en) (дата звернення: 12.02.2025).

32. План діяльності МОЗ на 2024 р. URL: [www.umj.com.ua/uk/novyna-251757-zatverdzheno-plan-diyalnosti-moz-na-2024-r](http://www.umj.com.ua/uk/novyna-251757-zatverdzheno-plan-diyalnosti-moz-na-2024-r) (дата звернення: 12.02.2025).
33. Regulation (EC) No 1907/2006. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32006R1907R%2801%29> (дата звернення: 12.02.2025).
34. German Federal Institute for Risk Assessment (BfR), Department of Chemicals and Product Safety, Berlin, Germany, Beneventi E., Tietz T. and Merkel S., 2020. Risk Assessment of Food Contact Materials. *EFSA Journal* 2020;18(S1):e181109, 11 pp. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.e181109>.
35. EFSA AFC Panel (EFSA Panel on Food Additives, Flavourings, Processing Aids and Materials in contact with Food), 2008. Note for Guidance for the preparation of an application for the safety assessment of a substance to be used in plastic Food Contact Materials. *EFSA Journal*, 6(7):21r, 45 pp. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2008.21r>.
36. EFSA Scientific Opinion of the Panel on food contact materials, enzymes, flavourings and processing aids (CEF) (2009); Scientific Opinion on 26th list of substances for food contact materials contact materials. *EFSA Journal*, 7(10):1324. [13 pp.]. doi:10.2903/j.efsa.2009.1324.
37. Commission Directive 2002/72/EC URL:<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2002/72/oj/eng> (дата звернення: 12.02.2025).
38. Good Manufacturing Practice (GMP) Printing Inks for Food Contact Materials, 4th completely revised version. March 2016. URL: [https://www.pac.gr/bcm/uploads/gmp-eupia-4th\\_version\\_final.pdf](https://www.pac.gr/bcm/uploads/gmp-eupia-4th_version_final.pdf) (дата звернення: 12.02.2025).
39. Guidelines for Good Manufacturing Practice for plastic materials and articles intended for food contact applications. URL: [https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/11/PlasticsEurope\\_Guidelines\\_for\\_GMP\\_updated\\_June\\_2011.pdf](https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/11/PlasticsEurope_Guidelines_for_GMP_updated_June_2011.pdf) (дата звернення: 12.02.2025).

УДК 637.133.2.07

## ANALYTICAL METHODS FOR ASSESSING THE DEGREE OF HEAT TREATMENT OF MILK

**V. Ischenko, N. Kvitkovska, O. Kochubei-Lytvynenko, K. Chebanenko***National University of Food Technologies***N. Ischenko***Taras Shevchenko National University of Kyiv*

---

**Key words:**

milk,  
heat treatment,  
physico-chemical analysis

**Article history:**

Received 02.02.2025

Received in revised form  
22.04.2025Accepted 30.04.2025**Corresponding author:**

suxodolska@ukr.net

---

**ABSTRACT**

In order to reduce the number of microorganisms in drinking milk, inactivate some enzymes that can cause defects in the taste and texture of the product, as well as extend the shelf life of milk, its heat treatment is used. The article considers regulated and reference methods for assessing the heat treatment of milk. They are conventionally divided into two groups: the first group includes determining the degree of denaturation and inactivation of heat-labile components, and the second group is based on the detection of substances formed during heat treatment. The first group includes the determination of alkaline phosphatase enzymes, lactoperoxidase and whey proteins:  $\alpha$ -lactalbumin and  $\beta$ -lactoglobulin. The second group includes the determination of substances formed as a result of the Maillard reaction: furosine, carboxymethyl-lysine, 5-hydroxymethylfurfural, and lactulose. The quantitative characteristics of the corresponding heat treatment markers are characterized. As analytical methods for assessing heat treatment, such targeted analysis methods as high-performance liquid and ion chromatography, enzyme-linked immunosorbent assay, capillary electrophoresis were considered. These methods require lengthy sample preparation procedures, are laborious and expensive. As an alternative to these methods, studies are described in which, as analysis methods, near-IR spectroscopy and fluorescence spectroscopy are used. Promising may be studies on the determination of ionic calcium and total calcium in milk samples and discrimination of sample content on this basis, since the calcium content depends quite strongly on heat treatment and milk processing processes. It was concluded that a reliable assessment of the degree of heat treatment, possible violations in the technological process and detection of a counterfeit product should be based on the use of several markers and should include a multivariate approach to data processing. The criteria for choosing a particular method for determining the degree of heat treatment of milk should be the suitability of the method for achieving the set goal, its versatility, and the sensitivity of the analysis.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-4

---

## АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ СТУПЕНЯ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ МОЛОКА

**В. М. Іщенко, канд. хім. наук, ORCID ID: 0000-0002-0218-8516**

**Н. П. Квітковська, ORCID ID: 0009-0008-3268-0510**

**О. В. Кочубей-Литвиненко, д-р. тех. наук, ORCID ID: 0000-0003-0712-448X**

**Х. В. Чебаненко, ORCID ID: 0000-0001-5002-1393**

*Національний університет харчових технологій*

**М. В. Іщенко, канд. хім. наук, ORCID ID: 0000-0002-0851-1679**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

*У статті розглянуті регламентовані та довідникові методи оцінки термічної обробки молока, які розділені на дві групи: перша група включає визначення ступеня денатурації та інактивації термолабільних компонентів, друга група базується на виявленні речовин, які утворюються в процесі термічної обробки. Щодо аналітичних методів оцінки термічної обробки, то в переважній більшості це такі цільові методи аналізу, як високоефективна рідинна та йонна хроматографія, імуноферментний аналіз, капілярний електрофорез. Є дослідження, в яких як методи аналізу використовують спектроскопію ближньої ІЧ-області та флуоресцентну спектроскопію. Перспективними можуть бути дослідження з визначення йонного кальцію у молоці, яке зазнало термообробки.*

**Ключові слова:** *молоко, термічна обробка, фізико-хімічний аналіз.*

**Вступ.** Незважаючи на велику користь молока для людини, воно водночас є чудовим середовищем для розмноження небажаних мікроорганізмів, таких як бактерії, гриби, цвілі, що часто забруднюють цей продукт, спричиняють його псування та створюють потенційні ризики для споживачів [1]. З метою зменшення кількості мікроорганізмів у питному молоці інактивування деяких ферментів, які можуть спричинити дефекти смаку й текстури продукту, а також продовження термінів зберігання молока, використовують його термічну обробку. Термічна обробка є домінуючим підходом у молочній промисловості для забезпечення безпеки продукту, проте її проведення може змінювати як хімічний склад, так і якість молока. Для оцінки фактичної інтенсивності температурної обробки молока необхідно використання аналітичних методів аналізу з визначення певних маркерів, які дають змогу однозначно встановити ступінь її проведення і, відповідно, охарактеризувати якість молочного продукту.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Основний принцип, на якому ґрунтується термічна обробка молока, полягає в тому, щоб цей процес знищив мікрофлору в молоці, не спричиняючи надмірних хімічних змін, які негативно вплинуть на сенсорну та поживну якість продукту [2]. Проте нагрівання молока спричиняє втрату деяких органолептичних і поживних його властивостей (денатурацію сироваткових білків і зміни їх структури, проходження реакції Маяра, руйнування вітамінів, випадання в осад кальцій фосфату, зміни мінерального складу молока). Усі ці трансформації безпосередньо залежать від температурного інтервалу процесу, тому неконтрольована теплова обробка молока може призвести до певних небажаних втрат поживних і органолептичних якостей продукту. Зважаючи на ці факти, при переробці молока необхідно контролювати умови проведення термічної обробки та швидко реагувати на проблеми, які можуть виникнути в технологічному процесі. Водночас використання певного аналітичного методу визначення ступеня термічної обробки

молока може мати велике значення для подальшого виробництва молочних продуктів з молока, яке зазнало теплового оброблення, а також для можливого виявлення фальсифікованого продукту, наприклад, молочного продукту, виготовленого із сухого молока з приховуванням цього факту. Слід зазначити, що в українських наукових публікаціях практично відсутні системні дослідження цієї проблеми і відповідні експериментальні роботи, тому проведення аналітичного огляду сучасних методів визначення ступеня термічного оброблення молока є актуальним.

**Мета досліджень:** зробити огляд сучасних регламентованих і довідникових аналітичних методів визначення ступеня термічного оброблення молока. Провести класифікацію розглянутих аналітичних методів аналізу залежно від способу визначення речовин-маркерів молока, що реагують на зміни температури. Визначити перспективні напрямки дослідження з вибору певного фізико-хімічного методу аналізу визначення ступеня термічної обробки молока.

**Матеріали і методи.** Розглянуто способи термічного оброблення молока, літературні науково-практичні джерела з описом методів їх визначення, схарактеризовані маркери на термічну обробку молока. Проведено аналіз, обробку й узагальнення наукової інформації з теми дослідження.

**Результати досліджень.** В Україні основними промисловими процесами теплової обробки молока є: пастеризація, ультрависокотемпературне оброблення та стерилізація. Відповідно до ДСТУ 2212:2003 «Виробництво молока та молочних продуктів. Терміни та визначення понять» ці процеси визначаються так:

- пастеризація — теплове оброблення за температури понад 65 °С з відповідним витримуванням;
- ультрависокотемпературне оброблення (УВТ) — теплове оброблення впродовж кількох секунд за температури понад 135 °С;
- стерилізація — теплове оброблення за температури понад 100 °С з витримуванням до повного знищення живих мікроорганізмів і спор.

У цьому ж ДСТУ відмічається, що продукт, виготовлений із сухого молока, повинен класифікуватися як «відновлений молочний продукт» або «відновлене молоко».

У монографії Хілтона і співавторів [3] зібрані дані про вплив способів термічної обробки молока на його мікробіологічні та ферментативні показники (табл. 1).

*Таблиця 1. Вплив термічної обробки молока на мікробіологічні та ферментативні показники [3]*

| Спосіб температурної обробка | Температура та час витримування   | Бактерицидний ефект  | Вплив на ферменти   |
|------------------------------|---|--|---|
| Пастеризація                 | 63 °С протягом 30 хв;<br>65 °С протягом 15 хв;<br>72—82 °С протягом 15—30 с | Знищує неспоруючі збудники і психротрофні бактерії                       | Інактивує лужну фосфатазу і ліпазу  |
| УВТ-оброблення               | 138—145 °С протягом 1—10 с  | Знищує всі неспоруючі бактерії і всі спори, крім високотермостійких спор | Інактивує лужну фосфатазу, ліпазу, лактопероксидазу і більшість плазмів, але не всі бактеріальні протеази |
| Стерилізація                 | 115—120 °С протягом 10—30 хв;<br>125 °С протягом 4 хв                       | Знищує всі неспоруючі бактерії і всі спори, крім високотермостійких спор | Інактивує практично всі ферменти  |

Найбільш повний огляд мікробіологічних характеристик молока залежно від способів термічної обробки та інструментів для визначення цих показників за період 1917—2017 рр. наведено в огляді [4]. У запропонованому аналітичному дослідженні акцент буде зроблено тільки на хімічних маркерах теплової обробки молока, не фокусуючись на мікробіологічних змінах складу молока при його термічній обробці, також будуть охарактеризовані методи визначення цих маркерів.

Як уже зазначалось (табл. 1), при термічній обробці молока інактивується значна частина його ферментів. Так, визначення лужної фосфатази у молоці використовують для оцінки проведеної пастеризації. Для цього застосовують фенольний метод (ISO 11816-1:2024 | IDF 155-1:2024. «Milk and milk products. Determination of alkaline phosphatase activity»). Цей метод дає змогу визначити лужну фосфатазу в сирому й термічно обробленому незбираному молоці, напівзнежиреному молоці, знежиреному молоці та ароматизованому молоці. Він також застосовний до сухого молока після відновлення. Активність лужної фосфатази виражається в мОд/л, а одиницею активності лужної фосфатази є кількість ферменту, який каталізує перетворення 1 мікромоля субстрату за хвилину. Тест на лужну фосфатазу вважається таким, що дає негативний результат, якщо виміряна активність у коров'ячому молоці не перевищує 350 мОд/л (Reg EC 1664/2006, «Official Journal of the European Union L320/13»). Позитивний тест вказує на неадекватну пастеризацію молока або можливу присутність термостабільних мікробних фосфатаз. Відповідно до ДСТУ ISO 11816-1:2016. «Молоко та молочні продукти. Визначення активності лужної фосфатази. Частина 1. Флуорометричний метод» лужну фосфатазу можна визначити за допомогою специфічного реагенту «Флуорофоса», який у присутності лужної фосфатази набуває флуоресцентних властивостей.

Для оцінки ступеня термічної обробки молока можна також визначити лактопероксидазу — це нативний фермент, більш термостабільний, ніж лужна фосфатаза. Лактопероксидаза інактивується при 75—80 °С, тож якщо молоко піддавалося вищій температурі (>75 °С) під час пастеризації відбудеться інактивація ферменту і відповідний тест на пероксидазу дасть негативний результат [5]. Фотометричний метод визначення активності лактопероксидази в молоці ISO/TS 17193:2011. «Milk — Determination of the lactoperoxidase activity — Photometric method» є референтним і дає змогу визначити цей фермент у молоці в кількості, що перевищує 50 мкг/л. Метод визначення активності лактопероксидази ґрунтується на окисненні гідроген пероксиду пероксидазою: виділяється кисень, який окиснює безбарвний 1,4-фенілєндіамін у фіолетовий індофенол (тест Шторха), інтенсивність забарвлення якого пропорційна концентрації ферменту. Якщо молоко правильно пастеризоване, протягом 30 с після змішування з'явиться синє забарвлення; якщо забарвлення не з'явиться, це буде означати, що лактопероксидаза була інактивована після температури, вищої за температуру пастеризації.

Проте найбільш чутливими до підвищення температури є сироваткові білки [6], тому досліджень з вивчення впливу температури на білки сироватки найбільше. Основні білки сироватки, зазвичай, перераховують у порядку зменшення термостійкості таким чином:  $\alpha$ -лактальбумін >  $\beta$ -лактоглобулін > альбумін > імуноглобуліни [7]. Висока стійкість  $\alpha$ -лактальбуміну до нагрівання обумовлюється оборотністю денатурації білка — після охолодження спостерігається відновлення його нативної структури за рахунок повторного згортання ланцюгів. Дані про вплив температури на денатурацію основних білків сироватки представлені в табл. 2.

Таблиця 2. Температурна денатурація основних білків сироватки

| Білок сироватки                        | Температура  | Посилання |
|--|--|-----------|
| $\alpha$ -лактальбумін ( $\alpha$ -LA) | Середнє значення температури денатурації для $\alpha$ -LA становить 63,7 °C при нейтральному рН. $\alpha$ -LA може повторно згортатися в нативну структуру при температурі нагрівання менше 80 °C і починає агрегувати з іншими білками при температурі вище 80 °C. Нагрівання впродовж 5 хв при 85 °C призводить до повної денатурації $\alpha$ -LA | 8, 9, 10  |
| $\beta$ -лактоглобулін ( $\beta$ -LG)  | Нагрівання $\beta$ -LG при 70 °C впродовж 30 хв призводить до розгортання $\beta$ -LG та проходження необоротної реакції димеризації. 70 °C є критичною температурою для денатурації $\beta$ -LG при нейтральному рН   | 11        |

Так, в огляді [11] узагальнені дослідження, проведені у 1999—2009 рр., щодо поведінки  $\beta$ -лактоглобуліну під час термічної обробки молока при рН>6,8 в діапазоні температур до 150 °C. Усі результати показують, що дисоціація та конформаційні зміни  $\beta$ -LG є оборотними при термічній обробці до 60 °C. Незворотні модифікації мономерів з'являються між 60 і 70 °C, починаючи з незначної конформаційної зміни, яка називається «станом розплавленої глобули». Підвищений вплив тіолових груп при температурах від 65 до 75 °C викликає утворення малих олігомерів головним чином шляхом окиснення тіолів. Реакції обміну тіол/дисульфід домінують між 75 і 85 °C (при рН>7,0), а неспецифічна нековалентна агрегація індукуює більші агрегати. Утворенню великих агрегатів при температурах від 85 до 105 °C запобігає подальше швидке охолодження. Розгортання залишкових структур  $\beta$ -лактоглобуліну спостерігається вище при 125 °C і, можливо, викликане хімічним розпадом дисульфідних зв'язків.

Загалом механізм денатурації  $\beta$ -LG описують за такими напрямками: його зв'язування з іншим денатурованим сироватковим білком ( $\alpha$ -LA), реакція з міцелярним к-казеїном або його адсорбція на поверхні жирових кульок [12—15]. Автори [16] вважають, що роль  $\beta$ -LG в процесі термічного оброблення молока є центральною. Дослідження Рюкке і співавторів [17] показали, що  $\beta$ -LG денатурує на 12% при 65 °C через 15 с і на 60% при 85 °C після 30 с теплової обробки. Водночас ступінь денатурації сироваткових білків і склад розчинних комплексів залежать не лише від температури та часу нагрівання, але й від концентрації білка. У концентрованому молоці спостерігається вищий ступінь агрегації білка і значна різниця в розмірі та складі агрегатів, присутніх у фракції, що не осаджується [18].

Як уже відмічалось,  $\alpha$ -LA, який містить чотири внутрішньомолекулярні дисульфідні зв'язки, є більш стійким до дії температури. Денатурація  $\alpha$ -LA відбувається за рахунок утворення комплексів з агрегатами  $\beta$ -LG і аs2-казеїнів. Середні значення щодо вмісту  $\alpha$ -LA в залежності від способу термічної обробки для пастеризованого молока змінюються в межах 400—900 мг/л. Вважається, що за вмістом  $\alpha$ -LA можна диференціювати молоко тривалого зберігання, одержане непрямою пастеризацією, від УВТ молока. Результати [19] показали можливість використання розподілу  $\alpha$ -LA і сироваткового альбуміну в білкових фракціях при підкисленні молока до рН 4,6 до нерозчинного  $\beta$ -LG як показників інтенсивності термічної обробки молока.

Якісне і кількісне визначення білків сироватки  $\alpha$ -LA і  $\beta$ -LG залежно від ступеня термічного оброблення молока можна проводити електрофоретичним методом, ос-

кільки це швидка і надійна техніка скринінгу для розрізнення різних категорій термічно обробленого молока. Застосовуються електрофоретичні методи для розділення білків молока за якісною ознакою з використанням електрофорезу у поліакриламідному гелі (SDS-PAGE), кількісна оцінка також можлива, хоча це досить громіздка процедура, яка вимагає багато часу. Хейві із співавторами [20] вивчали агрегацію концентратів сироваткових білкових з використанням одновимірного і двовимірного SDS-PAGE. Розчини концентрату сироваткового білка (WPC), що містять 10, 30, 60 і 120 г сухого порошку/кг, нагрівали при 75 °C і агрегацію сироваткового білка вивчали шляхом спостереження за змінами в розподілі  $\alpha$ -LA і  $\beta$ -LG та сироваткового альбуміну. Результати одновимірного PAGE показали, що мінімальна кількість великих агрегатів утворювалася, коли розчини з концентрацією 10 г WPC/кг нагрівали при 75 °C протягом 16 хв, тоді як помітні кількості утворювалися, коли 30, 60 і 120 г WPC/кг розчини обробляли аналогічно. Двовимірний PAGE-аналіз показав, що деякі дисульфідно-пов'язані димери  $\beta$ -LG були присутні в нагрітому 10 г WPC/кг розчині, але їх було зовсім мало в нагрітому 120 г WPC/кг розчині. Навпаки, додецилсульфат натрію (SDS) зміг відокремити мономерний білок від агрегатів високої молекулярної маси в нагрітому розчині WPC 120 г/кг, але не в розчині з концентрацією 10 г WPC/кг, нагрітому протягом 30 хвилин. Швидкість втрати нативного і SDS-мономерного  $\beta$ -LG,  $\alpha$ -LA та сироваткового альбуміну під час нагрівання зростає, коли концентрація WPC була збільшена з 10 до 120 г/кг. У 120 г WPC/кг розчину, нагрітого при 75 °C, кількість SDS-мономерного  $\beta$ -LG в кожному зразку була більшою, ніж кількість нативного білка. Однак у розчинах WPC 10, 30 і 60 г/кг відмінності між кількістю нативно-подібних і SDS-мономерних білків були незначними. Загалом, ці результати вказують на те, що на додаток до дисульфідно-пов'язаних агрегатів, гідрофобні агрегати, які включають  $\alpha$ -LA,  $\beta$ -LG і сироватковий альбумін, утворилися в нагрітому розчині WPC при високій концентрації білка, що було підтверджено модельними дослідженнями з використанням бінарних сумішей цих білків.

Інші можливості капілярного електрофорезу для кількісного визначення  $\alpha$ -LA і  $\beta$ -LG розглянуто в дослідженнях [21—23].

Незважаючи на те, що хроматографічне розділення білків вважається дорогим, метод рідинної хроматографії досить широко використовується для кількісного визначення білків сироватки. Проведені дослідження [24—28] з хроматографічному розділення білків відрізняються використанням різних моделей колонок, розчинниками та часом елюювання. В більшості цих досліджень використовувалось УФ-детектування або мас-спектрометрія. Заслуговує на увагу статистичне експериментальне проєктування, здійснене у праці Бордіна і співавторів [26]. В проведеному дослідженні розділення основних білкових компонентів молока було проведено за допомогою високоефективної обернено-фазової іон-парної хроматографії з фотодіодним детектуванням, використовуючи колонку C4. Ідентифікація кожного білка визначалась за допомогою часу утримування, співвідношення площ піків і УФ-спектрів другої похідної. Кількісне визначення базувалося на калібрувальних кривих, одержаних з використанням очищених білків. Було встановлено основні джерела невизначеності та повний бюджет невизначеності. Процедура спочатку була розроблена з використанням сертифікованого еталонного матеріалу сухого знежиреного молока CRM 063R, а потім була застосована до різних типів комерційного молока, а також до сирого молока. Метод здатний розділити та кількісно визначити сім основних білків (к-ка-

зеїн,  $\alpha$ 2-казеїн,  $\alpha$ 1-казеїн,  $\beta$ -казеїн,  $\alpha$ -лактальбумін,  $\beta$ -лактоглобулін В і  $\beta$ -лактоглобулін А) за один цикл, а також забезпечити точне визначення загальної концентрації білка.

У праці [29] представлено новий метод ВЕРХ для швидкого визначення  $\beta$ -LG лише за 1,8 хв (загальний час роботи 3 хв) з використанням простого УФ-детектування при 205 нм. Була перевірена селективність розділення для можливо спільного елюювання інших основних сироваткових білків (сироваткового альбуміну, лактоферину,  $\alpha$ -LA, імуноглобуліну G). Метод валідований для аналізу рідких зразків молока щодо лінійності (20—560 мг/мл,  $R^2 > 0,99$ ), меж виявлення та кількісного визначення (7 та 23 мг/л молока), повторюваності ( $RSD \leq 2,6\%$ ) та ступеня повернення (103%). Загалом 71 промисловий зразок рідкого молока, виробленого з використанням різних методів теплового навантаження, були профільовані за рівнем внутрішнього неденатурованого кислоторозчинного  $\beta$ -LG. Як і очікувалося, пастеризоване молоко продемонструвало найвищі концентрації вище 3000 мг/л через те, що пастеризація була найм'якшою термічною обробкою, тоді як, навпаки, УВТ молоко показало найменші кількості (<200 мг/л). Для молока з подовженим терміном придатності (в ЄС його маркують як ESL) було визначено досить різноманітні рівні в діапазоні від ~100 до 4000 мг/л, оскільки технології виробництва молока, які використовуються для ESL, можуть суттєво відрізнятись та наразі не регулюються в ЄС.

Проаналізувавши 71 промисловий зразок в 2012 р. та 80 зразків молока у 2015 р. з різним ступенем термічної обробки та технологією виготовлення, автори [30] роблять висновок, що отримані результати у різні роки суттєво між собою не відрізнялися. Встановлено, що за допомогою фуросину, лактулози та  $\alpha$ -LA можна провести диференціацію пастеризованого, фільтрованого та прямо нагрітого ESL молока від ESL молока непрямого нагрівання, а також УВТ молока, тоді як  $\beta$ -LG дозволяв дискримінацію безпосередньо нагрітого ESL молока від фільтрованого ESL молока та пастеризованого молока відповідно. Аналіз проводили методом обернено-фазової високорідинної хроматографії (RP-HPLC).

Аккерман із співавторами [31] повідомили про визначення методом рідинної хроматографії з тандемною квадрупольно часпролітною мас-спектрометрією (LC/MS Q-TOF) білків сироватки залежно від різних стратегій нагрівання, таких як нагрівання в пластинах і трубчастих теплообмінниках і використання прямого впорскування пари. Розділення проводили з колонкою Xbridge BEH300C18 (250×2,1 мм, 3,5  $\mu$ m), використовували лінійне градієнт (розчинник А=0,05% трифтороцтова кислота (TFA) у воді; розчинник В=0,1% TFA в ацетонітрилі) починаючи зі 100% розчинника А. Температуру колонки встановлювали 45 °С і проводили УФ-детектування на 214 нм.

Міжнародна молочна федерація (IDF, 2005) надала рекомендації щодо ВЕРХ для аналізу кислоторозчинних  $\alpha$ -LA і  $\beta$ -LG за допомогою обернено-фазової колонки PLRP-S (довжина 150 мм, внутрішній діаметр 4,6 мм, розмір частинок 5 чи 8  $\mu$ m, розмір пор 30 нм) або еквівалентні колонки з дериватизованим полістирол дивінілбензолом. Розчинник А складається з 0,1% трифтороцтової кислоти у воді та розчинник В 0,1% трифтороцтової кислоти в ацетонітрилі. Градієнт елюювання починався при 35% В з часом роботи приблизно 38 хв. Виявлення  $\beta$ -LG було зроблено при 205 нм.

Одним із сучасних методів аналізу білків молока є похідна спектроскопія, що була розроблена для вирішення проблеми високої подібності УФ-спектрів (UV-Vis). Метод застосовується для якісного і кількісного аналізу багатьох груп хімічних сполук,

що містять хромофори [32]

Луф і Брендл [33] запропонували використання другої похідної спектрофотометричного методу для визначення теплової класифікації знежиреного рідкого та сухого молока від кількості неденатурованого сироваткового білка, що залишився після термічної обробки в фільтраті при рН 4,6. Метод ґрунтується на поглинанні УФ-променів триптофаном і тирозином, кожен з характерними максимумами і мінімумами між 270—300 нм. Мейзел [34] застосував четверту похідну УФ спектрофотометрії для швидкого визначення співвідношення казеїну та білків сироватки в молоці.

У дослідженні [35] безпосередньо вимірювали білкові фракції білка УФ-спектрофотометрією четвертої похідної без таких процедур, як знежирення молока та осадження казеїну. Було проаналізовано 45 зразків свіжого молока. Перед вимірюваннями зразки витримували при 40 °С на водяній бані; потім 20 мл молока розбавили в 50 разів 6М гуанідин гідрохлоридом в 0,1 М натрій ацетатному буфері, рН 5,0 і перемішували. Використовували 10 мм кварцову кювету і записували УФ-спектри від 320 до 260 нм стосовно гуанідинового буфера. Загальний вміст білка та казеїну, визначених цим методом, статистично не відрізнялись від значень, отриманих за допомогою еталонного методу, що ґрунтується на визначенні нітрогену за Кьельдалем ( $p < 0,05$ ).

Цікавою є праця [36], в якій застосовували три методи кількісного визначення співвідношення білків сироватки до загального білка (капілярний електрофорез, капілярний електрофорез з використанням додецилсульфату натрію та УФ четверта похідна спектроскопія поглинання), які застосували до зразків сирих ( $n=21$ ), пастеризованих ( $n=5$ ) та УВТ-оброблених ( $n=18$ ) проб молока. Середні значення співвідношення, отримані цими методами, становили, відповідно, 17,1, 18,5 і 17,2% для сирого молока, 16,6, 17,7 і 18,8% для пастеризованого молока та 16,8, 17,0 і 17,2% для УВТ молока. Проте в порівнянні з електрофорезом спектроскопія є значно дешевшим методом, що робить його більш придатним для рутинного аналізу.

Порівняльне дослідження використання різних методів для визначення білків різних зразків сухого молока було проведено в праці [37]. Визначення проводили методом К'ельдаля та двома спектрофотометричними методами Бредфорда та Лоурі, які використовували для визначення загального білка в низці зразків сухого молока (знежирене сухе молоко, незбиране сухе молоко, порошок сироваткового протеїну та суха сироватка). Дослідження показали, що метод Бредфорда доцільно використовувати для визначення загального вмісту білків у знежирених зразках, крім того, цей метод показав найвищу чутливість. Використовуючи стандарти казеїну і сироваткового білка альбуміну, метод Лоурі показав найнижчу варіацію питомої абсорбції. Метод УФ при 220 нм з попередньою екстракцією ліпідів показав найкращі результати визначення загального білка в усіх пробах; усі результати статистично не відрізняються ( $P > 0,05$ ) від отриманих за загальним білковим азотом без екстракції ліпідів. Найкращі результати визначення загального білка у всіх зразках без екстракції ліпідів показав метод Бредфорда; результати статистично не відрізнялися ( $P > 0,05$ ) від отриманих для загального азоту методом К'ельдаля.

Казеїн, який являє собою комплекс чотирьох фракцій, досить стійкий до дії високої температури порівняно з білками молочної сироватки, оскільки казеїни не мають третинної та четвертинної структури. Відповідно до класичного тесту термостійкості за алкогольною пробою, коров'яче молоко повинне бути стабільним до нагрівання при 140 °С впродовж щонайменше 20 хв, тобто не коагулювати. Проте коагуляція казеїну може відбуватися під час ультрапастеризації, якщо рН молока занадто низьке

(<6,5) або в молоці з високою концентрацією йонного кальцію [3]. Хоча казеїн і не коагулює при нагріванні, його міцели беруть участь у багатьох рівноважних процесах в молоці, в результаті змінюється склад міцел казеїну, а також збільшується їх діаметр за рахунок реакції з  $\beta$ -лактоглобуліном. Оскільки казеїн є основним білковим компонентом молока, досліджень з вивчення змін у властивостях казеїну при нагріванні досить багато: найбільш повний літературний огляд цього питання представлено в огляді Анема [38]; щодо визначення фракцій казеїну у молоці заслуговує на увагу метод йонної хроматографії [39] та електрофорезу [40]. Методом електрофорезу вдалося оцінити розподіл денатурованих сироваткових білків і казеїнів між розчинними та міцелярними комплексами при нагріванні впродовж 10 хв до температури 90 °С. Розчинні комплекси і сироваткові протеїни були відокремлені від міцел казеїну за допомогою методів фракціонування.

За рахунок великого вмісту хімічних сполук молоко є ідеальною основою для виникнення і перебігу хімічних реакцій між ними. При термічній обробці молока відбувається реакція конденсації між карбонільною групою (альдегідна або кетонна група), що міститься в лактозі та аміногрупою в амінокислотах пептидів. Це так звана реакція Маяра, чи реакція цукроамінної конденсації. В реакції розглядають три етапи: початковий етап, проміжна стадія (перегрупування Амадорі) та розвинена стадія (утворення меланоїдинів). На проходження реакції Маяра впливають час нагріву, вміст води та її активність, температура, рН та йони металів. Досить детальний літературний огляд реакції Маяра, що відбувається у молоці при нагріванні, наведено в [41]. До числа найбільш відомих продуктів реакції Маяра, що містяться в молоці і можуть бути маркерами його термічної обробки, відносять фуросин, карбоксиметилізін (CML) і 5-гідроксиметилфурурол (HMF).

Вміст фуросину визначають методом йонно-парної обернено-фазової високо-ефективної рідинної хроматографії (RP-HPLC) з УФ-детектуванням при 280 нм за стандартним методом ISO (ISO 18329:2004, «Milk and milk products — Determination of furosine content — Ion-pair reverse-phase high-performance liquid chromatography method»). Утворення фуросину пов'язане з ранньою стадією реакції Маяра, при якій відбувається перетворення лактозилізіну за допомогою перегрупування Амадорі до більш стабільної сполуки лактозилізіну, яка є біологічно недоступною формою незамінної амінокислоти лізіну. Фуросин утворюється при кислотному гідролізі лактозилізіну. Концентрація фуросину різко зростає у молоці при ультрапастеризації за температури вище 120 °С (23 мг/л при 120 °С і 80 мг/л при 150 °С) [42].

Як альтернативу досить складному та дорогому методу визначення фуросину автори [43] запропонували використовувати флуоресценцію продуктів реакції Маяра і розчинного триптофану. Метод ґрунтується на одночасному визначенні денатурації білка за флуоресценцією триптофану ( $\lambda_{exc}$  290 нм;  $\lambda_{em}$  340 нм) і вимірювання флуоресценції продуктів реакції Маяра ( $\lambda_{exc}$  350 нм;  $\lambda_{em}$  440 нм) у фракції молока, розчинній при рН 4,6. Перша реакція характеризується низькою тепловою обробкою, така як пастеризація, а друга відбувається при більш високій температурі (УВТ або стерилізація). Для характеристики теплової обробки молока автори цього дослідження вводять індекс FAST, який являє собою відношення інтенсивності флуоресценції продуктів реакції Маяра до інтенсивності флуоресценції триптофану в молочній фракції при рН 4,6 після осадження білка. На перший погляд здавалося, що знайдено простий, недорогий і чутливий спосіб визначення ступеня термічної обробки молока, який, зокрема, дасть змогу реагувати на будь-які технологічні проблеми під час теплового процесу, а також визначати добавку сухого молока чи навіть повну заміну

натурального молока на «молоко», одержане розчиненням сухого молока у воді, тобто його відновлений продукт, який інколи нечесні виробники молочної продукції продають як звичайне молоко. Подальші дослідження в цьому напрямку, зокрема автори дослідження [44] припускають, що за індексом FAST можна виявити до 5% відновленого молока у свіжому молоці. Проте в інших дослідженнях, де використовувалися модельні системи, було встановлено, що на вихід флуоресценції продуктів реакції Майяра впливає не тільки ступінь термічного оброблення, але й інші параметри, зокрема, рН та сольовий склад [45]. Цікавою є думка Фейнберга зі співавторами [46], які вважають, що жоден індикатор не може бути універсальним для виявлення ступеня термічної обробки молока, якщо він не пов'язаний з іншими маркерами. В дослідженні були вибрані такі маркери: фурузин, лактулоза, нативний  $\alpha$ -лактальбумін, денатурований  $\alpha$ -лактальбумін, відсоток денатурованого  $\alpha$ -лактальбуміну, індекс FAST, флуоресценція триптофану,  $\beta$ -лактоглобулін і лактопероксидаза та здійснено 5000 вимірювань. Проведений дисперсійний аналіз показав, що не можна вибрати жоден індикатор для універсальної ідентифікації молока залежно від його температурної обробки. Автори роблять висновок, що така ідентифікація повинна базуватися на багатоваріантному підході. Застосування факторного дискримінантного аналізу шляхом комбінування принаймні п'яти показників дає можливе вирішення цього питання.

На пізній стадії реакції Майяра відбувається деградація лактулозилізіну та утворення CML. У дослідженні [47] наводяться такі концентрації CML: 16 мг/кг білка для пастеризованого молока, 53 мг/кг білка для пастеризованого молока з низьким вмістом жиру, близько 60 мг/кг білка для УВТ цільного молока та 343 мг/кг білка для стерилізованого молока. Дані одержані імуноферментним аналізом (ELISA).

5-Гідроксиметилфурфурол (HMF), що утворюється в молоці за рахунок реакції Майяра, може бути цінним індикатором ступеня термічного оброблення та свіжості молока. Проте досліджень з визначення HMF у молоці досить мало через дуже малі концентрації речовини. Ріхман із співавторами [48] вважають, що додавання сухого молока до рідкого можна виявити за вмістом HMF. Вміст HMF, визначений методом ВЕРХ, у сирому молоці становив 7,66 мкмоль/літр, а в пастеризованому та УВТ молоці коливався від 10,52—16,0 до 16,33—20,85 мкмоль/літр відповідно. HMF у сухому молоці, відновленому до рідкого молока, становив 28,0 мкмоль/літр. Зроблено висновок, що ці значення HMF можна використовувати для виявлення фальсифікації сирого, пастеризованого та УВТ молока сухим молоком.

Під час термічної обробки молока відбувається ще один цікавий процес: частина лактози молока ізомеризується до лактулози, яка являє собою дисахарид галактози і фруктози. Лактулоза не міститься в сирому молоці і мало змінюється під час його зберігання. Отже, вміст лактулози може також бути показником теплової обробки молока. Лактулозу в молоці, яке зазнало термічної обробки, можна визначити ферментативним методом (ISO 11285:2004, «Milk — Determination of lactulose content Enzymatic method») або методом ВЕРХ, що регламентується ISO (ISO 11868:2007, «Heat-treated milk — Determination of lactulose content — Method using high-performance liquid chromatography»). Метод ВЕРХ використовується у спірних випадках і є специфічним для визначення вмісту лактулози в підігрітому молоці, знежиреному, частково знежиреному або незбираному молоці, щоб відрізнити молоко, стерилізоване за допомогою ультратермічної обробки, від стерилізованого молока. В 2012 р. корейські дослідники [49] визначали методом ВЕРХ співвідношення лактулози до фуразину як маркер на теплову обробку молока та вміст у ньому сухого молока. Для

дослідження виготовлялись зразки молока із сирого продукту нагріванням на масляній бані при 75 °С протягом 10—120 с та нагріванням при 130 °С від 2 до 60 с. Відновлене молоко добавляли до свіжого молока у кількості 10, 20 та 30%. Вміст лактулози і фуросину, у молоці, обробленому при 75 °С, коливався від 1,61 до 2,96 мг/100 мл молока та від 0,37 до 1,69 мг/100 мл відповідно. Для молока, обробленого при 130 °С, концентрації лактулози та фуросину коливались від 9,29 до 26,60 мг/100 мл і від 2,16 до 7,58 мг/100 мл відповідно. Встановлено, що порівняно із сирим молоком спостерігається більш ніж удвічі зниження співвідношення LU/FU після додавання відновленого молока ( $p < 0,05$ ). Ці дослідження продовжили китайські вчені [50], які описали розробку методики ідентифікації відновленого молока за співвідношенням вмісту лактулози та фуросину методом рідинної хроматографії в поєднанні з тандемною мас-спектрометрією (LC-MS/MS). Межа кількісного виявлення лактулози становила 0,05 мг/л, а фуросину 0,01 мг/л.

Усі вище розглянуті методи ґрунтуються на визначенні органічних складових молока, адже мінеральні речовини складають незначну його частину (8—9 г/л). Мінеральні речовини молока представлені такими елементами, як кальцій, калій, магній, натрій і хлоридом, сульфатом, фосфатом та цитратом. Деякі із цих компонентів, такі як  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , існують у йонній формі, а інші — в рівновазі між розчинною та колоїдною формами. Вважається, що від 10 до 30% кальцію знаходиться у молоці в йонному стані (гідратовані йони  $\text{Ca}^{2+}$ ); більша його частина у вигляді складного комплексу кальцій казеїнату з колоїдним кальцій фосфатом, а невелика кількість зв'язана з  $\alpha$ -лактоальбуміном [51]. Значний вплив на неорганічну складову молока має його термічна обробка: ці питання детально розглянуто в [3], зокрема, вплив рН, йонної сили на зміну концентрації  $\text{Ca}^{2+}$  під час термічного оброблення молока. Відмічається, що в процесі нагрівання кальцій гідрогенфосфат, який знаходиться у вигляді істинного розчину, переходить у нерозчинний фосфат кальцію, що у вигляді колоїду осідає на казеїнових міцелах. Показник рН теж зменшується при термічній обробці молока і це могло б призвести до часткового розчинення кальцій фосфату, але очевидно утворення нерозчинного  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  за підвищення температури є домінуючим фактором і загалом кількість йонного кальцію і фосфору у молоці, яке зазнало температурної обробки зменшується [52].

Для кількісного визначення вмісту кальцію в молоці наразі використовують декілька методів, в основному це полуменева атомно-абсорбційна спектрометрія (ПААС) та індуктивно-зв'язана плазма — оптична емісійна спектрометрія (ІЗП-ОЕС) [53]. Але ці методи дають інформацію тільки про загальний вміст кальцію, без його розподілу за формами. Для технологічного контролю процесу більш важливим є вимірювання йонного кальцію, що можна зробити з методом прямої потенціометрії з використанням йон-селективного електроду на кальцій [54]. Останній метод є достатньо популярним через низьку вартість обладнання, високу експресність та простоту пробопідготовки. Але як і в огляді Левіса [55], так і в інших дослідженнях, в яких проводили визначення йонного кальцію методом прямої потенціометрії, не приводяться дані щодо невизначеності вимірювань, а, отже, загальна якість результатів вимірювань лишається невідомою. Загалом праць, присвячених використанню відношення йонного та загального кальцію і фосфору як маркерів на температурну обробку молока, не знайдено.

**Висновки.** Більшість відомих довідникових та офіційних методів оцінки термічної обробки молока можна умовно розділити на дві групи: *перша група* включає визначення ступеня денатурації та інактивації термолабільних компонентів, тоді як

друга група базується на виявленні речовин, які утворюються в процесі термічної обробки. До першої групи відноситься визначення ферментів лужної фосфатази, лактопероксидази та білків сироватки:  $\alpha$ -лактальбуміну і  $\beta$ -лактоглобуліну. До другої групи визначення фуринозу, карбоксиметил-лізину, 5-гідроксиметилфурфурол і лактулози. Щодо аналітичних методів оцінки термічної обробки, то в переважній більшості це такі цільові методи аналізу, як високоефективна рідинна та йонна хроматографія, імуоферментний аналіз, капілярний електрофорез. Проте ці методи вимагають тривалих процедур пробопідготовки, є трудомісткими і дорогими. Є дослідження, в яких, як методи аналізу використовують спектроскопію ближньої ІЧ-області та флуорисцентну спектроскопію. Перспективними можуть бути дослідження з визначення йонних кальцію та фосфору у зразках молока, яке зазнало відповідної термообробки. Надійна оцінка ступеня термічної обробки, можливих порушень у технологічному процесі та виявлення сфальсифікованого продукту повинна ґрунтуватися на використанні кількох маркерів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Fusco, V., Chieffi, D., Fanelli, F., Logrieco, A. F., Cho, G. S., Kabisch, J., Franz, C. M. (2020). Microbial quality and safety of milk and milk products in the 21st century. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 2013—2049.
2. Deeth, H. C. (2022). Heat Treatment of Milk: Principles and Purpose. *Encyclopedia of Dairy Sciences*. H.C. Deeth. London, United Kingdom: Academic Press.
3. Deeth, H. C., Lewis, M. J. (2017). *High Temperature Processing of Milk and Milk Products*. John Wiley & Sons.
4. Boor, K. J., Wiedmann, M., Murphy, S., Alcaine, S. (2017). A 100-Year Review: Microbiology and safety of milk handling. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 9933—9951.
5. Deeth, H. C. (2021). Heat-induced inactivation of enzymes in milk and dairy products. A review. *International Dairy Journal*, 121, 105104.
6. Pelegrine, D. H. G., Gasparetto, C. A. (2005). Whey proteins solubility as function of temperature and pH. *Food Science and Technology*, 38(1), 77—80.
7. Van den Oever, S. P., Mayer, H. K. (2021). Analytical assessment of the intensity of heat treatment of milk and dairy products. *International Dairy Journal*, 121.
8. Carrotta, R., Arleth, L., Pedersen, J. S., Bauer, R. (2003). Small-angle x-ray scattering studies of metastable intermediates of beta-lactoglobulin isolated after heatinduced aggregation. *Biopolymers*, 70, 377—390.
9. Akkerman, M., Rauh, V. M., Christensen, M., Johansen, L. B., Hammershoj, M., Larsen, L. B. (2016). Effect of heating strategies on whey protein denaturation-Revisited by liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Dairy Science*, 99(1), 152—166.
10. Krämer, A. C., Torreggiani, A., Davies, M. J. (2017). Effect of oxidation and protein unfolding on cross-linking of beta-lactoglobulin and alpha-lactalbumin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65, 47.
11. De Wit, J. N. (2009). Thermal behaviour of bovine  $\beta$ -lactoglobulin at temperatures up to 150 °C: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(1), 27—34.
12. Claey's, W. L., van Loey, A. M., Hendrickx, M. E. (2002). Intrinsic time temperature integrators for heat treatment of milk. *Trends in Food Science & Technology*, 13, 293311.
13. Corredig, M., Dalgleish, D. (1996). Effect of different heat treatments on the strong binding interactions between whey proteins and milk fat globules in whole milk. *Journal of Dairy Research*, 63(3), 441—449.
14. Haque, M. A., Aldred, P., Chen, J., Barrow, C., Adhikari, B. (2014). Drying and denaturation characteristics of alpha-lactalbumin, beta-lactoglobulin, and bovine serum albumin in a convective drying process. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62, 4695—4706.
15. Sakkas, L., Moutafi, A., Moschopoulou, E., Moatsou, G. (2014). Assessment of heat treatment of various types of milk. *Food Chemistry*, 159, 293-301.

16. Considine, T., Patel, H. A., Anema, S., Singh, H., Creamer, L. K. (2007). Interactions of milk proteins during heat and high hydrostatic pressure treatments — A Review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8, 1—23.
17. Rukke, E. O., Sørhaug, T., Stepaniak, L. (2011). *Heat treatment of milk e thermization of milk*. In J. W. Fuquay (Ed.). *Encyclopedia of dairy science*. London. UK: Elsevier Ltd.
18. Li, Y., Dalglish, D., Corredig, M. (2015). Influence of heating treatment and membrane concentration on the formation of soluble aggregates. *Food Research International*, 76, 309316.
19. Pizzano, R., Manzo, C., Nicolai, M. A. Addeo, F. (2012). Occurrence of major whey proteins in the pH 4.6 insoluble protein fraction from UHT-treated milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 8044—8050.
20. Havea, P., Singh, H., Creamer, L. K., Campanella, O. H. (1998). Electrophoretic characterization of the protein products formed during heat treatment of whey protein concentrate solutions. *Journal of Dairy Research*, 65, 79—91.
21. Kinghorn, N. M., Norris, C. S., Paterson, G. R., Otter, D. E. (1995). Comparison of capillary electrophoresis with traditional methods to analyse bovine whey proteins. *Journal Chromatography A*, 700(1—2), 111—123.
22. Feng, P., Fuerer, C., & McMahon, A. (2018). Quantification of whey protein content in milk-based infant formula powders by sodium dodecyl sulfate-capillary gel electrophoresis (SDS-CGE): Multi-laboratory testing study, final action 2016.15. *Journal of AOAC International*, 101, 1566—1577.
23. Miralles, B., Rothbauer, V., Manso, M. A., Amigo, L., Krause, I., Ramos, M. (2001). Improved method for the simultaneous determination of whey proteins, caseins and para-kappa-casein in milk and dairy products by capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 915, 225—230.
24. Bobe, G., Beitz, D. C., Freeman, A. E., Lindberg, G. L. (1998). Separation and quantification of bovine milk proteins by reversed-phase high-performance liquid chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 458—463.
25. Villamiel, M., Arias, M., Corzo, N., Olano, A. (1999). Use of different thermal indices to assess the quality of pasteurized milk. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und — Forschung A*, 208, 169—171.
26. Bordin, G., Cordeiro Raposo, F., de la Calle, B., Rodriguez, A. R. (2001). Identification and quantification of major bovine milk proteins by liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, 928, 63—76.
27. Moatsou, G., Hatzinaki, A., Kandarakis, I., Anifantakis, E. (2003). Nitrogenous fractions during the manufacture of whey protein concentrates from Feta cheese whey. *Food Chemistry*, 81, 209—217.
28. Losito, I., Carbonara, T., Monaci, L., Palmisano, F. (2007). Evaluation of the thermal history of bovine milk from the lactosylation of whey proteins: An investigation by liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 389, 2065—2074.
29. Boitz, L. I., Fiechter, G., Seifried, R. K., Mayer, H. K. (2015). A novel ultra-high performance liquid chromatography method for the rapid determination of b-lactoglobulin as heat load indicator in commercial milk samples. *Journal of Chromatography A*, 1386, 98—102.
30. Boitz, L. I., Mayer, H. K. (2017). Extended shelf life milk — one concept, different qualities: A comprehensive study on the heat load of differently processed liquid milk retailed in Austria in 2012 and 2015. *LWT — Food Science and Technology*, 79, 384—393.
31. Akkerman, M., Rauh, V. M., Christensen, M., Johansen, L. B., Hammershoj, M., & Larsen, L. B. (2016). Effect of heating strategies on whey protein denaturation e revisited by liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Dairy Science*, 99, 152—166.
32. Kus, S., Marczenko, Z., Obarski, N. (1996). Derivative UV-vis spectroscopy in analytical chemistry. *Chemia Analytyczna*, 41, 899—930.
33. Luf, W., E. Brandl, E. (1997). Quantification of the ratio of whey powder to milk powder using spectroscopy in alkali. *Milchwissenschaft*, 52, 213—216.
34. Meisel, H. (1995). Application of fourth derivative spectroscopy to quantitation of whey protein and casein in total milk protein. *Milchwissenschaft*, 50, 247—251.
35. Qiaoqian, Lu, Zdenko, P. (1999). Determination of protein and casein in milk by fourth derivative UV spectrophotometry. *Analytica Chimica Acta*, 393, 227—234.
36. Miralles, B., Bartolome, B., Amigo, L., Ramos, M. (2000). Comparison of Three Methods to Determine the Whey Protein to Total Protein Ratio in Milk. *Journal of Dairy Science*, 83(12), 2759—2765.

37. Neide, K. K. Kamizake, Mauricio, M. Goncalves, Cassia, T. B. V. Zaia, Dimas, A. M. Zaia. (2003). Determination of total proteins in cow milk powder samples: a comparative study between the Kjeldahl method and spectrophotometric methods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 16, 507—516.
38. Anema, S. (2021). Heat-induced changes in caseins and casein micelles, including interactions with denatured whey proteins. *International Dairy Journal*, 122:105136.
39. Holland, B., Rahimi Yazdi, S., Ion Titapiccolo, G., Corredig, M. (2010). Short communication: Separation and quantification of caseins and casein macropeptide using ion-exchange chromatography. *Journal of Dairy Science*, 93, 893—900.
40. Pesic, M. B., Barac, M. B., Stanojevic, S. P., Vrvic, M. M. (2014). Effect of pH on heat-induced casein-whey protein interactions: A comparison between caprine milk and bovine milk. *International Dairy Journal*, 39, 178—183.
41. Xiang J., Liu F., Wang B., Chen L., Liu W., Tan S. A. (2021). Literature Review on Maillard Reaction Based on Milk Proteins and Carbohydrates in Food and Pharmaceutical Products: Advantages, Disadvantages, and Avoidance Strategies. *Foods*, 10, 1998—2006.
42. Nangpal, A., Reuter, H., Dehn-Mueller, B., Erbersdobler, H. F. (1990). Formation of furosine during UHT treatment of milk-comparison between direct and indirect heating. *Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte*, 42, 43—51.
43. Birlouez-Aragon, I., Nicolas, M., Metais, A., Marchond, N. (1998). A Rapid Fluorimetric Method to Estimate the Heat Treatment of Liquid Milk. *International Dairy Journal*, 8, 771—777.
44. Guan, R., Liu, D., Ye, X., Yang, K. (2005). Use of fluorometry for determination of skim milk powder adulteration in fresh milk. *Journal of Zhejiang University Science*, 6B(11), 1101—1106.
45. Matiacevich, S. B., Santagapita, P. R., Buera, M. P. (2005). Fluorescence from the Maillard Reaction and its Potential Applications in Food Science. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(6), 483—495.
46. Feinberg, M., Dupont, D., Efstathiou, T., Louâpre, V., Guyonnet, J.-P. (2006). Evaluation of tracers for the authentication of thermal treatments of milks. *Food Chemistry*, 98, 188—194.
47. Mehta, B. M., Deeth, H. C. (2015). Blocked Lysine in Dairy Products: Formation, Occurrence, Analysis, and Nutritional Implications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 206—218.
48. Rehman, Z. U., Saeed, A., Zafar, S. I. (2000). Hydroxymethylfurfural as an indicator for the detection of dried powder in liquid milk. *Milchwissenschaft*, 55, 256—257.
49. Cho, Y.-H., Hong, S.-M., Kim, C.-H. (2012). Determination of Lactulose and Furosine Formation in Heated Milk as a Milk Quality Indicator. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 32(5), 540—544.
50. Hongting, L., Riming, H., Guangfeng, Z., Zhenlin, X., Yuanming, S., Hongtao, L., Yudong, S., Haiming, W., Baojun, X., Wei, X. (2020). Discrimination of reconstituted milk in China market using the content ratio of lactulose to furosine as a marker determined by LC-MS/MS. *Food Science and Technology*, 108648.
51. Gancheron, F. (2005). The minerals of milk. *Reproduction Nutrition Development*, 45, 473—483.
52. Pouliot, Y., Boulet, M., Paquin, P. (1989). Observation on the heat induced salt balance changes in milk. I. Effect of heating time between 4 and 90 °C. *Journal of Dairy Research*, 56, 185—192.
53. Bakircioglu, D., Topraksever, N., Yurtsever, S., Kizildere, M., Kurtulus, Y. B. (2018). Investigation of macro, micro and toxic element concentrations of milk and fermented milks products by using an inductively coupled plasma optical emission spectrometer, to improve food safety in Turkey. *Microchemical Journal*, 136, 133—138.
54. Silanikove, N., Fira Shapiro, F., Shamay, A. (2003). Use of an ion-selective electrode to determine free Ca ion concentration in the milk of various mammals. *Journal of Dairy Research*, 70, 241—243.
55. Lewis, M. J. (2011). The measurement and significance of ionic calcium in milk — A review. *International Journal of Dairy Technology*, 64, 1—13.

УДК 663.2, 634.8

## MAIN APPROACHES TO THE ECOLOGIZATION OF GRAPE CULTIVATION FOR WINEMAKING IN CRIMEA

F. Abkadyrov, R. Mukoid

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

Viticulture,  
environmental issues,  
Crimea,  
pollution,  
organic farming,  
agrotechnical methods

**Article history:**

Received 20.02.2025  
Received in revised form  
09.03.2025  
Accepted 27.03.2025

**Corresponding author:**

mukoid\_roman@ukr.net

---

**ABSTRACT**

In today's world, there is a growing reevaluation of the effectiveness of production systems, particularly in agriculture. As the largest land user, agriculture plays a crucial role in the sustainable development of the economy, especially considering environmental challenges such as climate change, biodiversity loss, and water pollution. Viticulture, as an industry that requires large amounts of chemicals, has a significant negative impact on the environment, particularly through soil and water contamination. Crimea, where viticulture has long been a traditional practice, is facing additional environmental challenges due to occupation and the development of agricultural lands. After de-occupation, it will be essential to reclaim the land and revive viticulture based on ecological principles, particularly organic farming.

The object of this research is organic viticulture in Crimea, with the focus being on the agrotechnical methods used for its organization. The goal is to identify ways to restore viticulture based on ecological principles, while the main tasks include assessing the current condition of the vineyards and analyzing methods of ecological adaptation. Viticulture in Crimea has a long history, but the development of the industry was disrupted due to the annexation of the peninsula. During Soviet times, viticulture became highly specialized, which led to the degradation of landscapes. Present-day ecological challenges call for the implementation of organic farming to restore ecological balance and ensure the sustainability of agroecosystems.

Organic farming is an environmentally-friendly approach that emphasizes the use of natural fertilizers, biological pest control methods, and soil management practices that enhance biodiversity and improve the health of the ecosystem. In the context of Crimea, adopting organic viticulture could significantly mitigate the negative impacts caused by the overuse of chemicals in conventional agriculture and help rebuild the ecological health of the land.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-5

---

## ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ВИРОЩУВАННЯ ВИНОГРАДУ ДЛЯ ВИНОРОБСТВА В КРИМУ

Ф. Р. Абкадиров, здобувач, ORCID ID: 0009-0009-8034-0745

Р. М. Мукоїд, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-3454-1484

Національний університет харчових технологій

*У сучасному світі важливою проблемою є перехід до сталого розвитку сільського господарства, зокрема виноградарства, що має значний вплив на екологію. У Криму ця галузь стикається з численними викликами, як-от: забруднення ґрунтів хімікатами, ерозія та зміни клімату. Для відновлення та збереження виноградарства необхідно впровадити органічні агротехнології, що включають зменшення використання пестицидів, застосування біологічних методів захисту та розвитку адаптивних ландшафтних систем. Перехід до органічного виноградарства може стати важливим етапом для відродження кримського виноробства, сприяючи не тільки економічному розвитку, а й збереженню екологічної рівноваги в регіоні.*

**Ключові слова:** виноградарство, екологічні проблеми, Крим, органічне землеробство, агротехнічні прийоми.

**Вступ.** Сучасний розвиток органічного виноградарства та виноробства стає важливим аспектом агропромислових стратегій, що орієнтуються на стійкість, екологічну безпеку й ефективність. У контексті змінюваних кліматичних умов і зростаючих вимог до екологічної чистоти продукції органічне виноградарство набуває дедалі більшого значення не лише в Європі, але й у ряді інших регіонів, зокрема на південному заході України, в Криму. Це спричинено особливою увагою до збереження біорізноманіття, відновлення традиційних агротехнік і зниження негативного впливу на довкілля.

Дослідники продовжують вдосконалювати практики екологічного землеробства, що включають органічні методи вирощування винограду, зокрема біодинамічні підходи, агротехнічні прийоми без використання хімічних добрив і пестицидів. Важливим аспектом цього є підтримка стійких агроєкосистем і відновлення традиційних методів землеробства, адаптованих до місцевих природно-кліматичних умов. Такі методи дають змогу значно покращити якість продукції, підвищити її споживчу цінність, а також сприяють відновленню деградованих ґрунтів.

Особливе значення для органічного виноградарства має правильний вибір агротехнічних прийомів, що мінімізують негативний вплив на навколишнє середовище. Як показують дослідження вчених на прикладі кримського регіону органічні методи можуть сприяти зменшенню ерозії ґрунтів, покращенню водного режиму та підвищенню стійкості екосистем до природних катаклізмів, таких як посухи та зливи.

Особливо перспективними є стратегії інтегрованого управління популяціями шкідників і хвороб, що включають використання природних методів захисту рослин. Це забезпечує мінімальний вплив на навколишнє середовище і дає змогу зберегти біорізноманіття, яке є основою стійкості агроєкосистем. Крім того, застосування таких методів на виноградниках значно зменшує використання хімічних засобів захисту рослин, що є важливим аспектом розвитку органічного виноградарства на Кримському півострові.

**Мета дослідження** полягає в аналізі перспектив розвитку органічного виноградарства в Криму, зокрема через екологічну адаптацію агротехнічних прийомів до специфічних умов регіону. Використання таких підходів може стати основою для

відродження кримського виноградарства, яке в минулому мало важливе економічне та культурне значення для півострова.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Темі органічного виноградарства і виноробства приділяється багато уваги дослідниками з європейських країн, де наукові результати мають широке застосування на практиці [13, 14, 16, 18]. М. Делмас і Н. Лессен розглянули вплив екологічного маркування на споживання органічних вин, що актуально для виноробства у Криму після переходу на екологічні практики. Аналіз свідчить про те, що споживачі схильні підтримувати екологічно чисті продукти, що робить органічне виноградарство потенційно вигідним для відродження виноробства в регіоні [15]. Останніми роками цей напрямок розвивається і українськими вченими [2, 9, 11,]. Зокрема, М. С. Петренко у своїй статті розглядає стратегії розвитку органічного виноградарства в Криму з акцентом на екологічні проблеми та рішення [7]. Основна увага приділена необхідності зменшення використання хімічних засобів і впровадженню біологічних методів боротьби зі шкідниками. Бондаренко присвячує свою статтю екологічним аспектам вирощування технічних сортів винограду для виноробства, включаючи Крим. Автор пропонує агротехнічні прийоми, які мінімізують негативний вплив на довкілля, такі як природні методи внесення добрив і боротьби з хворобами [3]. У південних регіонах нашої країни такої агротехніці приділяється все більше уваги. Перспективи органічного землеробства пов'язані із загальносвітовими тенденціями екологізації агропромисловості і культури здорового харчування.

**Матеріали і методи.** Використані літературно-аналітичний, порівняльно-аналітичний методи та метод польових досліджень. Матеріали польових досліджень на дослідних і виробничих полігонах були взяті з опублікованих матеріалів Національного наукового центру (Нікітський ботанічний сад), Національного інституту винограду і вина «Магарач».

**Результати дослідження.** Виноградарство на теренах Криму було поширене щонайменше з античних часів через сприятливі природно-кліматичні умови, присутність дикого винограду в місцевій флорі, міграцію середземноморських народів — давніх носіїв культури вирощування винограду. Про роль виноградарства та виноробства в старовинному Криму свідчать тарапани — пристосування для виробництва суслу на території історичних поселень, знайдені тут у великій кількості залишки амфор, які використовувалися для транспортування і зберігання вина, багато видів аборигенних сортів виноградної рослини.

Археологічні розкопки та дані історичних досліджень свідчать про поширення культури винограду в південно-західному Криму, на узбережжі Каламитської затоки, Керченському півострові, Південному березі Криму та південно-східному Криму. У кожному кримському регіоні були свої агротехнічні правила, місцеві сорти винограду й вина. Їх продукція не лише споживалася на місцевому ринку, а й продавалася за межами півострова.

Еволюційний розвиток галузі вирощування і переробки винограду в Криму був перерваний анексією півострова російською імперією у 1783 році. Ще до цього, в 1778 р., царський уряд примусово переселив християнське населення Криму в степи Причорномор'я і Приазов'я. Переважно то були жителі гірського Криму, які вирощували виноград і виробляли місцеве вино. Згодом і велика кількість мусульман, яких переслідувала нова влада, вимушена була залишити батьківщину, а ті, що не переїхали, були позбавлені свого майна й земель. Таким чином втрачалися місцеві традиції та навички садівництва, виноградарства, землеробства, які протягом століть були адаптовані до ландшафтних умов Кримського півострова.

Нові землевласники Криму, серед яких переважно були придворні вельможі, чиновники, відставні генерали, нехтували місцевими агротехнологічними прийомами, завезли нові сорти винограду та впроваджували європейський досвід у Криму. З одного боку, це дало змогу збільшити об'єми виробництва, а з іншого — позбавляло його продукцію самобутності, сприяло швидкому поширенню шкідників і збудників хвороб. Нова культура агровиробництва не була адаптована до місцевих умов і мала виснажливий характер для місцевих ландшафтів, викликала процеси водної та вітрової ерозії ґрунтів.

За радянських часів сільське господарство Криму розвивалося шляхом вузької спеціалізації. Для Південного узбережжя було обрано виноградарство технічних сортів. Вважалося, що механізація, хімізація агровиробництва, підвищення продуктивності праці вимагають збільшення площ аграрних угідь і глибокої спеціалізації, проте це мало дуже негативні наслідки для місцевих ландшафтів, адже монокультура винограду не враховувала природної диференціації території. Суцільні виноградники нівелювали ландшафтне розмаїття Південного берегу Криму, що підривало його стійкість до антропогенного впливу. Виноградні угіддя простягалися на надмірні за виміром гірської території площі, не залишаючи місця для будь-якого природного острівця, яке мало виконувати середовище, утворюючи функції, підтримуючи необхідне флористичне і фауністичне розмаїття ландшафту.

Південнобережні ампелоландшафти того часу були виключно енергоємні, трудомісткі й потребували високих норм внесення мінеральних добрив, пестицидів, гербіцидів. Інакше кажучи, ці штучні утворення, виокремлені з місцевого природного середовища, фактично мало зв'язані з ним трофічними ланцюгами, не могли нормально розвиватися і плодоносити. Побічними ефектами такої агротехніки були денудація, накопичення важких металів у ґрунті, потрапляння хімічних речовин у підземний і поверхневий стік тощо.

Неправильна, екологічно не обґрунтована, нераціональна діяльність, яка не відповідала природному потенціалу конкретного ареалу Кримського півострова, призводила до деградації ґрунтів на великих площах. Плянтова оранка в процесі посадки багаторічних насаджень змішувала верхні генетичні горизонти [8]. Внаслідок використання важкої сільськогосподарської техніки ущільнювалися ґрунти, утворювалися плужні «підпошви», злиті «стежинки». За даними Н. О. Драган на 49% орних земель Криму відбуваються процеси дефляції. На території півострова продовжують збільшуватися площі еродованих і дефлорованих ґрунтів, у тому числі внаслідок утримання їх поверхні під чорним паром у садах і виноградниках та їх механізованої обробки вздовж схилу.

На геохімічні та геофізичні процеси в агроландшафтах значною мірою впливає іригація, особливо за низького технічного рівня і застарілих прийомів зрошення, відсутності дренажних систем. На поверхні ґрунтів утворюється кірка, а в середній частині профіля акумулюються дрібні фракції й відбувається їх ущільнення. Надмірне зволоження активізує процеси вторинного засолення ґрунтів.

Останнім часом прискорення процесів ерозії ґрунтів пов'язане не лише з сільськогосподарським використанням земель, але й з глобальними змінами клімату [9]. Серед найбільш поширених метеорологічних явищ, що сприяють ерозії ґрунтів, особливо шкідливими є сильний вітер і зливи, а також підвищення середньодобових температур повітря. З 1985 р. до 2015 р. на території кримських рівнин кількість опадів збільшилася на 18% від норми. Частка твердих опадів складає менше 10%, а змішаних — 5...10%. Зростаюча кількість опадів, серед яких переважають зливи,

викликають водну ерозію ґрунтів. Ця тенденція може мати катастрофічні наслідки, особливо на гірських схилах (табл. 1).

Таблиця 1. Проблеми екології ґрунтів регіонів виноградарства Криму

| Регіон            | Екологічні проблеми  | Агротехнічні прийоми  |
|-------------------|--|---|
| Північний         | Вторинне засолення, слитизація, вітрова ерозія ґрунтів унаслідок надмірного зрошення, вирубки лісосмуг | Гіпсування ґрунтів, використання сидератів замість чорного пару, відновлення лісосмуг, зменшення площі орних земель |
| Західний          | Вітрова ерозія внаслідок високої розораності ґрунтів, вирубки лісосмуг                                 | Гіпсування ґрунтів, використання сидератів замість чорного пару, відновлення лісосмуг, зменшення площі орних земель |
| Східний           | Вітрова ерозія внаслідок високої розораності ґрунтів, вирубки лісосмуг                                 | Гіпсування ґрунтів, використання сидератів замість чорного пару, відновлення лісосмуг, зменшення площі орних земель |
| Передгірний       | Водна, вітрова ерозія внаслідок високої розораності ґрунтів  | Орання поперек схилу, впровадження систем крапельного зрошення, використання сидератів і залуження ґрунтів          |
| Південно-бережний | Водна, вітрова ерозія внаслідок високої розораності ґрунтів  | Орання поперек схилу, впровадження систем крапельного зрошення, використання сидератів і залуження ґрунтів          |

У Криму впродовж попередніх років активізуються пилові бурі. За останні 16 років збільшилися і максимальна сила вітру й кількість діб зі швидкістю вітру понад 15 м/с. У цей період двічі, у 2007 р. та 2012 р., швидкість вітру склала 33 м/с. Найбільша кількість діб із сильним вітром спостерігається наприкінці зими — початку весни, коли переважають північно-східні або західні румби. У рівнинному та передгірному Криму саме в цей час відбувається більшість пилових бур, які зачіпають верхній родючий шар ґрунту (табл. 1).

Кліматичні зміни створюють нові виклики для сільського господарства, які потребують невідкладної екологізації сучасного агровиробництва. Раціональне природокористування та екологізація процесів вирощування винограду в Криму мають ґрунтуватися на правильній науково обґрунтованій системі територіальної організації агровиробництва [12]. Адаптивно-ландшафтні системи виноградарства свого часу досліджувалися Національним науковим центром (Нікітський ботанічний сад), Національним інститутом винограду і вина «Магарач», Інститутом ефіроолійних лікарських рослин. Застосування наукового потенціалу цих багаторічних біоекологічних досліджень може забезпечити динамічну стійкість, інтенсивність кримського виноградарства і природоохоронні заходи.

Основними напрямками екологізації мають стати оптимізація територіальної структури землеробства Криму, розвиток органічного і біодинамічного виноградарства, відродження автохтонних сортів виноградної рослини (рис. 1). Природні умови сприятливі для виноградарства в південно-західній, північно-західній, передгірній, східній, північно-східній, південнобережній частинах півострова. Відповідно до адаптивна-ландшафтних систем землеробства розміщення виноградних плантацій треба максимально узгодити з територіальною структурою ґрунтів конкретного регіону.



Рис. 1. Основні напрямками екологізації виноградників у Криму

За величиною бонітету відповідно до вимог вирощування винограду ґрунти розподіляються від коричневих без арбонатних і карбонатних, чорноземів передгірських залужених і карбонатних, чорноземів залишково-карбонатних скелетних до слабо- і середньозмитих. Не підходять для винограду маломіцні ґрунти, що підстеляються щільними породами, з високим рівнем підземних вод, а також солонці. Якщо більшість польових, плодових культур мають високі вимоги щодо потенційної родючості ґрунтів, то культура винограду вважається більш стійкою щодо їх скелетності, змитості, солонцюватості. З урахуванням цього фактора треба розвивати полікультурність агроценозів, ускладнювати їх територіальну структуру. Краще місцерозташування за вмістом гумусу, гранулометричним складом, фізико-хімічними якостями ґрунтів треба використовувати для закладки плодових, польових, овочевих культур. Малопродуктивні землі з бонітетом менше ніж 20 балів треба залишити для відновлення природних біогеоценозів. На фрагментах з бонітетом 20—30 балів можливі посадки ефіроносних рослин.

Одночасне вирощування різних видів рослин робить агроценоз більш стійким до вірусних, грибкових захворювань і шкідників. Монотонний агроландшафт не відповідає вимогам щодо біорозмаїття як необхідної умови стійкості екосистем. Куртини лісу, лугов, вкриті травою, яри створюють екологічні ніші для місцевої фауни та стають осередками наступу на шкідливі види. Сільськогосподарські плантації таким чином можуть вписуватися в природний ландшафт. Осередки дикої природи тут виконують стабілізуючі й компенсуючі функції щодо сусідніх агрооб'єктів.

Природні осередки мають бути сіткоподібно розподілені по всьому агроландшафту. Площа стабілізуючих територій повинна складати щонайменше 250 м<sup>2</sup> для сільськогосподарських угідь площею не більше 10 га, тоді площа компенсуючих частин складе 5% їх корисної площі. Така форма екологічного розмаїття території може значно зменшити одностороннє навантаження на агросистеми й забезпечити достатню екологічну стабільність.

У сучасних умовах все більшої популярності набуває органічне землеробство [1, 6, 10], яке задовольняє потреби споживачів у «чистій» продукції й виконує природоохоронні функції. У їх основі лежить біологічна система захисту рослин на основі підбору стійких до хвороб сортів, фітосанітарної стабілізації агроценозів, профілактична система захисту рослин на основі біологічних інсектицидів і фунгіцидів.

Головна проблема органічного виноградарства — дієвість дозволених засобів захисту рослин, особливо в умовах високої інтенсивності розвитку шкідників. Відомо, що інтенсивне використання в агроценозах пестицидів у попередній період значно зменшило видовий склад особливо чутливих хижих комах, кліщів і позначилося на їх здатності до саморегуляції. Ще донедавна теорія та практика захисту рослин була на позиціях повної ліквідації шкідників, яку досягали використанням політоксичних пестицидів.

Сучасні стратегії захисту рослин полягають в управлінні популяціями шкідників. Впроваджуються інтегровані системи, які передбачають селективне внесення пестицидів відповідно до стадій розвитку як шкідливих, так і корисних організмів, фаз росту рослин з урахуванням метеорологічних та інших факторів. Свою дієвість показали й технології, в яких використовують трофічні зв'язки ентомозу (акаро) комплексу конкретного ампелоценозу.

У ландшафтному середовищі Криму, особливо на Південному узбережжі, є умови для закладки виноградників невеликими масивами посеред природних біогеоценозів. Мозаїчність ландшафту обумовлює високе видове розмаїття комах і кліщів, в тому числі аборигенної хижої фауни, що має велике біоценотичне значення для природної регуляції чисельності популяцій фітофагів [2]. Відсутність навантаження пестицидами на сусідніх природних осередках сприяє збереженню хижої біоти та видового розмаїття в агроценозі.

На дослідних полігонах інституту виноградарства і вина «Магарач» у колоніях рослиноїдних кліщів велика кількість хижих комах: кокцинеліди (*Stethorus punctillum* Ws. та ін.), клопи *Orius sp.*, личинки галиці *Arthrocnodax sp.*, трипси (*Scolothrips acariphagus* Junh.) і хижі кліщі родини *Stigmaeidae* (*Zetzelliamali* Ewing.), *Pronematiidae* (*Pronematus rapidus* Kuzn.) і *Phytoseiidae* (*Typhlodromus cotoneastri* Wainst., *Phytoseius plumifer* Cat. Et Fanz., *Euseiusfinlandicus* Oud. та ін.) [4].

Фауністична спільнота хижих кліщів *Phytoseiidae*, які є основними регуляторами чисельності рослиноїдних кліщів на виноградниках і сусідніх природних біотопах, свідчить про міграцію хижаків на виноградники в осередки росту популяцій фітофагів. Багаторічні дослідження довели можливість відновлення саморегуляції чисельності садового павутинного кліща на промислових виноградниках без пестицидів методом «крайового ефекту».

На дослідному полігоні Магарач виключили використання засобів захисту рослин від фітофагів на крайніх шести рядках винограднику на площі 1 га. За таких умов з прилеглих природних осередків хижі види комах і кліщів мігрували на периферію виноградника. На третій рік сюди проникли й закріпилися хижка галиця *Arthrocnodax sp.*, клопи *Orius spp.*, кліщі *Stigmaeidae*. На четвертий рік чисельність корисної фауни збільшилася не лише на периферії виноградника, а навіть і там, де продовжували використовувати пестициди.

Частка хижих кліщів у структурі акарокомплексу за 5 років без пестицидів збільшилася з 0,3 до 12,5% (*Stigmaeidae*) та з 1,7 до 19,6% (*Phytoseiidae*). При цьому максимальна чисельність фітофага знизилася з 30,5 до 6,5 екз/лист. Біотичний індекс, що характеризує трофічні взаємозв'язки в акарокомплексі, збільшився з 1:47 до 1:2. У результаті резервації корисної біоти за сукупністю характеристик наблизили виноградник до природних ценозів, де механізми саморегуляції заважають масовому розвитку фітофагів. Ці дані відображають перспективи для застосування технологій органічного виноградарства на Південному узбережжі Криму.

Світовий досвід органічного виноградарства доводить більшу ефективність місцевих сортів винограду та клонів. Як виявилось, вони більш стійкі до мільдю, оїдіуму, сірої гнилі. Міжвидові культури потребують у середньому 3...4 профілактичних обприскувань за сезон і повне дотримання використання низьких доз міді, а також можуть бути використаними в органічному виробництві.

Упродовж століть на основі дикого винограду кримських лісів, народної селекції було виведено багато видів аборигенних сортів винограду. У промислових виноградниках зараз використовується не менше 20 їх видів, переважно в Судацькому регіоні, наприклад, Джеват Кара, Кефесія, Екім Кара, Сари Пандас, Кок Пандас, Шабаш тощо. З них виробляють кращі вина Криму, такі як «Чорний Доктор».

На рис. 2 показано розподіл аборигенних сортів винограду в Криму: 75% сортів аборигенів росте в районі Судака, багато з них дійшли до нас із глибини століть і були відомі з часів давньогрецьких і генуезьких поселень [8].

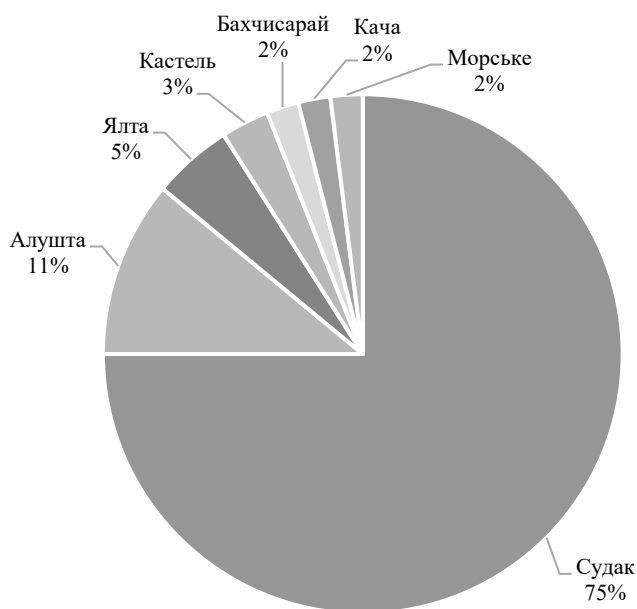


Рис. 2. Локалізація аборигенних сортів винограду в Криму

Схожість за цілим рядом морфологічних ознак аборигенних сортів з диким виноградом певних регіонів доводить їх місцеве походження. Знайдена в горах *Vitis vinifera* subsp. *sylvestris* var. *tavrica* має аналогії з кримськими культурними сортами, наприклад із сортом Херсонський в ареалі Севастополя. Сорт Манжил ал походить від дикого винограду, що дотепер росте на схилах гори Манжил. Аборигенні сорти винограду сформувалися або в результаті штучного й природнього відбору з диких лоз лісів Криму, або є гібридами між місцевими та завезеними сортами [8].

**Висновок.** Розвиток виноградарства в Криму потребує комплексного підходу, що включає економічні й екологічні аспекти, відбір і відновлення сортів винограду, оптимізацію агротехнологій, впровадження інновацій у виноградарстві, покращення ґрунтів і кліматичної стійкості, впровадження сталих методів господарювання, покращення виробництва вина.

Отже, для екологізації виноградарства в Криму треба використати комплексний підхід на основі оптимізації територіальної структури сільськогосподарських угідь, запровадження сучасних агротехнологій, зокрема органічного землеробства, використання гібридів і аборигенних сортів як посадкового матеріалу. В Україні вже накопичений відповідний досвід наукових досліджень і практичної діяльності в цій галузі.

На дослідних полігонах органічного виноградарства Національного наукового центру (Нікітський ботанічний сад), Національного інституту винограду і вина «Магарач» були отримані задовільні результати. Для максимально ефективного запровадження цього досвіду в умовах гірського рельєфу Криму виноградні угіддя мають відповідати таким вимогам: дрібний контур, мала площа, включення природних осередків, локальна диференціація посадкового матеріалу.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Басюк Д. І., Сологуб, Ю. І., Бабич, І. М. та ін. (2014). Актуальні проблеми управління виноградно-виноробним комплексом: монографія. Кам'янець-Подільський: Видавець Зволейко Д. Г.
2. Баранець, Л. О., Мезернюк, Т. М. (2019). Щікідливість комах-поліфагів на промислових виноградних насадженнях північного причорномор'я. *Виноградарство і виноробство: міжвідомчий тематичний науковий збірник*. Одеса. ННЦ «ВіВ ім. В. Є. Таїрова», 86—94.
3. Бондаренко, В. І. (2019). Екологічні підходи до вирощування технічних сортів винограду. *Виноградарство і виноробство України*, 11(2), 41—47.
4. Іваненко, С. М. (2021). Екологічна модернізація виноградарства в умовах Криму. *Агроекологічний журнал*, 10, 56—62.
5. Кравченко, І. В. (2016). Екологічне виноробство: особливості та перспективи розвитку в Криму. *Вісник садівництва та виноградарства*, 8, 24—29.
6. Орел, А. М., Дяченко, В. В. (2023). Сучасні аспекти розвитку органічного землеробства в умовах сталого сільського господарства. *Економіка та суспільство*, 48, 1—9.
7. Петренко, М. С. (2021). Органічне виноградарство в Криму: стратегії розвитку та екологічні аспекти. *Збірник наукових праць Інституту садівництва НААН України*, 12, 102—108.
8. Полулях, А. А. (2017). Генетичні ресурси винограду інституту «Магарач». Проблеми і перспективи зберігання. *Генетичні ресурси*, 21, 608—616.
9. Сапронова, Н. Г. (2021). Виноградарство та зміна клімату: адаптаційні підходи в Україні. *Агроекологічний журнал*, 111, 34—40.
10. Тимченко, О. А. (2020). Сучасні тенденції в органічному виноградарстві України. *Органічне виробництво та сталий розвиток*, 5, 56—63.
11. Печко, В. (2024). Україні треба зайняти постійне місце на виноробній мапі світу. *Напої. Технології та Інновації*, 4, 6—9.
12. Шевченко, О. В. (2017). Екологізація виноградарства в умовах Криму: сучасні виклики та перспективи. *Вісник аграрної науки*, 95, 78—84.
13. Bisson, L. F., Waterhouse, A. L., Ebeler, S. E., Walker, M. A., & Lapsley, J. T. (2002). The present and future of the international wine industry, *Nature*, 418(6898), 696—699.
14. Capone, R., Bilali, H. E., Debs, P., Cardone, G., & Driouech, N. (2016). Food system sustainability and food security: connecting the dots. *Journal of Food Security*, 4, 83—92.
15. Delmas, M., Lessem, N. (2015). Eco-premium or eco-penalty? Eco-labels and quality in the organic wine market. *Business & Society*, 56(2), 318—356.
16. Jones, G. (2010). Climate, grapes, and wine: structure and suitability in a variable and changing climate. Wiley Interdisciplinary Reviews. *Climate Change*, 6(5), 472—485.
17. Mylona, P., Tzortzakakis, N. (2018). Organic viticulture: sustainable management and practices. *Sustainability in agriculture and food production*, 7, 123—145.
18. Reganold, J., Wachter, J. (2016). Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, 2, 1—8.
19. Tayebi, A., Behnamian, N., Li, J. (2020). Sustainability in grape production: A review of environmental, economic, and social aspects. *Sustainability*, 12, 12—20.

УДК 54.06:635.2

## GLYCOALKALOIDS OF POTATOES: $\alpha$ -SOLANINE AND $\alpha$ -CHACONINE. A REVIEW

O. Makarenko, K. Chebanenko

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

glycoalkaloids,  
potatoes,  
 $\alpha$ -solanine,  
 $\alpha$ -chaconine,  
toxicity,  
chromatography

---

**Article history:**

Received 15.04.2025

Received in revised form  
21.04.2025

Accepted 23.04.2025

---

**Corresponding author:**

chebanenkohv@nuft.edu.ua

---

**ABSTRACT**

This article provides an analysis of recent studies concerning the properties and toxicity of potato glycoalkaloids,  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine. Changes in the European Union legislation regarding the control and monitoring of their content are discussed, which establish an indicative level of 100 mg/kg for the sum of  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine. In properly cultivated, harvested, and stored potatoes, the glycoalkaloid content usually ranges from 20 to 100 mg/kg.

In Ukraine, active development of portable systems for analyzing glycoalkaloid content in potatoes based on biosensors exploiting the anticholinesterase activity of glycoalkaloids was conducted in the early 2000s. However, this method has not been implemented in practical control techniques.

Exceeding the content of  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine in potatoes poses a risk of poisoning, including fatal cases, which were recorded in the 20th century in Germany and the United Kingdom. Clinical signs of potato glycoalkaloid toxicity include dry mouth, pain in the mouth and throat, throat constriction, nausea, vomiting, abdominal pain, and diarrhea, accompanied by various neurological symptoms such as weakness, confusion, depression, and others. For adults, a toxic dose is considered to be 200–400 mg, while for children, a critical dose may be as low as 20–40 mg. A dose exceeding 600 mg is potentially life-threatening. However, at low concentrations, glycoalkaloids can exhibit anticancer activity.

Methods for reducing the levels of  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine in potatoes are presented. It is noted that their content depends on environmental and genetic factors, as well as on storage and processing methods. Modern methods for controlling the content of glycoalkaloids in potatoes and potato-based food products are also analyzed.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-6

---

## ГЛІКОАЛКАЛОЇДИ КАРТОПЛІ $\alpha$ -СОЛАНІН ТА $\alpha$ -ЧАКОНІН. ОГЛЯД

О. Г. Макаренко, канд. хім. наук, ORCID ID: 0000-0002-9472-3546

Х. В. Чебаненко, ORCID ID: 0000-0001-5002-1393

Національний університет харчових технологій

У статті проаналізовано останні дослідження, які стосуються властивостей і токсичності глікоалкалоїдів картоплі  $\alpha$ -соланіну та  $\alpha$ -чаконіну. Розглянуто зміни в законодавстві Європейського Союзу щодо їх контролю та моніторингу вмісту, яке встановлює індикативний рівень у 100 мг/кг для суми  $\alpha$ -соланіну та  $\alpha$ -чаконіну. Для безпечності харчової продукції важливим є питання контролю вмісту  $\alpha$ -соланіну і  $\alpha$ -чаконіну у продовольчій картоплі та картоплі для промислової переробки. Наведено способи зменшення рівнів вмісту  $\alpha$ -соланіну та  $\alpha$ -чаконіну в картоплі. Зазначено, що їх вміст залежить від екологічних, генетичних чинників і способів зберігання й обробки картоплі. Проаналізовано актуальні методи контролю глікоалкалоїдів у картоплі та харчових продуктах з неї.

**Ключові слова:** глікоалкалоїди, картопля,  $\alpha$ -соланін,  $\alpha$ -чаконін, токсичність, хроматографія.

**Вступ.** Картоплю (*Solanum tuberosum*) окультурили і почали вирощувати мешканці Південної Америки близько 8 000 років до нашої ери [1]. На європейському континенті вона вперше з'явилася на початку XVI ст. в Іспанії і далі поширилась по всій Європі [2]. В Північну Америку картопля була завезена шотландсько-ірландськими іммігрантами на початку XVIII ст. [3]. І вже через 100 років у XIX ст. картопля стала однією із основних продовольчих культур. В Україні картоплю спочатку почали вирощувати на Лівобережжі, а з 1742 р. вже і на правобережній частині, далі географія її розповсюдження сягнула Закарпаття в 1770 р. та Галичину в 1780 році. Вже наприкінці XVIII ст. картопля розповсюдилась по всій Україні [1].

Споживання картоплі у світі постійно зростає завдяки її високій поживній цінності. М'якоть картоплі є цінним джерелом антиоксидантів, вітамінів С, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>6</sub>, В<sub>9</sub>, а також багатьох мікроелементів, необхідних для підтримки нормального функціонування організму людини. Аскорбінова кислота та природні барвники картоплі — каротиноїди, зокрема лютеїн, зексантин і віолаксантин, виконують роль антиоксидантів, що сприяють зменшенню окислювального стресу в клітинах. У шкірці картоплі містяться фенольні сполуки, такі як хлорогенова кислота та антоціани. Як антиоксиданти, так і фенольні речовини здатні пригнічувати розвиток ракових клітин і позитивно впливати на серцево-судинну систему, знижуючи ризик гіпертонії та високого артеріального тиску [4].

Однак картопля може становити потенційну загрозу для здоров'я людини через вміст глікоалкалоїдів (ГА) — групи нітрогеновмісних сполук, які природним чином виробляються різними видами культурних і декоративних рослин родини пасльонових. Ці сполуки виконують захисну функцію, підвищуючи стійкість рослин до шкідників і хвороб. ГА складаються зі стероїдного аглікону та бічного ланцюга, утвореного олігосахаридами. У найбільш поширених комерційних сортах картоплі головними ГА є  $\alpha$ -чаконін і  $\alpha$ -соланін, у баклажанах (*S. melongena*) переважають глікоалкалоїди  $\alpha$ -соламаргін і азолазонін, у томатах (*S. lycopersicum*) основними ГА є  $\alpha$ -томатин і  $\alpha$ -дегідротоматин. Приклади нехарчових рослин із родини пасльонових

включають тютюн, петунію та пасльонові гірко-солодкі. ГА, що містяться в картоплі, більш токсичні, ніж ті, що містяться в помідорах і томатах [5, 6]. Підвищений вміст таких сполук у харчових продуктах супроводжується появою гірко-смаку. Алкалоїдні глікозиди, такі як  $\alpha$ -соланін і  $\alpha$ -чаконін, можуть мати шкідливий вплив на травну систему. У великих кількостях надходження в організм цих речовин можуть спричинити прискорене серцебиття, збої в роботі нервової системи й навіть становити загрозу життю як для людини, так і для сільськогосподарських тварин [7].

У сучасних умовах проблема безпечності та якості харчових продуктів набула пріоритетного значення і особливої актуальності, стала важливим фактором підвищення рівня життя та забезпечення продовольчої безпеки. Безпечний харчовий продукт — харчовий продукт, який не створює шкідливого впливу на здоров'я людини безпосередньо чи опосередковано за умов його виробництва та обігу з дотримання вимог санітарних заходів і споживання за призначенням. Таким чином, питання контролю вмісту  $\alpha$ -соланіну і  $\alpha$ -чаконіну є актуальним як для продовольчої картоплі, так і картоплі для промислової переробки.

Представляє науково-практичний інтерес аналіз стану даних щодо токсичності  $\alpha$ -чаконіну і  $\alpha$ -соланіну, їх методи виявлення та контролю в харчових продуктах, оскільки картопля залишається одним із найважливіших харчових продуктів та сировиною для виробництва ряду продуктів харчування і, звісно, картопляного крохмалю.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** У картоплі міститься отруйна речовина — соланін, глікозид, що складається з алкалоїду соланідину і трисахариду, який містить глюкозу, галактозу, рамнозу. Багато глікозидів у поверхневих шарах бульби і особливо в шкірці. Вміст соланіну різко збільшується при зберіганні картоплі на світлі. Соланін — один із видів сапоніну, який є сильним піноутворювачем, що робить його шкідливою домішкою у виробництві [8]. Соланін проявляє свою негативну дію при вмісті понад 2,0 мг/кг. Особливо багато його в позеленілих бульбах і пророслих паростках.

Комісія експертів Європейського агентства з безпеки харчових продуктів (EFSA) з питань забруднюючих речовин у харчовому ланцюзі (CONTAM) провела оцінку ризику, пов'язаного з глікоалкалоїдами у кормах і харчових продуктах, зокрема в картоплі та продуктах на її основі. Для цих ефектів група CONTAM визначила найнижчий рівень, при якому спостерігається шкідлива дія (LOAEL) як орієнтир для оцінки ризику при гострому впливі, що становить 1 мг загального вмісту глікоалкалоїдів картоплі на кг маси тіла на добу [5, 14]. У Рекомендації Комісії ЄС 2022/561 від 6 квітня 2022 року щодо моніторингу вмісту глікоалкалоїдів у картоплі та продуктах її переробки [14] встановлено індикативний рівень у 100 мг/кг для суми  $\alpha$ -соланіну та  $\alpha$ -чаконіну.

В Україні активними розробками портативних систем для аналізу вмісту ГА в картоплі на основі біосенсорів, які використовували антихолінестеразну активність глікоалкалоїдів, займались на початку 2000 років. Так, у працях [9—12] запропоновано використовувати потенціометричний біосенсор, який дає змогу селективно визначати ГА на фоні іонів важких металів і фосфороорганічних пестицидів. Вказаний біосенсор, метод високоефективної рідинної хроматографії й тонкошарової хроматографії були використані для виявлення ГА у сортах картоплі, що вирощуються в Україні, також підтверджено високу валідність результатів. У подальшому розробка була вдосконалена: оптимізовано процедуру підготовки зразків бульб картоплі, від-

працьовані аналітичні методики й експериментальні протоколи для кількісного визначення ГА, досліджено вплив параметрів зберігання зразків на чутливість і відтворюваність сенсорного сигналу, сама методика перевірена на різних сортах врожайності 2007 і 2008 років [13]. Фактично в Україні в подальшому не фіксувалось додаткових наукових доробок у галузі дослідження ГА картоплі.

Серед рекомендованих аналітичних методів — рідинна хроматографія з ультрафіолетовим фотодіодним детектором (LC-UV-DAD) та рідинна хроматографія в поєднанні з мас-спектрометрією (LC-MS). Можна також застосовувати альтернативні методи за умови надання підтверджень їх надійності для визначення конкретних глікоалкалоїдів. Межа кількісного визначення (LOQ) для кожного глікоалкалоїду, зазвичай, має становити близько 1 мг/кг і не повинна перевищувати 5 мг/кг [14].

Для якісного визначення соланіну бульбу картоплі розрізають на пластинки за товшки 1 мм від верхівки до середини, з боків і біля вічок. Пластинки поміщають у фарфорову чашку і на них наносять по краплях спочатку оцтову (80—90%), а потім — сірчану кислоту і кілька крапель 5-відсоткового розчину перекису водню. Зрізи з вмістом соланіну швидко червоніють — і тим інтенсивніше, чим більше соланіну знаходиться в картоплі. Кількісне визначення вмісту соланіну проводять методом, який описано у [15].

На території України чинний Національний стандарт України «ДСТУ 9221:2023 Картопля продовольча. Технічні умови» не передбачає контроль вмісту ГА в картоплі. Цей стандарт поширюється на технологію вирощування продовольчої картоплі, яку заготовляють і поставляють для споживання у свіжому вигляді, а також для перероблення на продукти харчування. У стандарті вказано кількість бульб із виростами, наростами, з плямами блідо-зеленого кольору загальною площею понад 2 см<sup>2</sup>, але не більше ніж 1/4 поверхні бульби, сукупно відсоток не більше ніж 2,0—10,0% від маси, залежно від того, рання картопля чи пізня. Завдяки наведеному гранично допустимому вмісту токсичних елементів і речовин у продовольчій картоплі, таких як свинець, кадмій, ртуть, миш'як, мідь, цинк, пагулін, нітратів, є можливість контролювати вміст шкідливих речовин у картоплі та надавати споживачу безпечний харчовий продукт [16].

Однак слід зазначити, що в «ДСТУ 4993:2008 Картопля для промислового перероблення» регламентують вміст позеленілих і недозрілих бульб не більше 2%, що є непрямим критерієм підвищення вмісту соланіну [17]. Цей стандарт установлює вимоги до картоплі, призначеної для промислового перероблення на продукти харчування (картопляні чипси, заморожений напівфабрикат (картопля фрі) та сухе картопляне пюре), спирт і крохмаль.

**Мета дослідження:** аналіз актуальної інформації про властивості і токсичність  $\alpha$ -соланіну та  $\alpha$ -чаконіну, перспективи використання ГА як потенційних лікарських засобів, методи контролю вказаних ГА в картоплі для промислового перероблення та картоплі продовольчої.

**Викладення основних результатів дослідження.** У їстівній картоплі (*Solanum tuberosum*) основними ГА є  $\alpha$ -соланін і  $\alpha$ -чаконін. Як показано на рис. 1,  $\alpha$ -чаконін має розгалужений бічний ланцюг вуглеводу  $\beta$ -чакотріозу (біс- $\alpha$ -L-рамнопіранозил- $\beta$ -D-глюкопіраноза), приєднаного до 3-ОН групи агліконасоланідину. У свою чергу,  $\alpha$ -соланін містить схожий розгалужений ланцюг  $\beta$ -солатріозу ( $\alpha$ -L-рамнопіранозил- $\beta$ -D-глюкопіранозил- $\beta$ -галактопіраноза), який також зв'язаний із тією ж гідроксильною групою аглікона. Обидва трисахаридні ланцюги можуть бути послідовно розщеплені під

дією кислотного або ферментативного гідролізу, в результаті чого утворюється аглікон — соланідин. У картоплі можуть бути присутні невеликі кількості таких продуктів гідролізу, як  $\beta$ - і  $\gamma$ -чаконіни, соланіни та соланідин [18, 19].

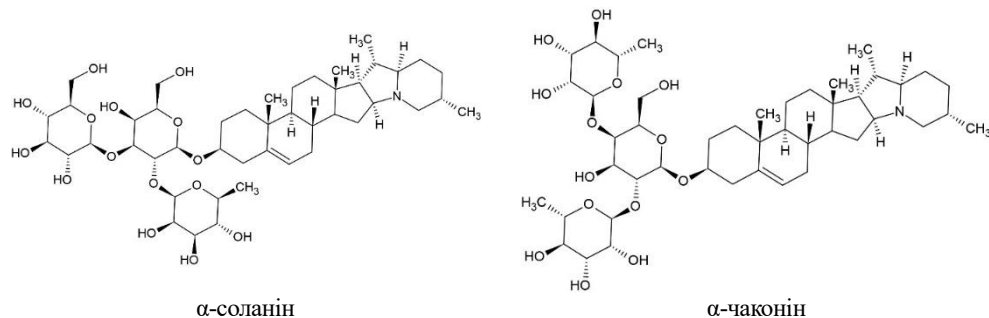


Рис. 1. Структурні формули  $\alpha$ -соланіну і  $\alpha$ -чаконіну

ГА  $\alpha$ -соланін і  $\alpha$ -чаконін є твердими безбарвними речовинами, які кристалізуються із метанолу у формі гольчастих кристалів і мають температуру плавлення 286 °C для  $\alpha$ -соланіну та 243 °C для  $\alpha$ -чаконіну відповідно. Вони практично нерозчинні у воді (1,38 мг/л), етері і хлороформі. При дослідженнях на щурах при внутрішньочеревинному введенні для  $\alpha$ -соланіну  $LD_{50}$  складало 67,0 мг/кг, для  $\alpha$ -чаконіну — 84,0 мг/кг [20—22].

У правильно вирощеній, зібраній і збереженій картоплі вміст ГА, зазвичай, становить від 20 до 100 мг/кг. Однак у деяких випадках результати аналізів зразків картоплі фіксують рівні ГА, що перевищують 200 мг/кг [23].

Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) встановило, що середній вміст  $\alpha$ -соланіну та  $\alpha$ -чаконіну в картоплі становить 51,2 мг/кг. Максимальне зафіксоване значення становить 276,6 мг/кг. З огляду на можливий гострий харчовий вплив, особливу стурбованість викликає ризик для здоров'я немовлят і дітей раннього віку. Для дорослих потенційні ризики виникають лише у випадках надмірного споживання [5].

$\alpha$ -Чаконін і  $\alpha$ -соланін становлять приблизно 95% загального вмісту ГА у бульбах картоплі. Їхня концентрація може змінюватися під впливом екологічних та генетичних чинників. У зрілих плодах рівень соланіну зазвичай є мінімальним. До основних факторів, які сприяють підвищенню вмісту соланіну, належать: фізичне ушкодження рослини, певні сорти картоплі, фізіологічний стрес, недостиглість, температурні фактори та вплив світла. Позеленіння бульб після збору врожаю є ознакою зберігання в неналежних умовах. Наприклад, у Китаї це призводить до 15% втрати врожаю картоплі [24, 25]. Однак варто зазначити, що позеленіння картоплі не завжди може свідчити про підвищення рівня ГА. Це лише кольорова індикація можливої проблеми.

Соланін разом із чаконіном синтезується в картоплі з ацетил-коензиму А і холестерину [18, 26]. У картопляній шкірці концентрація ГА значно перевищує їхній рівень у м'якоті. Щоб ефективно видалити токсичну частину соланіну, достатньо очистити картоплю на глибину 3—4 мм. Це зменшить вміст соланіну на 30—80% порівняно з неочищеною картоплею, знижуючи ризик надлишкового споживання глікоалкалоїдів. Це ж стосується і паростків картоплі, які проростають як відповідь на стресові умови зберігання. Вміст  $\alpha$ -соланіну можна оцінити органолептичним спо-

собом: гіркий смак шкірки свідчить про його високу концентрацію. Якщо після споживання невеликого шматочка відчувається печіння в роті, це свідчить про рівень соланіну понад 0,2 мг/г. Для дорослих токсичним вважається дозування 200—400 мг, а для дітей критичною може стати вже доза 20—40 мг. Доза понад 600 мг потенційно небезпечна для життя [24, 25, 27, 28]. Типове співвідношення  $\alpha$ -чаконіну до  $\alpha$ -соланіну в бульбі становить приблизно 60:40 [29].

Процеси нарізання та промивання картоплі у воді мають лише незначний вплив на зменшення рівня ГА. Бланшування є трохи ефективнішим, оскільки під час цієї процедури частково видаляються водорозчинні ГА. Однак навіть при цьому рівень їх зниження залишається недостатньо високим. Варіння картоплі у воді більш суттєво сприяє зниженню концентрації ГА у бульбах. Це пояснюється підвищенням їх розчинності у воді при піднятті температури води до її кипіння. Ще більше понижує вміст рівня ГА смаження за рахунок високої температури цього процесу [30, 31].

Токсичну дію ГА картоплі  $\alpha$ -чаконіну та  $\alpha$ -соланіну пов'язують з численними випадками отруєнь, зокрема летальних, зафіксованих у ХХ ст. в Німеччині та Великій Британії. Повідомлялося, що  $\alpha$ -чаконін є високоцитотоксичним глікоалкалоїдом у картоплі. А тератогенний потенціал  $\alpha$ -соланіну підтверджено в експериментальних дослідженнях на тваринних моделях (мишах та амфібіях), де спостерігалися вроджені аномалії розвитку, зокрема ураження центральної нервової системи [32—34]. Результати сукупної токсикологічної оцінки свідчать, що ГА картоплі проявляють токсичну дію на людину навіть у дуже низьких дозах, що робить її більш чутливою до цих сполук порівняно з іншими видами тварин [35].

Структура  $\alpha$ -соланіну демонструє схожість із стероїдними гормонами людини, зокрема андрогенами, естрогенами, прогестероном та іншими статевими гормонами. Як стероїдний алкалоїд соланін характеризується широким спектром біологічної активності: в низьких концентраціях він виявляє протизапальні властивості, чинить протиалергічну дію, сприяє профілактиці бронхіальної астми, а також впливає на регуляцію метаболічних процесів і функціонування ендокринної системи. На сьогодні кілька досліджень *in vitro* та *in vivo* показали його антипроліферативну активність проти раку:  $\alpha$ -соланін пригнічує ріст ракових клітин печінки (HepG2), лімфоми (U937), товстої кишки (HT29), шлунка (AGS і КАТО III) і ракових клітин шийки матки (HeLa). Ці дослідження показують, що  $\alpha$ -соланін може бути потужним засобом для майбутньої протипухлинної терапії [36, 37].

Для визначення вмісту глікоалкалоїдів (ГА) було розроблено низку аналітичних методів, зокрема: ультрафіолетова спектрофотометрія, високоефективна тонкошарова хроматографія, імунологічні методи аналізу, високоефективна рідинна хроматографія з ультрафіолетовим детектором, рідинна хроматографія з мас-спектрометрією, а також матрична лазерна десорбційно-іонізаційна часпролітна мас-спектрометрія. Серед зазначених методів хроматографічні методи найбільш поширені завдяки їх високій чутливості й точності. Водночас їх аналітичні характеристики можуть значно погіршуватись у присутності складних матриць. Зазначено, що з метою підвищення надійності результатів, необхідно застосовувати ефективні методи попередньої обробки зразків, зокрема селективної екстракції та ізоляції цільових глікоалкалоїдів перед проведенням інструментального аналізу [38]. Пропонуються різні способи оптимізації обробки зразка. Зокрема ефективним та екологічним показав себе метод обробки зразків ультразвуком [39, 40] або з використанням мікрохвильової екстракції [41].

Офіційний метод АОАС застосовує колонку C18 та елюент 60:40 ацетонітрил/вода з фосфатним буфером рН 7,6. Детектування проводять на довжині хвилі 202 нм. Зразки попередньо заморожують, ліофільно сушать і екстрагують суму ГА водним розчином вода/оцтова кислота/NaHSO<sub>3</sub> (100:5:0,5 — о/о/м). Потім ГА концентрують і виділяють методом твердофазної екстракції на картриджах C18з подальшим зберіганням зразка при пониженій температурі [42].

**Висновок.** Картопля як один із найбільш важливих харчових продуктів може містити потенційно небезпечні рівні концентрацій глікоалкалоїдів, зокрема  $\alpha$ -соланіну та  $\alpha$ -чаконіну. Підвищення їх вмісту залежить від багатьох факторів, зокрема від сортових особливостей, умов вирощування та зберігання, ступеня зрілості й фізичної цілісності бульби. ЄС вимагає контролю за рівнем глікоалкалоїдів у картоплі та продуктах з неї від держав-членів та операторів харчового бізнесу. Вивчення ГА картоплі активізувалось в останні роки, оскільки важливими є показники вмісту описаних речовин для прямого використання продовольчої картоплі та її промислового перероблення. Методи контролю були зосереджені на використанні сучасних інструментальних методів аналізу із удосконаленням процедур обробки і підготовки проб.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Федосій, І. О., Комар, О. О., Фурдига, М. М., Захарчук, Н. А. (2022). *Картоплярство: навчальний посібник*. Київ: ФОП Ямчинський.
2. Ruiz de Galarreta, J. I., Pascualena, J., Legorburu, F. J. et al. (2006). The History of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Research in Spain. *Potato Research*, 49, 19—25. DOI: 10.1007/s11540-006-9001-6.
3. Maiti, R. K., and Singh, V. (2022). A mini review on origin, history and taxonomic status of the potato. *Farm. Manage.*, 7, 21—35. DOI:10.31830/2456-8724.2022.FM-104.
4. Waseem, K., and others. (2020). Nutritional composition and health benefits of potato. *Adv Food & Nutr Sci.*, 5, 7—16. DOI:10.21065/25631 640.5.7.
5. EFSA CONTAM Panel (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain). (2020). Scientific Opinion — Risk assessment of glycoalkaloids in feed and food, in particular in potatoes and potato-derived products. *EFSA Journal*, 18(8):6222. DOI: 10.2903/j.efsa.2020.6222.
6. Glycoalkaloids in Foods. URL: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/food-nutrition/reports-publications/food-safety/glycoalkaloids-foods.html> (дата звернення: 27.04.2025).
7. Edited By Leo, M. L., Nollet, Javed A. (2022). *Analysis of Naturally Occurring Food Toxins of Plant Origin*. CRC Press. DOI: 10.1201/9781003222194.
8. Грабовська, О. В. (2010). *Технологія крохмалю та крохмалепродуктів: курс лекцій*. К.: НУХТ.
9. Arkhypova, V. N. et al. (2004). Application of enzyme field effect transistors for fast detection of total glycoalkaloids content in potatoes. *Sensors Actuators B Chemical.*, 103(1), 416—422. DOI: 10.1016/j.snb.2004.04.070.
10. Nazarenko, E. A. et al. (2004). Potato glycoalkaloids detection based on conductometric sensor coupled to butyryl cholinesterase. *Биополим. Cell.*, 20(4), 331—336. DOI: 10.7124/bs.0006B8.
11. Назаренко, О. А. та ін. (2005). Потенціометричний біосенсор для визначення глікоалкалоїдів картоплі: керована зміна аналітичних характеристик, порівняння з методом тонкошарової хроматографії. *Биополімери і клітина*, 21(3), 275—282.
12. Корпан, Y. I. et al. (2006). Sensitivity and specificity improvement of an ion sensitive field effect transistors-based biosensor for potato glycoalkaloids detection. *J. Agric. Food Chem.*, 54(3), 707—712. DOI: 10.1021/jf0529316.
13. Архипова, В. М. та ін. (2009). Біосенсорний аналіз глікоалкалоїдів у картоплі. *Biotechnology*, 2(3), 64—73.
14. Commission Recommendation (EU) 2022/561 of 6 April 2022 on monitoring the presence of glycoalkaloids in potatoes and potato-derived products. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0561> (дата звернення: 16.04.2025).

15. Ібатуллін, І. І., Мельник, Ю. Ф., Отченашко, В. В., та ін. (2015). *Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин: навчальний посібник*. Під ред. академіка НААН України І. І. Ібатулліна.
16. ДСТУ 9221:2023 Картопля продовольча. Технічні умови. Київ, 2023, 17 с.
17. ДСТУ 4993:2008 Картопля для промислового переробляння. Технічні умови. Київ, 2008. 10 с.
18. Friedman, M. (2006). Potato Glycoalkaloids and Metabolites: Roles in the Plant and in the Diet. *J. Agric. Food Chem.*, 54, 8655—8681. DOI: 10.1021/jf061471t.
19. Nepal, B., and Stine, K. J. (2019). Glycoalkaloids: Structure, Properties, and Interactions with Model Membrane Systems. *Processes.*, 7, 513. DOI:10.3390/pr7080513.
20. The Merck Index: *An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals*. (2013). Edited by M. J. O'Neil, Royal Society of Chemistry. Cambridge 15<sup>th</sup> Edition.
21. Alpha-Solanine. PubChem. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6537493> (дата звернення: 27.04.2025).
22. Alpha-Chaconine. PubChem. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/442971> (дата звернення: 27.04.2025).
23. FAQ to the BfR from 23 April 2018: Frequently asked questions about solanine (glycoalkaloids) in potatoes URL: <https://www.bfr.bund.de/cm/349/frequently-asked-questions-about-solanine-glycoalkaloids-in-potatoes.pdf> (дата звернення: 27.04.2025).
24. Karaca, M., Erbaş, O. (2024). Solanine Poisoning: Effects, Risks, and Management Strategies. *JEB Med. Sci.*, 5(2), 189—193. DOI: 10.5606/jebms.2024.1090.
25. Liu, J-M. et al. (2020). Antimicrobial Activity Against Phytopathogens and Inhibitory Activity on Solanine in Potatoes of the Endophytic Bacteria Isolated From Potato Tubers. *Front. Microbiol.*, 11:570926. DOI: 10.3389/fmicb.2020.570926.
26. Sebastian, B. et al. (2021). Biosynthesis of  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine in potato leaves (*Solanum tuberosum L.*) — A  $^{13}\text{C}$  study. *Food Chemistry*, 15:365:130461. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130461.
27. Izawa, K. et al. (2010). Human-environment interactions — Taste. *Comprehensive Natural Products II*, 631—671. URL: <https://pharmacy.hebmu.edu.cn/trywhx/resources/43/2019624171159.pdf> (дата звернення: 27.04.2025)
28. Duggan, T., Dawid, C., Baur, S., Hofmann, T. (2020). Characterization of Bitter and Astringent Off-Taste Compounds in Potato Fibers. *J. Agric. Food Chem.*, 68(41), 11524—11534 DOI: 10.1021/acs.jafc.0c04853.
29. Barceloux, D. G. (2009). Potatoes, tomatoes, and solanine toxicity (*Solanum tuberosum L.*, *Solanum lycopersicum L.*). *Dis Mon.*, 55(6), 391—402. DOI: 10.1016/j.disamonth.
30. Zarins, R., Kruma, Z. (2017). Glycoalkaloids in potatoes: a review. 11th Baltic Conference on Food Science and Technology "Food science and technology in a changing world" Foodbalt 2017 Conference Proceedings. Jelgava, LLU, 7—11. DOI: 10.22616/foodbalt.2017.002.
31. Liu, H. et al. (2020). Effect of acid on glycoalkaloids and acrylamide in French fries. *Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo Risk Assess.*, 37, 938—945. DOI: 10.1080/19440049.2020.1743883.
32. Ordóñez-Vásquez, A. et al. (2019). Toxicity, teratogenicity and anti-cancer activity of  $\alpha$ -solanine: A perspective on anti-cancer potential. *Int. J. Pharmacol.*, 15, 301—310. DOI: 10.3923/ijp.2019.301.310.
33. He, Y. et al. (2021).  $\alpha$ -Chaconine Affects the Apoptosis, Mechanical Barrier Function, and Antioxidant Ability of Mouse Small Intestinal Epithelial Cells. *Front. Plant Sci.*, 12:673774. DOI: 10.3389/fpls.2021.673774.
34. *Handbook of plant and animal toxins in food: occurrence, toxicity, and prevention*. Edited by Gulzar Ahmad Nayik, & Jasmeet Kour, First edition. | Boca Raton: CRC Press, 2022. DOI: 10.1201/9781003178446.
35. Uluwaduge, D. I. (2018). Glycoalkaloids, bitter tasting toxicants in potatoes: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 3, 188—193.
36. Pan, B. et al. (2016). Inhibition of prostate cancer growth by solanine requires the suppression of cell cycle proteins and the activation of ROS/P38 signaling pathway. *Cancer Med.*, 5(11):3214—3222. DOI: 10.1002/cam4.916. Epub 2016 Oct 10. PMID: 27726305; PMCID: PMC5119977.

37. Hassan, S. H. et al. (2021). Alpha Solanine: A Novel Natural Bioactive Molecule with Anticancer Effects in Multiple Human Malignancies. *Nutr. Cancer.*, 73(9), 1541—1552. DOI: 10.1080/01635581.2020.1803932. Epub 2020 Aug 7. PMID: 32762370.

38. Petrova, I., Ivanova-Petropolus, V., Koleva-Gudeva, L. (2023). HPLC-DAD method for analysis of glycoalkaloids alpha-solanine and alpha-chaconine in conventional potato. *Journal of International Scientific Publications: Agriculture & Food.*, 11, 312—320. DOI: 10.62991/AF1996325925.

39. Martínez-García, I., Gaona-Scheytt, C., Morante-Zarcero, S., Sierra, I. (2024). Development of a Green, Quick, and Efficient Method Based on Ultrasound-Assisted Extraction Followed by HPLC-DAD for the Analysis of Bioactive Glycoalkaloids in Potato Peel Waste. *Foods.*, 13, 651. DOI: 10.3390/foods13050651.

40. Martínez-García, I., Pérez-Quintanilla, D., Morante-Zarcero, S., Sierra, I. (2025). Effect of various culinary treatments on the glycoalkaloid content of potato peel, *Journal of Food Composition and Analysis*, 137(A), 106937. DOI: 10.1016/j.jfca.2024.106937.

41. Narasimharao, K., Jacob, S., Mcdougal, O. (2017). Determination of Glycoalkaloids in Potatoes and Potato Products by Microwave Assisted Extraction. *American Journal of Potato Research*, 94(2), 153—159. DOI: 10.1007/s12230-016-9558-9.

42. AOAC (2000). Glycoalkaloids ( $\alpha$ -solanine and chaconine) in potato tubers. Official method 997.13, 1—4.

УДК 664.14

# INNOVATIVE SOLUTIONS IN THE QUALITY MANAGEMENT OF GLAZED SWEETS BASED ON CREME-BRULEE IN THE PROCESSING OF THEIR RETURN WASTE

Yu. Kambulova, O. Kokhan, O. Dudzinskyi, V. Soloshenko

*National University of Food Technologies***Key words:**

recyclable waste,  
fondant sweets,  
technological parameters,  
quality

**Article history:**

Received 12.02.2025  
Received in revised form  
15.02.2025  
Accepted 03.03.2025

**Corresponding author:**

eagavva@gmail.com

**ABSTRACT**

The article presents the results of research on the possibility of establishing rational methods of recycling return waste in the production of glazed fondant sweets. To achieve this goal, research was carried out in the production conditions of the KONTI LLC candy shop to establish the main technological operations where return waste is generated, to analyse the return waste and to determine the impact of its different amounts on the parameters of the technological process and the quality of finished products. As part of the experimental part, standard physical and chemical, quality research methods for semi-finished and finished products used to control the production of glazed sweets were used. The research results showed that the largest share of return waste in the production of glazed fondant sweets is generated at the stages of forming the cases and glazing them.

Therefore, an important aspect was to study the possibility of recycling such return waste, especially already glazed sweets, with minimal resource consumption and maintaining the high quality of finished products. It was found that the return waste can be introduced in its original form and in the form of syrups (broths) at different stages of production of sweets based on creme brulee fondant.

It has been established that the maximum possible proportion of return waste without deteriorating the quality of a new batch of products is achieved by using a combined processing method: part of the waste in the form of decoctions introduced at the stage of preparation of candy syrup and in its original form at the stage of its introduction at the stage of tempering the candy fondant mass, and the most energy-efficient method is to process glazed return waste at the stage of tempering the candy fondant mass based on creme brulee.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-7

---

## ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ В УПРАВЛІННІ ЯКІСТЮ ГЛАЗУРОВАНИХ ЦУКЕРОК З КОРПУСОМ НА ОСНОВІ ПОМАДИ КРЕМ-БРЮЛЕ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ЇХ ЗВОРОТНИХ ВІДХОДІВ

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

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

О. В. Дудзінський, аспірант

В. Ю. Солошенко

Національний університет харчових технологій

*У статті наведено результати досліджень зі встановлення раціональних способів переробки зворотних відходів глазурованих помадних цукерок. Визначено основні технологічні операції, де відбувається утворення зворотних відходів, проведено аналіз цих зворотних відходів і доведено вплив від їх внесення на параметри технологічного процесу виробництва та якість готових виробів, а також можливість переробки глазурованих зворотних відходів при виробництві цукерок на основі помади крем-брюле. Встановлено, що максимально можлива частка внесення зворотних відходів без погіршення якості продукції досягається шляхом внесення відходів у початковому вигляді на етапі темперування цукеркової помадної маси.*

**Ключові слова:** зворотні відходи, помадні цукерки, технологічні параметри, якість.

**Вступ.** Помадні цукерки з відносно невисокою ціною користуються стабільним попитом у споживачів серед усіх верств населення насамперед за рахунок високих органолептичних показників.

Основою помадних цукерок є цукрова, фруктова та молочна помади, до складу яких входить натуральна сировина: цукор, патока, фруктова сировина, молочні продукти, що й зумовлює високі споживчі характеристики виробів при досить помірній їх собівартості. Саме тому більшість вітчизняних кондитерських підприємств виготовляє цю групу цукерок у досить широкому асортименті.

Виробництво цієї групи цукерок відноситься до масового виробництва, вироби виготовляються на потоково-механізованих лініях з механізацією більшості процесів і частковою автоматизацією деяких ділянок виробництва. Однак повністю запобігти утворенню зворотних відходів при промисловому виробництві цукерок неможливо.

Існують виробничі ділянки, де недотримання чітких технологічних параметрів процесу може призводити до утворення напівфабрикатів і готових виробів неналежної якості, тому й досі залишається актуальним завдання щодо мінімізації утворення таких зворотних відходів і знаходження актуальних способів їх переробки, що дає змогу зменшити витрати підприємства на їх переробку.

Для вирішення цього актуального завдання була проведена низка спостережень за технологічним процесом виробництва цієї групи цукерок і серія досліджень на базі цукеркового цеху ТОВ «КОНТІ» в м. Костянтинівка.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Помадні цукерки виробляються з помадних мас, які поділяються на такі види: помада цукрова, помада молочна, помада крем-брюле та помада фруктова [1].

Складовими частинами цукрової помади є цукор, патока та вода. Молочна помада містить у своєму складі молочні продукти, в тому числі і вершкове масло. Молочна помада світло-коричневого забарвлення називається помадою крем-брюле. Фруктова

помада містить у своєму складі фруктово-ягідну сировину, переважно у вигляді пюре, що вноситься на етапі приготування рецептурної суміші для помадного сиропу.

Смакові властивості помади, крім рецептури, суттєво залежать від її консистенції, що характеризується співвідношенням твердої та рідкої фаз цього кондитерського напівфабрикату.

Метою процесу приготування напівфабрикату помади є отримання маси дрібно-кристалічної структури, тому для отримання помади необхідно забезпечити такі умови, при яких відбувається процес кристалізації й утворюються дрібні кристали розміром менше 10—12 мкм [2]. Дисперсний склад помадних мас значною мірою залежить від факторів, що впливають на процес кристалізації сахарози. Одним із вирішальних факторів є пересичення помадного сиропу, що залежить від вмісту сухих речовин у ньому. При збільшенні вмісту сухих речовин сиропу скорочується процес помадоутворення, частка кристалів великих розмірів знижується.

Смакові властивості цукерок на основі молочної помади та помади крем-брюле також залежать від аромату молочних продуктів, що входять до їх складу. Цей показник обумовлюється багатьма сполуками, що містяться в молоці, і особливо метилсульфідом і  $\delta$ -декалактоном. Остання сполука особливо характерна для термічно обробленого молока. При нагріванні молока і молочного жиру в умовах підвищеної вологості утворюються й інші сполуки, які надають продуктам характерний запах: метилкетони, ацетальдегід, фурфурол, ароматичні речовини, меланоїдини тощо [3].

Відмінності в приготуванні молочної помади крем-брюле полягають у наявності додаткової технологічної операції томління — тривалого нагрівання цукрово-паточкового-молочного сиропу. Змішування й томління компонентів здійснюється в дисуторі при температурі 95—107 °С протягом 40—50 хв [4]. За таких умов у сиропі відбувається інтенсивний процес меланоїдиноутворення. В результаті високої температури і тривалого нагрівання відбувається взаємодія редуруючих цукрів і білкових речовин з утворенням складних сполук меланоїдинів, які надають сиропу специфічний смак, аромат і темно-коричневе забарвлення.

Загальновізвано, що реакція меланоїдиноутворення (реакція Маяра) є комплексом неферментативних хімічних речовин за рахунок перетворень, які відбуваються послідовно та паралельно. Початкова стадія реакції починається із взаємодії нуклеофільних груп білків, пептидів, амінокислот з карбонільними групами у складі відновлених вуглеводів, а також альдегідів або жирів. Реакція супроводжується утворенням великої кількості низько- та високомолекулярних речовин (полімерів). На швидкість реакції утворення продуктів реакції Маяра впливає багато факторів, зокрема температура, час, активність води ( $a_w$ ), рН, масова частка вологи, хімічний склад, концентрація та співвідношення окремих компонентів, присутність кисню, а також деяких іонів металів (в т. ч. міді та заліза), вітамінів (в т. ч. аскорбінової кислоти), флавоноїдів [5, 6].

Молоко є своєрідною ідеальною основою для виникнення та перебігу реакції Маяра за рахунок відносно високого вмісту лактози, білків, жиру. Каталізаторами реакції виступають технологічні параметри, особливо тепловий вплив. Значення має тип молочних білків. Вважається, що казеїни, зазвичай, більш стабільні до дії високої температури порівняно з білками молочної сироватки. Згідно з нещодавно опублікованими дослідженнями взаємодії вуглеводів з окремими представниками основних груп білків молока встановлено, що, наприклад, реакційна здатність (активність)  $\beta$ -казеїну була приблизно на 45% нижчою, ніж у представників групи білків молочної сироватки  $\alpha$ -лактоальбуміну та  $\beta$ -лактоглобуліну [7].

Після операції томління рецептурну суміш із вмістом сухих речовин 78,0—82,0% і редуруючих речовин 8,9—11,0% фільтрують і перекачують у збірник-змішувач, звідки вона в міру необхідності подається в проміжну ємність, в якій зберігається при температурі 70—98 °С. Після фільтрування суміш направляють на уварювання, в процесі якого відбуваються різні процеси зміни цукрів: реакція інверсії сахарози, послідовна реакція розпаду цукрів з утворенням ангідридів, продуктів конденсації, оксиметилурфурулу, забарвлюючих речовин та органічних кислот. Це призводить до трансформаційних змін складу маси, її зовнішнього вигляду і смакових якостей.

У результаті цієї реакції утворюються забарвлені продукти, які впливають на смак і аромат помадного сиропу. При уварюванні під вакуумом цей напівфабрикат виходить менш забарвленим, але в ньому розвивається характерний смак пряженого молока. При уварюванні молочних помадних сиропів збільшується масова частка редууючих речовин.

Найбільш розповсюдженим способом формування корпусів помадних цукерок є відливання цукеркової маси в крохмальні форми. Перед відливанням помаду із помадозбивальної машини передають у темперувальні збірники, де змішують з різноманітними добавками і, як правило, підігрівають до більш високої температури: помада цукрова — 70—75 °С, помада молочна, крем-брюле — 70—85 °С.

У помадних масах з наявною твердою фазою у вигляді дрібних кристалів сахарози, на відміну від молочних, цей процес відбувається легко та швидко і залежить від швидкості охолодження маси. В початковий період, після відливання маси в крохмальні форми, процес кристалізації найбільш інтенсивно відбувається в зовнішніх шарах корпусу, а потім, у міру його охолодження, розповсюджується по всьому його об'єму. Тому помадні цукерки відрізняються однорідною суцільною кристалічною структурою [8].

Незважаючи на удосконалення технологічного обладнання та дотримання режимів виготовлення, повністю запобігти утворенню зворотних відходів при промисловому виробництві цукерок неможливо.

Під зворотними відходами кондитерського виробництва розуміють санітарно-доброякісні відходи, одержані на окремих фазах у вигляді сировини, напівфабрикатів і готових виробів. До зворотних відходів не належать відходи, викликані порушенням вимог нормативно-технічної документації, санітарно-недоброякісні відходи і відходи, які мають перероблятися протягом зміни на тій же стадії, в тій же бригаді і в ті ж сорти.

Утворені у процесі виробництва санітарно-доброякісні відходи дозволяється використовувати при повторному виробництві з відповідним перерахунком рецептур.

Нині зворотні відходи глазуrowаних цукерок переробляють одним із двох способів. При першому способі відходи розігрівають у варильному котлі до 70 °С і протирають через протирочну машину. Отриману масу вводять у ті сорти цукерок, корпуси яких містять какао-продукти, при цьому кількість сировини зменшують з урахуванням кількості введених компонентів. Другий спосіб полягає в тому, що відходи розігрівають у варильному котлі до 35 °С і відокремлюють на ситі глазур, яку збирають в окрему ємність. Корпуси, що залишилися на ситі, переносять в інший варильний котел і розігрівають до 70 °С (з додаванням води або без неї), після чого готують густий сироп або масу, яку вводять у помадний сироп, попередньо зробивши перерахунок всіх компонентів, що вводяться, або в темперувальну машину [9]. Другий спосіб є більш ресурсозатратним, тому зараз на більшості підприємств не відокрем-

люють глазур від корпусу, а заглазовані відходи використовують у вигляді розварів (сиропів) або в подрібненому вигляді при приготуванні помадних мас темного кольору, що містять у своєму складі какао-продукти.

Саме тому пошук шляхів зниження кількості зворотних відходів і визначення раціональних способів їх перероблення зі збільшенням їх кількості в рецептурі виробів без погіршення якості готових цукерок залишається доволі актуальним завданням, що потребує вирішення.

**Мета досліджень** полягає в аналізі причин появи зворотних відходів при виробництві глазури помадних цукерок на основі помади крем-брюле, визначенні раціональних способів переробки зворотних відходів у виробничих умовах, дослідженні впливу внесення різної кількості зворотних відходів на якість нової партії цукерок та формулюванні рекомендацій щодо переробки зворотних відходів глазури помадних цукерок.

**Матеріали і методи.** Проводилися дослідження зразків помадних цукерок, що були виготовлені на основі помади крем-брюле у виробничих умовах ТОВ «КОНТІ». Виготовлення зразків цукерок здійснювалось на потоково-механізованій лінії з виробництва помадних цукерок з відливанням корпусів у крохмальні форми. Контроль за параметрами кожної технологічної операції здійснювався згідно з розробленими на підприємстві технологічними інструкціями з виробництва цукерок з помадними корпусами та системою НАССР.

Відбір проб для фізико-хімічних досліджень зразків проводили згідно з ДСТУ 4619:2006 [10]. Визначення фізико-хімічних показників напівфабрикатів і готової продукції проводили загальноприйнятими в кондитерському виробництві методами [11]. Напівфабрикати і готову продукцію досліджували органолептично за ДСТУ 4683:2006 [12], масову частку вологи у сировині та напівфабрикатах визначали прискореним методом за допомогою сушильної шафи СЕШ-1 та рефрактометричним методом [13]. Визначення масової частки редукуючих речовин у напівфабрикатах і готових виробів здійснювали фериціанідним методом за ДСТУ 5059:2008 [14], що ґрунтується на взаємодії редукуючих цукрів з іоном заліза (III), взятим у надлишку.

**Результати досліджень.** Для вирішення актуального завдання збільшення частки перероблення зворотних відходів при виробництві цукерок з помадними корпусами на першому етапі роботи було здійснено аналіз технології виробництва помадних цукерок на основі помадної маси крем-брюле з метою виявлення основних причин появи зворотних відходів. Проведений аналіз дав змогу виявити основні технологічні операції, на яких утворюються зворотні відходи, що можуть бути перероблені при виробництві нової порції готових виробів, а також санітарні відходи, які заборонено переробляти.

З'ясовано, що зворотні відходи утворюються на етапі формування цукерок, вони відбраковуються під час інспекції помадних корпусів, що надходять на глазурування. Як правило, відбраковуються корпуси, що мають дефекти зовнішнього вигляду: неправильну форму, розміри, вагу, механічно пошкоджені, не відповідають за смаком, кольором, запахом найменуванню продукції, що виробляється, тощо. Основна причина такого браку є недотримання режимів на етапі формування цукеркових корпусів або через використання неякісного напівфабрикату цукеркової помадної маси, що призводить до погіршення структуроутворення корпусів цукерок. Друга стадія, де відбувається фіксація зворотних відходів, — це інспектування вже заглазованих цукерок, що надходять на загортання та пакування, вони можуть бути відбракованими через неякісне нанесення глазури: часткове перекриття корпусу, невідповідність

відсотку глазури рецептурі цукерок, неправильна форма заглазованих цукерок через напливи глазури тощо.

З метою економії ресурсів існує необхідність дослідження можливості переробки зворотних відходів при приготуванні нових партій продукції з встановленням можливості збільшення частки зворотних відходів у готових виробках без погіршення їх якості.

Переробка зворотних відходів при виробництві цього виду цукерок можлива шляхом:

- приготування розчинів зі зворотних відходів з концентрацією 70—75% (розварів) з подальшим їх додаванням на етапі приготування нової порції цукеркового сиропу;

- внесенням зворотних відходів у цукеркову помадну масу на етапі її темперування перед формуванням.

На першому етапі експериментальної частини були проведені дослідження зворотних відходів при виробництві цукерок на основі помади крем-брюле «Веселий боцман Амаретто». Досліджували зразки зворотних відходів різних партій цукерок, у яких визначали основний фізико-хімічний показник, що контролюється в цьому виді цукерок і який може суттєво впливати на перебіг процесу виготовлення нової партії виробів з використанням цих відходів, зокрема масову частку редукуючих речовин, що визначалася в умовах лабораторії підприємства. Отримані результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Показники якості зворотних відходів помадних цукерок

| Об'єкт контролю                       | Контрольований параметр             | Граничне значення параметра | Фактичні значення |          |          |          |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------|----------|----------|----------|
|                                       |                                     |                             | партія 1          | партія 2 | партія 3 | партія 4 |
| Зворотні відходи. Корпус неглазований | Масова частка редукуючих речовин, % | Не більш 16                 | 11,4              | 11,0     | 11,3     | 11,0     |
| Зворотні відходи. Корпус глазований   | Масова частка редукуючих речовин, % | Не більш 16                 | 11,0              | 11,5     | 11,4     | 11,3     |

Аналізуючи отримані результати, робимо висновок, що вміст редукуючих речовин у зворотних відходах корпусу та заглазованої цукерки в межах норми.

Одним із шляхів перероблення зворотних відходів цукеркового виробництва є переведення їх у розчин з подальшим використанням цього розчину під час приготування нової порції рецептурної суміші для помадного сиропу, тому в наших дослідженнях було проведено приготування сиропів на основі досліджуваних відходів (розварів). Розвари готували з концентрацією сухих речовин в межах 70—75%. Для приготування розварів використовували суміш зворотних відходів корпусів і глазованих цукерок без попереднього відокремлення з них глазури.

Переробка зворотних відходів саме заглазованих цукерок стала можлива через те, що, на відміну від цукрової чи молочної помади, помада крем-брюле має більш насичений колір і внесення глазури не суттєво змінить колір цього напівфабрикату, крім того, цукерки «Веселий боцман Амаретто» мають у своєму складі какао-порошок, що надає корпусу темного кольору. Це дає змогу прогнозувати можливість переробки більшої частки саме заглазованих зворотних відходів.

На етапі приготування розварів контролювали масову частку сухих і редукуючих речовин в цих напівфабрикатах. Результати досліджень наведені в табл. 2.

**Таблиця 2. Показники якості розварів зі зворотних відходів помадних цукерок**

| Об'єкт контролю                                       | Контрольований параметр             | Граничне значення параметра | Фактичні значення |
|---|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Розвари зі зворотних відходів.<br>Корпус глаз/неглаз. | Масова частка сухих речовин, %      | 70—75                       | 75,2/75,0/74,9    |
|   | Масова частка редукуючих речовин, % | Не більш 16                 | 11,7              |

При приготуванні розварів спостерігається несуттєве збільшення масової частки редукуючих речовин, що можна пояснити частковим гідролізом сахарози на етапі приготування сиропів зі зворотних відходів. Але це значення не перевищує допустимих норм. Також треба відмітити, що процес гідролізу відбувається неінтенсивно через відсутність у рецептурі досліджуваних цукерок кислоти як смакового компонента, яка б могла суттєво впливати на показники якості розварів, збільшуючи масову частку редукуючих речовин.

На першому етапі у виробничих умовах була випробувана максимальна кількість зворотних відходів, які вносили у вигляді розвару, що становить 4,8% до загальної кількості готових виробів. Проведені спостереження з фіксацією параметрів і показників якості напівфабрикатів наведено в табл. 3.

**Таблиця 3. Вплив внесення зворотних відходів у вигляді розварів у кількості 4,8% на технологічний процес виробництва цукерок**

| Етапи                              | Об'єкт контролю                 | Контрольований параметр            | Періодичність контролю      | Граничне значення параметра | Фактичне значення параметра при проведенні виробничих випробувань |
|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Уварювання сиропу                  | Цукрово-патоково-молочний сироп | Показник кулісного механізму       | Не менш ніж 1 раз за зміну  | 6—9                         | 8   |
|                                    |                                 | Кінцева температура уварювання, °С |                             | 110—125                     | 120   |
|                                    |                                 | Тиск пари, МПа                     |                             | 1,5—3,5                     | 3,5   |
| Приготування помадної маси         | Помадна маса                    | Температура помадної маси, °С      | Не менш ніж 2 рази за зміну | Не більш 80                 | 80,0  |
|                                    |                                 | Масова частка вологи, %            | Не менш ніж 2 рази за зміну | 9—11,7 (оптим. 10,5)        | 10,1  |
| Формування та вистоювання корпусів | Цукеркова маса                  | Температура цукеркової маси, °С    | Не менш ніж 2 рази за зміну | Не більш 85                 | 87,0  |
|                                    |                                 | Масова частка вологи, %            | Не менш ніж 2 рази за зміну | 9,0—11,7 (оптим. 10,6)      | 10,1  |

Продовження таблиці 3

|  |   |                             |                      |      |
|--|---|-----------------------------|----------------------|------|
|  | Масова частка редукуючих речовин, %       | Не менш ніж 2 рази за зміну | Не більш 16          | 11,6 |
|  | Температура корпусу після охолодження, °C | Не менш ніж 2 рази за зміну | 19—22 (оптим. 20—21) | 20   |

Було відмічено, що використання зворотних відходів при приготуванні помадних цукерок на основі молочної помади крем-брюле у вигляді розвару впливає на більш інтенсивне «заварювання» (утворення накипу у вигляді денатурованих білків, що містяться в молочній сировині) варильної колонки, а також спостерігалось підвищення в'язкості цукеркового сиропу.

На етапі формування корпусів цукерок у крохмальні форми при стандартних режимах роботи формуючого обладнання спостерігалось утворення «хвостів», що свідчить про збільшену в'язкість цукеркової маси, тому виникла технологічна необхідність підвищити температуру на 2 °C вище верхньої межі: до 87 °C.

Провівши оцінку якості отриманих зразків цукерок при спрацюванні відходів у вигляді розварів визначено, що при органолептичній оцінці відмічалася більш в'язка консистенція зразків цукерок порівняно з контрольним зразком, що, напевно, пов'язано з більшою в'язкістю помадного сиропу і, як наслідок, гальмування процесу кристалізації на етапі помадоприготування, тому, вочевидь, частка твердої фази помадної маси буде меншою, ніж у контрольному зразку цукерок.

Щодо технологічності такого шляху спрацювання відходів, то було прийнято рішення вважати його нетехнологічним, адже ускладнюється процес формування виробів, що може призводити до утворення ще більшої кількості зворотних відходів у вигляді формування корпусів з «хвостами», що спричиняє інтенсивне засмічення крохмалю частиками цукерок. Для подолання цієї проблеми необхідно підвищувати температуру цукеркової маси на етапі темперування, а це призводить до погіршення початкової дрібнокристалічної консистенції в бік збільшення кристалів твердої фази цукеркової помадної маси.

З точки зору економії енергоресурсів досліджений шлях переробки передбачає додаткові їх витрати на етапі приготування самого розвару та підтримання підвищеної температури на етапі темперування й формування корпусів цукерок. Тому наступний комплекс досліджень з виробничими випробуваннями був здійснений шляхом введення частини відходів у вигляді розвару, а іншої частини — у вигляді подрібнених зворотних відходів на етапі темперування цукеркової помадної маси в темперувальній машині. З огляду на попередні дослідження, внесення розвару на етапі приготування сиропу було зменшено вдвічі і становило 48 кг розвару, що містить 40 кг зворотних відходів. А на етапі темперування на порцію помадної маси було внесено ще 15 кг суміші зворотних відходів (7 кг глазуrowаних цукерок + 8 кг корпусу). Внесення зворотних відходів за такою схемою підвищило загальний відсоток зворотних відходів до 6,1% на 1 т готової продукції.

Спостереження за ходом технологічного процесу при переробці зворотних відходів таким способом продемонстрували, що зниження кількості зворотних відходів у вигляді розварів вплинуло на зменшення в'язкості помадного сиропу, що, у свою чергу, позитивно позначилося на операції темперування та формування корпусів цукерок без необхідності підвищення температурних параметрів цих технологічних

стадій. Формування корпусів відбувалося без ускладнень. Тривалість цієї операції була однаковою з тривалістю вистоювання корпусів, що виготовляються без використання зворотних відходів. Операція глазурування зразків корпусів теж відбувалася без додаткового корегування параметрів.

Визначення органолептичних і фізико-хімічних показників у досліджуваних зразках продемонструвало їх відповідність вимогам нормативної документації на виріб, тому цей комбінований спосіб перероблення є доволі перспективним до використання. Крім цього, такий комбінований спосіб дає змогу збільшити частку зворотних відходів до 6,1%. Однак залишається ризик «заварювання» змійовика варильної колонки, що потребуватиме додаткових зупинок у роботі потоково-механізованої лінії на додаткове промивання варильного обладнання. Також приготування розварів зі зворотних відходів є доволі енергозатратною додатковою операцією, адже потребуватиме встановлення додаткового варильного обладнання та використання додаткових ресурсів.

Враховуючи цю обставину, було вирішено дослідити можливість переробки зворотних відходів без приготування розварів, а вносити їх лише на етапі темперування нової порції цукеркової помадної маси в кількості 4,0%, 6,4% та 9,4% до загального виходу готових виробів (1 т). Результати проведених досліджень зведено в табл. 4.

Таблиця 4. Вплив зворотних відходів, внесених на етапі темперування цукеркової маси, на технологічний процес виробництва цукерок

| Етапи                              | Об'єкт контролю | Контрольований параметр                   | Граничне значення параметра | Фактичне значення параметра при проведенні виробничих випробувань |      |       |
|------------------------------------|-----------------|---|-----------------------------|---|------|-------|
|                                    |                 |   |                             | Дозування зворотних відходів, %                                   |      |       |
|                                    |                 |   |                             | 4,0   | 6,4  | 9,4   |
|                                    |                 | Тиск пари, МПа                            | 1,5—3,5                     | 3,5   | 3,5  | 3,5   |
| Приготування цукеркової маси       | Цукеркова маса  | Температура цукеркової маси, °С           | Не більш 85                 | 83,5  | 84,0 | 85,0  |
|                                    |                 | Масова частка редуруючих речовин, %       | Не більш 16                 | 11,1  | 11,4 | 11,2  |
|                                    |                 | Тривалість темперування, хв               | 24—26 хв                    | 24  | 25   | 30—31 |
| Формування та вистоювання корпусів | Цукеркова маса  | Температура цукеркової маси, °С           | Не більш 85                 | 84,0  | 84,0 | 85,0  |
|                                    |                 | Масова частка вологи, %                   | 9,0—11,7 (оптим. 10,6)      | 10,6  | 10,8 | 10,5  |
|                                    |                 | Масова частка редуруючих речовин, %       | Не більш 16                 | 11,0  | 11,2 | 11,1  |
|                                    |                 | Температура корпусу після охолодження, °С | 19—22 (оптим. 20—21)        | 20  | 20   | 20    |
|                                    |                 | Вага 10 штук напівфабрикату корпусу       | 137—144 (оптим. 141)        | 140   | 141  | 142   |

Було відмічено, що зі збільшенням внесеної частки зворотних відходів виникає необхідність збільшення тривалості операції темперування з 24 хв до 31 хв. Збільшення тривалості темперування пов'язано з необхідністю рівномірного розподілення зворотних відходів в об'ємі порції цукеркової помадної маси.

На етапі формування спостерігалось ускладнення формування корпусів з цукеркової маси з внесенням більшої кількості зворотних відходів при звичайних параметрах і виникала необхідність збільшення температури цукеркової маси до максимальної 84—85 °С.

Показники якості зразків готових помадних цукерок, отриманих з використанням зворотних відходів, що вносилися на стадії темперування, наведені в табл. 5.

Таблиця 5. Показники якості зразків помадних цукерок з використанням зворотних відходів, що вносяться на етапі темперування

| Показники                            | Характеристика показника згідно з нормативною документацією  | Відповідність зразка з різним дозуванням зворотних відходів на етапі темперування вимогам нормативної документації |            |   |
|--------------------------------------|--|--|------------|---|
|                                      |  | 4,0%   | 6,4%       | 9,4%  |
| Смак, колір, запах, зовнішній вигляд | Цукерки продовгуватої прямокутної форми, глазуровані кондитерською глазур'ю без добавок. Корпус складається з помади крем-брюле з додаванням рослинного жиру та какао-порошку з додаванням лікєру та ароматизатора | Відповідає   | Відповідає | Відповідає, однак консистенція менш однорідна |
| Масова частка вологи, %              | Не більше 16,0   | 7,2  | 7,1        | 7,1   |
| Масова частка редукуючих речовин, %  | Не більш 16,0  | 11,1   | 11,2       | 11,0  |

Аналіз отриманих зразків продемонстрував, що за фізико-хімічними показниками вони відповідали вимогам нормативної документації, однак за органолептичними показниками в зразку з максимальною кількістю внесених зворотних відходів відмічалася неоднорідна консистенція, навіть з урахуванням збільшення часу операції темперування. Зважаючи на цю обставину, було вирішено рекомендувати перероблення зворотних відходів таким способом у кількості не більше 6,4%.

**Висновки.** У результаті виробничих випробувань встановлено, що технологічним способом переробки зворотних відходів є комбінований спосіб, що передбачає їх внесення у вигляді розвару на етапі приготування сиропу з одночасним внесенням зворотних відходів на етапі темперування цукеркової маси. Таким способом можна досягти спрацювання різних видів зворотних відходів (корпус, глазуровані цукерки) в кількості 6,1% на 1 т готових виробів без погіршення якості готових виробів і суттєвої зміни параметрів технологічних операцій зі збереженням продуктивності обладнання.

Найбільш ресурсозощадливим способом виявився спосіб внесення зворотних відходів у вигляді зворотних відходів на етапі темперування цукеркової помадної маси.

Встановлено, що дозування зворотних відходів можливе до 6,4% на 1 т готових виробів без погіршення якості готової продукції.

Проведені дослідження демонструють можливості переробки не лише корпусів, а й глазуrowаних цукерок. Також можливе збільшення частки зворотних відходів при виробництві глазуrowаних помадних цукерок з корпусом з помади крем-брюле майже на 50% порівняно з чинними рекомендаціями (3,7%), що стимулює продовжувати розпочаті дослідження.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. ДСТУ 4135:2021 Цукерки. Загальні технічні умови. [Чинний від 2021-10-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2021. 21 с.
2. Hartel, R. W. (2018). *Confectionery Science and Technology*: ebook / R. W. Hartel, J. H. Von Elbe, R. Hofberger. USA: Springer International Publishing.
3. Delgado-Andrade, C., Fogliano, V. (2018). Dietary advanced glycosylation end-products (dAGEs) and melanoidins formed through Maillard reaction: Physiological consequences of their intake. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9, 271—291.
4. Crestani, C. E., Bernardo, A., Costa, C. B., Giulietti, M. (2018). Experimental data and estimation of sucrose solubility in impure solutions. *Journal of Food Engineering*, 218, 14—23.
5. Nguyen, H. T., van der Fels-Klerx, H. J., van Boekel, M. A. (2013). N-ε- (carboxymethyl) lysine: A Review on analytical methods, formation, and occurrence in processed food, and health impact. *Food Reviews International*, 30(1), 36—52.
6. Bund, R. K., Hartel, R. W. (2010). *Crystallization in foods and food quality deterioration*. Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages Woodhead Publishing Series in Food Science, *Technology and Nutrition*, 186—215.
7. Vistoli, G., De Maddis, D., Cipak, A. et al. (2013). Advanced glycoxidation and lipoxidation end products (AGEs and ALEs): An overview of their mechanisms of formation. *Free Radic Res.*, 47, 3—27.
8. 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.
9. Дорожинська, О. С., Кохан, О. О. (2021). Зміна якості неглазуrowаних цукерок кристалічної структури на основі комбінації цукрів лактози та фруктози протягом їх зберігання. *Харчова промисловість*, 30, 18—28.
10. ДСТУ 4619:2006 Вироби кондитерські. Правила приймання, методи відбору та підготовки проб. [Чинний від 2007-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 10 с.
11. *Технологія та лабораторний практикум кондитерських виробів і харчових концентратів: навчальний посібник / за ред. Дорохович А. М. та Ковбаси В. М.* Київ: Інкос, 2015.
12. ДСТУ 4683:2006 Вироби кондитерські. Методи визначення органолептичних показників якості, розмірів, маси нетто і складових частин. [Чинний від 2007-10-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 8 с.
13. ДСТУ 4910:2008 Вироби кондитерські. Методи визначення масових часток вологи та сухих речовин. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 13 с.
14. ДСТУ 5059:2008 Вироби кондитерські. Методи визначання цукрів. [Чинний від 2010-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 31 с.

УДК 637.3.05

## COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL EFFICIENCY OF VARIOUS METHODS OF FORMULATING CREAM MIXTURES

I. Bartoshak, G. Polishchuk

National University of Food Technologies

---

### Key words:

cream cheese,  
thermoacid coagulation,  
enzymatic coagulation,  
protein,  
fat

---

### Article history:

Received 01.04.2025

Received in revised form  
04.04.2025

Accepted 14.04.2025

---

### Corresponding author:

milknuft@i.ua

---

### ABSTRACT

The article analyzes the assortment, chemical composition, and technological features of various types of cream cheeses. It reveals the lack of systematic information regarding the technological efficiency of different methods of curdling cream mixtures for producing cream cheeses, the main ones being enzymatic and heat-acid coagulation methods. Based on the analysis of a set of organoleptic and physicochemical indicators of cream curds obtained using the mentioned coagulation methods, it was proven that the following factors significantly influence the process: the type of starter culture; the combination of starter culture and rennet enzyme; the addition of whey protein concentrate; and the type of coagulant. It was established that in the case of enzymatic curdling of cream mixtures, a cultured milk cheese starter culture containing mesophilic lactococci should be used, together with the addition of a rennet enzyme. A sour cream starter culture, which contains mesophilic, including aroma-producing lactococci, resulted in the formation of a loose curd with low syneresis capacity. In heat-acid coagulation curdling of cream mixtures, it is advisable to use a 10% solution of acetic acid along with the additional inclusion of 1% KSB-UF whey protein concentrate. Citric acid led to the formation of an excessively pasty curd and significant losses of dry matter with whey compared to acetic acid. The highest transfer of raw material components into cream curds was observed with heat-acid coagulation compared to enzymatic curdling. To ensure a higher degree of dry matter concentration in cream cheeses, the duration of cold self-pressing of cream curds should be more than 2 hours at  $10 \pm 2$  °C. The research results will be considered in improving technological schemes for producing various types of cream cheese.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-8

---

# ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ СПОСОБІВ ЗСІДАННЯ ВЕРШКОВИХ СУМІШЕЙ

І. В. Бартошак, аспірант, ORCID ID: 0009-0009-3659-5927

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

Національний університет харчових технологій

У статті проаналізовано хімічний склад та основні способи виробництва вершкових сирів. Виявлено відсутність систематизованої інформації щодо технологічної ефективності ферментативного і термокислотного зсідання вершкових сумішей. За результатами проведеного дослідження встановлено доцільність спільного використання закваски і ферменту при виробництві вершкового сиру ферментативним зсіданням. У разі одержання вершкового сиру термокислотним зсіданням виявлено більшу технологічну активність оцтової кислоти, порівняно з лимонною кислотою, а також підвищення виходу сиру при внесенні у вершки концентрату сироваткових білків.

**Ключові слова:** вершковий сир, термокислотне зсідання, ферментативне зсідання, білок, жир

**Вступ.** М'які вершкові сири (англ. *cream cheese*) одержують шляхом ферментативної або термокислотної коагуляції молочних і вершкових сумішей з відділенням сироватки та подальшим самопресуванням білково-жирових згустків [1]. Для ферментації вершків, зазвичай, застосовують закваски, які містять мезофільні молочнокислі бактерії роду *Lactococcus* і *Leuconostoc*. Підвищити ефективність процесу зсідання вершків можливо додатковим застосуванням сичужного ферменту. Технологічний цикл виробництва вершкових сирів, які відносять до свіжих м'яких сирів, доволі короткий за відсутності процесу визрівання. У той ж час найбільш тривалим і працездатним є процес відділення сироватки від білково-вершкового згустку, що потребує додаткового вивчення [2].

Відповідно до комерційного опису і класифікації вершкового сиру, сиру Neufchâtel та інших м'яких сирів, розробленої Міністерством сільського господарства США (USDA — United States Department of Agriculture), традиційний вершковий сир віднесено до типу I класу А. Цей сир має кисломолочний і злегка діацетиловий смак і запах, однорідний колір — від білого до світло-кремового, гладку текстуру, без грудочок, без слідів розтріскування і відокремлення сироватки [3].

Жирність вершкових сирів може досягати 70% і більше в сухій речовині, тому вони здатні втрачати форму при кімнатній температурі. Сири цієї групи виготовляють як без наповнювачів, так і з солодкими, солоними та пряними наповнювачами [2]. Зокрема, для надання сиру певних смакових характеристик використовують часник, трави (1,6%), перець чорний молотий (1,5%), суміш волоського і лісового горіхів (до 5%), родзинки, інжир і розмарин (0,5%) [4]. Строк зберігання вершкових сирів за температури 1—5 °С, зазвичай, становить до 14 діб, а при застосуванні сорбінової кислоти або сорбату калію у кількості 0,1% може бути подовжений до 30 діб [5]. Вершкові сири здавна користуються високою популярністю серед споживачів у різних країнах світу, але в Україні асортимент цих продуктів поки що доволі вузький.

Саме це викликає науковий інтерес з метою адаптації існуючих технологій вершкових сирів до вітчизняної сировинної бази, технічних можливостей підприємств і вподобань українських споживачів.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Вершкові сири дуже популярні в країнах Європи та Америки [5], де виготовляють національні різновиди цих продуктів з доволі широким діапазоном вмісту жиру. Згідно з вимогами USDA, у класичному вершковому сирі вміст молочного жиру, зазвичай, складає від 33% і більше від загальної маси продукту, вміст вологи — не більше 55%, рН — в діапазоні від 4,4 до 4,9. Вершковий сир зі зниженим вмістом жиру містить вологи – не більше 70%, жиру — не менше 16,5%, рН — від 4,4 до 5,1. Також унормовано склад легкого вершкового сиру за вмісту вологи не більше 70%, жиру — не більше 16,5%, а рН в діапазоні 4,4—5,2. Вміст солі для всіх видів вершкового сиру має не перевищувати 1,4% [6]. У Канаді сир містить до 30% жиру [7]. Італійський вершковий сир «Mascarpone» з оригінальним свіжим солодкуватим смаком виготовляють з вершків жирністю 25%, що обумовлює вміст молочного жиру до 75% і вище від загального вмісту сухих речовин і високу калорійність — більше 400 ккал/100 г [8]. До вершкових також відносять французькі сири «Chavroux» і «Petit-suisse», а також норвезький «Snofrisk», склад і жирність яких можуть змінюватися, залежно від виду сиру. Різновид французьких вершкових сирів «Neufchâtel» містить вологи не більше 65% і молочного жиру не менше 20%. Типовим представником американського вершкового сиру є сир «Філадельфія», жирність якого у середньому становить 21,5%. До складу цього сиру можуть входити концентрати сироваткових білків, сіль, стабілізатори, лимонна кислота [9]. В Україні спостерігається тенденція до зростання виробництва саме цієї групи сирів, зокрема крем-сиру ТМ Président, сиру вершкового «Філадельфія Українська» ТМ 60% жирності у сухій речовині ТМ «БІАГР» та ін., але вітчизняний ринок вершкових сирів поки що знаходиться на початковому етапі розвитку.

Отже, органолептичні та фізико-хімічні характеристики сиру вершкового у різних країнах світу суттєво варіюють відповідно до національних вподобань споживачів і сучасних тенденцій зміни попиту на харчові продукти за вмістом жиру та калорійністю [10]. Так, за вмістом жиру в нормалізованій суміші розрізняють сир подвійний вершковий (жирність вихідної суміші 9—15%) та сир одновершковий (жирність вихідної суміші 4,5—5%). Жирність продукту в сухій речовині залежить від співвідношення між вмістом сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ) і жиром у нормалізованій вихідній суміші. Наприклад, за підвищення масової частки жиру в суміші від 9 до 15% і відповідного зниження вмісту СЗМЗ від 8,0% до 7,5% масова частка жиру у сирі підвищується від 33,0 до 35,7%, а масова частка жиру в сухій речовині сиру варіює у межах від 53 до 54% [11].

Згідно з класичними технологічними схемами сухі речовини концентрують відділенням частини сироватки саме з гарячого згустку, що інтенсифікує цей процес, забезпечує високі мікробіологічні показники готового продукту та подовжує строки його зберігання [12]. Загалом, технологія вершкового сиру, одержуваного ферментацією вершкових сумішей, складається з таких технологічних операцій [11]: нормалізація молока (вершків) за вмістом жиру в діапазонах 8—15% і 4—5%; гомогенізація молочно-вершкової суміші; пастеризація молочно-вершкової суміші; коротка або тривала ферментація молочно-вершкової суміші до досягнення рН 4,5—4,8, що обумовлено температурою ферментації та кількістю закваски; перемішування і нагрівання згустку; відділення сироватки самопресуванням, центрифугуванням або

ультрафільтрацією; внесення в сирну масу солі і стабілізатора; холодне або гаряче (подрібнення, перемішування, нагрівання) пакування; зберігання вершкового сиру.

На відміну від технологій натуральних сичужних сирів, при виробництві вершкових сирів гомогенізація молока або вершків є обов'язковою і застосовується з метою зменшення розмірів жирових кульок і збільшення поверхні поділу фаз «жир—плазма», яка активно адсорбує білки, головним чином казеїн. Вкриті казеїном жирові кульки як активні частинки наповнювача включаються в структуру білкових кислотних гелів і зміцнюють їх [13]. Отже, жировий мікрогель вершкового сиру складається з агрегованих кластерів, утворених вкритими білком кульками молочного жиру, і пор різних розмірів, заповнених сироваткою. Підвищення кислотності молока покращує стабільність індукованих кислотою утворених білково-жирових просторових структур. Зважаючи на це, виникає можливість створювати продукти з меншим вмістом жиру, але із сенсорними властивостями, подібними до властивостей повножирних вершкових сирів шляхом модифікації технологічних прийомів [14, 15].

В інших описах технологічного процесу виробництва вершкових сирів є деякі відмінності. Так, для прискорення процесу утворення згустку, особливо за низької жирності вершків, застосовують сичужний фермент Одержаний самопресуванням згусток підпресовують і для подовження тривалості зберігання у продукт додають сорбінову кислоту та її солі. Окремим питанням є визначення раціонального вмісту кухонної солі у вершкових сирах, оскільки цей інгредієнт суттєво впливає на сенсорні і фізико-хімічні властивості готового продукту [16]. В Україні крем-сир «Філадельфія» виготовляють згідно з ТУ У 10.5-33548609-018:2021 «Крем-сири. Технічні умови». Продукт містить до 85% вологи, не менше 4% білка і до 20—75% жиру в сухій речовині. Технологія такого сиру подібна до технології плавлених сирів і передбачає попереднє одержання кислотно-сичужного сиру кисломолочного 5-відсоткової жирності, який механічно подрібнюють у кутері до пастоподібного стану з подальшим внесенням 30-відсоткових вершків, зневодненого молочного жиру, солі, камеді і стабілізаційної системи. Одержану суміш інтенсивно перемішують, підігрівають до температури вище 90 °С, гомогенізують і фасують при 70—75 °С.

Принципово іншим є спосіб коагуляції вершків у технології вершкового сиру «Mascarpone». Жирність цього сиру варіює від 44 до 47%, тому він може містити понад 80% жиру в сухій речовині [17]. За іншим джерелом інформації цей сир може містити 45—55% жиру, 44—50% вологи, 7—8% білка і 0,5—0,7% золи [18]. «Mascarpone» одержують з гомогенізованих вершків термокислотним зсіданням білків при 95 °С за прямого підкислення 10-відсотковими розчинами лимонної, молочної, винної або оцтової кислот (10 мл/кг) з подальшим дренажем сироватки тривалістю до 20 год, гомогенізацією та пакуванням.

Отже, технології вершкових сирів мають суттєві відмінності залежно від складу вихідної сировини, способів коагуляції білків і нормативних показників готової продукції. Така різноплановість викликає потребу у проведенні порівняльного аналізу технологічної ефективності різних способів коагуляції вершків (термокислотне зсідання або ферментація) як вагомих чинників у технології вершкових сирів для визначення найкращого варіанта зсідання вершкових сумішей з найменшими втратами цінних компонентів вихідної високовартісної сировини.

**Мета досліджень:** проведення порівняльного аналізу різних способів зсідання вершків у технології вершкового сиру для визначення найбільш раціональних технологічних рішень.

**Матеріали і методи.** Модельні зразки вершкового сиру готували з гомогенізованих пастеризованих вершків, що містять 10,5% жиру і 3,5% білка з метою одержання сиру з унормованими показниками за вмістом вологи (не більше 55%) і вмістом молочного жиру (не менше 33%), відповідно до рекомендацій USDA [3, 6]. Згідно зі специфікацією сиру вершкового, його активна кислотність має бути у межах від 4,4 до 4,9 од. рН, тому за критерій повноти ферментації або термокислотного зсідання вершків було прийняте значення цього показника — не вище 4,9 од. рН.

Оскільки в технології вершкових сирів гомогенізація є рекомендованою технологічною операцією, що забезпечує більший вміст жиру в білковому згустку за рахунок кращого утримання жирових кульок всередині білкового гелю [19], для проведення дослідження вершки гомогенізували за допомогою лабораторного гомогенізатора-диспергатора 15М-8ТА «Lab Homogenizer & Sub-Micron Disperser».

Для вивчення технологічної ефективності різних способів коагуляції білків вершкові сирні згустки одержували двома способами — ферментативним і термокислотним зсіданням вершків.

Ферментативний спосіб є традиційним для виробництва більшості вершкових сирів. Він передбачає ферментацію нормалізованих гомогенізованих пастеризованих вершків закваскою, що містить мезофільні молочнокислі бактерії, за можливого додаткового внесення молокозсідального ферменту. У цьому дослідженні вершки пастеризували при 88 °С без витримання, гомогенізували за тиску 10±2 МПа і температури 70±2 °С, охолоджували до температури 28±2 °С, вносили розраховану кількість закваски і проводили ферментацію.

Для одержання білково-жирових згустків використовували закваску двох видів:

- для сиру кисломолочного «Іпровіт» (склад: *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*, *Lactococcus lactis* subsp. *Diacetilactis*);
- для сметани «Vivo» (склад: *Lactococcus lactis* ssp. *Lactis*, *Lactococcus lactis* ssp. *Cremoris*, *Lactococcus lactis* ssp. *Diacetilactis*, *Streptococcus salivarius* ssp. *Thermophilus*).

Для інтенсифікації процесу зсідання у двох зразках застосовували фермент для сирів — СНУ-МАХ М 1000 (Данія). Закваску і фермент вносили у вершки в кількостях, рекомендованих виробниками.

Для першої групи зразків (№ 1—4) було змодельовано процес кислотного і кислотного-сичужного зсідання вершків:

- зразок № 1: вершки ферментували закваскою для сиру кисломолочного;
- зразок № 2: вершки ферментували закваскою для сметани;
- зразок № 3: вершки ферментували закваскою для сиру кисломолочного і ферментом СНУ-МАХ М 1000;
- зразок № 4: вершки ферментували закваскою для сметани і ферментом СНУ-МАХ М 1000.

Одержані згустки нагрівали до 45—55 °С і відділяли сироватку самопресуванням на фільтрувальній тканині при температурі 10—14° С впродовж 2 годин.

Інший, термокислотний спосіб зсідання вершків, є типовим для технології сиру «Mascarpone». Цей сир за невисокої кислотності, але за відносно високого вмісту вологи відрізняється нетривалим строком зберігання, тому для підвищення зв'язування вологи та виходу готового продукту за рахунок фізичної взаємодії агрегованих денатурованих сироваткових білків з казеїновою матрицею у вершки рекомендують вносити концентрат сироваткових білків [20, 21]. Для термокислотного способу зсідання вершків (зразки № 5—8) було змодельовано процес зсідання вершків різними

органічними кислотами (лимонною та оцтовою) за температури  $92 \pm 2$  °С, у тому числі в присутності КСБ-УФ:

- зразок № 5: у вершки додавали 10-відсотковий розчин лимонної кислоти (Е 330) у кількості 10 мл/кг;
- зразок № 6: у вершки додавали 10-відсотковий розчин оцтової кислоти (Е 260) у кількості 10 мл/кг;
- зразок № 7: у вершки додавали 10-відсотковий розчин лимонної кислоти (Е 330) у кількості 10 мл/кг і концентрат сироваткових білків КСБ-УФ у кількості 1%;
- зразок № 8: у вершки додавали 10-відсотковий розчин оцтової кислоти (Е 260) у кількості 10 мл/кг і концентрат сироваткових білків КСБ-УФ у кількості 1%.

Сироватку відділяли від гарячих згустків на фільтрувальній тканині з їх подальшим охолодженням і витриманням впродовж 2 год за температури 10—12 °С.

Активну кислотність вершків і згустків визначали потенціометрично згідно з ДСТУ 8550 із застосуванням лабораторного вимірювача рН/MV/ISE/Temp ADWA AD1200 АТС. Масову частку білка у вершках, сироватці і сирному згустку визначали методом К'ельдаля згідно з ДСТУ 8063. Масову частку жиру у вершках, сироватці і сирі визначали кислотним методом Гербера згідно з ГОСТ 5867.

Масову частку сухих речовин у вершках, сироватці і згустках ( $M_{sp}$ ) визначали висушуванням наважок зразків при 135 °С протягом 2 год з подальшим перерахунком за формулою:

$$M_{sp} (\%) = (m_1 - m_0) \times 100 / m - m_0, \quad (1)$$

де:  $m_0$  — маса бюкси, г;  $m$  — маса бюкси з наважкою зразка до висушування, г;  $m_1$  — маса бюкси з наважкою зразка після висушування, г.

Органолептичну оцінку вершкових згустків здійснювали відповідно до комерційного опису основних характеристик вершкового сиру, розробленого USDA [3]:

- колір — однорідний від білого до світло-кремового;
- смак і аромат — помірно виражений чистий, кисломолочний, злегка діацетиловий, не допускається гіркий, крейдяний, пустий, дріжджовий та інші сторонні прикуси і запахи;
- консистенція — однорідна, середньої твердості при температурі 7,2 °С і мазка при температурі 20 °С;
- зовнішній вигляд — гладкий, без грудочок і крупки пастоподібний згусток з рівною, зволоженою поверхнею без слідів розтріскування та виділення сироватки, на поверхні допускається наявність поодиноких крапель вологи.

Одержані результати за 3-кратної повторюваності і заданої довірчої ймовірності  $P \geq 0,95$  статистично обробляли за допомогою стандартної програми Excel.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Систематизовані результати дослідження фізико-хімічних показників зразків вершкових згустків, одержаних різними способами зсідання, а також відділеної сироватки, наведено у табл. 1 і на рис. 1.

Таблиця 1. Фізико-хімічні показники вершкових згустків

| Номер зразка | Масова частка вологи, % | Масова частка білка, % |
|--------------|-------------------------|------------------------|
| 1            | 61,7 $\pm$ 2,1          | 5,71 $\pm$ 0,16        |
| 2            | 77,1 $\pm$ 2,0          | 4,63 $\pm$ 0,15        |
| 3            | 58,2 $\pm$ 1,7          | 7,05 $\pm$ 0,23        |
| 4            | 63,7 $\pm$ 2,3          | 7,23 $\pm$ 0,26        |
| 5            | 60,1 $\pm$ 2,1          | 7,73 $\pm$ 0,19        |

Продовження таблиці 1

|   |          |           |
|---|----------|-----------|
| 6 | 56,5±2,0 | 7,77±0,23 |
| 7 | 55,6±1,8 | 7,89±0,28 |
| 8 | 55,1±2,2 | 8,10±-,25 |

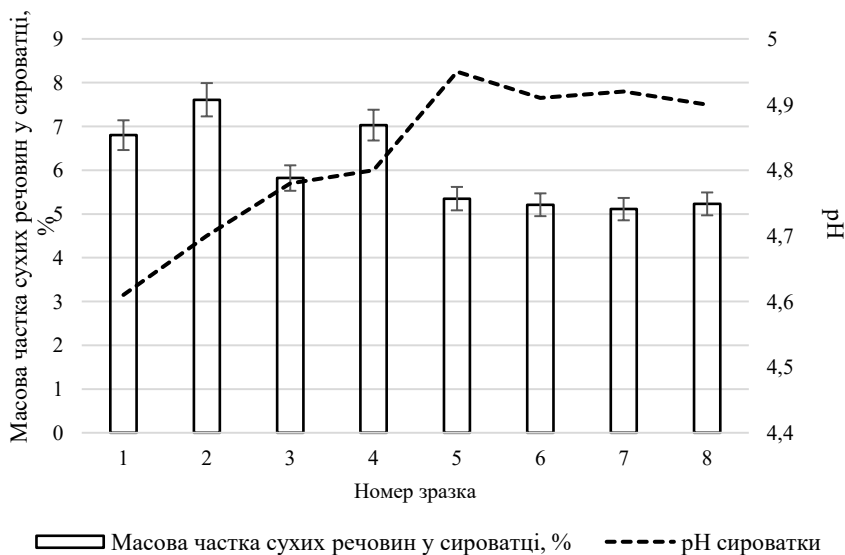


Рис. 1. Фізико-хімічні показники сироватки

Відповідно до наведених вище даних, можна відмітити певні закономірності формування фізико-хімічних показників згустків і відділеної сироватки для різних способів зсідання вершків. У першій групі зразків № 1—4, одержуваних шляхом ферментації вершків заквасками (№ 1—2) і заквасками та молокозсідальним ферментом (№ 3—4), більше води виявлено у згустках (63,7 і 77,1%) з найбільшими втратами сухих речовин разом у сироватці (7,03—7,62%) у разі ферментації вершків лише закваскою для сметани. У цьому випадку одержуваний згусток був занадто ніжний, не структурований, з низькою синергетичною здатністю та з відділенням непрозорої сироватки (зразок № 2). Одночасне застосування закваски для сметани і ферментного препарату у зразку № 4 дещо покращувало процес зсідання. Що стосується згустків, одержуваних із застосуванням закваски для сиру кисломолочного (зразки № 1 і № 3), то очевидним є зниження на 0,81—1,21% втрат сухих речовин разом з сироваткою за одночасного підвищення вмісту сухих речовин у згустку, у тому числі білка.

Якщо порівняти ефективність процесу зсідання вершків без ферменту і з ферментом, то доволі очікуваним є його позитивний вплив на хімічний склад вершкових згустків, що пояснюється формуванням більш щільної білкової матриці, що зменшує втрати білка та краще утримує у білковій матриці жир і вологу [22]. З метою підвищення виходу вершкового продукту надалі рекомендовано комплексне застосування заквашувального і ферментного препаратів (зразки № 1 і № 3).

Ферментативний спосіб зсідання вершків дає змогу досягти значень активної кислотності не вище 4,8 од. рН, що є рекомендованим для кислотної коагуляції молочних білків. У той же час термокислотний спосіб коагуляції вершків за допомогою розчинів харчових кислот у зразках № 5—8 не дає змоги досягти значень активної

кислотності нижче 4,9 од. рН. Якщо знизити активну кислотність до ізоелектричної точки казеїну за рахунок більшої дози розчинів органічних кислот, то, ймовірно, можна буде підвищити вихід готового продукту, що також заслуговує уваги в подальших дослідженнях.

Також, порівняно з ферментативним зсіданням вершків, термокислотний спосіб дає змогу знизити вміст води у вершкових згустках майже до рекомендованих значень — не більше 55%, зокрема для зразків № 7 і № 8. Зрозумілим є те, що короткий час самопресування, лише до 2 год, не дає змоги досягнути нижчих значень вмісту води у згустках, що потрібно додатково вивчити в подальших дослідженнях. Однак навіть за скороченого за часом циклу одержання вершкових згустків можна відмітити найкращі варіанти умов термокислотного зсідання вершків — за допомогою оцтової кислоти з одночасним додатковим внесенням у вершки 1% КСБ-УФ. Виявлений ефект корелює з відомою здатністю сироваткових білків у складі КСБ-УФ активно включатися в матрицю сиру з високим загальним вмістом сухих речовин [23], що суттєво підвищує вміст білка у згустках і знижує вміст сухих речовин у сироватці.

Масову частку сухих речовин, жиру і жиру у сухій речовині в досліджуваних зразках вершкових згустків наведено на рис. 2.

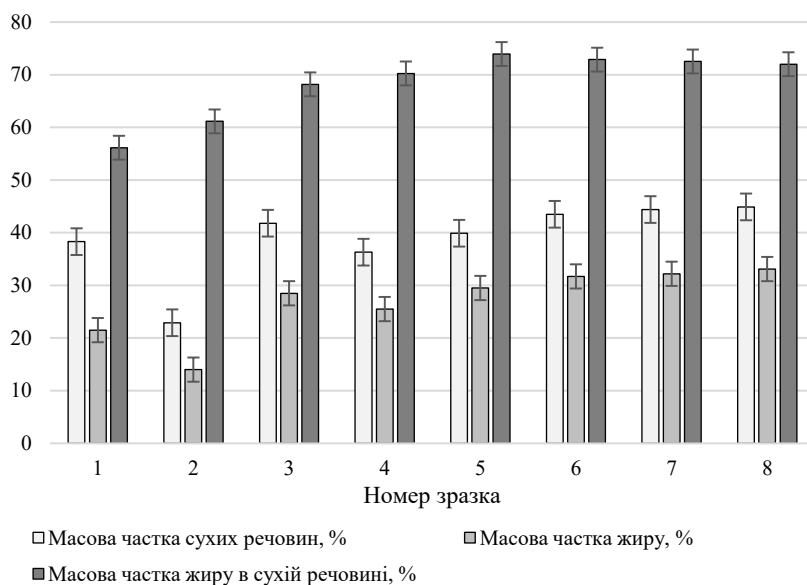


Рис. 2. Хімічний склад вершкових згустків

На рис. 2 наочно продемонстровано перевагу застосування термокислотного способу зсідання вершків, що дає змогу підвищити вміст жиру в сухій речовині вершкових згустків до значень більше 70% за одночасного суттєвого збільшення вмісту сухих речовин. Покращанню хімічного складу вершкових згустків сприяє застосування саме оцтової кислоти, а також додаткове внесення у вершки перед зсіданням КСБ-УФ. Щодо зразків № 1—4, то суттєво збільшити вміст сухих речовин, жиру та жиру в сухій речовині дає змогу лише комплексне застосування закваски і молочнозсідального ферменту, про що було вказане вище у табл. 1 для інших показників.

Для одержання більш повної інформації та проведення порівняльного аналізу ефективності різних способів зсідання вершків також було проаналізовано органолептичні показники вершкових згустків (табл. 2).

Таблиця 2. Органолептичні показники вершкових згустків

| Номер зразка | Смак та аромат   | Консистенція                                      | Колір  | Зовнішній вигляд   |
|--------------|--|---|--|--|
| 1.           | Помірно виражений чистий, кисломолочний                                  | Однорідна, занадто, мазка                         | Білий зі злегка кремовим відтінком, рівномірний за всією масою | Пастоподібний мазкий згусток, на поверхні наявні поодинокі краплі сироватки                |
| 2.           | Помірно виражений чистий, кисломолочний, злегка діацетиловий             | Неоднорідна, занадто мазка                        |  | Слабкий рихлий, злегка зернистий згусток зі слідами розтріскування та відділення сироватки |
| 3            | Помірно виражений чистий, кисломолочний                                  | Однорідна, доволі щільна, помірно мазка           |  | Гладкий, пастоподібний мазкий, доволі щільний згусток                                      |
| 4.           | Помірно виражений чистий, кисломолочний, злегка діацетиловий             |   |  | Пастоподібний, злегка зернистий згусток, на поверхні наявні поодинокі краплі сироватки     |
| 5.           | Чистий, вершковий, злегка солодкуватий без сторонніх присмаків і запахів | Однорідна, кремоподібна, мазка                    |  | Гладкий, пастоподібний, з рівною зволоженою поверхнею згусток                              |
| 6.           |  |   |  |  |
| 7.           |  | Однорідна, кремоподібна, доволі щільна, але мазка |  | Гладкий, пастоподібний мазкий, щільний згусток   |
| 8.           |  |   |  |  |

За органолептичними показниками лише зразок № 2 не відповідав унормованим вимогам до сирів вершкових унаслідок незв'язної консистенції з явно вираженими слідами розтріскування та відділення сироватки. Для зразків № 3, 4 комплексне застосування закваски і молокозсідального ферментного препарату значно покращувало якість вершкових згустків. Така ж закономірність прослідковувалася і для зразків № 7 і № 8 у разі додаткового внесення КСБ-УФ до вершків перед зсіданням, що призводить до більшої зв'язності і сухості поверхні вершкових згустків.

За комплексом органолептичних і фізико-хімічних показників вершкових згустків, одержаних різними способами зсідання вершків, доведено суттєвий вплив на цей процес таких чинників: виду закваски; сполучення дії закваски і молокозсідального ферменту; внесення концентрату сироваткових білків; виду харчової кислоти.

Порівняльний аналіз ефективності дії вказаних чинників впливу на показники якості вершкових згустків дав змогу для подальших досліджень рекомендувати такі умови одержання вершкових сирів:

- у разі ферментативного зсідання вершкових сумішей слід застосовувати закваску для сиру кисломолочного за одночасного внесення молокозсідального ферменту;

- при термокислотному зсіданні вершкових сумішей раціональним є застосування розчину оцтової кислоти за додаткового внесення концентрату сироваткового білка КСБ-УФ.

**Висновки.** 1. Науково-технічна інформація щодо асортименту, складу та особливостей технології вершкових сирів доволі обмежена і несистематизована, що потребує більш детального вивчення чинників впливу на формування показників якості сирів цієї групи.

2. У разі застосування ферментативного зсідання вершків більшу ефективність виявила закваска для сиру кисломолочного за сполучення з молокозсідальним ферментом.

3. При термокислотному зсіданні вершків доцільним є застосування 10-відсоткового розчину оцтової кислоти з одночасним внесенням у вершкову суміш концентрату сироваткових білків КСБ-УФ у кількості 1%.

4. Найбільший перехід складових сировини у вершкові згустки виявлено при термокислотному зсіданні вершків, порівняно з їх ферментативним зсіданням.

5. Перспективи подальших досліджень полягають у виявленні раціонального ступеня зниження активної кислотності вершків за допомогою оцтової кислоти при термокислотному зсіданні білків, а також рекомендованої тривалості холодного самопресування вершкових згустків для підвищення вмісту сухих речовин у сирі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Chen, N., Liu, X., Ding, Q., Wang, F., Luo, J., Ren, F. (2013). Effects of coagulation methods on quality of cream cheese. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29, 287—291.
2. Ong, L., Kentish, S. E., Gras, S. L. (2018). Small scale production of cream cheese: A comparison of batch centrifugation and cloth bag methods. *International D. J. V.*, 81, 42—52.
3. The U. S. Department of Agriculture (USDA). Commercial item description cream cheese, Neufchatel cheese and related products. A-A-20253B. September 30, 2021. Superseding A-A-20253A May 8, 2008. 11 P. <https://www.ams.usda.gov>.
4. Janier, C. (2008). Le fromage. *Petite encyclopédie pratique / Chistian Janier*. — L.: Éditions Stéphane Bâchés. 195.
5. Рябченко, Н. (2023). Особливості виготовлення вершкового сиру. *Продукты & ингредиенты*, 5(102), 28—29.
6. The U. S. Department of Agriculture (USDA). USDA Specifications for Cream Cheese, Cream Cheese with other Foods, and Related Products, Effective August 22, 1994. 1—5.
7. Sanchez, C., Beauregard, J. L., Chassagne, M. H., Bimbenet, J. J., Hardy, J. (1996). Effects of processing on rheology and structure of double cream cheese. *Food Res. Intern.*, 28(6), 547—552.
8. Capozzi, V., Lonzarich, V., Khomenko, I., Cappellin, L., Navarini, L., Biasioli, F. (2020). Unveiling the Molecular Basis of Mascarpone Cheese Aroma: VOCs analysis by SPME-GC/MS and PTR-ToF-MS. *Molecules*, 10; 25(5):1242.
9. Lentschner, K. Le Philadelphia de Kraft débarque en France (2010). Keren Lentschlmer. *Le Figaro.fr/économiste*. 27/12/2010.
10. Бартошак, І., Поліщук, Г. (2024). Перспективи розширення асортименту вершкових сирів в Україні. Сучасні тренди і перспективи в галузі переробки м'яса і молока: програма та тези матеріалів V Міжнародної науково-практичної конференції, К.: НУХТ, 40.
11. Phadungath, C., Songklanakarin, J. (2005). Cream cheese products: A review. *Journal of Science and Technology*, 27(1):191—199.
12. Breidinger, S. L., and Steffe, J. F. (2001). Texture Map of Cream Cheese. *Journal of Food Science*, 66:453—456.
13. Brighenti, M., Govindasamy-Lucey, S., Jaeggi, J. J., Johnson, M. E., Lucey, J. A. (2018). Effects of processing conditions on the texture and rheological properties of model acid gels and cream cheese. *Journal of Dairy Science*, 101(8), 6762—6775.

14. Wendin, K., Langton, M., Caous, L., Hall, G. (2000). Dynamic analyses of sensory and micro-structural properties of cream cheese. *Food Chemistry*, 71, 363—378.
15. Feeney, E., Lamichhane, P., Sheehan, J. (2021). The cheese matrix: Understanding the impact of cheese structure on aspects of cardiovascular health — A food science and a human nutrition perspective. *International Journal of Dairy Technology*, 74.
16. Lučan Čolić, Mirela. (2020). Physico-chemical properties, spreadability and consumer acceptance of low-sodium cream cheese. *Mljekarstvo*, 70, 13—27.
17. Munieweg, F. R., Gaviao, E. R., Czarnobay, M., Dilda, A., Stefani, L. C. M., Nespolo, C. R. (2021). Mascarpone cheese from sheep's milk — a new option for the consumer. *Food Science and Technology*, 41(2):568—575.
18. Sandip, B. Zade, Bikash, C. Ghosh. (2016). Mascarpone cheese — a butter substitute. *Indian J. Dairy Sci.*, 69(2), 132—135.
19. Kim, J., Watkinson, P., Fonterra, M. L., Matia-Merino, L. (2022). Effect of Process and Formulation Variables on the Structural and Physical Properties in Cream Cheese using GDL Acidulant June. *Food Biophysics*, 17(1).
20. Perreault, V., Rémillard, N., Chabot, D. et al. (2017). Effect of denatured whey protein concentrate and its fractions on cheese composition and rheological properties. *Journal of Dairy Science*, 100(7). 5139—5152.
21. Bielska, P., Cais-Sokolińska, D. (2023). Fresh White Cheeses from Buttermilk with Polymerized Whey Protein: Texture, Color, Gloss, Cheese Yield, and Peptonization. *Applied Sciences*, 13(21), 11692.
22. Myagkonosov, D., Smykov, I., Abramov, D., Delitskaya, I., Ovchinnikova, E. (2022). Influence of milk-clotting enzymes of animal and microbial origin on the quality and shelf life of soft cheeses. *Food systems*, 4, 286—293.
23. Hinrichs, J. (2001). Incorporation of whey proteins in cheese. *International Dairy Journal*, 11, 4—7, 495—503.

УДК 664.6.584.19

## THE PRIORITY IMPORTANCE OF BIOFLAVONOIDS IN DIETS TO USE UNDER THE CRISIS SITUATIONS

**G. Simakhina***National University of Food Technologies***Key words:**

healthy foods,  
extreme conditions,  
antioxidants,  
bioflavonoids,  
extracts,  
powders

**Article history:**

Received 15.04.2025

Received in revised form  
02.05.2025

Accepted 05.05.2025

**Corresponding author:**

lyutik.0101@gmail.com

**ABSTRACT**

Providing Ukrainian nation with nutrition adequate to the needs of a human body in the extreme conditions caused by russian full-scale military aggression is the essential task for the national public health system. Such nutrition should primarily contain the increased concentration of bioflavonoids, due to their diverse positive impacts on a human body, which, in turn, would impart the different functional properties (antioxidant, anticancer, antimicrobial, immunomodulating, tonic etc) to the food products.

The plant raw materials are of the utmost priority to obtain the polyfunctional fortifiers. This is quite understandable, owing to the fact that the majority of natural plant materials are congenial to a human body. During the long-lasting evolution period, a human got accustomed to absorb the plant components; this is why they are easily involved in biochemical processes in the body. Actually, this results from their high absorption level as well as the absence of undesired side effects even in case of the long-term intake.

The novelty opportunities of science and techniques allow the researcher to identify the various biologically active substances, to extract them from plants and hereinafter to examine their curative properties and the positive influence on the human body.

The purpose of this work is to substantiate the expedience of fortifying the traditional food bases by plant compositions with prevalent bioflavonoid content in order to create the diets adequate to the needs of a human body in the extreme life conditions.

The author of the article proves that the most rapid, economically profitable and technologically expedient way to obtain such products is to fortify the traditional food bases by polyfunctional plant compositions that would include agricultural raw materials, medicinal and spicy herbs, secondary resources. The increased amount of bioflavonoids would be the main selection criterion.

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-9

## ПРІОРИТЕТНЕ ЗНАЧЕННЯ БІОФЛАВОНОЇДІВ У РАЦІОНАХ ХАРЧУВАННЯ ПРИ КРИЗОВИХ СИТУАЦІЯХ

Г. О. Сімахіна, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-7836-3114

Національний університет харчових технологій

*Забезпечення населення України харчуванням, адекватним до потреб організму в екстремальних умовах, викликаних внаслідок широкомасштабної агресії росії, є актуальним завданням національної системи охорони здоров'я. Завдяки наявності біофлавоноїдів у своєму складі харчові продукти набувають різного функціонального спрямування.*

*Найшвидшим шляхом отримання таких продуктів є збагачення традиційних основ рослинними поліфункціональними композиціями, джерелами яких є сільськогосподарські культури, лікарська сировина, вторинні ресурси, а основним критерієм вибору — підвищений вміст біофлавоноїдів.*

**Ключові слова:** *оздоровчі продукти, екстремальні умови, антиоксиданти, біофлавоноїди, екстракти, порошки.*

**Вступ.** Експерти Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) оприлюднили інформацію, яка ґрунтується на результатах багаторічних досліджень у різних країнах світу, згідно з якою стан здоров'я населення, життєзабезпечення всіх функцій організму та захист його від несприятливих чинників довкілля безпосередньо залежить від якості та структури харчування, передусім принципово нового його покоління, яке сьогодні на світовому ринку позиціонується як «корисне для здоров'я, оздоровче».

М. М. Амосов сформулював науковий підхід до поняття «здоров'я» [1] з кількісної точки зору: «Існує певна потужність функціонування організму в нормальних умовах і його максимальні можливості, які виявляються в екстремальних ситуаціях, коли організм прагне зберегти себе як біологічний вид». Ця друга позиція «зберегти себе як біологічний вид» стала щоденним завданням практично для кожного громадянина України протягом трьох останніх років. І найбільш доступним для цього та ефективним є здорове харчування. Саме завдяки йому на належному рівні підтримується стан здоров'я, підвищується стресостійкість та адаптаційні можливості організму, а коли закінчиться війна — здорове харчування забезпечуватиме досягнення високих життєвих стандартів, активне творче довголіття і найголовніше, збереження генофонду української нації.

Накопичений на сьогодні досвід свідчить про те, що технологічно доцільним та економічно вигідним способом отримання оздоровчих продуктів є модифікація традиційного харчування за рахунок введення до його рецептур додаткових збагачуючих нутрієнтів — вітамінних і вітамінно-мінеральних комплексів [32], порошоків дикорослих ягід [13], рослинних антиоксидантів для гальмування активності вільних радикалів [8], продуктів перероблення ягід як структуроутворювачів [25], підвищення вітамінної цінності консервів [16] тощо.

Для здійснення модифікаційних процесів необхідно орієнтуватись на селекцію нових сільськогосподарських високоврожайних культур з підвищеним вмістом основних біологічно активних речовин; більш широко залучати до сфери харчових технологій нетрадиційну сировину, лікарські трави, вторинні сировинні ресурси.

Таким чином, виробництво натуральних поліфункціональних збагачувачів традиційних харчових середовищ, дієтичних добавок, нових функціональних інгредієнтів,

натуральних біокоректорів цілком обґрунтовано є одним із актуальних стратегічних напрямів розвитку харчової промисловості, оскільки забезпечує створення харчових продуктів профілактичного, оздоровчого, лікувального призначення — антиоксидантного, антиканцерогенного, антимікробного, імуномодулюючого, загальнозміцнюючого тощо.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Наведені матеріали ілюструють той факт, що оздоровчі продукти завдяки наявним у їхньому складі збагачуючим біокомпонентам характеризуються надзвичайно широким спектром дії і позитивно впливають на всі органи та системи організму людини (їх, як відомо, усього 12, починаючи від центральної і закінчуючи периферійною нервовими системами). Тому доцільно обрати для характеристики саме ті інгредієнти, які необхідні організму людини в нинішніх екстремальних умовах проживання і життєдіяльності. Насамперед це стосується антиоксидантів. Саме ця група сполук сприяє підвищенню стійкості організму до різноманітних шкідливих чинників (фізичних, хімічних, психоемоційних).

Це пояснюється тим [11], що антиоксиданти забезпечують необхідну активність антиоксидантної системи — універсальної регулюючої системи організму, яка контролює рівень вільнорадикальних реакцій окислювання і перешкоджає накопиченню окислених токсичних продуктів [3].

Крім того, вони впливають на синтез і перетворення багатьох біологічно активних речовин (амінів, вітамінів тощо) і беруть участь у формуванні ряду структурних елементів клітин. Тому в сучасних умовах впровадження в медичну практику нових ефективних лікарських засобів, дослідження їх фармакокінетичних і фармакодинамічних властивостей — пріоритетний напрям для фахівців різного профілю: хіміків, фармакологів, клініцистів. Фахівці в галузі харчових технологій мають можливість адаптувати результати доказової медицини до розроблення нових продуктів певного функціонального спрямування і таким чином розширювати спектр оздоровчих продуктів та їх раціональне застосування.

Останніми роками розробку нових лікарських засобів проводять за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням сучасних програм [19]. Варто зазначити, що такий метод уже використовується і в галузі харчових технологій. Зокрема, на кафедрі технології оздоровчих продуктів з використанням програми Nureg-Chem, яка дає змогу проводити дослідження просторової та електронної будови БАР, було встановлено взаємозв'язок між електронною будовою антоціанів та їхньою здатністю вступати в одноелектронні реакції з вільними радикалами, а також проаналізовано співвідношення антирадикальної активності між трьома різновидами антоціанідинів — пеларгонідину, ціанідину, дельфінідину [23].

На сучасному етапі лікування метаболічних порушень [4] дуже важливо застосовувати біофлавоноїди, які володіють мембраностабілізуючою, антиоксидантною, протизапальною, гіпоглікемічною, нефропротекторною дією.

До найбільш відомих біофлавоноїдів відносять: гесперидин, лютеолін, рутин, кверцетин, мірицетин. Наприклад, фітокомпозиція на основі поліфенольного екстракту з листя журавлини великоплідної та амінокислот (L-аргінін, таурин, гліцин) за умови лікувально-профілактичного застосування при експериментальному цукровому діабеті покращує оксидантно-антиоксидантний баланс організму [29].

Важливим є висновок авторів [7], що антиоксиданти є не лише скавенджерями (поглиначами) вільних радикалів, а й відповідальними за код клітин, тому цілком

очевидно, що збільшення в раціонах харчування продуктів з достатньою концентрацією антиоксидантів істотно пригнічує оксидативний стрес, що важливо для населення України в умовах воєнного стану.

Ряд авторів поєднують антиоксидантну дію природних сполук з їхнім антистресовим впливом [34], що значно підвищує цінність натуральних антиоксидантів для нинішніх екстремальних ситуацій.

Останнім часом встановлено важливість застосування біофлавоноїдів при лікуванні COVID [31]. З'явилися також публікації [14], які свідчать, що розлади розумової діяльності пов'язані з накопиченням вільних радикалів кисню і це потребує продуктів з натуральними антиоксидантами, оскільки синтетичні препарати мають небажані побічні ефекти.

Автори [30] підтверджують умовиводи інших дослідників, що саме завдяки поліфенолам рослини мають різнобічний вплив і на роботу серцево-судинної системи, яка теж потребує антиоксидантного захисту.

Для нашої подальшої роботи важливим є висновок, який обґрунтовує доцільність отримання поліфункціональних збагачувачів не з однієї монокультури, а з суміші рослин, підібраних за принципом синергізму на основі науково обґрунтованих даних. Нині відома достатня кількість комплексних вітчизняних рослинних засобів, які ефективно впливають на ті чи інші ланки метаболізму [2]. Навіть така популярна в народній медицині лікарська трава, як м'ята перцева, досі викликає інтерес дослідників [10], які виявляють її нові фармакологічні ефекти — антиоксидантний, протівірусний, протизапальний тощо.

З викладеного матеріалу видно, що для отримання поліфункціональних збагачувачів використовують передусім рослинну сировину. І це зрозуміло. Адже за своєю хімічною природою більшість рослинних матеріалів споріднені з організмом людини. В ході тривалої еволюції людина пристосувалась до засвоєння рослинних компонентів, тому вони легко включаються до біохімічних процесів у живому організмі. Цьому сприяє і висока ступінь їх засвоєння, і відсутність негативних побічних ефектів навіть при тривалому використанні.

Сучасні можливості науки і техніки дають змогу розпізнавати, вилучати з рослин і вивчати різні біологічно активні речовини, їхні цілющі властивості і позитивний вплив на організм людини [27]. Наприклад, у траві звіробою активними фармацевтичними інгредієнтами визнано флавоноїди (рутин, кверцетин, гіперозид і дубильні речовини) і виявлено кореляцію між вмістом цих сполук та мікроелементним складом трави [9].

Для запобігання стресу та поліпшення адаптації організму в умовах воєнного стану компліментарною медициною запропоновано ряд фітопрепаратів, які можна застосовувати як антистресові засоби або стрес-протектори завдяки захисному впливу на нервову, серцево-судинну, ендокринну та імунну системи [6]. Цілком очевидно, що введенням до складу харчових продуктів компонентів даних препаратів можна досягти таких же цілей. Крім того, фітопрепарати знижують підвищений вміст холестерину, нормалізують співвідношення жирних кислот, і це є ще одним аргументом розроблення харчових продуктів, збагачених композиціями біологічно активних сполук рослинного походження. Найбільш популярні з таких фітопрепаратів містять екстракти пасифлори, квіток ромашки, суцвіття хмелю, зерна вівса, коріння женьшеню тощо [20].

У багатьох випадках поліфункціональні збагачувачі використовують у вигляді екстрактів, переважно водно-спиртових або оліє-жирових. Екстрагування БАР із рослинної сировини є ключовою стадією процесу отримання екстрактів і концентратів. Вибір екстрагентів забезпечує селективність вилучення певних сполук із сировини, метод та умови екстрагування формують загальну ефективність процесу.

Вартий уваги сучасний метод екстрагування БАР із рослинної сировини пружно-в'язким середовищем (наприклад, оліє-жировим) за участі мікрохвильового поля, що став новим науково-технічним напрямом у фармацевтичному, косметичному та інших виробництвах [21]. Зважаючи на ефективність отриманих результатів, такий метод було б доцільно перенести і в сферу харчових технологій.

У праці [12] наведено характеристику сучасних методів екстрагування, що забезпечують інтенсифікацію процесів масообміну і прискорення стадії вилучення БАР з рослинної сировини: відцентрове та вихрове екстрагування (турбоекстрагування), акустичне, електроімпульсне тощо.

У практичній діяльності харчових виробництв широко використовуються також збагачувачі, отримані з різних видів плодово-ягідної то овочевої сировини в сухому порошкоподібному стані. В Україні потреба в таких порошках для використання у різних галузях харчової промисловості складає щонайменше 5 тис. тонн на рік [24].

Автори [17] на основі проведених досліджень довели, що внесення до рецептури хлібобулочних виробів суміші порошоків моркви, гарбуза і яблук надало можливість отримати цільовий продукт з підвищеним вмістом вітамінів, мінеральних елементів і харчової клітковини. Такого ефекту вдалось досягти без жодної штучної добавки.

Широкий спектр овочевих і ягідних порошоків, отриманих методом інфрачервоного сушіння, пропонує вітчизняне підприємство ФГ «Агрокотехнології». Без сумніву, вони знайдуть належне місце у сфері харчових технологій, оскільки мають високу якість, належні органолептичні властивості, не містять штучних барвників, ароматизаторів, консервантів.

Відомим в Україні виробником рослинних порошоків є Інститут технічної теплофізики НАН України. У праці [18] описано отримання харчових порошоків з фруктів та овочів за технологією, що забезпечує одержання високоякісного продукту, в якому у концентрованому вигляді збережено всі інгредієнти вихідної сировини.

У технології отримання порошоків, зокрема з каротиновмісної сировини, необхідно обрати оптимальний спосіб сушіння, який, на думку розробників [22], визначається природою матеріалу та вимогами до якості кінцевого продукту. З огляду на ці міркування, в технології запропоновано конвективний метод сушіння як один із найефективніших і дешевих. Таким чином отримано значний асортимент порошоків — яблучного, морквяного, картопляного, гарбузового тощо.

Отже, на основі аналізу літературних джерел можна зробити однозначний висновок щодо актуальності, доцільності і необхідності в нинішніх складних екологічних умовах розробляти продукти, збагачені комплексними або комбінованими рослинними композиціями в різних агрегатних станах. Головною перевагою таких збагачувачів є той факт, що при їх створенні враховується ефект дії кожного інгредієнта зокрема та ефекти спільної синергічної дії. Тому продовжується пошук нових сировинних джерел з високим вмістом біокомпонентів, вдосконалюються технології їх перероблення, з'ясовуються нові фізіологічні ефекти БАР рослин, що має привести з часом до повного витіснення зі сфери харчових технологій синтетичних добавок, більшість яких небезпечні для здоров'я людини, і їх заміни натуральними збагачувачами.

**Мета дослідження:** на підставі аналітичного огляду, систематизації та інтерпретації літературних джерел, експериментальних даних обґрунтувати доцільність збагачення традиційних харчових середовищ рослинними композиціями з переважаючим вмістом біофлавоноїдів для створення раціонів харчування, адекватних потребам людини в екстремальних умовах життєдіяльності.

**Матеріали і методи.** Матеріалом дослідження є найбільш розповсюджені в Україні лікарські трави: кропива дводомна (*Urtica*), материнка звичайна (*Origanum vulgare*), меліса лікарська (*Melissa officinalis*), чебрець духмяний (*Satureja hortensis*), шавлія лікарська (*Salvia officinalis*), квітки звіробою (*Hypericum perforatum L.*), листя берези повислої (*Betula pubescens*), квітки ромашки (*Chamomilla recutita*), листя шавлії (*Salvia*), трава кропиви собачої (*Herba Leonuri*), квітки цмину (*Helichrysum arenarium L. Moench.*). У дослідженні використано загальнонаукові та системно-оглядові методи інформаційного пошуку, контент-аналіз. Водно-спиртові екстракти отримували методом мацерації при співвідношенні сировина-екстрагент 1:10, розмір часток сировини 1,5—2 мм, температура кімнатна, тривалість екстрагування 24 год, об'ємна частка спирту в екстрагенті 70%. Попередні дослідження з використанням водно-спиртових розчинів з концентрацією спирту 30% та 50% показали, що частка вилучених при цьому біофлавоноїдів вдвічі менша, ніж при 70-відсотковій концентрації. Також непереконливим вийшов експеримент з отримання водних настоїв лікарських трав, оскільки при цьому у воду переходить менше 5% біофлавоноїдів сировини.

Вміст біофлавоноїдів в екстрактах розраховували за загальновідомою методикою колориметричним методом, який ґрунтується на формуванні флавоноїд-алюмінієвого комплексу [28]. Оптичну густину визначали при довжині хвилі 425 нм у кюветі товщиною шару 10 мм. Для порівняння використовували розчин з хлороводневою кислотою.

**Результати досліджень.** Під час кризових ситуацій у країні, які зумовлюють необхідність підвищення стійкості організму громадян до оксидантного стресу, до фізичних і психологічних перевантажень, коли порушується активність життєво важливих органів та систем, завданням медицини є знизити цей дисбаланс [21] засобами препаратів, а завданням фахівців харчової промисловості — забезпечити раціони харчування населення продуктами, збагаченими компонентами протекторної дії різного спрямування, передусім антиоксидантного [33].

Створення таких продуктів важливо і з тієї точки зору, що в умовах, в яких проживають громадяни України протягом останніх 5 років, паралельно з виникненням і поглибленням оксидантного стресу порушуються практично всі процеси метаболізму (енергетичний, білковий, ліпідний, електролітний та інші види обміну), також страждає ендокринна, серцево-судинна, імунна системи тощо.

Такі збої в роботі систем організму викликаються вільними радикалами кисню, що утворюються під час підвищення рівня радіаційного забруднення, вибухів, викидів токсичних сполук і навіть при палінні цигарок [3]. Вільні радикали руйнують мембрани клітин, ферменти, ДНК, призводять до виникнення таких хвороб, як рак, атеросклероз, малярія, коронавірусна інфекція, нейродегенеративні захворювання. Цей процес викликає порушення балансу між вільними радикалами та антиоксидантами, і для його зміцнення в позитивний для організму бік необхідне використання антиоксидантів, найбільш ефективними з яких є поліфенольні сполуки, біофлавоноїди, про що свідчить проведений аналіз літературних джерел і невпинний інтерес науковців до цієї групи сполук [5].

На основі детального вивчення біофлавоноїдів, які були відкриті в 1936 р. угорським ученим Альбертом Сент-Дьйордьї і які є об'єктом уваги біохіміків, фізіологів, геронтологів усього світу, констатовано факт, що жоден інший клас природних сполук не чинить такого численого і різноманітного впливу на біологічну активність клітин живого організму як біофлавоноїди, запобігаючи навіть передчасному старінню.

Цю особливість флавоноїдів давно з'ясували японські вчені і вже 20 років тому в біохімічних аналізах пацієнтів з'явився новий показник «біофлавоноїдне навантаження, тобто концентрація біофлавоноїдів у крові, а також було визначено мінімальну добову потребу організму в цих сполуках — 500 мг. І на сьогодні японські геронтологи переконані, що одним із визначальних чинників середньої тривалості життя населення в Японії (цей показник найвищий у світі) є достатня кількість флавоноїдів у раціонах харчування.

На жаль, наше Міністерство охорони здоров'я недавно звернуло увагу на феномен біофлавоноїдів і лише у 2017 р. в нових «Нормах фізіологічних потреб населення України» [15] вперше з'явився показник добової потреби у біофлавоноїдах — 250 мг. Хоча відсутня будь-яка інформативна та роз'яснювальна робота для середньостатистичного споживача щодо обов'язкового введення біофлавоноїдів до раціонів. Тому зрозумілою є стурбованість науковців з технологій харчового виробництва щодо незначних обсягів продуктів з біофлавоноїдами на вітчизняному ринку. Хоча причини цього загальновідомі — відсутність державної політики в галузі здорового харчування та відповідного нормативно-правового поля, приватна власність на всі харчові підприємства, основною метою діяльності яких є рентабельність, а не вирішення соціальних проблем, пов'язаних передусім із забезпеченням населення харчуванням, адекватним умовам життєдіяльності. З нашої точки зору в умовах воєнних дій, воєнного стану в країні роль оздоровчого харчування, організація системи його виробництва та доведення до столу споживача, управління якістю продукції, маркетингу та менеджменту підприємницькою діяльністю має бути постійно в центрі уваги державних органів влади, а харчові підприємства повинні реагувати на вимоги та реалії сьогодення і потреби споживачів.

Основним джерелом отримання поліфункціональних збагачувачів є рослинна сировина — багате джерело різноманітних біологічно активних речовин, які і зумовлюють фармакологічну, профілактичну, оздоровчу дію харчових продуктів та напоїв, збагачених такими БАР.

До важливих сировинних ресурсів у цьому контексті належать також вторинні продукти харчових виробництв — сироватка, шроти плодово-ягідних і овочевих культур, надземна маса сільськогосподарських культур; популярністю користуються також дикорослі і культивовані гриби, різноманітні гідробіонти, лікарська та пряно-ароматична сировина, продукти бджільництва тощо [33].

Залежно від способів перероблення сировини, якісних і кількісних показників її біокомпонентів, відповідно до Закону України 771/97-ВР «Про основні принципи та вимоги до безпеки та якості харчових продуктів» (редакція від 16.01.2020 р.) кожне із джерел отримання збагачувачів має низку своїх специфічних маркерів, які в подальшому зумовлюють створення на їхній основі продукції певного функціонального призначення (загальнозміцнюючого, адаптогенного, імуномодуючого, дезінтоксикаційного тощо) високої ефективності та повністю безпечної для споживачів. Збагачуючі добавки можна отримувати у вигляді екстрактів, порошків із певними

фізико-хімічними властивостями, якісними, кількісними показниками та органолептикою.

Надалі такі композиції можна використовувати для збагачення будь-яких традиційних харчових основ і напоїв, для виробництва дієтичних добавок; вони можуть слугувати базисом для отримання продуктів спеціального призначення (спортивного харчування, харчування для спецконтингентів тощо).

На кафедрі технології оздоровчих продуктів досліджено 10 різних лікарських трав з метою визначення в них загального вмісту біофлавоноїдів, а також ступеня їх переходу у водно-спиртовий екстрагент (відповідно до наведеної вище методики), що надає можливість передбачити їхню ефективність як збагачувачів.

Усі досліджені лікарські трави заготовлені і випробувані відомою українською компанією «Ліктрави», яка з 1928 р. вивчає сировину за різними показниками якості і під таким строгим контролем створені природою рослини стають ефективним та безпечним терапевтичним засобом, а також джерелом отримання поліфункціональних збагачувачів для різних харчових основ та напоїв.

Відповідно до інформації з інтернет-джерел обрані для досліджень трави займають для вирощування найбільші площі в Україні. Всього в Україні налічується 2210 видів трав, з них 244 (близько 10%) складають культивовані та інтродуковані, а решта — дикорослі. Офіційно лікарськими визнано 250 видів трав і саме серед цього розмаїття слід обирати сировину для виробництва рослинних збагачувачів, адже те, що використовується в медицині, є безпечним і для харчових продуктів.

При виборі рослинних джерел для отримання збагачуючих композицій з максимальним вмістом біофлавоноїдів слід мати на увазі, що накопичення цієї групи сполук певною мірою залежить від стадії росту рослини. Наприклад, за нашими даними в листі смородини максимальна концентрація біофлавоноїдів (3,25% на абсолютно суху речовину) становила в першій половині жовтня, а в кінці серпня була майже вдвічі меншою. Для квітів ромашки виявилась така закономірність: максимальний вміст біофлавоноїдів на стадії переходу від бутонізації до цвітіння — 2,34%; за масового цвітіння цей показник дещо менший — 2,18%; а після цвітіння — 1,96 %.

Отже, необхідно знати особливості синтезу тих чи інших БАР у рослинах, щоб обрати період максимального накопичення сполуки, яка є предметом дослідження. Отримані результати наведено в таблиці.

*Таблиця. Концентрація біофлавоноїдів і ступінь їх вилучення з лікарської сировини*

| Найменування сировини    | Оптична густина, од. опт. густ. | Вміст біофлавоноїдів, мг/100 г |              | Ступінь вилучення біофлавоноїдів, % |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
|                          |                                 | у сировині                     | у настоянках |                                     |
| 1. Квітки звіробою       | 0,38                            | 3,890                          | 3,286        | 84,48                               |
| 2. Листя смородини       | 1,68                            | 1,281                          | 0,885        | 69,06                               |
| 3. Листя меліси          | 0,49                            | 1,685                          | 1,159        | 68,81                               |
| 4. Листя чебрецю         | 1,53                            | 1,470                          | 0,996        | 67,74                               |
| 5. Листя шавлії          | 1,42                            | 0,634                          | 0,409        | 64,62                               |
| 6. Квітки цмину          | 1,88                            | 2,638                          | 1,702        | 64,52                               |
| 7. Квітки материнки      | 1,72                            | 2,980                          | 1,175        | 39,44                               |
| 8. Квіти ромашки         | 1,44                            | 0,472                          | 0,139        | 29,46                               |
| 9. Трава кропиви собачої | 1,44                            | 0,462                          | 0,132        | 28,63                               |
| 10. Листя берези         | 0,47                            | 0,825                          | 0,203        | 24,62                               |

Установлено, що за оптимальних умов проведення процесу екстрагування можна досягти досить повного переходу біофлавоноїдів в екстракт. Так, ступінь вилучення цієї групи антиоксидантів із квіток звіробою складає 84,46%, з листя смородини, меліси, чебрецю, шавлії, квіток цмину — до 69,0%. З інших видів рослин вихід біофлавоноїдів зменшується до 24,6% для листя берези. Такий діапазон абсолютних значень вмісту біофлавоноїдів в екстрактах певною мірою пояснюється відмінностями у структурі тканин різних трав, їхньому біокомпонентному складі, що може впливати на коефіцієнт дифузії.

Досліджені рослини мають різну антиоксидантну ефективність, яка визначається вмістом біофлавоноїдів. І за цим показником побудовано ряд їхньої порівняльної оцінки від максимальної до мінімальної:

*звіробій > материнка > цмин > меліса > чебрець > смородина > береза > шавлія > ромашка > кропива.*

Отже, найбільш ефективними серед досліджених лікарських рослин є перші 5 із цього ряду, і вони можуть знайти широке застосування у виробництві напоїв і харчових продуктів антиоксидантної дії як компоненти раціону, здатні зменшити токсичний вплив на організм процесів вільнорадикального окислення. Можна очікувати, що ці рослини знайдуть своє місце і в медицині при проведенні антиоксидантної терапії.

**Висновки.** Одним із першочергових завдань вітчизняної медичної та харчової науки є подальше удосконалення науково обґрунтованого і доказового підходу до збільшення виробництва оздоровчих харчових продуктів, отриманих шляхом модифікації традиційного харчування. В основі цього процесу лежить збагачення харчових середовищ (зернових, борошняних, м'ясних, молочних, оліє-жирових) рослинними композиціями з підвищеними концентраціями есенціальних сполук, які забезпечують витривалість і виживання організму в кризових умовах довкілля.

Сфери застосування таких продуктів у комплексній профілактиці та лікуванні аліментарних хвороб охоплюють населення всіх вікових категорій.

Поліфункціональні рослинні збагачувачі відкривають реальну можливість розширити спектр оздоровчих продуктів на основі досягнень сучасної науки, яка довела ефективність природних сполук, зокрема виняткову роль біофлавоноїдів у функціонуванні організму людини в екстремальних умовах життєдіяльності, і значною мірою визначають тенденції розвитку сучасних харчових технологій. Використання біофлавоноїдів у складі комплексних збагачувачів забезпечує корегування структури харчування як здорових, так і хворих людей, і стійкий позитивний ефект при профілактиці та лікуванні хвороб. Необмежений вибір вітчизняної рослинної сировини надає можливість отримувати комплексні збагачувачі у необхідних кількостях та в необхідному поєднанні фармакологічно сумісних сполук.

Напрямами подальших досліджень є пошук нових, поки що маловивчених рослин, дослідження їх біокомпонентного складу і підбір найбільш придатних для використання у сфері харчових технологій, продукція яких повинна відповідати основним принципам харчування XXI століття — якість, безпека, ефективність.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Амосов, Н. М. (2003). *Енциклопедія Амосова*. Донецьк: Сталкер.
2. Архипова, М. О. (2023). Фармакотерапевтичний дизайн комплексного рослинного препарату з поліфункціональною дією. *Фітотерапія: часопис*, 3, 83—94.
3. Барабой, В. А. (2008). *Біоантиоксиданти*. Київ: Книга-плюс.

4. Білий, С. (2022). Вплив біофлавоноїдів на показники пуринового обміну та прекурсорів утворення сечової кислоти при метаболічному синдромі. *Фітотерапія: часопис*, 1, 46—54.
5. Будняк, Л. (2023). Дослідження вмісту біофлавоноїдів у фітосубстанціях з трави айстри новобельгійської. *Фітотерапія: часопис*, 4, 32—37.
6. Буршинський, С. Г. (2023). Нові підходи до лікування синдрому тривоги. *Ukrainian Medical Journal*, 156(4), 48—56.
7. Горчакова, Н., Беленічев, І., Гарник, Т., Зайченко, Г., Клименко, О., Горова, Е., Шумейко, О., Маслова, І. (2024). Стреспротекторні властивості фітопрепаратів. *Фітотерапія: часопис*, 3, 5—14. DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2024-3-5>.
8. Данилова, Л. А., Березка, Р. А., Домарецький, В. О. (2009). Вплив добавок антиоксидантів з рослинної сировини на стійкість пастеризованого пива. *Харчова та переробна промисловість*, 9—10, 18—20.
9. Деркач, Т. М., Страшний, В. В. та ін. (2018). Вміст біологічно активних речовин та елементний склад трави звіробою. *Фармацевтичний часопис*, 4, 4—11.
10. Добровольний, О. Н., Давтян, Л. (2024). Вивчення поліфенольного складу екстрактів м'яти перцевої. *Фітотерапія: часопис*, 3, 175—181.
11. Кисличенко, В. С. (2009). Дослідження фізіологічно активних сполук роду *Ribes*. *Фізіологічно активні речовини*, 1(27), 131—140.
12. Макаренко, А. А., Авдєєва, Л. Ю. (2022). Огляд новітніх методів екстрагування рослинної сировини. *Матеріали XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Біотехнологія XXI століття»*, 21 червня, 34—39.
13. Мирошник, Ю. О., Доценко, В. Ф. (2024). Досвід використання порошоків з нетрадиційної рослинної сировини в борошняних кондитерських виробках. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 8, 65—71.
14. Москоні, Л. (2019). *Їжа для мозку. Наука розумного харчування* / пер. з англ. Київ: Наш формат.
15. Наказ МОЗ України №1073 від 03.09.2017 «Про затвердження Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії» (zareєстровано в Міністерстві юстиції України 02.10.2017 р. за №1206/31074).
16. Осокіна, Н. М., Герасимчук, О. І. (2019). БАР у консервах із плодів чорної смородини. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, 3, 44—51.
17. Панасюк, С. Г., Тараймович, І. В. (2022). Використання овочево-фруктових порошоків як інноваційних інгредієнтів у рецептурі крафтових хлібобулочних виробів. *Товарознавчий вісник*, 15, 49—60.
18. Петрова, Ж. О. (2014). Інноваційні технології виробництва функціональних рослинних порошоків. *Наукові праці ОНАХТ*, 2(46), 64—68.
19. Поготова, Г. А., Чекман, І. С. (2014). Квантово-фармакологічні дослідження властивостей антиоксидантів як лікарських засобів. *Український медичний часопис*, 6, 94—100.
20. Смалюх, О., Сур, С. (2018). Оцінка складу та вмісту БАР комплексних рослинних екстрактів, отриманих за різними технологіями. *Фармацевтичний часопис*, 4, 13—19.
21. Сметаніна, К. І., Пархомчук, А. В. (2023). Організаційні аспекти фармацевтичного забезпечення засобами рослинного походження в надзвичайних ситуаціях. *Фітотерапія: часопис*, 2, 57—65.
22. Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., Самойленко, К. М., Слободянюк, К. С. (2022). *Тепломасобмінні процеси отримання комбінованих функціональних порошоків*: монографія. Київ: Наукова думка.
23. Стеценко, Н. О., Сімахіна, Г. О., Гойко, І. Ю. (2017). Дослідження антиоксидантних властивостей антоціанів як необхідних компонентів харчових продуктів в екстремальних умовах життєдіяльності. *Наукові праці НУХТ*, 22(3), 167—175.
24. Технології, досвід, перспективи. (2024). Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Ягідництво і переробка» *Ягідник*, 4—5, 8—20.
25. Хомич, Г. П. (2024). Використання різних видів смородини в якості структуроутворювачів. *Journal of Chemistry and Technologies*, 4, 83—89.
26. Чабан, О. С., Хлустова, О. В., Омелянович, В. А. (2022). *Психічні розлади воєнного часу*. Київ: Медицина.

27. Чернега, А. О. (2021). Біохімічний склад свіжих і сушених ягід смородини. *Новітні агротехнології*, 9, 34—41.
28. Шостак, Т. А., Калинюк, Т. Г., Вронська, Л. В. (2017). Ідентифікація та кількісне визначення флавоноїдів комплексного густого екстракту трави звіробою та квіток нагідок. *Фармацевтичний журнал*, 3—4, 71—78.
29. Akbari, B., Baghaei-Yazdi, N., Bahmaie, M., & Mahdavi Abhari, F. (2022). The role of plant-derived natural antioxidants in reduction of oxidative stress. *BioFactors*. DOI: 10.1002/biof.1831.
30. Alotaibi, B. S., Ijaz, M., Buabeid, M., Kharaba, Z. J., Yaseen, H. S., & Murtaza, G. (2021). Therapeutic effects and safe uses of plant-derived polyphenolic compounds in cardiovascular diseases: A review. *Drug Design, Development and Therapy*, 1, 4713—4732. DOI: 10.2147/dddt.s327238.
31. Khan, J., Deb, P. K., Priya, S., Medina, K. D., Devi, R., Walode, S. G., & Rudrapal, M. (2021). Dietary flavonoids: Cardioprotective potential with antioxidant effects and their pharmacokinetic, toxicological and therapeutic concerns. *Molecules*, 26(13), 4021. DOI: 10.3390/molecules26134021.
32. Simakhina, G. O., Naumenko, N. V. 2021 (). Antioxidant Activity of Wild Berries. *Ukrainian Food Journal*, 10(1), 37—54.
33. Simakhina, G. O., Naumenko, N. V., & Kaminska, S. V. (2024). Changes in vitamin content and sensory characteristics of frozen wild berries during storage. *Ukrainian Food Journal*, 13(1), 54—69.
34. Smith, A. G., Miles, V. N., Holmes, D. T., Chen, X., & Lei, W. (2021). Clinical trials, potential mechanisms, and adverse effects of arnica as an adjunct medication for pain management. *Medicines*, 8(10), 58. DOI: 10.3390/medicines8100058.

УДК 664.87

## RESEARCH INTO CHANGES THE AMOUNT OF REDUCING SUGARS IN POTATOES DURING STORAGE AND THEIR EFFECT ON THE COLOR OF CHIPS

Y. Strokach, V. Kovbasa

National University of Food Technologies

---

### Key words:

potato,  
potato tuber,  
variety,  
potato chips,  
dry matter,  
reducing sugars

---

### Article history:

Received 11.04.2025  
Received in revised form  
22.04.2025  
Accepted 24.04.2025

---

### Corresponding author:

mstrokach@ukr.net

---

### ABSTRACT

The article analyzes the achievements of Ukrainian scientists, considers a comprehensive assessment of the quality indicators of potatoes intended for the production of potato chips. Particular attention is paid to the change in the content of reducing sugars during storage of tubers and their impact on the color of the final product. The following potato varieties were selected for research: early ripening — Madison, Karlena, medium-early — Kibits, Tauras and medium-late — Opal, from which data were obtained on the change in the content of reducing sugars and the impact on the color of chips.

It was found that during the period of physiological dormancy, the content of reducing sugars in potatoes is stable, but later their accumulation increases, which is associated with the processes of respiration and starch conversion. The presence of a high amount of reducing sugars (>0.4%) significantly worsens the quality of chips: it leads to darkening of the product due to the Mayer reaction and the appearance of an undesirable aftertaste. Evaluation of the color of chips using a Hunter Lab spectrophotometer confirmed a direct relationship between the content of reducing sugars and darkening of the product. The higher the color value of the chips, the lower the content of reducing sugars in potato tubers and vice versa. The higher the content of reducing sugars in potatoes, the lower the color value of the chips. At a chip color value of 69.10 units of the device, the content of reducing sugars in potatoes is 0.05%, and at 64.65 the content of reducing sugars in potatoes is 0.31%.

The article emphasizes the importance of correctly selecting potato varieties with a high dry matter content and low reducing sugar levels for the production of high-quality chips with a golden color, pleasant texture and without foreign taste. A direct relationship between the content of reducing sugars in potato tubers and the color of chips was determined and confirmed.

The study was conducted by the laboratories of LLC "Chipsy Lyuks" and of the National University of Food Technology in 2023—2024.

The results obtained are important for improving potato chip production technologies, as they allow optimizing the selection of raw materials and storage conditions to achieve consistently high quality of finished products.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-10

---

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ КІЛЬКОСТІ РЕДУКУЮЧИХ ЦУКРІВ КАРТОПЛІ В ПРОЦЕСІ ЗБЕРІГАННЯ ТА ЇХ ВПЛИВ НА КОЛІР ЧИПСІВ

Є. В. Строкач

В. М. Ковбаса, д-р техн. наук, ORCID ID: 009-0001-8876-3373

Національний університет харчових технологій

*У статті наведено результати аналітичних досліджень впливу кількості редукуючих цукрів для отримання картопляних чипсів високої якості. Для проведення досліджень було обрано картоплю сортів: ранньостиглі Медісон, Карлена; середньоранні Кібітс, Таурас та середньопізній Опал. Визначено зміну вмісту редукуючих цукрів в картоплі під час зберігання з серпня по січень. Встановлено, що під час зберігання в зазначений період кількість редукуючих цукрів збільшується з 0,12% до 0,22%. Зміна кольору картопляних чипсів залежно від вмісту редукуючих цукрів в картоплі коливається в діапазоні від 66,43 до 69,10 одиниць приладу.*

**Ключові слова:** картопля, бульба, сорт, чипси картопляні, сухі речовини, редукуючі цукри.

**Вступ.** Їжа є надзвичайно важливою частиною життя людини, що суттєво впливає на здоров'я та самопочуття. Збалансоване харчування сприяє нормальному функціонуванню організму людини і надає йому всі необхідні поживні речовини. Картопля є однією з найважливіших, найпоширеніших сільськогосподарських культур і одним з найцінніших продуктів харчування, поступаючись лише зерновим культурам. Картопля широко використовується для переробки в харчовій промисловості. Одним із найбільш популярних продуктів з картоплі є картопляні чипси, які виробляються згідно з ДСТУ 4608:2006. Чипси і снеки картопляні. Загальні технічні вимоги. Виробництво якісного кінцевого продукту значною мірою залежить від якості сировини — бульби картоплі. Для виготовлення продукту якість картоплі має відповідати вимогам зазначеного вище ДСТУ. Невідповідність показників може призвести до погіршення смакових якостей чипсів, зміни їх кольору після обсмажування, зниження хрусткості й твердості або появи небажаних речовин, таких як акриламід. Саме тому вивчення та оцінка якісних показників картоплі, призначеної для переробки на чипси, є актуальним завданням для харчоконцентратної галузі.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Картопля будь-якого сорту корисна для здоров'я людини, особливо якщо їсти її разом зі шкіркою. У структурі харчування населення України вона посідає одне з головних місць. Картопля містить в значній кількості вітамін С (10—25 мг на 100 г, 200—300 г картоплі забезпечує 30% його добової потреби) та високий вміст калію (370—570 мг на 100 г, 100 г забезпечує 12% добової потреби), який в організмі людини відповідає за правильну роботу м'язів, незамінний для клітинного метаболізму, нормалізації водно-сольового обміну і нормального функціонування нервової та серцево-судинної систем. Картопля містить 15—25% крохмалю і відрізняється великими запасами енергії. Білок картоплі (туберин — солерозчинний глобулін) має високу біологічну цінність і забезпечує організм усіма незамінними амінокислотами. 100 грамів картоплі задовольняє добову потребу людини: білком на 8%, вітаміном С — на 30%, вітамінами групи В — на 10%, калієм — на 12%, залізом — на 10% та іншими мікроелементами. Для забезпечення виробництва якісних картопляних чипсів, сировина має відповідати вимогам ДСТУ

4993:2008 «Картопля для промислового перероблювання. Технічні умови», яке включає цілий комплекс органолептичних показників, до яких входять: зовнішній вигляд, форма бульб, розмір бульб, наявність в'ялих бульб і бульб з позеленінням і наростами, наявність дрібних бульб до 30 мм, кількість і глибина залягання вічок, наявність бульб, пошкоджених сільськогосподарськими шкідниками, наявність бульб, пошкоджених кореневищами пірїю, наявність бульб, уражених хворобами та фізико-хімічних показників: наявність у бульбах редукуючих цукрів — не більше ніж 0,2% в післязбиральний період та 0,4% після зберігання; наявність сухих речовин і крохмалю — вміст сухих речовин від 20% до 24%, крохмалю — 13,6% до 17,0%.

Популярність картоплі обумовлена не тільки наявністю вітаміна С, калію, вмістом крохмалю і білком туберином, а ще й здатністю до тривалого зберігання, що надає можливість виробляти чипси протягом усього календарного року. Під час зберігання в бульбах відбуваються зміни, які тісно пов'язані з попереднім розвитком рослини картоплі та залежать значною мірою від сорту, умов вирощування і збирання. Після збирання бульби перебувають у стані глибокого фізіологічного спокою (1—3 місяці). При цьому припиняються процеси, уповільнюється обмін речовин, відбуваються глибокі зміни в клітинах. Накопичення цукрів у бульбах і зменшення вмісту крохмалю є одними з основних процесів у проходженні періоду спокою. Поряд з цим відбувається біосинтез аскорбінової кислоти, білковий обмін, а також фізіолого-біохімічні процеси дихання, в основу яких покладено окисний розклад цукрів. Найважливішим фактором, що впливає на тривалість спокою, є температура зберігання, яка опосередковано змінює хімічний баланс бульби, діє на перебіг фізіологічних процесів. Вміст цукрів буває тим вищим, чим нижча температура зберігання. У разі пониження температури із +3 °С до 0 °С накопичення цукрів збільшується, за підвищення температури до 7...10 °С посилюється зворотний процес — перехід цукру в крохмаль знижується, зростає його ресинтез. Процеси перетворення крохмалю в цукор і навпаки відбуваються одночасно, їхня швидкість залежить від сорту та умов зберігання. При цьому реакція крохмаль → цукор проходить швидше, ніж цукор → крохмаль, споживання цукру під час дихання (цукор → CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) зменшується втричі. Розпад крохмалю відбувається двома шляхами: гідролітичним — за участі амілази, та фосфоролітичним — за участі фосфорилази. Другий шлях є основним, оскільки активність фосфорилази в бульбах дуже висока, а амілази, навпаки, дуже низька. Після виходу зі стану спокою під час проростання спостерігається різке посилення активності амілази. У зв'язку з цим розпад крохмалю під час проростання бульб має швидше гідролітичний, ніж фосфоролітичний характер [1—5, 8, 10].

Зміни, які відбуваються під час зберігання картоплі, і їх вплив на якість картопляних чипсів досліджували такі українські науковці, як В. А. Колтунова, Т. М. Купрінова, О. А. Коваленко, Н. І. Войцешина [6, 7, 9, 11—14].

**Мета досліджень:** визначення зміни редукуючих цукрів у процесі зберігання картоплі та вплив кількості редукуючих цукрів на інтенсивність кольору картопляних чипсів.

**Матеріали і методи.** Для проведення досліджень зміни вмісту редукуючих цукрів було обрано картоплю тривалого зберігання середньоранніх сортів Кібітс, Таурас і середньо-пізнього сорту Опал. Визначення вмісту редукуючих цукрів проводили з використанням реактиву Самнера з подальшим визначенням оптичної густини отриманого розчину на ФЕК КФК-2 при довжині хвилі 540 нм. Реактив Самнера є модифікацією мідно-лужного розчину, до складу якого входять сульфат міді (CuSO<sub>4</sub>); лужний розчин — гідроксид натрію (NaOH) або калію (KOH); стабілізатори — тартрат

натрію чи калію (сіль винної кислоти), для утримання йонів міді в розчині. Метод базується на здатності редукуючих цукрів давати забарвлені сполуки з 3,5-динітросаліціловою кислотою. Дослідження залежності між показниками вмісту редукуючих цукрів і значенням кольору чипсів проводились для бульб ранньостиглих сортів Медісон, Карлена, середньоранніх сортів Кібіц, Таурас і середньопізнього сорту Опал. Визначення кольору чипсів проводили з використанням спектроколориметра Hunter Lab D25 NC. Інтенсивність кольору вимірювали в одиницях приладу. Чим вище отримане значення приладу, тим світліші чипси. Залежність кольору чипсів від значення виміру представлено на шкалі вимірювання (рис. 1.)

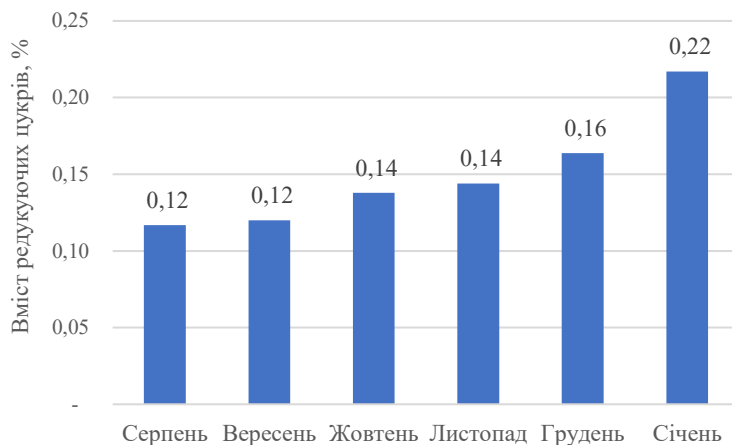


Рис. 1. Шкала кольору чипсів за Hunter Lab

Експериментальну частину роботи виконували протягом 2023—2024 рр. (з урожаєм, зібраним восени 2023 р.) у лабораторних умовах ТОВ «Чипси Люкс» та лабораторії кафедри технології хлібопекарських і кондитерських виробів НУХТ.

**Результати досліджень.** Дослідження зміни редукуючих цукрів під час зберігання проводились протягом шести місяців у період з серпня по січень для середньоранніх сортів Кібіце, Таурас і середньо-пізнього сорту Опал. У період перших двох місяців зберігання в обраних сортах бульби при температурі +8 °С спостерігається фізіологічний спокій, що підтверджуються сталим значенням вмісту редукуючих цукрів (рис. 2). Після двох місяців зберігання спостерігається незначне накопичення редукуючих цукрів в усіх сортах картоплі до рівня 0,14%, яке в січні досягло максимального значення 0,22%.

Дослідження залежності між показниками вмісту редукуючих цукрів і значенням кольору чипсів проводились для бульб ранньостиглих сортів Медісон, Карлена, середньоранніх сортів Кібіц, Таурас і середньопізнього сорту Опал. Інтенсивність кольору чипсів безпосередньо залежить від вмісту редукуючих цукрів у картопляних бульбах. Вміст редукуючих цукрів у бульбах більше ніж 0,4% є небажаним, оскільки приводить до зниження кольору чипсів. Такий вплив пов'язаний з реакцією меланоїдиноутворення (реакція Маяра).



**Рис. 2.** Зміна вмісту редуруючих цукрів вукартоплі під час зберігання

Меланоїдиноутворення — це складний окисно-відновлювальний процес взаємодії редуруючих цукрів з азотмісткими речовинами. Меланоїдини мають темне забарвлення й надають готовим виробам специфічного аромату разом із вторинними і проміжними продуктами реакції.

Реакція Маяра може відбуватися вже за температури 30...40 °С, але тільки за температури 120...130 °С ця реакція досягає швидкості, достатньої для появи ароматоутворюючих речовин. Швидкість реакції збільшується в разі присутності вологи. Оптимальним для реакції є слабкокисло середовище. Найбільш здатні до взаємодії моноцукри, а з амінокислот — лізин, лейцин, треонін, аланін.

Згідно з останніми дослідженнями [11], реакція починається з конденсації альдози та аміну в глюкозиламін, енамінол-форма якого може реагувати далі у двох напрямках.

За першим напрямком у результаті складних хімічних реакцій з утворенням редукуєних,  $\alpha$ -,  $\beta$ -дикарбонільних сполук (кетонів), які, у свою чергу, можуть полімеризуватися у високомолекулярні коричнево-чорні меланоїдини або розщеплюватися на прості летючі речовини. При цьому звільняються ароматоутворювальні речовини: метилгліоксаль, діацетил, ацетон, ацетальдегід. Вони можуть безпосередньо впливати на аромат або вступати в реакцію ще раз до утворення меланоїдинів. Другий напрямок реакції — через елімінування гідроксильних груп біля третього атома вуглецю, що призводить до утворення дезоксиозонів, які при відщепленні води утворюють фурфурол (пентозу) і 5-оксиметилфурфурол (гексозу).

Зміна кольору готових чипсів залежно від вмісту редууючих цукрів у картоплі представлено на рис. 3.

Ступінь потемніння отриманих чипсів значною мірою залежить від кількості редууючих цукрів. Як видно з отриманих даних, між вмістом редууючих цукрів у бульбах картоплі та кольором чипсів існує пряма залежність - чим вищі значення кольору чипсів, тим менший вміст редууючих цукрів у картопляних бульбах. Зважаючи на цю залежність, можна визначати придатність вибраного сорту для переробки на картопляні чипси.

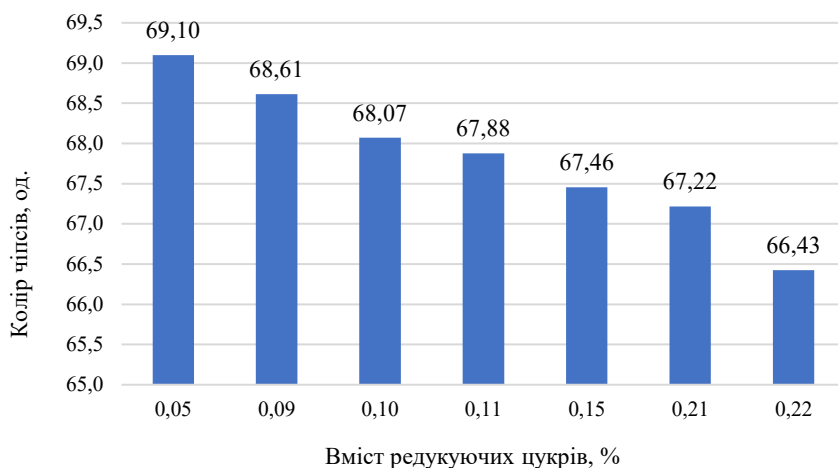


Рис. 3. Зміна кольору чіпсів залежно від вмісту редуруючих цукрів

**Висновки.** Результати досліджень свідчать про те, що в усіх сортах картоплі, які було досліджено, одним з головних факторів, що впливає на якість готових чіпсів, є вміст редууючих цукрів (глюкози і фруктози) у бульбах під час збору урожаю і в процесі зберігання картоплі. Високий рівень редууючих цукрів у картоплі приводить до отримання чіпсів з темно-коричневим забарвленням, що погіршує їх привабливість для споживачів та може привести до утворення специфічних смакових сполук, які надають продукту не зовсім приємної гіркоти. Для виробництва високоякісних картопляних чіпсів важливо використовувати спеціально підібрані сорти картоплі з низьким вмістом редууючих цукрів, що забезпечує золотисте забарвлення готового продукту.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Войцешина, Н. І. (2006). *Технологічні властивості картоплі залежно від сорту, умов вирощування та зберігання*: дис. ... канд. с.-г. наук: 05.18.03 — первинна обробка та зберігання продуктів рослинництва / Інститут картоплярства УААН. Немішаєво.
2. Дударев, І. М., Кузьмін, О. В. (2023). *Чипси з рослинної сировини*: монографія. Одеса: Олді+.
3. Калина, В. С., Вечеря, Г. М. (2016). Аналіз існуючих технологій виробництва картопляних чіпсів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*, 19(2), 146—152.
4. *Картопля* / за ред. А. А. Бондарчука, М. Я. Полоцького, В. С. Куценка. Біла Церква, 2007. Т. 3.
5. *Картоплярство: селекція* / за ред. А. А. Бондарчука, Т. М. Олійник. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020.
6. Коваленко, О. А., Ковбаса, В. М., Купріянова, Т. М., Гребень, Б. В., Нагорний, В. Ю. (2016). Дослідження процесу обсмаження картопляних чіпсів. *Харчова наука і технологія*, 10(2), 32—36.
7. Коваленко, О., Ковбаса, В., Батраченко, О., Купріянова, Т. (2015). Зміна редууючих цукрів картоплі при різних умовах її зберігання: *матеріали 81 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів*. К.: НУХТ.
8. Кожушко, Н. С., Гончаров, М. Д. (2000). Технологічна оцінка картоплі на придатність до промислової переробки. *Картоплярство*, 30, 51—60.
9. Лисогор, О. А., Ковбаса, В. М. (2014). Вплив редууючих цукрів на якість смажених картоплетпродуктів: *матеріали Міжнародної наукової конференції, присвяченій 130-річчю НУХТ*. К.: НУХТ.

10. Лисогор, О. А., Ковбаса, В. М., Купріянова, Т. М. (2014). Сировина для виробництва картопляних чіпсів. *Продовольчі ресурси. Серія: Технічні науки*, 3, 40—43.
11. Amjad, A., Javed, M. S., Hameed, A., Hussain, M., Ismail, A. (2019). Changes in sugar contents and invertase activity during low temperature storage of various chipping potato cultivars. *Food Science and Technology*, 40(5), 340-345. URL: <https://doi.org/10.1590/fst.00219> (Last accessed: 15.05.2025).
12. Goyal, B., Goyal, P. (2018). Manufacturing of potato chips and its quality improvement. *Journal of Food Processing & Technology*, 9(12).
13. Parvin, D., Ahmed, J. U., Hossain, M. M., & Mohi-Ud-Din, M. (2019). Quest for Suitable Storage Condition for Sustainable Processing Quality of Potato Tubers. *Journal of Agricultural Research*, 23(2), 61—78. URL: <https://gau.edu.bd/aba/wp-content/uploads/sites/320/2020/09/6.pdf> (Last accessed: 15.05.2025).
14. Zhiwei, C., Asunta, L. Thompson, Jawahar, Jyoti. (2024). Influence of Storage Conditions on Four Chipping Potato Cultivars Developed in North Dakota. *Journal of Food Science*, 13, 17. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11511073/pdf/plants-13-02868.pdf> (Last accessed: 15.05.2025).

УДК 547.97: 547.9

## FEATURES OF EXTRACTION OF BLACK ELDERBERRY POMACE

**O. Kleshchuk, V. Shutyuk***National University of Food Technologies***Key words:**

elderberry,  
pomace,  
extraction,  
color parameters,  
color models

**Article history:**

Received 27.03.2025

Received in revised form  
14.04.2025

Accepted 22.04.2025

**Corresponding author:**

schutyuk@i.ua

**ABSTRACT**

The paper deals with the production of natural dye from black elderberry pomace. The efficiency of extraction by water-alcohol extractants with different alcohol concentrations and the effect of fermentation on this process were analyzed. It is assumed that anthocyanins have great potential due to their attractive shades of orange, red and purple, as well as water solubility, which greatly simplifies their use in water-based food products.

The results of color changes of water-alcohol extracts obtained during laboratory studies in two color models CMYK and Lab processed in the graphic editor Adobe Photoshop were analyzed.

The influence of changes in color parameters depending on the extractant and the duration of extraction was determined, and the effect of fermentation of raw materials on the quality of the extract was investigated. It has also been proven that the use of the enzyme APRO-ZYME MACERAT ANAX significantly increases the speed of the extraction process of black elderberry pomace. The extraction of pre-fermented pomace was carried out in a LR-2.ST reactor with a EUROSTAR 100 control stirrer with an aqueous-alcoholic solution with different alcohol concentrations.

The effect of different extractants on changing the parameters of the CMYK and Lab color models was investigated. Thus, a decrease in the value of the L parameter means that the extracts become darker, with an increase in a and a decrease in b, the red color is set.

The analysis of the obtained extracts in the CMYK and Lab color models shows that the extraction duration significantly affects the transition of coloring substances from raw materials to the extract. At a process duration of 140 min and a temperature of 40 °C, changes in color parameters when using water and water-alcohol extraction (alcohol concentration of 70%) practically stop, and a transition between pigment colors occurs.

Promising areas of research on the extraction of elderberry pomace to obtain a natural colorant suitable for use in various food industries have been identified. The water-alcohol extraction allows to obtain a dye of a brighter color compared to water extraction. However, the extraction method will affect both the quality of the final product and its cost.

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-11

## ОСОБЛИВОСТІ ЕКСТРАГУВАННЯ ВИЧАВОК ЯГІД БУЗИНИ ЧОРНОЇ

О. О. Клещук, ORCID ID: 0009-0005-8129-7698

В. В. Шутюк, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-6480-5890

Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто питання отримання натурального барвника з вичавок ягід чорної бузини. Проаналізовано ефективність екстрагування водно-спиртовими екстрагентами з різною концентрацією спирту та вплив ферментування на процес, а також результати зміни кольору екстрактів, отриманих під час лабораторних досліджень у двох колірних моделях СМУК і Lab. Визначено вплив зміни параметрів кольору залежно від екстрагента і часу екстрагування, досліджено вплив ферментації сировини на якість отриманого екстракту.

Визначено перспективні напрями досліджень екстрагування вичавок ягід бузини для отримання натурального барвника, придатного для застосування в різних галузях харчової промисловості.

**Ключові слова:** бузина, вичавки, екстракція, параметри кольору, колірні моделі.

**Постановка проблеми.** Сучасні дослідження натуральних барвників є значущою сферою науки, яка отримала стрімкий розвиток. Синтетичні барвники в останні роки все частіше пов'язують із несприятливими впливами на здоров'я людини. У зв'язку з цим багато виробників харчових продуктів прагнуть замінити синтетичні барвники на натуральні альтернативи. У харчовій промисловості існує ряд пігментів природного походження, які можна використовувати як харчові барвники. Зокрема, антоціани вирізняються великим потенціалом завдяки своїм привабливим відтінкам помаранчевого, червоного та фіолетового кольорів, а також водорозчинності, що значно спрощує їх застосування у водній основі харчових продуктів.

Плоди чорної бузини здавна відомі людям як лікувальний, технологічний харчовий інгредієнт у харчовій промисловості. Науковці у своїх дослідженнях підтвердили цінність плодів бузини в лікуванні та харчуванні людини. Їх вміст багатий на антоціани, аскорбінову кислоту, хризантемін, самбуцин C<sub>27</sub>H<sub>31</sub>O<sub>15</sub>Cl, каротин, рутин тощо [1].

Таблиця 1. Фізико-хімічні показники ягід бузини чорної

| Показники                | Кількість, % | Показники            | Кількість, % |
|--------------------------|--------------|----------------------|--------------|
| Сухі речовини (загальні) | 20±0,2       | Сахароза             | 0,324        |
| Сухі речовини (розчинні) | 12,6±0,2     | Глюкоза              | 4,279        |
| Пектин                   | 0,155±0,01   | Фруктоза             | 4,137        |
| Целюлоза                 | 1,55±0,05    | Лимонна кислота      | 0,976        |
| Загальна кислотність     | 1,25±0,05    | Яблучна кислота      | 0,216        |
| Полімеризований колір    | 0,0253       | Янтарна кислота      | 0,190        |
| Загальний цукор          | 8,7±0,1      | Антоціани (мг/л)     | 863,89       |
| Відновлюючий цукор       | 8,5±0,05     | Вітамін С (мг/100 г) | 34,10        |

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сировину з дикорослих рослин збирають у багатьох країнах світу. Проте з початку 1980-х років бузину чорну промисло-

во висаджують і вирощують на дослідних і комерційних ділянках у деяких європейських країнах, США, Канаді, Чилі та Новій Зеландії [2]. Але нині загальне виробництво ягід бузини чорної порівняно з іншими ягідними культурами досить невелике, тому відповідні статистичні дані відсутні або мізерні. Найбільшими операторами вирощування даної культури у XXI ст. є підприємства Німеччини, Данії, Італії, Польщі тощо. Так, у Німеччині виробництво плодів бузини становило 1576 тонн (580 га) у 2013 р. та 1759 тонн (583 га) у 2015 р. [3]. У США найчастіше вирощують гібридні сорти бузини Нігра та Канадська. Такі гібриди стійкі до вірусів, які поширюються на плантаціях бузини нематодами [4].

При переробці бузини чорної отримане сушло піддається мацерації з ферментами для підвищення ефективності соковиділення, посилення виділення антоціанів [5]. Пастеризований сік є безпечною альтернативою споживанню плодів бузини оскільки термічне оброблення значно знижує рівень потенційно токсичного ціаногенного глікозиду [6, 7]. У процесі виробництва концентрованого соку утворюється велика кількість побічних продуктів (25...40% від загальної маси ягід) [8, 9].

Дослідження підтвердили [10], що основна частина поліфенолів і антоціанів чорної бузини залишається у вичавках після віджимання соку. Зокрема, вміст барвних речовин становить 764 мг/100 г у м'якоті, 3198 мг/100 г у шкірці та 49 мг/100 г у кісточках [11]. Незважаючи на їх високу харчову та фармакологічну цінність, вичавки чорної бузини залишаються недостатньо освоєним ресурсом. Для ефективного використання цього матеріалу як джерела барвників важливо враховувати вплив різних факторів на антоціани, щоб звести до мінімуму можливі втрати [12, 13].

Нинішній тренд використання сировини з дикорослих ягід чорної бузини в харчовій промисловості полягає не тільки в тому, що притаманні їм природні компоненти сприяють регулюванню та запобігають дисфункції організму людини в сучасних несприятливих екологічних умовах, що підкреслює актуальність проведених лабораторних досліджень.

**Мета дослідження:** визначення впливу ферментування вичавок бузини чорною на процес водно-спиртового екстрагування для отримання природного барвника.

**Матеріали і методи.** Лабораторні дослідження отримання соку та екстракції вичавок з бузини чорної проводились на кафедрі технології консервування Національного університету харчових технологій. Ягоди бузини чорної зібрані в Обухівському районі Київської області восени 2024 р. і зберігались у побутовому холодильнику при температурі  $-17 \pm 1$  °С. Перед дослідженнями ягоди розморожувались, промивалися, просушувалися та інспектувалися. В сировині визначались основні фізико-хімічні показники згідно з ДСТУ 2789:2015. Екстракцію попередньо ферментованих вичавок проводили в реакторі LR-2.ST з мішалкою EUROSTAR 100 control водно-спиртовим розчином.

Параметри кольору визначались за допомогою оброблення світлин у графічному редакторі Adobe Photoshop, зроблених фотоапаратом CANON EOS 80D за шкалами HunterLab та СМУС [14].

**Результати і обговорення.** Для дослідження використовували вичавки ягід бузини, отримані після вичавлювання соку. Екстрагування проводили при температурі 40 °С для чотирьох зразків за таких параметрів:

- перший — неферментований, екстракція водно-спиртова (70%);
- другий — екстракція водою;
- третій — екстракція водно-спиртова (70%);
- четвертий — екстракція водно-спиртова (40%).

Для ферментування зразків вичавок використовували фермент APRO-ZYME MACERAT ANAX, виробник ANAX International Trading GmbH (0,03% від маси м'язги), впродовж 4 год при температурі  $20 \pm 2$  °C. Підготовлені зразки екстрагували впродовж 200 хв (рис. 1).

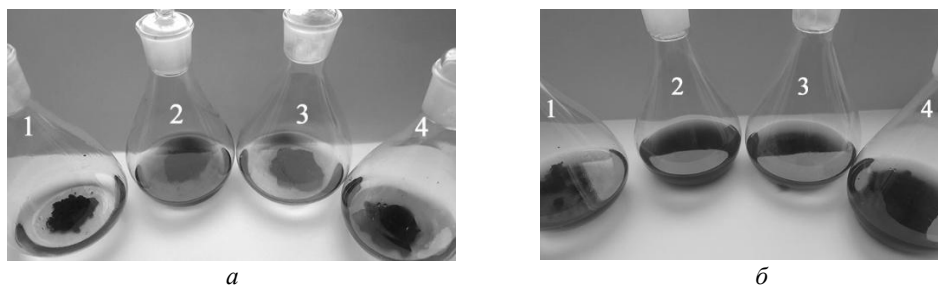


Рис. 1. Результати екстрагування вичавок з бузини через, хв: *a* — 20; *б* — 200

Результати оброблення отриманих світлин у графічному редакторі Adobe Photoshop екстрактів в адитивних кольорних моделях СМУК і Lab наведені в табл. 2. Вибір кольорної моделі СМУК пов'язаний з великою кількістю чорного кольору в шкірці ягід бузини чорної в складі вичавок.

Таблиця 2. Градація складових каналів екстрактів в адитивних кольорних моделях СМУК і Lab

| Параметр                   | Зразок 1 | Зразок 2 | Зразок 3 | Зразок 4 |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| C                          | 7,2      | 51,7     | 59,2     | 47,9     |
| M                          | 71,0     | 79,8     | 74,7     | 70,7     |
| Y                          | 54,3     | 53,5     | 53,6     | 54,4     |
| C                          | 69,5     | 75,9     | 75,8     | 67,8     |
| L                          | 16,32    | 5,663    | 5,982    | 11,307   |
| a                          | 19,821   | 9,002    | 5,19     | 9,327    |
| b                          | 3,143    | -6,009   | -5,698   | -3,87    |
| Варіант кольору СМУК і Lab |          |          |          |          |

Аналіз отриманих даних свідчить, що швидкість екстрагування ферментованих зразків вища для всіх видів екстрагенту (рис. 1, *a*), причому на початковому етапі швидкість екстракції водою вища водо-спиртової. Це пояснюється більшою швидкістю екстрагуванням водорозчинних речовин-антоціанів. Зі збільшення тривалості екстрагування інтенсивність насичення екстракту практично вирівнюється (рис. 1, *б*).

З огляду кольорної моделі СМУК більш ефективним є екстрагування ферментованих вичавок. Так, зразок № 1 (неферментований, екстракція водно-спиртова 70% спирту) має значне зменшення показника блакитного кольору — 7,2, тоді як для інших ферментованих зразків цей показник складає 47,9—59,2. Також неефективним способом є водно-спиртова екстракція (40%) ферментованих вичавок (зразок 4). Практично не відрізняються за насиченістю зразки 2 і 3 — екстракція водна та водно-спиртова (70%).

Аналіз колірної моделі Lab також підтверджує попередні висновки. Так, зразок № 1 має значення параметра  $b$  3,143 значно вище порівняно з іншими зразками, що свідчить про менше насичення синім кольором.

Дослідження кінетики зміни кольорів під час водного екстрагування вичавок (зразок 2) показали, що значення трьох складових колірної моделі СМУК збільшуються впродовж 140 хв екстрагування за винятком жовтого кольору (рис. 2). Жовтий колір на 80 хвилині екстрагування досягає значення 52 одиниць, а пізніше спостерігається стабілізація зміни в кольорі в межах 50...54 одиниць. Зміна значень кольору пояснюється похибкою визначення параметра. Після 140 хв екстрагування спостерігається зменшення насичення блакитного кольору, яке практично компенсується збільшенням чорного кольору.

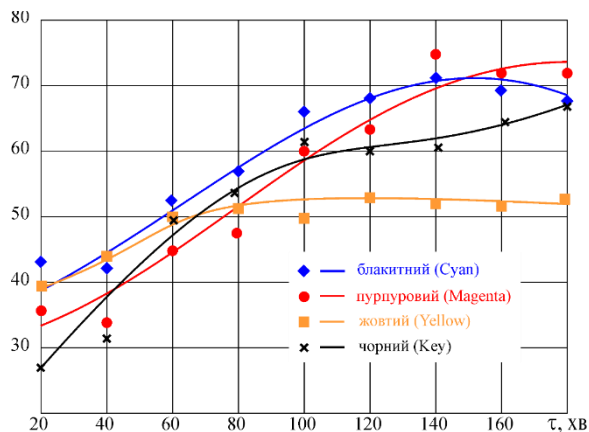


Рис. 2. Результати зміни кольору екстракту з вичавок з бузини (зразок 2) при екстрагуванні в колірній моделі СМУК

У колірній моделі Lab спостерігається подібна ситуація — після 140 хв значення складових колірної моделі практично не змінюються, що можна пояснити закінченнями активної фази водного екстрагування вичавок ягід бузини (рис. 3).

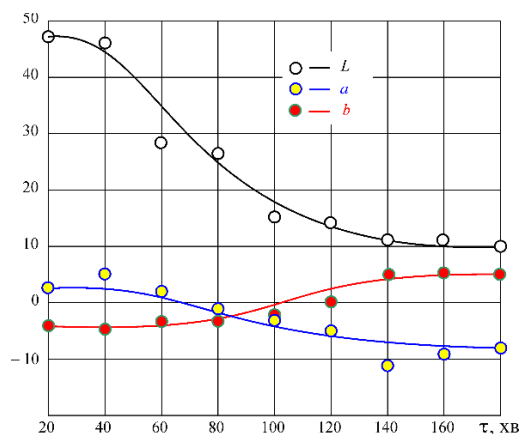


Рис. 3. Результати зміни кольору екстракту з вичавок з бузини (зразок 2) при екстрагуванні в колірній моделі Lab

Водно-спиртове екстрагування вичавок (зразок 3) має дещо інший характер зміни складових колірної моделі СМУК. Так, на початку процесу спостерігається менша

інтенсивність зміни кольору порівняно з водною екстракцією (рис. 4). Для жовтого кольору інтенсивна зміна відбувається в проміжку від 30 до 100 хв, після чого спостерігається незначне зменшення кольору з 57 до 52 одиниць. Для інших кольорів швидке зростання значень починається на 40 хв і зупиняється на 140 хвилині.

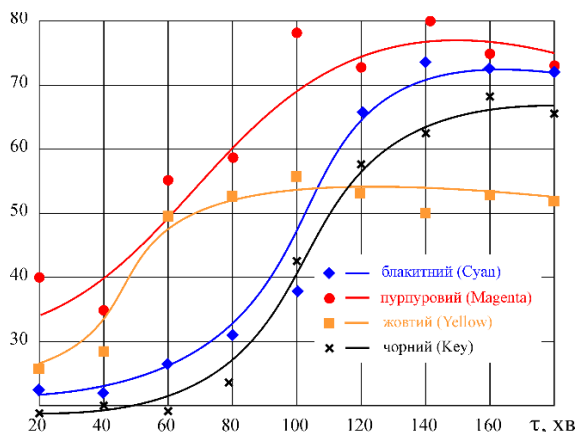


Рис. 4. Результати зміни кольору екстракту з вичавок з бузини (зразок 3) при екстрагуванні в колірній моделі СМУК

Для інших кольорів (пурпуровий, блакитний і чорний) при водно-спиртовій екстракції спостерігається повільніша зміна кольорів до 60 хвилини процесу порівняно з водною. А далі починаються більш інтенсивніші зміни значень кольорів до 140 хвилини (рис. 4), що можна пояснити наявністю в екстрагенті спиртової складової.

Аналіз зміни показників колірної моделі Lab під час водно-спиртової екстракції (рис. 5) показує, що параметр  $L$  зменшується під час всього процесу і досягає меншого показника 7 порівняно з водною екстракцією 10. Показник  $a$  до 80 хв екстрагування збільшується і досягає свого максимального значення 3, після чого зменшується до 140 хвилини (-15 одиниць), а після цього спостерігається друга хвиля зростання показника. Зміна значення показника  $b$  має один екстремум на 90 хв і досягає показника 23 одиниці, після чого зменшується до 4.

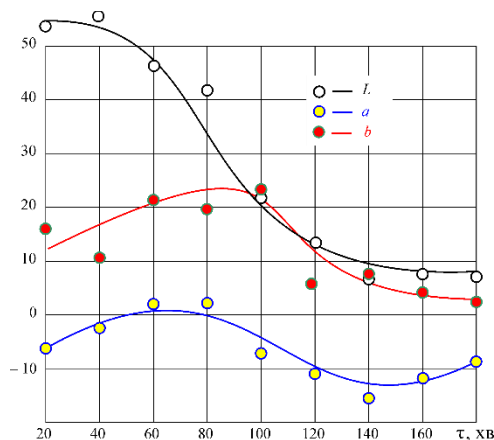


Рис. 5. Результати зміни кольору екстракту з вичавок з бузини (зразок 3) при екстрагуванні в колірній моделі Lab

Зменшення параметра  $L$  означає, що екстракти стають темнішими, зі збільшенням  $a$  і зменшенням  $b$  встановлюється червоний колір. Така зворотна реакція між параметрами  $a$  та  $b$  корелює з високим вмістом антоціанів. Навпаки, нижчі значення  $L$ , але вищі значення  $a$  і  $b$  пов'язані з коричневим кольором як можливим наслідком деградації пігменту.

**Висновки.** У вичавках з ягід бузини чорної при отриманні соку прямого віджиму міститься значна кількість поліфенолів і антоціанів: у м'якоті — 750...770 мг/100 г, у шкірці — 3100...3300 мг/100 г, які доцільно екстрагувати для використання як джерела природних барвників. Для більш ефективного екстрагування мезгу доцільно ферментувати. Це дає змогу отримати екстракт з більш насиченим кольором. Кращі результати досягаються при використанні як екстрагента води чи водно-спиртової суміші з концентрацією спирту 70%.

Аналіз отриманих екстрактів в колірних моделях СМΥК і Lab показує, що тривалість екстрагування значно впливає на перехід барвних речовин із сировини в екстракт. При досягненні тривалості процесу 140 хв та температурі 40 °C зміни параметрів кольорів при використанні водної та водно-спиртової екстракції (концентрація спирту 70%) практично припиняються і відбувається перехід між кольорами пігменту.

Використання отриманих результатів потребує подальших лабораторних досліджень з подальшою апробацією у виробничих умовах розроблених технологічних режимів. Так, водно-спиртова екстракція дає змогу отримати барвник більш яскравого кольору порівняно з водною. Але спосіб екстрагування буде впливати як на якість кінцевого продукту, так і на його собівартість.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Benderska, O., Bessarab, A., Shutuyuk, V. (2016). Study of the use of edible powders tomato sauce technologies. *Food science and Technology*, 10(3), 59—65.
2. Finn, C. E., Thomas, A. L., Byers, P. L., Serçe, S. (2008). Evaluation of American (*Sambucus canadensis*) and European (*S. nigra*) elderberry genotypes grown in diverse environments and implications for cultivar development. *Hortscience*, 43, 1385—1391. [CrossRef].
3. DStatis (2016). Obst, gemüse, gartenbau. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Accesed 2016-11-26 at: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/ObstGemueseGartenbau/Tabellen/>.
4. Finn, C. E., Thomas, A. L., Byers, P. L., Serçe, S. (2008). Evaluation of American (*Sambucus canadensis*) and European (*S. nigra*) elderberry genotypes grown in diverse environments and implications for cultivar development. *HortScience*, 43:1385—1391. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.5.1385>.
5. Vulić, J., Vračar, L., Šumić, Z. (2008). Chemical characteristics of cultivated elderberry fruit. *Acta Period. Technol.*, 39, 85—90.
6. Charlebois, D., Byers, P. L., Finn, C. E., Thomas, A. L. (2010). Elderberry: Botany, Horticulture, Potential. *Hortic. Rev.*, 37, 213—280.
7. Mikulic-Petkovsek, M., Schmitzer, V., Slatnar, A., Todorovic, B., Veberic, R., Stampar, F., Ivancic, A. (2014). Investigation of Anthocyanin Profile of Four Elderberry Species and Interspecific Hybrids. *J. Agric. Food Chem.*, 62, 5573—5580.
8. Ercisli, S., Tosun, M., Akbulut, M. (2009). Physico-chemical characteristics of some wild grown European elderberry (*Sambucus nigra L.*) genotypes. *Pharmacogn. Mag.*, 5, 320—337.
9. Diviš, P., Vespalcová, M., Pořízka, J., Matějček, A., Kaplan, J. (2015). Elemental composition of fruits from different Black elder (*Sambucus nigra L.*) cultivars grown in the Czech Republic. *J. Elem.*, 20, 549—557.
10. Khomych, G. P., Polozhishnikova, L. O. (2015). The change in the content of biologically active substances of black elderberry in the production of juice. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11(77)), 62. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51064>.
11. Setz, C. et al. (2023). European Black Elderberry Fruit Extract Inhibits Replication of SARS-CoV-2 In Vitro. *Nutraceuticals*, 3(1), 91—106. URL: <https://doi.org/10.3390/nutraceuticals3010007>.

12. Душак, О. В., Левківська, Т. М., Панчук, О. В. (2024). Перспективи використання нетрадиційної дикорослої сировини в технологіях концентратів солодких страв. *Продовольчі ресурси*, 12(22), 73—81.
13. Osman, A. G. et al. (2023). Elderberry extracts: characterization of the polyphenolic chemical composition, quality consistency, safety, adulteration, and attenuation of oxidative stress- and inflammation-induced health disorders. *Molecules*, 28(7), 3148. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules28073148>.
14. Shutyuk, V., Dushchak, O., Bessarab, O. (2024). Physico-chemical characteristics of dried green onion semi-finished products and their rehydration ability. *Ukrainian Food Journal*, 13(4), 753—765.

УДК 628.492:519.6

# ANALYSIS OF NUMERICAL MODELING METHODS OF THE THERMAL CONVERSION OF BIOMASS OF PLANT ORIGIN

O. Osmak, O. Seriogin, S. Blazhenko  
National University of Food Technologies

---

**Key words:**

plant biomass,  
gas generation,  
synthesis gas,  
thermodynamic modeling,  
heat balance,  
mass balance

---

**Article history:**

Received 05.02.2025  
Received in revised form  
12.03.2025  
Accepted 15.03.2025

---

**Corresponding author:**  
ingmex@ukr.net

---

**ABSTRACT**

An analysis of printed sources on the issue of numerical modeling of the process of gasification of biomass of plant origin was conducted. Taking into account the advantages and disadvantages, the use of gasifiers of the layered type of the reverse process for the production of synthesis gas was justified.

The main approaches to numerical modeling of the process of gasification of biomass were considered, in particular the kinetic and thermodynamic equilibrium models. The bottlenecks in existing numerical models were analyzed, in particular their limitations in assumptions and limitations in covering all the necessary aspects for the accurate reproduction of real experimental data obtained on real raw materials. When studying the process of gasification of biomass, the prospects for the application of thermodynamic modeling were considered. At the same time, considerable attention was paid to the analysis of the kinetics and thermodynamics of processes, the influence of ash formation on reactions, as well as taking into account the uneven distribution of temperature and concentrations in the gasifier.

Chemical reactions in gas generators are described through vector equations that take into account the complexity of interactions between biomass, air and the resulting gases. The system of equations involves the laws of mass balance, equilibrium and heat conservation. The method of successive approximations is used to predict the gas composition and thermodynamic parameters.

In general, the work focuses on the shortcomings of existing numerical models of gas generation from biomass of plant origin, in particular, the lack of proper consideration of the influence of secondary reactions and the diversity of raw material properties. At the same time, further development of numerical modeling based on stoichiometric analysis, energy balances and improvement of the technical description of the process remains relevant and requires additional research.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-12

---

# АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ БІОМАСИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

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

О. О. Сergyogin, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-0238-2922

С. І. Блаженко, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-9152-4859

Національний університет харчових технологій

*Розглянуті основні підходи до числового моделювання процесу газифікації біомаси, зокрема кінетична та модель термодинамічної рівноваги. Проаналізовані вузькі місця в існуючих числових моделях, зокрема їх обмеженість припущеннями та обмеженість в охопленні всіх необхідних аспектів для точного відтворення реальних експериментальних даних, отриманих на реальній сировині. При дослідженні процесу газогенерації біомаси розглянуто перспективи застосування термодинамічного моделювання. При цьому значну увагу приділено аналізу кінетики та термодинаміки процесів, впливу формування золи на реакції, а також врахуванню нерівномірного розподілу температури та концентрацій у газогенераторі.*

**Ключові слова:** рослинна біомаса, газогенерація, синтез-газ, термодинамічне моделювання, тепловий баланс, масовий баланс.

**Вступ.** Аналіз вітчизняних і закордонних друкованих джерел показує, що однією з найбільш зручних, з точки зору практичного застосування, є технологія, яка використовує для виробництва синтез-газу енергетичні комплекси з газогенератором шарового типу оберненого процесу у своєму складі. Це пояснюється особливостями конструкції останнього та застосовуваних технологій, які поєднують у собі можливість регулювання одиничної потужності, хороші екологічні показники, а також якість одержуваного генераторного газу.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** У результаті літературного пошуку виявлено два основні підходи до моделювання процесу газифікації біомаси рослинного походження в газогенераторах шарового типу оберненого процесу — кінетична модель, яку рекомендується використовувати при температурах нижче 750 °С, і модель термодинамічної рівноваги.

Під час аналізу створених на сьогодні чисельних моделей процесу газифікації рослинної біомаси особливу увагу привертають ті, в основі яких покладено саме термодинамічний аналіз, що базується на можливості однозначного визначення складу і термодинамічних властивостей системи при заданих параметрах температури і тиску. Він надає можливість одночасно визначити практично весь набір технічних характеристик, за винятком летких.

**Мета досліджень:** проаналізувати існуючі числові моделі процесу газогенерації біомаси рослинного походження, а також підтвердити їх адекватність, порівнюючи з відомими експериментальними даними.

**Матеріали і методи.** Зважаючи на різноманіття біомаси рослинного походження, не існує стандартної методики знаходження цих характеристик, тому актуальним залишається питання розробки такої методики. Одним із методів чисельного опису процесів, що відбуваються в газогенераторі під час газифікації біомаси рослинного походження, є термодинамічне моделювання, в результаті якого визначають:

- 1) рівноважний склад синтез-газу;
- 2) відносні кількості окислювача й тепла, які необхідні для процесу газифікації;

3) оптимальні значення калорійності синтез-газу та ефективності процесу.

**Результати досліджень.** Схематично рівноважну термодинамічну систему відображено на рис. 1.

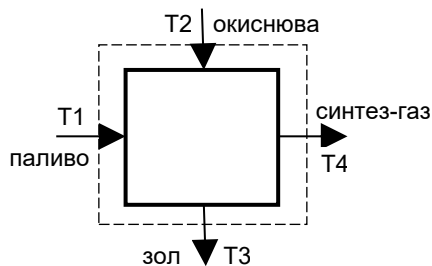


Рис. 1. Схема рівноважної термодинамічної системи

Вихідна система складається з таких рівнянь [1]:

1. Закон Дальтона, що зв'язує парціальний тиск рівноважних фракцій з повним тиском системи:

$$\sum_{i=1}^M p_i = p_0, \quad (1)$$

де  $M$  — загальна кількість компонент у газі;  $p_0$  — повний тиск;  $p_i$  — тиск  $i$ -го компонента.

2. Рівняння збереження маси:

$$\frac{\sum_{i=1}^M v_{j,i} \cdot p_i}{\sum_{i=1}^M v_{N,i} \cdot p_i} = B_j, \quad (2)$$

де  $v_{j,i}$  — стехіометричний коефіцієнт, що визначає зміст  $j$ -го елемента в  $i$ -й компоненті;  $N$  — загальне число хімічних елементів у системі;  $B_j$  — відношення вмісту  $j$ -го елемента до  $N$  елементів у вихідній газовій суміші.

3.  $(M - 1) - (N - 1) = M - N$  рівняння рівноваги складних речовин:

$$p_i = \frac{K_i}{\prod_{j=1}^N p_j} \cdot v_{j,i}, \quad (3)$$

де  $K_i$  — константа рівноваги реакцій дисоціації на атоми;  $p_i$  — парціальні тиски складних речовин;  $p_j$  — парціальні тиски атомарних складових.

4.  $l$  рівнянь рівноваги між конденсованою та газовою фазами:

$$p_l = p_{sl}, \quad (4)$$

де  $l$  — кількість компонент у конденсованій фазі;  $p_{sl}$  — тиск насиченої пари компоненти, що конденсуються.

При цьому припускається, що кожна компонента знаходиться в рівновазі тільки з газовою фазою і таким чином конденсація компонент відбувається роздільно.

Система рівнянь вирішується методом послідовних наближень. У працях [1—3] представлені результати чисельного термодинамічного визначення швидкого окислення вуглецю, що міститься у вхідній сировині, в ході процесу термічного розкладання біомаси. Проте необхідно зазначити, що в згаданих дослідженнях усі газоподібні речовини приймалися ідеальними газами. Передбачалося, що при відносно невисоких значеннях тиску (до 0,3 МПа) відхилення властивостей утворених газів від ідеальних будуть незначні і цими розбіжностями можна знехтувати.

У працях [1—3] зазначено, що тиск у газогенераторах шарового типу зворотного процесу практично однаковий по всьому об'єму шахти, однак температура і концентрації окремих складових істотно відрізняються по перетину газогенератора. Досягнення рівноважного стану визначається особливостями нерівномірного розподілу

температури в шахті газогенератора і швидкістю проходження через неї газової суміші. Варто зауважити, чим вища температура зони і менша швидкість проходження через цю зону продуктів реакцій газоутворення, тим більша швидкість встановлення рівноваги. Також до недоліків, проаналізованих методів варто віднести той факт, що вони не враховують теплові ефекти реакцій. Таким чином, термодинамічний аналіз дає змогу зробити висновки лише про загальні закономірності зміни рівноважного стану системи залежно від її вихідних параметрів.

Безумовно, з погляду практичного застосування технології отримання синтез-газу шляхом термохімічної конверсії біомаси рослинного походження в газогенераторах шарового типу оберненого процесу особливо цікавим є визначення діапазону стабільної роботи газогенератора. В працях [4, 5] процес газифікації досліджується з точки зору стехіометричного аналізу, а також з урахуванням масового і теплового балансів. При цьому приймаються ряд припущень: система одновимірна; поперечний переріз вихідного палива постійний; утворений синтез-газ підпорядковується законам ідеального газу; потік газу через шар палива може бути описаний за допомогою закону Дарсі; швидкість переміщення палива постійна; пористість і проникність змінюється в часі і в процесі переміщення палива по шахті газогенератора; розглядається тільки конвективна складова теплообміну; процес окислення відбувається лише на поверхні частинок.

З умови збереження маси для  $i$ -ої компоненти газової суміші отримаємо [6]:

$$\frac{\partial \rho_{gi}}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_{gi} w_{gi})}{\partial x} = I_i + S_{gi}, \quad (5)$$

де  $\rho_{gi}$  — густина  $i$ -ї компоненти газової суміші,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $w_{gi}$  — швидкість  $i$ -ї компоненти газової суміші,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $I_i$  — інтенсивність масообміну  $i$ -ї компоненти,  $\text{кг}/(\text{с м}^3)$ ;  $S_{gi}$  — питома масова витрата  $i$ -ї компоненти газової суміші,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \text{ с})$ ;  $\tau$  — час,  $\text{с}$ .

З умови збереження маси для  $i$ -ї компоненти палива отримаємо:

$$\frac{\partial \rho_{pi}}{\partial \tau} + w_p \frac{\partial(\rho_{pi})}{\partial x} = -I_i + S_{pi}, \quad (6)$$

де  $\rho_{pi}$  — щільність  $i$ -ї компоненти палива,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $w_p$  — швидкість переміщення палива,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $S_{pi}$  — питома масова витрата  $i$ -ї компоненти палива,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \text{ с})$ .

Баланс енергії для газової суміші матиме вигляд:

$$\frac{\partial Q_{gi}^r}{\partial \tau} + \frac{\partial(Q_{gi}^r w_g)}{\partial x} = E_g + \sum_i (I_i h_{згi} + S_{вxi} h_{вxi}), \quad (7)$$

де  $Q_{gi}^r$  — нижча теплота згорання газу,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $w_g$  — швидкість газу,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $E_g$  — питома теплотворність газу,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  $S_{вxi}$  — питома масова витрата  $i$ -ї компоненти на вході в зону газоутворення,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \text{ с})$ ;  $h_{вxi}$  — ентальпія  $i$ -ї компоненти на вході в зону газоутворення,  $\text{Дж}/\text{кг}$ .

Баланс енергії для палива:

$$\frac{\partial Q_{pi}^r}{\partial \tau} + w_p \frac{\partial(Q_{pi}^r)}{\partial x} = E_p - \sum_i I_i h_{згi} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p^p \frac{\partial}{\partial x} \right), \quad (8)$$

де  $Q_{pi}^r$  — нижча теплота згорання палива,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $w_p$  — швидкість руху палива,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $E_p$  — питома теплотворність палива,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  $I_i$  — інтенсивність масообміну  $i$ -ї компоненти,  $\text{кг}/(\text{с м}^3)$ ;  $h_{згi}$  — ентальпія  $i$ -ї компоненти в зоні газоутворення,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $\lambda_p^p$  — коефіцієнт радіаційної теплопровідності палива,  $(\text{Вт}/\text{м К})$ ;  $T_p$  — температура палива,  $\text{К}$ .

Швидкість газової суміші (за законом Дарсі):

$$w_g = w_p - \frac{K}{\mu_r} \left( \frac{dp}{dx} + g \cos \vartheta \rho_g \right), \quad (9)$$

де  $K$  — проникність палива,  $\text{м}^2$ ;  $\mu_{\Gamma}$  — динамічна в'язкість газу,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ ;  $p$  — тиск газу, Па;  $\vartheta$  — кут між напрямком руху і вертикаллю, градус;  $\rho_{\Gamma}$  — густина газу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $w_{\Pi}$  — швидкість руху палива,  $\text{м}/\text{с}$  ( $w_{\Pi} = \text{const}$ ).

Закон Менделєєва-Клапейрона для ідеального газу:

$$p = \frac{RT_{\Gamma}\rho_{\Gamma}}{M_{\Gamma}}, \quad (10)$$

де  $R$  — універсальна газова постійна,  $R = 8314 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $T_{\Gamma}$  — температура газу, К;  $\rho_{\Gamma}$  — щільність газу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $M_{\Gamma}$  — молекулярна маса газу,  $\text{кг}$ .

Кожен компонент газової суміші має свою молекулярну масу, що в сукупності утворюють газову суміш. Тоді з умови збереження маси газової суміші отримаємо:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( n_{\Gamma} w_{\Gamma} + \sum_i \frac{m_{\Gamma i} \Delta w_{\Gamma i}}{M_i} \right) = \sum_i \frac{I_i + S_{\Gamma i}}{M_i}, \quad (11)$$

де  $n_{\Gamma}$  — кількість компонент газової суміші;  $\Delta w_{\Gamma i}$  — зміна швидкості  $i$ -ї компоненти газу,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $M_i$  — молекулярна маса  $i$ -ї компоненти,  $\text{кг}$ .

Кількість компонент газової суміші визначаємо за формулою:

$$n_{\Gamma} = \sum_i \frac{\rho_{\Gamma i}}{M_i} = \Pi \rho_{\Gamma} \sum_i \frac{C_{\Gamma i}}{M_i} = \frac{\Pi \rho_{\Gamma}}{M_i}, \quad (12)$$

де  $\Pi$  — пористість сировини, біомаси рослинного походження;  $C_{\Gamma i}$  — масова частка  $i$ -ї газової частинки.

З урахуванням всіх перетворень рівняння Дарсі набуде вигляду:

$$\frac{dp}{dx} = - \left( \frac{\mu_{\Gamma}(w_{\Gamma} - w_{\Pi})}{K} \right) - g \cos \vartheta \rho_{\Gamma}. \quad (13)$$

Формула (13) використовується для розрахунку розподілу тиску на початковій стадії утворення синтез-газу.

Густина газу та вхідної сировини визначається як сума густин компонент газової фази і палива відповідно:

$$\rho_{\Gamma} = \sum_i \rho_{\Gamma i}, \quad \rho_{\Pi} = \sum_i \rho_{\Pi i}. \quad (14)$$

Маса газу та палива:

$$m_{\Gamma} = \frac{\rho_{\Gamma}}{\Pi}, \quad m_{\Pi} = \frac{\rho_{\Pi}}{1 - \Pi}. \quad (15)$$

Швидкість газу визначається як середньозважена швидкість:

$$w_{\Gamma} = \frac{\sum_i \rho_{\Gamma i} w_{\Gamma i}}{\rho_{\Gamma}}, \quad (16)$$

де  $w_{\Gamma i}$  — швидкість  $i$ -ї компоненти газової суміші визначається за формулою:

$$w_{\Gamma i} = w_{\Gamma} + \Delta w_{\Gamma i}, \quad (17)$$

в якій  $\Delta w_{\Gamma i} = - \frac{D_i}{\Pi C_{\Gamma i}} \frac{dC_{\Gamma i}}{dx}$  — зміна швидкості  $i$ -ї компоненти газової суміші,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $D_i$  — коефіцієнт дифузії  $i$ -ї компоненти,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Молекулярна маса газу:

$$M_{\Gamma} = \frac{M_i}{\sum_i C_{\Gamma i}}. \quad (18)$$

Ентальпія газу і палива:

$$h_{\Gamma} = \frac{Q_{\Gamma i}^r}{m_{\Gamma}}, \quad (19)$$

де  $Q_{\Gamma i}^r$  — нижча теплота згоряння газу,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;

$$h_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi i}^r}{m_{\Pi}}, \quad (20)$$

де  $Q_{\Pi i}^r$  — нижча теплота згоряння палива,  $\text{Дж}/\text{кг}$ .

Ентальпія палива для  $i$ -ї компоненти в зоні газоутворення:

$$h_{3\Gamma i}^{\Pi} = c_{\Pi i} (T_{\Pi} - T_{0\Pi}) + \Delta h_{3\Gamma i}, \quad (21)$$

де  $c_{pi}$  — теплоємність  $i$ -ї компоненти палива, Дж/(кг К);  $T_{0п}$  — початкова температура палива, К;  $T_{п}$  — температура палива, К;  $\Delta h_{3гi}$  — приріст ентальпії  $i$ -ї компоненти палива в зоні газоутворення, Дж/кг.

Ентальпія, що утворюється в результаті летких компонентів синтез-газу при взаємодії з  $i$ -ю компонентою:

$$h_{3гi}^r = c_{гi}(T_{г} - T_{0г}) + \Delta h_{3гi}, \quad (22)$$

де  $c_{гi}$  — теплоємність  $i$ -ї компоненти газу, Дж/(кг К);  $T_{0г}$  — початкова температура газу, К;  $T_{г}$  — температура газу, К;  $\Delta h_{3гi}$  — ентальпія піролізу  $i$ -ї компоненти в зоні газоутворення, Дж/кг.

Коефіцієнт теплопередачі від палива до газу визначається таким співвідношенням:

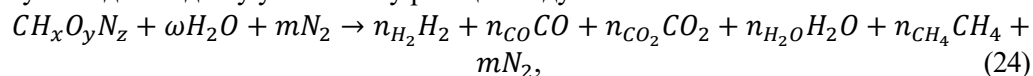
$$k_{п-г} = k_{0п-г} + c_1 Re_{г}^{c_2} Pr_{г}^{c_3}, \quad (23)$$

де  $Re_{г}$  — число Рейнольдса для газу;  $Pr_{г}$  — число Прандтля для газу;  $k_{0п-г}$  — коефіцієнт теплопередачі від палива до газу при  $w_{г} = w_{п}\omega_{г} = \omega_{г}$ , Вт/(м<sup>2</sup> с);  $c_1, c_2, c_3$  — емпіричні константи для кожного виду палива.

Аналіз літературних джерел надає можливість зробити висновок, що існуючі на тепер чисельні моделі процесу утворення синтез-газу з біомаси рослинного походження далекі від досконалості. Вони не дають змоги повною мірою підтвердити збіг розрахункових та експериментальних даних у всьому діапазоні режимних параметрів. Так, для прикладу, модель, представлена в [7], дає хорошу збіжність чисельного моделювання та експериментального дослідження при низьких швидкостях нагріву ( $\sim 2,219 \cdot 10^{-4}$  Дж м<sup>2</sup>/с), але не враховує вплив вторинних реакцій під час газоутворення.

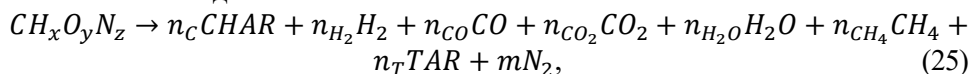
Для визначення летючих, як правило, застосовують два методи [5]. Згідно з першим методом, використовуються дослідні дані, типові для цього випадку, які проте не враховують специфічних особливостей, властивих тій чи іншій сировині [8, 9]. За другим методом необхідно мати елементний склад і результати лабораторних досліджень щодо виходу летючих для конкретно використовуваного палива [5].

Для опису процесу термоконверсії біомаси рослинного походження використовують одностадійну узагальнену реакцію виду:



де  $x, y, z$  — кількість атомів водню, кисню та азоту, приведена до одного атома вуглецю;  $\omega$  — кількість води, приведена до 1 моля органічної маси палива, кг/моль;  $m$  — кількість азоту.

У разі процесу піролізу можна записати подібну одностадійну узагальнену реакцію, яка матиме вигляд:



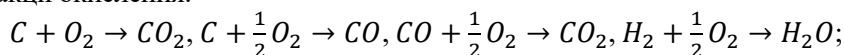
де  $CHAR$  — кокс;  $TAR$  — смола.

При цьому їхній бруто-склад може бути виражений формулою —  $CH_{x_1}O_{y_1}N_{z_1}$  і  $CH_{x_2}O_{y_2}N_{z_2}$  відповідно.

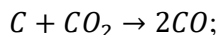
Запис подібних рівнянь є першим кроком при термодинамічному моделюванні, з них можна припустити основні реакції, які відбуваються при термохімічній конверсії біомаси рослинного походження.

Таким чином, механізм термоконверсії записують у вигляді декількох бруто-реакцій, в яких паливо та кокс представлені вуглецем і мають такий вигляд [10]:

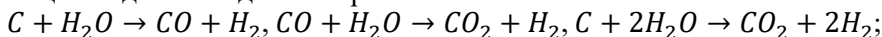
- реакції окислення:



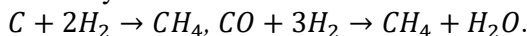
- реакція монооксиду вуглецю:



- реакції з водою та водяною парою:



- реакції утворення метану:



Наведені реакції відбуваються як із поглинанням, так і з виділенням тепла.

Хімічні реакції в газогенераторі можуть бути записані у векторній формі (вектор сьомого порядку з координатами, розташованими в такій послідовності:  $C, O_2, H_2O, CO, CO_2, H_2, CH_4$ ):

$$\begin{aligned} \bar{r}_1 &= \left(-1, -\frac{1}{2}, 0, 1, 0, 0, 0\right), \bar{r}_2 = (-1, -1, 0, 0, 1, 0, 0), \bar{r}_3 = (-1, 0, -1, 1, 0, 1, 0); \\ \bar{r}_4 &= (-1, 0, 0, 2, -1, 0, 0), \bar{r}_5 = (-1, 0, 0, 0, 0, -2, -1), \bar{r}_6 = \left(0, -\frac{1}{2}, 1, 0, 0, -1, 0\right); \\ \bar{r}_7 &= \left(0, -\frac{1}{2}, 0, -1, 1, 0, 0\right), \bar{r}_8 = (0, 0, -1, -1, 1, 1, 0), \bar{r}_9 = (0, 0, 1, -1, 0, -3, 1); \\ \bar{r}_{10} &= (-1, 0, -2, 0, 1, 2, 0), \bar{r}_{11} = (-3, 0, -2, 2, 0, 0, 1), \bar{r}_{12} = (-2, 0, -2, 0, 1, 0, 1). \end{aligned}$$

До газогенератора надходять: біомаса (паливо), повітря (кисень, водяна пара). На виході — синтез-газ, у якому присутні  $CO, CO_2, H_2, CH_4$ . У векторній формі загальна реакція може бути записана у вигляді  $(-, -, -, +, +, +)$ . Такий вигляд мають вектори  $\bar{r}_1, \bar{r}_2, \bar{r}_3, \bar{r}_{10}, \bar{r}_{11}, \bar{r}_{12}$ . Усі інші реакції можуть бути отримані шляхом лінійних комбінацій з базисних реакцій:  $\sum \alpha_i \cdot r_i$  де  $0 < \alpha < 1$ . Багатокутник  $\bar{r}_1 - \bar{r}_2 - \bar{r}_3 - \bar{r}_{10} - \bar{r}_{11} - \bar{r}_{12}$  містить усі можливі комбінації по вихідному продукту.

Відхилення від лінії теплового балансу в ліву сторону свідчить про наявність теплових втрат, високу температуру синтез-газу на виході з газогенератора, наявності реакції утворення метану. Відхилення в праву сторону може слугувати маркером наявності зовнішнього джерела тепла. Ступінь цього відхилення можна використовувати при оцінці конкретного технічного процесу.

Для визначення зони сухої перегонки необхідно враховувати кінетику виходу летючих речовин. Процес найкраще описується рівнянням першого порядку або системою з  $n$  подібних рівнянь, де, як правило,  $n = 2$ . Це неодноразово підтверджувалось у ході проведення фізичних експериментів [11].

$$df = K_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot f dt, \quad (26)$$

де  $f$  — частка летючих, що залишаються у частинці палива;  $E$  — енергія активації;  $K_0$  — константа швидкості реакції.

У [12] запропонована формула залежності виходу летючих від температури:

$$\log f = b_0 + b \cdot \log T + c \cdot V, \quad (27)$$

де  $b_0, b, c$  — константи,  $T$  — температура, °C;  $V$  — відсотковий вміст летючих у вхідному паливі (на горючу масу).

Ряд авторів [13, 17] вважають, що термічний розпад молекули речовини складається з великого числа незалежних реакцій, до кожної з яких застосовано рівняння першого порядку. При цьому стверджується, що величину енергії активації можна виразити у вигляді безперервної функції розподілу  $F(E)$ . Тоді  $F(E)dE$  дає вагову частку летючих, що вийшли з частинки за нескінченно великий проміжок часу, при цьому значення енергії активації знаходиться в межах між  $E$  і  $E + dE$ . Як правило, як функцію розподілу використовують функцію Гауса:

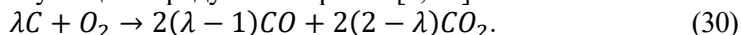
$$F(E) = \frac{e^{\left[\frac{-(E-E_0)^2}{2\sigma^2}\right]}}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma}, \quad (28)$$

де  $\sigma$  — середньоквадратичне відхилення.

Тоді

$$\frac{f}{V_1} = \int_0^\infty e^{\left[-\int_0^t k_0 \cdot e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} dT\right]} \cdot F(E) dE, \quad (29)$$

де константи  $k_0$ ,  $E_0$ ,  $\sigma$ ,  $V_1$  визначаються на основі дослідних даних. Переваги такого підходу полягають в усуненні залежності від температури, що дає змогу домогтися кореляції між експериментальними даними по конкретному виду палива для різних умов експерименту і одними й тими ж значеннями констант  $K_0$ ,  $E_0$ ,  $\sigma$ ,  $V_1$ . Реакції окислення нерідко об'єднують в одну, вводячи коефіцієнт  $\lambda$ , який характеризує первинний розподіл окислів вуглецю в продуктах згоряння [5, 14]:



У всіх моделях швидкість руху твердої фази приймається постійною і визначається швидкістю відведення золи через колосникові ґрати. При цьому нехтують аксіальним та радіальним тепло- і масопереносом. Також передбачається, що тиск зберігається незмінним у всьому обсязі газогенератора. У [5] реактор розглядається у вигляді циліндра, що складається з внутрішнього адіабатичного ядра, для якого справедливі зазначені вище припущення, і зовнішньої області товщиною  $l = \sqrt{\frac{K_l \tau}{\rho \cdot c_p}}$ , що враховує теплові втрати в навколишнє середовище. Тут  $K_l$  — коефіцієнт радіальної теплопровідності прикордонного шару;  $\tau$  — час перебування частинки в реакторі;  $\rho \cdot c_p$  — добуток густини вуглецевмісного палива на його теплоємність.

З урахуванням викладених вище припущень рівняння масового балансу можна представити у вигляді:

- для вуглецю: 
$$\frac{\partial C_C}{\partial t} = \frac{\partial F_C}{\partial z} + (r_3 + r_4 + r_5 + r_6); \quad (31)$$

- для пари: 
$$\frac{\partial C_{H_2O}}{\partial t} = -\frac{\partial F_{H_2O}}{\partial z} - (1 - \beta) \cdot r_3 + \beta \cdot (r_4 + r_5) + \frac{\alpha}{2} \cdot r_6 - r_8; \quad (32)$$

- для водню:

$$\frac{\partial C_{H_2}}{\partial t} = -\frac{\partial F_{H_2}}{\partial z} + \left(1 - \beta + \frac{\alpha}{2}\right) \cdot r_3 + \left(\frac{\alpha}{2} - \beta\right) \cdot r_4 - \left(\frac{4 - \alpha - 2 \cdot \beta}{2}\right) \cdot r_5 + r_8; \quad (33)$$

- для CO: 
$$\frac{\partial C_{CO}}{\partial t} = -\frac{\partial F_{CO}}{\partial z} + r_3 + 2 \cdot r_4 + \left(2 - 2 \cdot \gamma - \beta + \frac{\alpha}{2}\right) \cdot r_6 - r_8; \quad (34)$$

- для CO<sub>2</sub>: 
$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = -\frac{\partial F_{CO_2}}{\partial z} + \left(2 \cdot \gamma + \beta - \frac{\alpha}{2} - 1\right) \cdot r_6 - r_4 + r_8; \quad (35)$$

- для CH<sub>4</sub>: 
$$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial t} = -\frac{\partial F_{CH_4}}{\partial z} + r_5; \quad (36)$$

- для O<sub>2</sub>: 
$$\frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} = -\frac{\partial F_{O_2}}{\partial z} - \gamma \cdot r_6; \quad (37)$$

- для газоподібної фази:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{\partial F_i}{\partial z} + \left(\frac{\alpha}{2} + 1\right) \cdot r_3 + \left(\frac{\alpha}{2} + 1\right) \cdot r_4 + \left(\frac{\alpha}{2} - 1\right) \cdot r_5 + \left(\frac{\alpha}{2} + 1 - \gamma\right) \cdot r_6, \quad (38)$$

де  $F_i$  — молярний потік  $i$ -ї компоненти;  $z$  — координата по висоті газогенератора;  $r_i$  — швидкість реакції  $i$ -ї компоненти;  $V$  — швидкість твердої фази.

Передбачається, що реагенти входять у контакт з твердою фазою при температурі газу, а залишають поверхню частинок при температурі, яку має тверда фаза.

Енергетичний обмін між твердою і газоподібною фазами можна врахувати за допомогою коефіцієнта тепловіддачі —  $h$ , який враховує всі види теплообміну. Експериментальні дані щодо  $h$  в зоні активного газоутворення практично відсутні [12], тому для визначення коефіцієнта тепловіддачі використовуються співвідношення, отримані для  $h$  у за відсутності хімічної рівноваги [15]. У праці [9] запропоновано використовувати коефіцієнт пропорційності  $\xi$ . Тобто коефіцієнт тепловіддачі  $h_1 = \xi \cdot h$ , при цьому коефіцієнт пропорційності  $\xi$  визначають шляхом порівняння результатів чисельного моделювання та експериментальних даних.

Рівняння енергетичного балансу матиме вигляд [16]:

- для твердої фази (вуглець):

$$-\frac{\partial}{\partial t} (C_s \cdot H_s) + \frac{\partial}{\partial z} (F_s \cdot H_s) = \sum_{i=3}^7 r_i \cdot \Delta H_i(T_s) + \sum_{i=3}^7 r_i \cdot \sum_{j=1}^N [b_{ij} \cdot H_j(T_s) - a_{ij} \cdot H_j(T_g)] + \xi \cdot h \cdot S_i \cdot (T_s - T_g); \quad (39)$$

- для газоподібної фази:

$$-\frac{\partial}{\partial t} [\sum_{j=1}^N C_{gj} \cdot N_j(H_g)] + \frac{\partial}{\partial z} [\sum_{j=3}^N F_j \cdot H_j(T_g)] = \sum_{i=1}^7 r_i \cdot \sum_{j=3}^N [b_{ij} \cdot H_j(T_s) - a_{ij} \cdot H_j(T_g)] - V \cdot S_w \cdot (T_g - T_w) - \xi \cdot h \cdot S_l \cdot (T_s - T_g) - r_8 \cdot \Delta H_8, \quad (40)$$

де  $F_j$  — потік  $i$ -ї компоненти;  $H_j(T)$  — ентальпія компоненти при температурі  $T$ ;  $\Delta H_i(T)$  — теплові ефекти реакцій при температурі  $T$ ;  $H_g$  — ентальпія газового потоку;  $H_s$  — ентальпія твердої фази;  $F_s$  — витрата твердої фази;  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  — стехіометричні коефіцієнти реагенту ( $i$ ) і продукту реакції цього реагенту в реакції  $j$  відповідно;  $S_l$  — площа поверхні твердої фази в одиниці об'єму;  $S_w$  — площа поверхні стінки шахти газогенератора в одиниці об'єму;  $N$  — кількість компонент у газовій фазі;  $T_s$ ,  $T_w$ ,  $T_g$  — температури твердої фази, стінки і газового потоку відповідно;  $V$  — коефіцієнт тепловіддачі газ-стінка;  $C_s$ ,  $C_g$  — концентрації твердої і газоподібної фаз відповідно;  $r_i$  — швидкість реакції  $i$ -ї частинки.

Граничні умови:

$$\begin{aligned} z = L &\Rightarrow F_C = F_C^0, T_s = T_{sf} \\ z = 0 &\Rightarrow F_{H_2O} = F_{H_2O}^0, F_{O_2} = F_{O_2}^0, F_{CO} = F_{H_2} = F_{CO_2} = F_{CH_4} = 0, \\ &T_g = T_{gf}, \end{aligned}$$

де  $F_{H_2O}^0$ ,  $F_{O_2}^0$ ,  $F_C^0$  — потоки пару, кисню і вуглецю на вході в шахту газогенератора;  $L$  — висота шахти газогенератора;  $T_{gf}$  і  $T_{sf}$  — значення температури дугтя і твердого палива на вході в газогенератор.

Початкові умови: при  $t = 0$  задаються вихідні профілі температури і концентрації (можуть бути взяті з рішення стаціонарної задачі).

За незначних температур у зоні газоутворення рівновага зворотних реакцій змінюється в бік вхідних речовин. Зміни у складі генераторного газу можна врахувати, вводячи в розгляд константи швидкостей зворотних реакцій [14]. Тоді в рівняннях

масового та енергетичного балансів з'являються додаткові складові, аналогічні за формою величинам, що враховують перебіг прямих реакцій.

Вираз для визначення константи швидкостей у загальному вигляді матиме вигляд [14]:

$$\bar{K} = \frac{1}{\frac{1}{K \cdot (1 + \varepsilon \cdot S_i)} + \frac{\zeta}{D \cdot Nu_d}}, \quad (41)$$

де  $S_i$  — реакційна поверхня отворів в одиниці об'єму частинки;  $\varepsilon$  — активна глибина проникнення реакції;  $\zeta$  — розмір частки;  $D$  — коефіцієнт молекулярної дифузії у вільній газовому середовищі;  $Nu_d = \frac{\beta \cdot \zeta}{D}$  — дифузійний критерій Нусельта ( $\beta$  — коефіцієнт масообміну).

Константа швидкості кінетики хімічних реакцій газифікації може бути визначена за формулою Арреніуса:

$$K = K_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (42)$$

Розрахувати дифузійний опір у газовому середовищі можна за емпіричними формулами для визначення  $Nu_d$ , рекомендованим у [15]:

$$Nu_d = A \cdot Re_{\pi}^r S_i^v, \quad (43)$$

де  $Re_{\pi}^r = \frac{\zeta \cdot V_{\pi}}{v}$ ,  $v$  — кінематична в'язкість газового середовища;  $V_{\pi}$  — середня швидкість потоку між частинками;  $S_i$  — реакційна поверхня частинок в одиниці об'єму;  $A$  — емпірична константа.

Допускаючи подібність полів температури і концентрації, використовуємо ті ж залежності для визначення коефіцієнта тепловіддачі [15]:

$$Nu_{\pi} = \frac{\beta \cdot \zeta}{\lambda_r},$$

де  $\lambda_r$  — теплопровідність газової фази.

У цьому випадку замість критерію  $S_i$  до виразу входить критерій Прандтля:

$$Pr = \frac{v}{a},$$

де  $a$  — коефіцієнт температуропровідності.

Щоб врахувати вплив золи на процес газифікації біомаси рослинного походження, використовують дві моделі [5]:

- модель, що враховує зростання оболонки ядра частинки;
- модель відокремленої золи.

Перша модель передбачає наявність частинок однакового розміру і згідно з цією моделлю в міру перебігу реакції газоутворення по нормалі до поверхні утворюється шар золи. Газоподібні реагенти змушені дифундувати через зольний шар для того, щоб вступити в реакцію з ядром частинки. Цей додатковий опір враховується аналогічно опору дифузії речовини через газову оболонку до зовнішньої поверхні частинки.

Друга модель передбачає, що шар золи не утворюється на поверхні частинки, натомість зола накопичуються в просторі між частинками, що призводить до збільшення об'єму порожнеч між частинками і, отже, до зменшення реакційної поверхні в одиниці об'єму. Значення швидкості реакції в цьому випадку треба помножити на  $V_l$  — частину об'єму, який займають частинки біомаси, що не вступили в реакцію.

**Висновки.** При огляді елементів числових моделей процесу газифікації біомаси рослинного походження в газогенераторах шарового типу проаналізовано досвід

створення вказаного обладнання за кордоном і порівняно дані чисельних та експериментальних досліджень, а також враховані проблеми, що виникали в процесі цього дослідження.

Наведений вище аналіз сучасних чисельних модельних уявлень кінетики хімічних реакцій, масо- і теплообміну в реакційному обсязі, а також деякі кількісні оцінки на його основі дає чітке розуміння, що подібні підходи поки придатні для постановки теплофізичного експерименту з визначення граничних умов, а не для теплотехнічних визначень розподілених моделей реактора. Тому в подальших дослідженнях варто зосередитись на можливостях застосування імітаційного моделювання, в основу якого прийняти балансовий метод визначення ключових параметрів, заснований на осереднених характеристиках процесу газифікації біомаси рослинного походження, отриманих на реальних об'єктах, реальному паливі і в реальних масштабах сконструйованих газогенераторів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Assad, M. S., Penyazkov, O. G., & Skoblya, S. G. (2011). Calculation of the equilibrium composition of multicomponent thermodynamic systems by the method of entropy maximization. *J. Eng. Phys. Thermophy*, 84, 13—22. <https://doi.org/10.1007/s10891-011-0451-6>.
2. McAllister, S., Chen, J. Y., Fernandez-Pello, A. C. (2011). *Thermodynamics of Combustion. In: Fundamentals of Combustion Processes*. Mechanical Engineering Series. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7943-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7943-8_2).
3. Safarian, S., Rydén, M., Janssen, M. (2022). Development and Comparison of Thermodynamic Equilibrium and Kinetic Approaches for Biomass Pyrolysis Modeling. *Energies*, 15, 3999. <https://doi.org/10.3390/en15113999>.
4. Wei, James. (1979). Stecheometric analysis of coal gasification. *Ind. and Enng. Chem. Process. Des. and Develop.*, 18(3), 554—558.
5. Yoon, H., James, Wei, Norton, M. Denn. (1978). A model for moving-bed coal gasification reactors. *AJChC Journal*, 24(5), 885—904.
6. Niels, Bech, Larsv, Wolff. (1994). *Modelling of surface combusting straw bales*. Riso national laboratory, Roskilde, Denmark.
7. Yoon, H., James, Wei, Norton, M. Denn. (1979). Feasible operating regions for moving-bed coal gasification reactors. *Ind. and Enng. Chem. Process. Des. and Develop.*, 18(2), 306—312.
8. Hiroaki, Watanabe, Ryoichi, Kurose. (2020). Modeling and simulation of coal gasification on an entrained flow coal gasifier. *Advanced Powder Technology*, 31(7), 2733—2741.
9. Scho, J., Joseph, B. (1981). Heterogeneous model for moving-bed coal gasification reactors. *Ind. and Eng. Chem. Des. and Develop.*, 20(2), 314—318.
10. Higman, C., Van der Burgt, M. (2008). *Gasification (Second edition)*. Elsevier.
11. Roberts, A. F. (1963). *Thermal decomposition of wood in an inert atmosphere*. Ninth symposium on Combustion. N.-York.
12. Gregory, D. R., Littlejohn, R. F. (1965). The British coal Utilization Research Association. *Monthly Bulletin*, 6.
13. Anthony, D. B., Howard, J. B. (1976). Coal devalatilization and hydro gasification. *AJChC Journal*.
14. Adánez, J., Abad, A., Mendiara, T., Gayán, P., Diego, L., & García-Labiano, F. (2018). Chemical looping combustion of solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 65, 6—66. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2017.07.005>.
15. Kormienko, Y., Haidai, S., Stepaniuk, A., & Novokhat, O. (2024). Principles of simulation of energy-efficient granulation processes in a fluidized bed. *Energy Technologies & Resource Saving*. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2024.08>.
16. Kinc, M., Joseph, B. (1983). Dynamic behavior of moving-bed coal gasifier. *Ind. and Eng. Chem. Des. and Develop.*, 22(2), 212—217.
17. Souza-Santos, M. (2004). Solid Fuels Combustion and Gasification: *Modeling, Simulation, and Equipment Operations*. <https://doi.org/10.1201/9780203027295>.

УДК 664.2

# MATHEMATICAL MODELING OF THE VARIOUS FACTORS INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF TYPE "A" STARCH PRECIPITATION IN A CENTRIFUGAL FIELD

T. Pohorilyi, Yu. Rozhko, V. Olishevskiy, E. Babko, O. Nikolaieva  
*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

regression equation,  
adequacy criterion,  
number of degrees of  
freedom

---

**Article history:**

Received 05.03.2025  
Received in revised form  
24.03.2025  
Accepted 27.03.2025

---

**Corresponding author:**  
pogorilyy\_tm@ukr.net

---

**ABSTRACT**

Wheat starch production is a rather complex and energy-consuming process. For further optimization of this process, it is worth conducting mathematical modeling of the efficiency of type "A" starch precipitation in a centrifugal field depending on the influence of various factors. The main factors were selected as the amount of input raw materials, the frequency of the centrifuge drum rotation and the differential drum screw rotation speed. The mathematical model was based on the construction of a regression equation and its study for adequacy.

The basis was a full-factorial experiment  $N=23$ . The number of duplicate experiments was  $m=3$ . All subsequent studies concerned the normalized regression equation, to which the transition was made by coding the input factors. Initially, a successful input data check for the absence of gross errors was carried out based on the application of the Cochran criterion. The obtained coefficients of the regression equation were empirical in nature, therefore they were tested for significance based on the Student's  $t$ -test. The significance test of each of the regression equation coefficients showed that only the coefficients  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  and  $b_{23}$  were significant, on the basis of which the final normalized regression equation was obtained.

The adequacy of the final normalized regression equation to the actual process was checked using the Fisher criterion. There are several approaches to applying the Fisher criterion to this class of problems. The paper considered the main ones and proposed, in the authors' opinion, the most adequate implementation option for applying this criterion.

After successfully checking the normalized regression equation for adequacy, the transition from coded values to natural values was made and the total error of the experiment was calculated.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-13

---

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОСАДЖЕННЯ КРОХМАЛЮ ТИПУ «А» У ВІДЦЕНТРОВОМУ ПОЛІ

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

Ю. В. Рожко

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

О. А. Ніколаєва, канд. ф.-м. наук, ORCID ID: 0000-0002-4958-1833

Національний університет харчових технологій

*Виробництво пшеничного крохмалю є досить складним та енергозатратним процесом. Для подальшої оптимізації цього процесу варто провести математичне моделювання ефективності осадження крохмалю типу «А» у відцентровому полі з урахуванням впливу різних факторів. До основних факторів віднесено кількість вхідної сировини, частоту обертання барабана центрифуги та диференціальну швидкість обертання шнека барабана. Математична модель базувалась на побудові регресійного рівняння та дослідженні його на адекватність.*

**Ключові слова:** регресійне рівняння, критерій адекватності, число ступенів свободи.

**Вступ.** В Україні та світі в сучасній промисловості застосовуються різні способи та методи розділення різноманітних емульсій і суспензій, до яких відносяться осадження, фільтрування та центрифугування.

Найбільш ефективним для отримання крохмалю є центрифугування — процес розділення суспензій і емульсій в полі дії відцентрових сил. Завдяки високій швидкості обертання складові суспензії за рахунок різниці мас (а також густини і в'язкості середовища) осідають на стінках тіла обертання з розшаруванням від важчих до легших елементів. «На дні» осідають спочатку важкі тверді частинки, потім легші, а далі рідини з різною густиною.

Процес гравітаційного осадження суспензії відбувається за законом Стокса і характеризується швидкістю осадження її частинок (або фаз). Діаметр частинки єдиний фактор, який має квадратичний вплив на швидкість осадження. Цей чинник є одним із найважливіших факторів, що впливає на ефективність розділення. Відцентрові сили, які розвиваються при центрифугуванні, чинять на суспензію, що розділяється, набагато більшу дію, ніж сили тяжіння і тиску. Напруженість створюваного в центрифугі поля відцентрових сил характеризується фактором розділення — фактором Фруда, який являє собою відношення відцентрового прискорення до прискорення сили тяжіння.

Таким чином до важливості фактора розміру частинки додаються такі важливі фактори, як швидкість обертання та розмір тіла обертання. Чим більший фактор розділення, тим вища роздільна здатність центрифуги. Фактор розділення може бути підвищений за рахунок збільшення радіуса барабана і в ще більшій мірі — збільшенням числа обертів.

Виробництво пшеничного крохмалю є досить складним та енергозатратним процесом, який ще називають «мокрим процесом» (таким, де використовується достатньо велика кількість води,  $\sim 15 \text{ м}^3$  на 1 т борошна). Основна складність виробництва пшеничного крохмалю та глютену полягає в розділенні цих двох речовин, оскільки

кожна має дуже різні фізичні властивості. Клейковину незручно «витягувати» з вхідного борошна через її гумову клейкість. Використання центрифуг для розділення речовин з різною питомою вагою є ефективним рішенням, проте такий процес потребує ретельного дослідження та налаштування.

Процес розділяє один потік вхідної сировини на три потоки розділених фракцій. Якісною характеристикою досліджуваного процесу був вміст крохмалю типу «А» у важкій фракції розділення.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Незважаючи на повномасштабне вторгнення, Україна посідає вагоме місце у світі серед експортерів пшениці [6]. За даними Міністерства сільського господарства США, Україна у 2022—2023 роках посіла шосте місце (15,0 млн тонн) в рейтингу першої десятки країн експортерів пшениці. Проте глибока переробка пшениці всередині нашої державі надала б змогу створити сировину, а в результаті і товари з досить високою доданою вартістю, яка є одним з найважливіших чинників зростання економічної ситуації в країні. Загалом, глибока переробка пшениці дає декілька типів кінцевих продуктів, які в подальшому можуть використовуватися як високоякісна сировина при виробництві харчових чи інших продуктів [16].

Широкий огляд розділення фаз у біотехнології, включаючи методи математичного моделювання, запропоновано в [15, 17], хоч основні акценти зроблено на розділення клітинних культур і досить мало інформації про конкретні оптимальні параметри роботи центрифуг. У [11, 12, 14, 20] досліджено та побудовано математичні моделі процесу сепарації. Взаємозв'язок між швидкістю обертання і виходом продукту розглянуто в [19], але вивчався тільки один вид крохмалю. Метод RSM для знаходження оптимальних параметрів використано в [21]. Процес вилучення крохмалю з відходів описано у [18], проте автори не провели глибокого математичного аналізу процесу.

Використання вже готового закордонного обладнання дасть змогу вирішити проблему. Залишається лише питання режимів роботи такого обладнання при використанні місцевих сортів пшениці для зменшення енерговитрат та покращення якості цільового продукту [13].

**Мета досліджень:** створення математичної моделі визначення вмісту крохмалю «А» у відсотковому значенні в перерахунку на сухі речовини при осадженні у відцентровому полі з урахуванням параметрів диференційної швидкості шнека, швидкості обертання барабана центрифуги та кількості вхідної сировини (продуктивності).

**Матеріали і методи.** Математичну модель побудовано на основі використанням регресійного аналізу для трифакторного експерименту.

Відповідно до конструкції обладнання визначено три основні регулюючі фактори (вхідні параметри): кількість вхідної сировини  $Q$ , кг/год (продуктивність) —  $x_1$ , частоту обертання барабана центрифуги  $v$ , об/хв —  $x_2$ , диференційну швидкість шнека  $v_d$ , об/хв —  $x_3$ , які повинні мати вплив на кінцевий результат.

Від продуктивності залежить кількість сухих речовин, що подається в декантер за одиницю часу. Від швидкості обертання барабана центрифуги має залежати швидкість осадження сировини. Від диференційної швидкості обертання шнека залежить швидкість відведення важкої фракції (А-крохмалю) з барабана, а отже, і час на осадження та розділення.

Результатом є відсоткове значення А-крохмалю у важкій фракції розділення ( $M$ , %).

**Результати досліджень.** При проведенні досліду при кожній зміні параметру тричі проводився відбір кожної з проб.

Для формування плану проведення активного експерименту необхідно провести заміну вхідних величин (факторів впливу) як  $x_i$ , ( $i=1..3$ ), а отримані результати — як  $y_i$ .

Тоді план активного експерименту матиме такий вигляд:

$$(x_1^{(-)}x_2^{(-)}x_3^{(-)}; x_1^{(+)}x_2^{(-)}x_3^{(-)}; x_1^{(-)}x_2^{(+)}x_3^{(-)}; x_1^{(+)}x_2^{(+)}x_3^{(-)}; x_1^{(-)}x_2^{(-)}x_3^{(+)}; \\ x_1^{(+)}x_2^{(-)}x_3^{(+)}; x_1^{(-)}x_2^{(+)}x_3^{(+)}; x_1^{(+)}x_2^{(+)}x_3^{(+)}).$$

Залежність вихідної функції величини вмісту крохмалю «А» від вхідних регулюючих факторів є нелінійною, тому рівняння математичної моделі у вигляді рівняння регресії має такий вигляд:

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (1)$$

де  $x_1, x_2, x_3$  — значення заданих факторів впливу;  $\beta_0$  — вільний член рівняння;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  — лінійні коефіцієнти;  $\beta_{12}, \beta_{23}, \beta_{13}$  — коефіцієнти парної взаємодії двох різних факторів між собою;  $\beta_{123}$  — коефіцієнт взаємодії трьох вказаних факторів між собою.

Для побудови матриці експерименту використали матрицю з двома рівнями зміни вхідних параметрів — максимальний «+1» та мінімальний «-1».

Загальна кількість дослідів  $N$ , необхідних для проведення ПФЕ  $2^3$ , становить:  $N = 2^n = 2^3 = 8$ , де  $n = 3$  — кількість вхідних факторів.

Спланована кількість дублюючих дослідів становить:  $m = 3$ .

Визначили межі зміни факторів та склали матрицю рівнів варіювання (табл. 1).

Таблиця 1. Рівні варіювання та кроки варіювання факторів

| Фактор | Одиниці вимірювання                    | «0»-рівень<br>$x_{i_0}$ | Крок<br>варіювання<br>$\Delta x_i$ | Верхній<br>рівень<br>+1 | Нижній<br>рівень<br>-1 |
|--------|--|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| $x_1$  | Продуктивність, кг/год                 | 17 000                  | 3 000                              | 20 000                  | 14 000                 |
| $x_2$  | Швидкість обертання<br>барабана, об/хв | 2 925                   | 225                                | 3 150                   | 2 700                  |
| $x_3$  | Диф. швидкість, об/хв                  | 47,5                    | 12,5                               | 60,0                    | 35,0                   |

Нормалізували рівняння регресії, перетворивши змінні  $x_i$  в безрозмірні нормалізовані величини  $z_i$  для верхнього «+1» та нижнього рівня «-1»:

$$z_i = \frac{x_i - x_{i_0}}{\Delta x_i}, \quad (2)$$

де  $x_i$  — значення фактора на верхньому «+1» та нижньому «-1» рівні;  $x_{i_0}$  — значення  $i$ -го фактора на 0-рівні;  $\Delta x_i$  — крок варіювання  $i$ -го фактора.

Після нормалізації на основі (2) рівняння регресії (1) має вигляд:

$$y_1 = b_0 + b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_2 + b_3 \cdot z_3 + b_{12} \cdot z_1 \cdot z_2 + b_{23} \cdot z_2 \cdot z_3 + b_{13} \cdot z_1 \cdot z_3 + b_{123} \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3, \quad (3)$$

де, за аналогією з коефіцієнтами регресійного рівняння (1), коефіцієнти  $b_0$  — вільний член рівняння (3);  $b_1, b_2, b_3$  — лінійні коефіцієнти;  $b_{12}, b_{23}, b_{13}$  — коефіцієнти парної взаємодії двох різних факторів між собою;  $b_{123}$  — коефіцієнт взаємодії трьох факторів між собою. Зауважимо, що коефіцієнти  $\beta_j$ , ( $j = \{0, 1, 2, 3, 12, 13, 23, 123\}$ ), регресійного рівняння (1) та  $b_j$ , ( $j = \{0, 1, 2, 3, 12, 13, 23, 123\}$ ), нормалізованого регресійного рівняння (3) в загальному випадку різні.

Наступним кроком є побудова матриці плану повного багатфакторного (в нашому випадку трифакторного) експерименту, яка наведена в табл. 2.

Таблиця 2. План повного факторного експерименту  $2^3$  з урахуванням коефіцієнтів взаємодії та результати ПФЕ  $2^3$ 

| № досл. | $z_0$ | $z_1$ | $z_2$ | $z_3$ | $z_1z_2$ | $z_2z_3$ | $z_1z_3$ | $z_1z_2z_3$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $\bar{y}_i$ | $S_i^2$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-------------|-------|-------|-------|-------------|---------|
| 1       | +     | -     | -     | -     | +        | +        | +        | -           | 70,1  | 72,8  | 66,8  | 69,90       | 9,03    |
| 2       | +     | +     | -     | -     | -        | +        | -        | +           | 77,9  | 81,5  | 74,5  | 77,97       | 12,25   |
| 3       | +     | -     | +     | -     | -        | -        | +        | +           | 81,8  | 85,6  | 78,5  | 81,97       | 12,62   |
| 4       | +     | +     | +     | -     | +        | -        | -        | -           | 92,2  | 95,8  | 88,2  | 92,07       | 14,45   |
| 5       | +     | -     | -     | +     | +        | -        | -        | +           | 65,1  | 67,8  | 62,2  | 65,03       | 7,84    |
| 6       | +     | +     | -     | +     | -        | -        | +        | -           | 74,9  | 78,5  | 71,5  | 74,97       | 12,25   |
| 7       | +     | -     | +     | +     | -        | +        | -        | -           | 61,2  | 64,6  | 59,8  | 61,87       | 6,09    |
| 8       | +     | +     | +     | +     | +        | +        | +        | +           | 77,8  | 81,2  | 74,6  | 77,87       | 10,89   |

Для подальшої обробки статистичних даних з табл. 2 спочатку варто провести перевірку вхідних даних  $y_i$ , ( $i = 1..3$ ) на відсутність грубих помилок. Одним із методів проведення такої перевірки є оцінювання дисперсій на однорідність за допомогою використання критерію Кохрена.

Середні рядкові значення  $\bar{y}_i$ , ( $i = 1..3$ ) проведених експериментів розраховуються за формулою середнього арифметичного значення:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{k=1}^m y_{k_i}}{m}, \quad (4)$$

де  $m$  — кількість паралельних дослідів у визначенні  $\bar{y}_i$ , ( $i = 1..3$ ), (в нашому випадку  $m = 3$ );  $k$  — номер повторень по кожному рядку (в нашому випадку  $k = 1..3$ );  $i$  — номер рядка в плані експерименту табл. 2, (в нашому випадку  $i = 1..8$ ). Отримані результати середніх значень  $\bar{y}_i$ , ( $i = 1..3$ ) занесено в табл. 2.

Дисперсії паралельних дослідів величини вмісту крохмалю «А»  $y_i$ , ( $i = 1..3$ ) кожного рядка матриці плану експерименту табл. 2, тобто рядкові дисперсії відтворюваності одиничних результатів визначали на основі (4):

$$S_{y_{k_i}}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_{k_i} - \bar{y}_i)^2, \quad (i = 1..8), \quad (5)$$

де, в нашому випадку,  $m = 3$ .

У результаті проведених розрахунків на основі (5) остаточно отримали значення рядкових дисперсій відтворюваності одиничного результату у вигляді:

$$S_{y_{k_1}}^2 = \frac{1}{3-1} [(70,1 - 69,90)^2 + (72,8 - 69,90)^2 + (66,8 - 69,90)^2] = 9,03; \quad S_{y_{k_2}}^2 = 12,25; \\ S_{y_{k_3}}^2 = 12,62; \quad S_{y_{k_4}}^2 = 14,45; \quad S_{y_{k_5}}^2 = 7,84; \quad S_{y_{k_6}}^2 = 12,25; \quad S_{y_{k_7}}^2 = 6,09; \quad S_{y_{k_8}}^2 = 10,89. \quad (6)$$

Отримані дані занесено в табл. 2.

Найбільше значення рядкових дисперсій відтворюваності одиничного результату  $S_{y_{k_i}}^2$ , ( $i = 1..8$ ), з усіх розрахованих на основі (6), визначили на основі виразу:

$$S_{y_{k_i}, \max}^2 = \max_{1 \leq i \leq 8} S_{y_{k_i}}^2 = S_{y_{k_4}}^2 = 14,45. \quad (7)$$

Сума всіх рядкових дисперсій відтворюваності одиничного результату  $S_{y_{k_i}}^2$ , ( $i = 1..8$ ), дорівнює:

$$\sum_{i=1}^N S_{y_{ki}}^2 = 9,03 + 12,25 + 12,62 + 14,45 + 7,84 + 12,25 + 6,09 + 10,89 = 85,44 \quad (8)$$

Розрахункову величину критерію Кохрена  $G_p$  отримано за формулою співвідношення максимального значення дисперсій  $S_{y_{k,\max}}^2$  з виразу (7) до величини їх суми

$\sum_{i=1}^N S_{y_{ki}}^2$  з виразу (8):

$$G_\partial = \frac{S_{y_{k,\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_{y_{ki}}^2} = \frac{14,45}{85,44} = 0,16912 \quad (9)$$

Табличне критичне значення критерію Кохрена дорівнює  $G_{кр,(8; 2; 0,05)} = 0,5157$  і в нашому випадку визначено для ступенів свободи  $f_1 = N = 8$ ;  $f_2 = m - 1 = 3 - 1 = 2$ ; та для прийнятого рівня значущості  $\alpha = 0,05$ , (тобто рівень похибки проведених розрахунків приймається в межах 5%, відповідно, достовірність проведених розрахунків становить 95%).

Безпосередня перевірка виконання критерію Кохрена, яка вимагає виконання умови:

$$G_p < G_{кр}, \quad (10)$$

показала, що в нашому випадку на основі (9) умова виконується:

$$G_\partial = 0,16912 < G_{\partial\partial(8;2;0,05)} = 0,5157.$$

Отже, дисперсії (міра розсіювання) отриманих експериментальних даних у паралельних дослідях є однорідними, тобто відтворюваними.

Коефіцієнти рівняння регресії, які мають емпіричний характер, знайдено за формулами:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{j,i} \cdot \bar{y}_i, \quad (j = \{0, 1, 2, 3, 12, 13, 23, 123\}). \quad (11)$$

У нашому випадку емпіричні коефіцієнти рівняння регресії на основі (11)—(13) дорівнюють:

$$b_0 = 75,204; \quad b_1 = 5,513; \quad b_2 = 3,238; \quad b_3 = -5,271; \\ b_{12} = 1,013; \quad b_{23} = -3,304; \quad b_{13} = 0,971; \quad b_{123} = 0,504. \quad (14)$$

Далі необхідно було провести перевірку коефіцієнтів рівняння регресії (14) на значущість, що виконувалось на основі використання критерію Стюдента. Для цього спочатку необхідно визначити похибку коефіцієнтів рівняння регресії.

Середньоарифметична для всього експерименту дисперсія відтворюваності одиничного результату на основі отриманого значення суми рядкових дисперсій відтворюваності одиничного результату (8) визначається за формулою:

$$S_{y_k}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{y_{ki}}^2}{N} = \frac{85,44}{8} = 10,68. \quad (15)$$

Середня для всього експерименту дисперсія відтворюваності середнього вихідного значення процесу розраховується за формулою:

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{S_{y_k}^2}{m} = \frac{10,68}{3} = 3,56. \quad (16)$$

Дисперсія коефіцієнтів рівняння регресії визначалась за формулою:

$$S_b^2 = \frac{S_y^2}{N} = \frac{3,56}{8} = 0,445. \quad (17)$$

Похибка коефіцієнтів рівняння регресії визначалась за формулою:

$$S_b = \sqrt{S_b^2} = \sqrt{0,445} = 0,667. \quad (18)$$

Перевіряємо значущість коефіцієнтів регресії (14), що характеризують лінійні ефекти та ефекти парної і потрійної взаємодії. Для перевірки значущості коефіцієнтів регресії використаємо критерій Стьюдента.

Коефіцієнти рівняння регресії (14) можна вважати відмінними від нуля, тобто значущими, якщо виконується нерівність:

$$|b_j| > t_{кр,(f;\alpha)} \cdot \sqrt{S_b^2}, \quad (j = \{0, 1, 2, 3, 12, 13, 23, 123\}), \quad (19)$$

де  $t_{кр,(f;\alpha)}$  — табличне значення  $t$ -критерію або критерію Стьюдента;  $f$  — число ступенів свободи, яке визначається за формулою:

$$f = (m - 1) \cdot N; \quad (20)$$

$\alpha$  — рівень значущості (в харчовій промисловості переважно приймається в межах 5%).

Табличне критичне значення  $t$ -критерію або ж критерію Стьюдента дорівнює  $t_{кр(16; 0,05)} = 2,12$  і в нашому випадку визначено для ступенів свободи  $f = (m - 1) \cdot N = (3 - 1) \cdot 8 = 16$  та для прийнятого рівня значущості  $\alpha = 0,05$  (тобто рівень достовірності проведених розрахунків також становить 95%).

Критичне значення величини відхилення будь-якого коефіцієнта рівняння регресії становить:

$$|b_{кр}| = t_{кр(16; 0,05)} \cdot \sqrt{S_b^2} = 2,12 \cdot \sqrt{0,445} = 1,414. \quad (21)$$

Проведена перевірка (19) значущості кожного з коефіцієнтів (14) рівняння регресії (3) на основі (21) показала, що:

$$|b_0| = |75,204| > 1,414; \quad |b_1| = |5,513| > 1,414; \quad |b_2| = |3,238| > 1,414; \quad |b_3| = |-5,271| > 1,414; \\ |b_{12}| = |1,013| < 1,414; \quad |b_{13}| = |0,971| < 1,414; \quad |b_{23}| = |-3,304| > 1,414; \\ |b_{123}| = |0,504| < 1,414. \quad (22)$$

Таким чином, в результаті перевірки (22) значущими виявилися коефіцієнти:

$$b_0 = 75,204; \quad b_1 = 5,513; \quad b_2 = 3,238; \quad b_3 = -5,271 \quad \text{та} \quad b_{23} = -3,304. \quad (23)$$

В результаті проведених досліджень (22)—(23) за критерієм Стьюдента (19) на значущість коефіцієнтів (14) рівняння регресії (3) отримуємо остаточне нормалізоване рівняння регресії у формі поліному:

$$\hat{y} = 75,204 + 5,513 \cdot z_1 + 3,238 \cdot z_2 - 5,271 \cdot z_3 - 3,304 \cdot z_2 \cdot z_3. \quad (24)$$

На останньому етапі створення математичної моделі впливу різних факторів на ефективність осадження крохмалю типу «А» у відцентровому полі необхідно було провести перевірку отриманого нормалізованого рівняння регресії (24) із значущими коефіцієнтами (23) на адекватність дійсному процесу. Проводити таку перевірку варто з використанням критерію Фішера. Зауважимо, що саме по даному пункту можливо отримати недостовірні або такі, що значно відрізняються один від одного результати за умови некоректного застосування згаданого критерію або при умові застосування різних варіантів підрахунку чисел ступенів вільності (про що буде сказано далі).

У результаті підстановки значення кожного нормалізованого фактора в отримане рівняння регресії (24) отримуємо розрахункові значення функції  $\hat{y}_i$ , ( $i = 1..8$ ):

$$\begin{aligned}\hat{y}_1 &= 75,204 + 5,513 \cdot (-1) + 3,238 \cdot (-1) - 5,271 \cdot (-1) - 3,304 \cdot (-1) \cdot (-1) = 68,421 ; (25) \\ \hat{y}_2 &= 79,446 ; \hat{y}_3 = 81,504 ; \hat{y}_4 = 92,529 ; \hat{y}_5 = 64,488 ; \\ \hat{y}_6 &= 75,513 ; \hat{y}_7 = 64,354 ; \hat{y}_8 = 75,379 .\end{aligned}$$

Перевірка на адекватність кінцевого нормалізованого рівняння регресії (24) дійсному процесу включає в себе порівняння результатів (25), отриманих на основі нормалізованого рівняння регресії (24), із дослідними даними табл. 2.

З цією метою варто розрахувати дисперсію адекватності  $S_{ao}^2$  за формулою:

$$S_{ao}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - N'} , \quad (26)$$

де  $N'$  — кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

І тут необхідно зробити перше зауваження стосовно вибору значення цієї величини. За одними даними кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії  $N'$  розраховується на основі тієї кількості коефіцієнтів, які залишилися після перевірки (22) на значущість, але без урахування коефіцієнта  $b_0$ . Для такого варіанта розрахунку кількості значущих коефіцієнтів згідно з (23) без урахування коефіцієнта  $b_0$  отримали  $N' = 4$ .

За іншими даними кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії  $N'$  розраховується на основі тієї кількості коефіцієнтів, які залишилась після перевірки на значущість (22), причому лише основних ( $b_1, b_2, b_3$ ), тобто без урахування коефіцієнтів парної ( $b_{12}, b_{13}, b_{23}$ ) та потрібної ( $b_{123}$ ) взаємодії, але вже з урахуванням коефіцієнта  $b_0$ . Для такого варіанта розрахунку кількості значущих коефіцієнтів згідно з (23) також отримали  $N' = 4$ .

У першому та другому варіанті розрахунку кількості значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії  $N'$  отримали однакові величини. Але в більш загальному випадку це будуть різні величини. Скажімо, якщо після перевірки (22) значущими залишаться всі коефіцієнти рівняння регресії, то в першому випадку проведення розрахунків отримаємо  $N' = 7$ . В другому ж випадку отримаємо  $N' = 4$ . Вибір залишимо за дослідником.

Дисперсія адекватності  $S_{ao}^2$  регресійного рівняння дійсному процесу дорівнює:

$$\begin{aligned}S_{ao}^2 &= \frac{1}{N - N'} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 = \\ &= \frac{1}{8-4} \left[ (68,42 - 69,90)^2 + (79,45 - 77,97)^2 + (81,50 - 81,97)^2 + \right. \\ &\quad \left. + (92,53 - 92,07)^2 + (64,49 - 65,03)^2 + (75,51 - 74,97)^2 + (64,35 - 61,87)^2 + \right. \\ &\quad \left. + (75,38 - 77,87)^2 \right] = 4,443\end{aligned} \quad (27)$$

Розрахункове значення критерію Фішера визначено за формулою:

$$F_p = \frac{S_{ao}^2}{S_{\bar{y}}^2} , \quad (28)$$

де  $S_{ao}^2$  — визначена в (27) дисперсія адекватності регресійного рівняння дійсному

процесу;  $S_{\bar{y}}^2$  — визначена в (16) середня для всього експерименту дисперсія відтворюваності середнього вихідного значення процесу.

Тут необхідно зробити друге зауваження стосовно формули (28) обчислення розрахункового значення критерію Фішера. Така величина повинна бути завжди більше одиниці, тому у вищенаведеному виразі (28) дисперсія адекватності  $S_{ao}^2$ , яка розміщена в чисельнику, так само як і величина  $S_{\bar{y}}^2$  в знаменнику, поставлені чисто умовно. В чисельнику дроби (28) завжди повинна стояти більша за величиною дисперсія, а у знаменнику — менша з них. Тобто формулу (28) потрібно використовувати не буквально, а у вигляді:

$$F_p = \frac{\max\{S_{ao}^2, S_{\bar{y}}^2\}}{\min\{S_{ao}^2, S_{\bar{y}}^2\}}. \quad (29)$$

З огляду на зроблене друге зауваження остаточно розрахунковий критерій Фішера дорівнює:

$$F_p = \frac{\max\{S_{ao}^2, S_{\bar{y}}^2\}}{\min\{S_{ao}^2, S_{\bar{y}}^2\}} = \frac{S_{ao}^2}{S_{\bar{y}}^2} = \frac{4,443}{3,56} = 1,25. \quad (30)$$

Для знаходження табличного критичного значення розподілу Фішера необхідно визначити дві величини ступенів свободи  $f_1$  та  $f_2$ , та задати рівень значущості  $\alpha$ , тобто:

$$F_{кр} = F_{табл}(f_1, f_2, \alpha). \quad (31)$$

Третє зауваження стосується питання, як саме повинні визначатись величини ступенів свободи  $f_1$  та  $f_2$  з виразу (31), оскільки часто зазначається, що величина  $f_1$  співвідноситься з дисперсією адекватності  $S_{ao}^2$  регресійного рівняння дійсному процесу, а величина  $f_2$ , — саме для середньої всього експерименту дисперсії відтворюваності середнього вихідного значення процесу  $S_{\bar{y}}^2$ . Однак це не завжди так.

Коли знаходять критичне значення за таблицями розподілу Фішера, то за величину  $f_1$  приймають ту величину ступеня свободи, яка відповідає дисперсії, що знаходиться в чисельнику виразу (29), а за величину  $f_2$ , — величину ступеня свободи, яка відповідає дисперсії, що знаходиться в знаменнику виразу (29).

У нашому випадку в чисельнику розташована дисперсія адекватності  $S_{ao}^2$  регресійного рівняння дійсному процесу (27), тому число ступенів вільності  $f_1$  визначається як:

$$f_1 = N - N' = 8 - 4 = 4. \quad (32)$$

У знаменнику в нашому випадку розташована середня для всього експерименту дисперсія відтворюваності середнього вихідного значення процесу  $S_{\bar{y}}^2$ , (16), тому число ступенів вільності  $f_2$  визначається як:

$$f_2 = N(m - 1) = 8(3 - 1) = 16. \quad (33)$$

Таким чином, для нашого випадку критичне значення розподілу Фішера знаходимо за таблицями для ступенів свободи:  $f_1 = 4$ , на основі (32);  $f_2 = 16$ , на основі (33); та для рівня значущості  $\alpha = 5\%$  (тобто рівень достовірності перевірки на адекватність також становить 95%):

$$F_{кр,(4; 16; 0,05)} = 3,01. \quad (34)$$

Перевіряємо умову адекватності:

$$F_p = 1,25 < F_{кр,(4; 16; 0,05)} = 3,01. \quad (35)$$

Використовуючи критерій Фішера (35), можна зробити висновок, що отримане кінцеве нормалізоване рівняння регресії (24) є адекватним реальному дійсному процесу дослідних даних (табл. 2) з достовірністю 95%.

Останнім кроком буде перехід від нормалізованого рівняння регресії (24) в кодіваних величинах до натуральних величин. Таке перетворення проводиться на основі виразу (2), яке по кожному фактору буде представлено у вигляді:

$$z_1 = \frac{x_1 - x_{1_0}}{\Delta x_1} = \frac{x_1 - 17000}{3000}; \quad (36)$$

$$z_2 = \frac{x_2 - x_{2_0}}{\Delta x_2} = \frac{x_2 - 2925}{225}; \quad (37)$$

$$z_3 = \frac{x_3 - x_{3_0}}{\Delta x_3} = \frac{x_3 - 47,5}{12,5}. \quad (38)$$

Тоді остаточно математична модель визначення вмісту крохмалю «А» у відсотковому значенні в перерахунку на сухі речовини при осадженні у відцентровому полі після перетворень (24) на основі (36)—(38) буде представлена у вигляді регресійного рівняння:

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3) = 75,204 + 5,513 \cdot \frac{x_1 - 17000}{3000} + 3,238 \cdot \frac{x_2 - 2925}{225} - 5,271 \cdot \frac{x_3 - 47,5}{12,5} - 3,304 \cdot \frac{x_2 - 2925}{225} \times \frac{x_3 - 47,5}{12,5} \approx -141,31813 + 1,8377 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 7,0192 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 + 3,01448 \cdot x_3 - 1,1748 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (39)$$

При підстановці в отриману математичну модель (39) значення заданих вхідних параметрів  $x_1$ ,  $x_2$  та  $x_3$  (табл. 1) отримали математичні розрахунки вмісту А-крохмалю у важкій фракції процесу розділення, які повністю збігаються з отриманими в (25) значеннями.

Загальна похибка експерименту розрахована за формулою:

$$\Delta_{\text{зар}} = \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{y}_i - \bar{y}_i|}{\bar{y}_i}, \quad (40)$$

де величини  $\hat{y}_i$ , ( $i = 1..8$ ), визначаються на основі виразу (39), а  $\bar{y}_i$ , ( $i = 1..3$ ), — на основі виразу (4). Отже,  $\Delta_{\text{зар}} = 0,139\%$ .

**Висновки.** Створили математичну модель визначення вмісту крохмалю «А» у відсотковому значенні в перерахунку на сухі речовини при осадженні у відцентровому полі (39) з урахуванням параметрів:  $x_1$  — кількості вхідної сировини  $Q$ , кг/год (продуктивність);  $x_2$  — частоти обертання барабана центрифуги  $v$ , об/хв;  $x_3$  — диференційної швидкості шнека  $v_d$ , об/хв. Загальна похибка експерименту становить  $\Delta_{\text{зар}} = 0,139\%$ . Під час побудови математичної моделі зроблено декілька важливих зауважень стосовно різних підходів при обчисленні чисел ступенем вільності та при обчисленні розрахункового значення критерію Фішера.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Букетов, А. В. (2009). *Ідентифікація і моделювання технологічних об'єктів та систем*. Тернопіль: СМП «Тайп».
2. Гліненко, Л. К., Сухоносів О. Г. (2003). *Основи моделювання технічних систем*. Львів: Бескид Біт.
3. Грищенко, І. М., Григоренко, О. М., Борисенко, В. А. (2001). *Основи наукових досліджень: навч. посіб.* Київ: Київ. нац. торг.-екон. ун-т.

4. Муха, М., Воробйова, І. Проблеми експорту зерна через ЄС та потужностей зберігання в Україні. <http://elevatorist.com/blog/read/761eksport-cherez-suhoputni-shlyahi-do-yes-mojlivosti>.
5. Кривопляс-Володіна, Л. О., Гавва, О. М., Яровий, В. Л., Токарчук, С. В. (2016). Основи наукових досліджень у прикладних задачах: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Київ: Сталь.
6. Остапчук, М. В., Станкевич, Г. М. (2006). *Математичне моделювання на ЕОМ*. Одеса: «Друк».
7. Погорілий, Т. М. (2025). Моделювання оптимальних параметрів роботи горизонтальної центрифуги для отримання крохмалю типу «А». *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 131—144. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2025-31-1-12>.
8. Пушанко, М. М., Лагода, В. А. (2010). *Центрифугування цукрових утфелів*. К.: Вища школа.
9. Рожко, Ю., Погорілий, Т. (2024). Аналіз ефективності осадження крохмалю пшеничного типу «А» в полі дії відцентрових сил. Матеріали 90 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 11—12. Київ: НУХТ, Ч. 2.
10. Томашевський, В. М. (2005). *Моделювання систем*. Київ: Видавнича група ВHV.
11. Akhmadiev, F. G., Zinnatullin, N. N. (2014). Mathematical modeling of the separation of two-phase mixtures in a centrifugal thickener. *Theor. Found Chem. Eng.*, 48, 199—205. <https://doi.org/10.1134/S004057951402002X>.
12. Gleiß, M., Nirschl, H. (2023). About Modeling and Optimization of Solid Bowl Centrifuges. *KONA Powder and Particle Journal*, 41. <https://doi.org/10.14356/kona.2024010>.
13. Karl-Heinz Schneider, Dr. Götz Kröner. Weizenqualität für technische Anwendungen aus der Sicht der Stärkeindustrie, Proceedings des 23. Getreideseminars. Detmond. 2010.
14. Leone, A., Romaniello, R., Zagaria, R., Tamborrino, A. (2015). Mathematical modelling of the performance parameters of a new decanter centrifuge generation. *Journal of Food Engineering*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.011>.
15. Leung, W. (2007). Centrifugal Separations in Biotechnology. Centrifugal Separations in Biotechnology. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-477-0.X5000-9>.
16. Lim, Y.-M., Hoobin, P., Ying, D. Y., Burgar, I., Gooley, P. R., Augustin, M. A. (2015). Physical characterisation of high amylose maize starch and acylated high amylose maize starches. *Carbohydrate Polymers*, 117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.09.068>.
17. Pouliot, Y., Conway, V., Leclerc, P.-L. (2014). *Separation and Concentration Technologies in Food Processing. Food Processing: Principles and Applications: Second Edition*, 33—60. <https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch3>.
18. Prabha, V., Dash, S. K., Rayaguru, K., Panda, M., Nedunchezhiyan, M. (2020). Optimization of starch isolation process for sweet potato and characterization of the prepared starch. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00401-8>.
19. Saengchan, K., Nopharatana, M., Songkasiri, W. (2014). Recovery of tapioca starch from pulp in a conical basket centrifuge — Effects of rotational speed and liquid to solid (L/S) ratio on cake formation and starch-pulp separation efficiency. *Separation and Purification Technology*, 127, 192—201. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.026>.
20. Shin, H., Cho, S.-C. (2013). Optimization of Cationic Corn Starch Production by Using Response Surface Methodology. *Food Engineering Progress*, 17, 143—150. <https://doi.org/10.13050/foodengprog.2013.17.2.143>.
21. Yuting, Q., Fangling, D., Zhuqing, J., Bin, Q., Qianqian, G., Jie, L., Tongcheng, X. (2018). Optimization of starch isolation from red sorghum using response surface methodology. *LWT*, 91, 242—248. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.014>.

УДК 621.798:004.94

# SYNTHESIS OF DESIGN PARAMETERS OF A DEVICE FOR PACKAGING LOOSE PRODUCTS WITH A CONTINUOUS CUP-TYPE ADAPTRONIC DOSING MODULE

O. Gavva, L. Kryvoplias-Volodina  
*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

packaging device,  
dosing module,  
loose products,  
cup dispenser,  
movement trajectory,  
kinematic and power  
parameters,  
structural parameters

---

**Article history:**

Received 21.04.2025  
Received in revised form  
14.05.2025  
Accepted 21.11.2024

---

**Corresponding author:**

krivoplyas-volodina@ukr.net

---

**ABSTRACT**

For dosing fast-moving bulk products, cup-type dispensers are widely used, which provide volumetric dose formation. Obtaining high productivity values involves the use of adaptronic continuous dosing and packaging modules. In such modules, the operation of forming a dose of product and the operation of packing, i.e., moving it into consumer packaging, are combined in time. The main limiting component of the duration of the kinematic packing cycle is the duration of movement of loose products in the product pipeline of the packing device. The design of the product pipeline (funnel) of the packaging device significantly affects the additional resistance to product movement when it comes into contact with the inner surface of the funnel and possible mutual impact processes between product particles.

The object of the study was a packaging device made in the form of conjugated conical and cylindrical parts. Studies have established that with a corresponding eccentric arrangement of the cylindrical part relative to the conical axis, it is possible to increase the effective cross-sectional area of the conjugation of the conical and cylindrical parts and reduce the probability of impact interaction of particles of loose products on the inner surface of the cylindrical part of the packing device. A mathematical expression was obtained that made it possible to determine the rational value of the diameter of the conical part of the device, taking into account the continuous operation mode of the adaptronic-functional dosing and packaging module. Based on the results of mathematical modeling of the movement of a material particle in the product pipeline of the packing device, an expression was obtained to determine the rational value of the eccentricity of the packing device and the effective cross-sectional area of the funnel at the junction of the conical and cylindrical parts. It has been established that the eccentricity can be both positive and negative with respect to the axis of the conical part and depends on the rotor rotation frequency. To minimize the dimensions and weight of the packing device, it is recommended to make its conical part in the form of a torus.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-14

---

# СИНТЕЗ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ФАСУВАННЯ СИПКОЇ ПРОДУКЦІЇ АДАПТРОННОГО МОДУЛЯ ДОЗУВАННЯ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ СТАКАНЧИКОВОГО ТИПУ

О. О. Гавва, аспірант, ORCID ID: 0009-0004-4979-7943

Л. О. Кривопляс-Володіна, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-9906-6381

Національний університет харчових технологій

*Ключовою компонентою тривалості кінематичного циклу фасування є тривалість переміщень сипкої продукції в продуктопроводі фасувального пристрою модуля дозування та фасування. Завдання скорочення тривалості фасування безпосередньо пов'язано із задачами раціонального проектування фасувальних пристроїв. Проведено теоретичні дослідження руху легко плинної сипкої продукції в каналах фасувального пристрою при безперервній роботі дозувального модуля, побудованого за роторною системою компонування. Для забезпечення безперервної роботи функціонального модуля дозування одержано математичний вираз, який надає можливість визначити раціональне значення діаметра конусної частини лійки. На основі математичного моделювання руху матеріальної частинки в продуктопроводі фасувального пристрою одержано вираз для визначення раціонального значення ексцентриситету фасувального пристрою й ефективної площі поперечного перерізу лійки в місці спряження конічної та циліндричної частин фасувального пристрою. Для мінімізації габаритів фасувального пристрою рекомендовано виконати його конічну частину у вигляді тороподібної форми.*

**Ключові слова:** пристрій фасування, модуль дозування, сипка продукція, стаканчиковий дозатор, траєкторія переміщення, кінематичні параметри, конструктивні параметри.

**Вступ.** Пакування сипкої харчової продукції у споживчу тару передбачає виконання основних операцій дозування та фасування. Залежно від фізико-механічних властивостей сипкої продукції формування дози із масиву продукції здійснюють такими основними способами: об'ємним, ваговим, комбінованим, комбінаційним. Конструктивне виконання адаптронних модулів дозування та фасування умовно поділяє способи дозування на види, підвиди. Для дозування легко плинної сипкої продукції, величиною дози від 50 г до 3 кг, широко використовують дозатори з мірними телескопічними місткостями (телескопічні стаканчики). Компонування і принцип роботи таких дозаторів у пакувальних машинах-автоматах здебільшого залежить від продуктивності. Продуктивність — це обернено пропорційна величина тривалості кінематичного циклу процесу пакування.

Кінематичний цикл залежить від режиму роботи як пакувальної машини-автомата загалом, так і режимів роботи кожного окремого адаптронного модуля. Для одержання продуктивності великих значень (від 90 доз за хвилину до 150 доз за хвилину) використовують адаптронні модулі дозування безперервної дії. В таких дозаторах операція формування дози продукції й операція фасування, тобто переміщення її у споживчу тару, суміщені в часі, тому тривалість кінематичного циклу фасування дорівнює сумі тривалостей відкриття заслінки стаканчика, переміщення продукції зі стаканчика в споживчу тару, подачі та відведення споживчої тари. Основною частиною тривалості кінематичного циклу фасування є тривалість переміщення сипкої

продукції в лійці фасувального пристрою. Конструктивне виконання лійки фасувального пристрою впливає на додаткові опори переміщення продукції при контакті її з внутрішньою поверхнею лійки та можливих взаємодійних процесів між частинками продукції, тому завдання скорочення тривалості фасування продукції, що призведе до підвищення продуктивності модуля і всієї пакувальної машини, безпосередньо пов'язане із задачами раціонального проектування фасувальних пристроїв.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** При розробленні, випробуваннях й експлуатації пакувальних машин виникає завдання визначення оптимальних значень конструкційних і технологічних параметрів, раціональних експлуатаційних режимів, що забезпечують надійне функціонування машини при дії на неї множини дестабілізаційних факторів [1]. Одним із підходів до створення новітніх пакувальних машин є технологія паралельного інжинірингу [2].

Розвиток цього підходу базується на використанні раніше накопиченого досвіду під час проектування нового пакувального обладнання та розроблення методів пошукового структурно-параметричного його синтезу.

Пошукова задача структурно-параметричного синтезу під час розроблення нової пакувальної машини виникає на концептуальній стадії проекту, тобто на етапі зовнішнього проектування [3].

У науковій праці [4] наведено методологічні засади компонування машин для пакування сипкої продукції у споживчу тару на основі функціональних модулів. Розглянуто також структурні схеми як пакувальних машин, так і їх функціональних модулів. Встановлено, що для забезпечення виконання функціональної точності мехатронним модулем, високих значень продуктивності потрібно досконало дослідити переміщення продукції у всіх продуктових каналах модуля із визначенням параметрів, що надають можливість виконати раціональне конструювання робочих органів. У наукових працях [5, 6] наведено результати дослідження переміщення сипкої продукції у вагових дозаторах, сформульовані завдання на підвищення ефективності роботи таких дозаторів. Процесам переміщення сипкої продукції із місткостей присвячена праця [7], поряд із цим у дослідженнях не враховані режимні умови роботи дозаторів. Оптимізація параметрів вагового дозування сипкої продукції та розроблення методології потокового контролю точності дозування наведено в працях [8, 9]. Дослідженням переміщення сипкої продукції по гравітаційних поверхнях присвячена праця [10]. Питанням інтенсифікації переміщення дрібнодисперсної сипкої продукції при дії вібраційних навантажень присвячена праця [11]. Однак у цих дослідженнях відокремлено розглядається рух сипкої продукції без врахування режимів руху продукції в попередньо виконуваних технологічних операціях. Питанням удосконалення дозаторів об'ємного типу для сипкої продукції присвячені праці [13—15]. Розуміння механізмів виникнення небажаних ефектів є важливим для проектування надійних та ефективних систем транспортування харчових інгредієнтів. Фізико-механічне моделювання допомагає розробляти гігієнічні системи дозування, що відповідають сучасним промисловим стандартам [15]. Значна частина сучасних досліджень орієнтована на використання методу дискретних елементів (DEM) для моделювання гранульованих потоків у бункерах і шибєрних дозаторах. Вплив тиску рухомого зернистого шару на стінки бункера, детально розглянутий у [16], уточнено з позицій навантаження конструкцій приводів, що є важливим для раціонального проектування елементів фасувального пристрою. Розробки, представлені у праці [17], обґрунтовують флуктуації сили у двовимірному потоці сипких матеріалів, зважаючи на важливість

імпульсного навантаження при проектуванні дозувальних систем. У праці [18] автори встановили кореляцію між структурою потоку і тиском на стінку в повномасштабному силосі. Вагомий внесок у розуміння розподілу швидкостей і характеру потоку внесли у [19], де проаналізовано поведінку частинок під час заповнення та розвантаження бункерів. Завдяки введенню поняття локального масового потоку, у [20] здійснили вдосконалення CAD підходу фізико-механічного моделювання, що сприяє більш точному прогнозуванню швидкості переміщення частинок уздовж внутрішніх поверхонь бункера. Окрема увага приділяється дослідженню дозаторів шибєрного типу, зокрема в частині взаємодії частинок під час проходження через вузькі отвори. Результати експериментів [21] довели, що форма частинок має вирішальне значення для оцінки продуктивності та рівномірності потоку. У [22] розроблено тривимірну модель гвинтового живильника з урахуванням ефекту форми частинок, яка дала змогу наблизити результати моделювання до реальних умов. З'ясовано, що форма витків і кут нахилу істотно впливають на зону захоплення і стабільність потоку. Результати цих досліджень направлені на підвищення точності дозування. Попри значний обсяг наукових досліджень, спрямованих на розкриття складних фізичних явищ, що визначають динаміку сипких харчових продуктів, поточний рівень знань не забезпечує достатньої бази для розробки вичерпних інженерних рекомендацій. Це обмежує можливість створення універсальних та оптимальних систем транспортування і дозування зазначених матеріалів.

**Мета досліджень:** визначити й обґрунтувати раціональну конструкцію фасувального пристрою для сипкої продукції в пакувальних машинах-автоматах безперервної дії зі стаканчиковими дозаторами.

Відповідно до мети сформульовано такі завдання:

- проаналізувати кінематичні параметри руху частинок сипкої продукції у фасувальному пристрої;
- визначити вплив зміщення центральної циліндричної частини лійки щодо конусної частини на ефективну площу поперечного перерізу руху продукції та тривалість переміщення;
- надати практичні рекомендації щодо значення ексцентриситету в лійці залежно від продуктивності дозувально-фасувального модуля.

**Матеріали і методи.** *Об'єктом дослідження* є фасувальний пристрій адаптронного модуля дозування сипкої продукції стаканчикового типу безперервної дії.

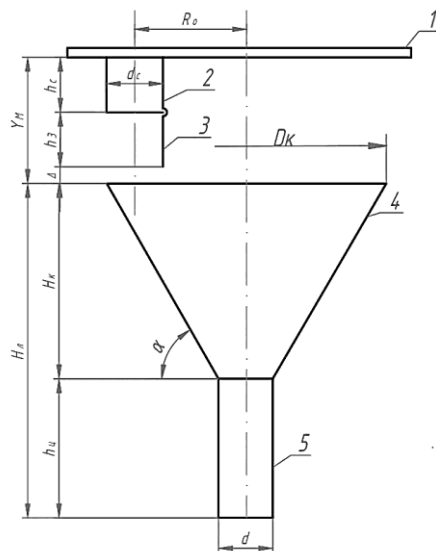
*Предмет дослідження* — кінематичні параметри руху матеріальних частинок сипкої продукції в продуктопроводі фасувального пристрою, його конструкція та конструктивні параметри.

*Методами дослідження* є математичне моделювання руху легко плинної сипкої продукції в продуктопроводі фасувального пристрою різного конструктивного виконання та синтез його конструкційних параметрів.

**Результати дослідження.** Здебільшого конструкція фасувального пристрою є поєднанням конічної й циліндричної частин продуктопроводу. Циліндрична частина має діаметр рукава плівки, з якого виготовляють упаковку, або еквівалентна розміру поперечного перерізу іншої упаковки (пачки, банки, коробки), а конічна — діаметр, що відповідає дузі руху стаканчика в зоні фасування. Кут нахилу бічної поверхні конуса приймається залежно від режиму руху сипкої продукції (нормальний, гідравлічний, суцільний). Для реалізації детермінованого гідравлічного режиму переміщення сипкої продукції рекомендують приймати кут нахилу конусної поверхні в межах  $60^\circ \dots 70^\circ$ . Довжина фасувального пристрою визначається його компонованням

залежно від діаметрів конусної та циліндричної частин, кута нахилу конусної поверхні та розташуванням і структурою модуля подачі плівки, формування з неї упаковки або розташуванням подавальної транспортної системи для інших видів упаковки.

Технологічна тривалість фасування визначається тривалістю переміщення продукції із дозувального стаканчика в конусну частину фасувального пристрою, переміщення в конусній і циліндричній частинах лійки (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема фасувального пристрою для сипкої продукції модуля дозування безперервної дії: 1 — бункер із сипкою продукцією; 2 — стаканчикова мірна ємність; 3 — заслінка; 4 — конічна частина лійки; 5 — циліндрична частина лійки

В оптимальному варіанті сипка продукція має переміщатися вертикально. Опором такому переміщенню є аеродинамічний опір повітря або газового середовища, в якому знаходиться продукція. Однак для дозаторів безперервної дії таке переміщення продукції реалізувати неможливо.

Частина продукції буде проковзуватися по внутрішній поверхні конуса лійки. Поряд із цим можливий силовий контакт продукції по внутрішній поверхні циліндричної частини фасувального пристрою. Це може призвести до турбулентності руху, співударів частинок. Таке явище збільшує тривалість фасування і, відповідно, зменшує продуктивність модуля. Для усунення цих недоліків є кілька способів, одним із яких є проектування раціональної конструкції фасувального пристрою. Загальновідомо, якщо змістити циліндричну частину лійки відносно конічної, то в зоні спряження отримаємо збільшену ефективну площу поперечного перерізу руху сипкої продукції (рис. 2).

Із геометричних залежностей відомо, що для поперечного перерізу циліндричної труби ефективна площа переміщення продукції визначається:

$$F_{\text{еф}} = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1)$$

а для перерізу у вигляді еліпса:

$$F'_{ef} = \frac{\pi d}{4} \sqrt{d^2 + 4(e \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2}, \quad (2)$$

де  $F_{ef}$ ,  $F'_{ef}$  — ефективні площі переміщення продукції по циліндричному і, відповідно, еліпсоїдному спряженні;  $d$  — внутрішній діаметр циліндричної частини лійки;  $e$  — ексцентриситет зміщення циліндричної частини лійки відносно конічної.

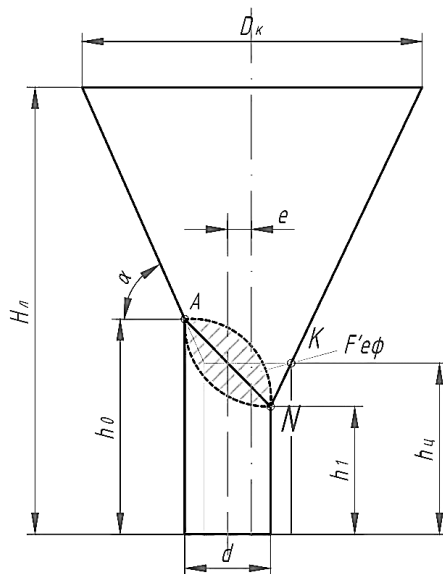


Рис. 2. Схема лійки фасувального пристрою із зміщеною циліндричною частиною

Величина ексцентриситету залежить від кутової швидкості обертання ротора дозатора, радіуса ротора, продуктивності та геометричних параметрів конічної і циліндричної частин лійки фасувального пристрою.

Важливим конструктивним параметром фасувального пристрою, яким забезпечується безперервний режим фасування сипкої продукції при заданій продуктивності, є діаметр конусної частини лійки  $D_k$ . Під час визначення раціонального значення  $D_k$  потрібно враховувати тривалість переміщення сипкої продукції із стаканчика у споживчу упаковку, кількість стаканчиків у дозаторі та частоту обертання ротора дозувального модуля (рис. 3).

Визначення діаметра конусної частини лійки виконаємо із застосуванням основних положень геометрії щодо довжини хорди  $oa$  або  $ob$  при заданому радіусі розташування стаканчиків  $D_p/2$  та центральному куту  $\varphi_\Sigma$ :

$$D_k = 2D_p \cdot \sin(0,5\varphi_\Sigma),$$

де  $\varphi_\Sigma$  — сумарний центральний кут визначається як:

$$\varphi_\Sigma = 0,5\varphi_\phi + 0,5\varphi_{np} + \varphi_c + 0,5\Delta\varphi;$$

$\varphi_\phi$  — кут, на який повернеться ротор стаканчиків, за якого вся продукція із стаканчика переміститься в упаковку:

$$\varphi_\phi = \omega_p \cdot t_\phi;$$

$\omega_p$  — кутова швидкість ротора, визначається  $\omega_p = \frac{\pi \cdot n_p}{30}$ ;  $n_p$  — частота обертання

ротора, визначається  $n_p = \frac{Z}{m_0}$ ;  $Z$  — продуктивність дозувально-фасувального модуля;  $m_0$  — кількість стаканчиків у роторі модуля дозування;  $t_\phi$  — тривалість фасування-переміщення сипкої продукції із стаканчика в упаковку.

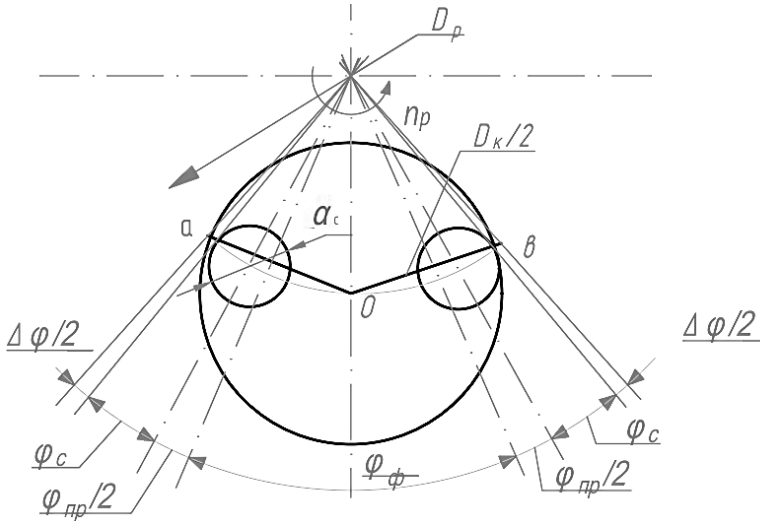


Рис. 3. Схема до визначення раціонального значення діаметра  $D_k$  конусної частини лійки

Для проектних розрахунків та прийнявши гідравлічний режим переміщення сипкої продукції тривалість фасування можна визначити як:

$$t_\phi = k_1 \cdot \lambda \sqrt{\frac{2H_\Sigma}{g}},$$

де  $k_1$  — коефіцієнт, що враховує переміщення частинок сипкої продукції по внутрішній поверхні лійки та можливі співударні явища між частинками;  $\lambda$  — коефіцієнт аеродинамічного опору переміщенню частинок у продуктопроводі лійки;  $H_\Sigma$  — довжина шляху переміщення сипкої продукції  $H_\Sigma = h_c + Y_m + H_d$ ;  $\phi_{np}$  — кут повороту ротора, що відповідає тривалості переміщення рукава плівки на довжину упаковки або подачі порожньої упаковки:

$$\phi_{np} = \omega_p \cdot t_{np} = \omega_p \cdot L_{yn} / v_{np},$$

де  $L_{yn}$  — довжина упаковки;  $v_{np}$  — швидкість переміщення зварних і протягувальних пристроїв (для м'якої упаковки);  $\phi_c$  — центральний кут ротора, що відповідає радіусу стаканчика;  $\Delta\phi$  — кут, що адекватний технологічному зазору.

Одержане значення  $\phi_\Sigma$  має бути меншим за кут розташування стаканчиків у роторі, тобто  $2\phi_\Sigma < \phi_0$ , де  $\phi_0 = 2\pi / m_0$ .

Для визначення раціонального значення ексцентриситету за умови, що частинки сипкої продукції не будуть вдарятися по внутрішній поверхні циліндричної частини лійки, доречно розглянути поетапно рух сипкої продукції із рухомого мірного стакана в упаковку.

Відповідно до проведених відеоспостережень встановлено, що при повороті ротора на кут  $\varphi_{\Sigma}$  здебільшого всі частинки сипкої продукції знаходяться в циліндричній частині фасувального пристрою, тому що  $Y_m + H_k < h_u$ . Тобто найбільш несприятливі умови руху сипкої продукції (взаємодія із внутрішньою конусною поверхнею, удар по циліндричній частині лійки) будуть у частинок, що найбільш віддалені від геометричного центра лійки, тобто в точці М (рис. 4).

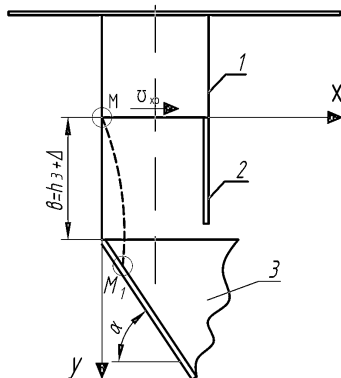


Рис. 4. Схема розрахунку переміщення частинки сипкої продукції на першому етапі руху:

1 — стаканчик; 2 — заслінка; 3 — конусна частина лійки

Для дослідження руху частинки сипкої продукції в продуктопроводі фасувального пристрою приймемо такі припущення: частинка сипкої продукції має масу, але геометричними розмірами її можна нехтувати; відповідно до фізико-механічних властивостей можна прийняти, що частинка є пружно-пластичною із коефіцієнтом відновлення швидкості після удару по конусній поверхні, який знаходиться в межах ( $k=0,1\dots 0,3$ ); впливом дії навколишніх частинок на рух досліджуваної частинки умовно також нехтуємо. Отримані значення ґрунтуються на даних з досліджень сипких харчових матеріалів, що демонструють пружно-пластичну поведінку.

З точки зору однорідності дії зовнішніх зусиль на частинку сипкої продукції, її рух у фасувальній лійці можна навести сукупністю чотирьох характерних етапів:

- перший — переміщення матеріальної частинки із початкової позиції (точка М) до контакту із внутрішньою конусною поверхнею лійки;
- другий — косий пружно-пластичний удар частинки по внутрішній поверхні конусної частини лійки;
- третій — переміщення матеріальної частинки по внутрішній поверхні конусної частини лійки;
- четвертий — переміщення матеріальної частинки в зоні спряження конусної і циліндричної частин лійки.

На першому етапі початок руху частинки розпочинається з моменту відкриття заслінки. Тривалість відкриття заслінки суттєво незначна порівняно з тривалістю інших етапів, тому можемо приймати, що відкриття заслінки відбувається миттєво. Всі частинки сипкої продукції рухаються із лінійною швидкістю  $v_{x0}$ , яка визначається

$$v_{x0} = \omega_p \frac{D_p}{2}.$$

Рух матеріальної частинки на першому етапі описується рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= g; \quad \dot{y} = gt; \quad y = g \frac{t^2}{2} \quad \text{при} \quad t_n = 0; \quad y_n = 0; \quad \dot{y}_n = 0; \\ \dot{x} &= v_{x0}; \quad x = v_{x0} \cdot t \quad \text{при} \quad t_n = 0; \quad x_n = 0; \quad \dot{x}_n = v_{x0}. \end{aligned} \quad (3)$$

Якщо припустити, що проекція конусної поверхні лійки в системі координат  $XOY$  описується рівнянням  $y = b + tg\alpha \cdot x$ , то тривалість переміщення частинки сипкої продукції до конусної поверхні в точці  $M_1$  можна визначити:

$$t_1 = \left[ v_{x0} \cdot tg\alpha + \sqrt{(v_{x0} \cdot tg\alpha)^2 + 2gb} \right] / g. \quad (4)$$

Після підстановки виразу [4] для визначення  $t_1$  в рівняння руху (3) матеріальної частинки одержимо:

$$\begin{aligned} \dot{y}_{1k} &= g \cdot t_1; \quad y_{1k} = g \frac{t_1^2}{2}; \\ \dot{x}_{1k} &= v_{x0}; \quad x_{1k} = v_{x0} \cdot t_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Координати  $y_{1k}$  та  $x_{1k}$  відповідають координаті точки  $M_1$ , в якій відбувається удар частинки по внутрішній поверхні конусної частини лійки.

Враховавши траєкторію руху матеріальної частинки, її фізико-механічні властивості, можна стверджувати, що на другому етапі буде косий пружно-пластичний удар (рис. 5).

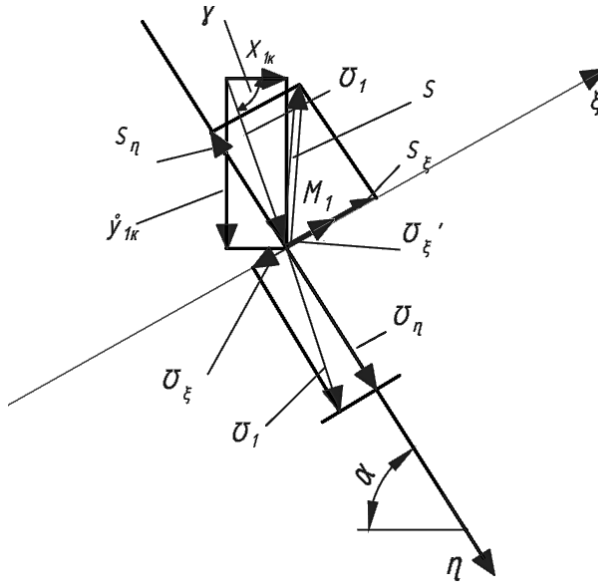


Рис. 5. Схема визначення кінематичних параметрів руху матеріальної частинки сипкої продукції після удару по внутрішній поверхні конічної частини лійки

Використавши ньютонівську теорію удару, запишемо вирази для визначення кінематичних параметрів руху частинки після удару:

$$v_\eta = v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha); \quad v'_\xi = v_\xi \cdot k = v_1 \cdot \sin(\gamma - \alpha) \cdot k, \quad (6)$$

$$\text{де } v_1 = \sqrt{(\dot{y}_{1k})^2 + (\dot{x}_{1k})^2}; \quad \gamma = \text{arctg} \left( \frac{\dot{y}_{1k}}{\dot{x}_{1k}} \right).$$

Після удару можливе відскакування частинки від поверхні конічної частини лійки з повторним ударом, але враховуючи, що для значної частини харчових продуктів  $k$  знаходиться в межах  $0,1 \dots 0,3$ , то значенням  $v'_z$  можна знехтувати, прийнявши подальший рух частинки тільки по поверхні конусної частини лійки. Під час удару виникають сили навантаження як на продукт, так і на стінку лійки. Силе ударне навантаження можна оцінити ударною силою або ударним імпульсом  $S$ . Ці параметри важливі під час вибору товщини матеріалу лійки і міцнісних властивостей продукції. На третьому етапі частинка рухається по поверхні конусної частини лійки з проковзуванням, яке враховується коефіцієнтом  $f$  опору ковзання. На цьому етапі переміщення відбувається від точки  $M_1$  до точки  $A$ . Точка  $A$  характеризує початок циліндричної частини лійки (рис. 6).

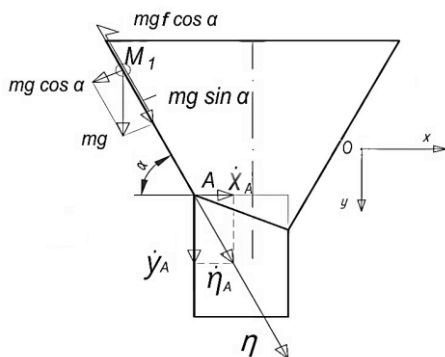


Рис. 6. Схема визначення кінематичних параметрів руху частинки сипкої продукції по внутрішній поверхні конічної частини лійки

Рівняння руху матеріальної частинки сипкої продукції по конусній частині лійки запишемо у вигляді:

$$\dot{\eta} = (g \cdot \sin \alpha - g \cdot \cos \alpha \cdot f) \cdot t + v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha); \quad (7)$$

$$\eta = (g \cdot \sin \alpha - g \cdot \cos \alpha \cdot f) \cdot 0,5 \cdot t^2 + v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha) \cdot t \quad (8)$$

при  $t_n = 0$ ;  $\eta = 0$ ;  $\dot{\eta} = v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha)$ ,

де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання матеріальної частинки по внутрішній поверхні конусної частини лійки.

Прийmemo відстань від точки  $M_1$  до  $A$  за  $l_{AM1}$ , яка залежить від кута  $\alpha$ ,  $v_{0x}$  та  $e$ . За таких умов:

$$t_2 = \left[ -v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha) + \sqrt{[v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha)]^2 + 2l_{AM1}(g \cdot \sin \alpha - g \cdot f \cdot \cos \alpha)} \right] \times [g \cdot \sin \alpha - g \cdot f \cdot \cos \alpha]^{-1}. \quad (9)$$

Тоді

$$\dot{\eta}_A = (g \cdot \sin \alpha - g \cdot f \cdot \cos \alpha) \cdot t_2 + v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha), \quad (10)$$

а проєкції на осі  $x$  та  $y$ :

$$\dot{x}_A = \dot{\eta}_A \cdot \cos \alpha; \quad \dot{y}_A = \dot{\eta}_A \cdot \sin \alpha. \quad (11)$$

У подальшому, на четвертому етапі, частинка переміщується в циліндричній частині лійки (рис. 7).

Рівняння, що описують рух матеріальної частинки в циліндричній частині лійки, мають вигляд:

$$x = \dot{x}_A \cdot t; \quad y = 0,5 \cdot t^2 \cdot g + \dot{y}_A \cdot t \quad \text{при } t = 0; \quad x = 0; \quad y = 0; \quad x = \dot{x}_A; \quad y = \dot{y}_A. \quad (12)$$

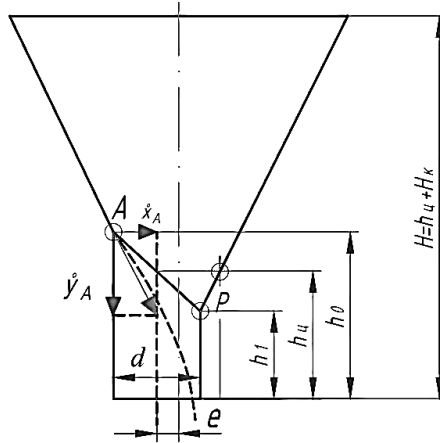


Рис. 7. Схема визначення кінематичних параметрів руху частинки сипкої продукції в циліндричній частині фасувального пристрою

Тривалість переміщення частинки в циліндричній частині лійки можна визначити за формулою при  $y = h_0$ :

$$t_3 = \left[ -\dot{y}_A + \sqrt{(\dot{y}_A)^2 + 2gh_0} \right] / g, \quad (13)$$

тоді

$$x_{h_0} = \dot{x}_A \cdot t_3; \quad y_{h_0} = 0,5 \cdot t_3^2 \cdot g + \dot{y}_A \cdot t_3.$$

На цьому етапі важливо, щоб матеріальна частинка не вдарялася по внутрішній поверхні циліндричної частини лійки і не проковзувалась по ній. Для виконання цієї умови потрібно, щоб виконувалась умова  $x_{h_0} = \dot{x}_A \cdot t_3 \leq d$ .

Виконання цієї умови можливе при відповідному ексцентриситеті циліндричної частини стосовно конічної.

Після відповідних математичних перетворень одержимо:

$$e = \left[ \frac{H_k}{\sin \alpha} - \left[ \left( \frac{\omega_p \cdot 0,5 D_p (\omega_p \cdot 0,5 D_p \cdot tg \alpha + \sqrt{(\omega_p \cdot 0,5 D_p \cdot tg \alpha)^2 + 2gb})}{g \cdot \cos \alpha} \right) + l_{AM1} \right] \right] \cos \alpha, \quad (14)$$

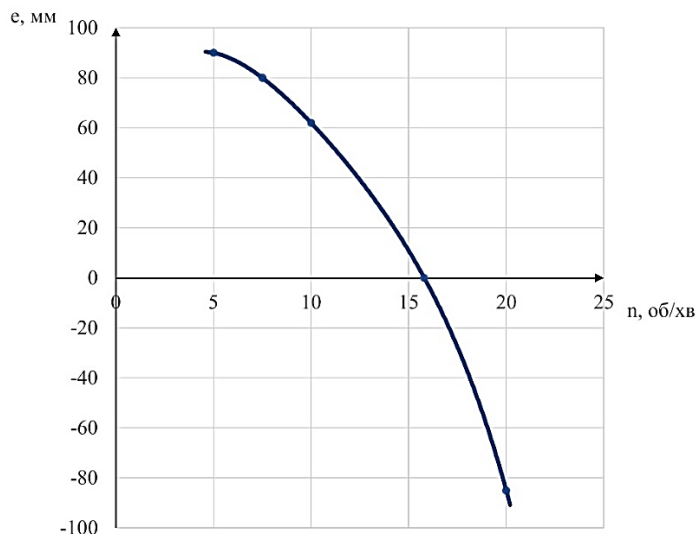
де

$$l_{AM1} = \left\{ \frac{d^2 \cdot g^2}{\left[ -\dot{y}_A + \sqrt{(\dot{y}_A)^2 + 2gh_0} \right]^2 \cdot \cos^2 \alpha} - [v_1 \cdot \cos(\gamma - \alpha)]^2 \right\} \left[ 2(g \cdot \sin \alpha - g \cdot f \cdot \cos \alpha) \right]^{-1}.$$

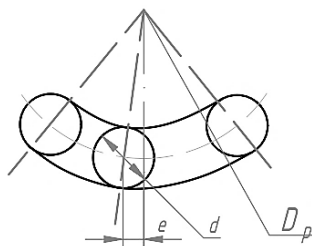
Аналіз одержаного виразу показує, що за всіх інших сталих геометричних параметрів фасувального пристрою величина ексцентриситету залежить від частоти обертання ротора модуля дозування в параболічній залежності. Чим більша частота ротора, тим менше значення  $e$  (рис. 8).

При відповідних значеннях частоти обертання ротора ексцентриситет може бути від'ємним, тобто циліндрична частина лійки від осі симетрії конічної частини лійки.

Під час проектування фасувальних пристроїв для функціональних модулів дозування стаканчиковаго типу безперервної дії поряд з ексцентриситетом циліндричної частини лійки доречно конусну частину виконувати у вигляді тора, що змінює площу поперечного перерізу від тора до кола діаметром циліндричної частини лійки (рис. 9).



**Рис. 8.** Зміна значення ексцентриситету фасувального пристрою за різного значення частоти обертання ротора дозатора (розрахункові дані:  $m_0=6$ ;  $D_p=0,8$  м;  $Z=30$  уп/хв;  $n=5$  об/хв;  $Z=45$  уп/хв;  $n=7,5$  об/хв;  $Z=60$  уп/хв;  $n=10$  об/хв;  $Z=90$  уп/хв;  $n=15$  об/хв;  $Z=120$  уп/хв;  $n=20$  об/хв)



**Рис. 9.** Схема раціональної конструкції фасувального пристрою для функціонального пристрою дозування стаканчиковаго типу безперервної дії

**Висновки.** 1. Встановлено, що основною ключовою компонентою тривалості кінематичного циклу фасування є тривалість переміщення сипкої продукції в лійці фасувального пристрою. Конструктивне виконання лійки впливає на додаткові опори переміщенню продукції при контакті її з внутрішньою поверхнею лійки та можливих ударних процесів між частинками продукції й елементами поверхні лійки.

2. Одержані математичні вирази, за допомогою яких можна визначити раціональне значення діаметра конусної частини лійки при заданій продуктивності дозувального модуля, компонування пакувальної машини-автомата та структурно-механічних властивостей сипкої продукції.

3. На основі моделювання руху матеріальної частинки в продуктопроводі фасу-

вального пристрою одержано вираз для визначення раціонального значення ексцентриситету фасувального пристрою та ефективної площі поперечного перерізу лійки в місці спряження конічної та циліндричної частин фасувального пристрою. Одержані результати та запропоновані інженерні рекомендації стосуються переважно легкоплинної сипкої харчової продукції, зокрема таких матеріалів, як борошно, сіль, цукор. Зважаючи на значну варіативність реологічних властивостей сипких продуктів, для матеріалів із підвищеною вологістю, злипанням або неоднорідною структурою результати слід адаптувати з урахуванням специфіки їхнього переміщення в продуктопроводах фасувального обладнання.

4. Аналіз результатів теоретичних досліджень надає можливість рекомендувати під час проєктування фасувальних пристроїв для сипкої продукції приймати раціональні значення ексцентриситету зміщення осі симетрії циліндричної частини щодо осі симетрії конічної частини лійки, а також за мінімізації габаритів і ваги фасувального пристрою виконати його конічну частину у вигляді тороподібної форми.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Гавва, О. М. та ін. (2023). *Системна інженерія пакувальних машин-автоматів*: монографія. Київ: Вид-во «Сталь».
2. Stypnytskyu, V. V. (2013). Principles of functional-oriented technology manufacturing products engineering production. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*, 760, 26—34.
3. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*. (2004). USA: PM1 Standards Committee.
4. Гавва, О. М. та ін. (2015). *Функціонально-модульне проєктування пакувальних машин*: монографія. Київ: Вид-во «Сталь».
5. Масло, М. А., Гавва, О. М. (2014). Вплив динаміки робочих органів пакувальних машин на технологічні параметри процесів пакування. *Упаковка*, 6, 32—36.
6. Масло, М. А. (2003). Вдосконалення вагових дозаторів. *Упаковка*, 28, 29.
1. Кирия, Р. В., Брагинец, Д. Д., Мищенко, Т. Ф. (2012). Истечение сыпучего груза из бункера с регулируемой боковой заслонкой. *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр.* Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 101, 130—138.
7. Derenivska, A. et al. (2014). Optimization of transportation of bulk solids food products in the linear weight feeder of packing machine. *Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies*, 3, 20—23.
8. Овчаренко, А. И., Середа, А. Д., Шапиро, М. В. (2007). Погрешность дозирования сыпучих продуктов. *Упаковка*, 1, 44—47.
9. Булгаков, В. М. та ін. (2016). Уточнена теорія руху матеріальної точки по гравітаційним поверхням сільськогосподарських машин. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2(1), 1—14.
10. Sholoviy, Y. P., Maherus, N. I. (2014). The development of the mathematical model of the fine disperse material behavior under vibration in the conical hole of the dispenser. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*, 786, 24—29.
11. Магерус, Н. І. (2014). Вплив параметрів вібрації та геометрії лунки на рух дрібнодисперсного сипкого матеріалу у конічній лунці дозатора. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2, 71—77.
12. Пальчевський, Б. О., Бондарчук, Д. В. (2010). Аналіз точності роздільно-порційного об'ємного дозування сипких матеріалів. *Наукові нотатки*, 28, 398—402.
13. Пальчевський, Б. О., Бондарчук, Д. В. (2011). Експериментальне дослідження роботи об'ємних дозувальних пристроїв сипких речовин. *Технологічні комплекси*, 3, 57—62.
14. Бондарчук, Д. (2010). Підвищення точності роботи об'ємних дозаторів сипких речовин. *Технологічні комплекси*, 1, 99—103.
15. Zuriguel, I., Parisi, D. R., Hidalgo, R. C., Lozano, C., Janda, A., Gago, P. A., Peralta, J. P., Ferrer, L. M., Pugnaroni, L. A., Clément, E. et al. (2014). Clogging transition of many-particle systems flowing through bottlenecks. *Sci. Rep.*, 4, 7324.

16. Chou, C. S., Tzeng, C. Y., Smid, J., Kuo, J. T., & Hsiau, S. S. (2000). *Experimental study of moving granular bed: Wall stress measurement*. In Proceedings of the 14th ASCE Engineering Mechanics Division Conference, Austin, TX, USA, 21—24 May.
17. Longhi, E., Easwar, N., & Menon, N. (2002). Large force fluctuations in a flowing granular medium. *Phys. Rev. Lett.*, 89, 045501. doi: 10.1103/PhysRevLett.89.045501.
18. Chen, J. F., Rotter, J. M., Ooi, J. Y., & Zhong, Z. (2006). Correlation between flow pattern and wall pressures in a full scale silo. *Eng. Struct.*, 29, 2308—2320. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.011>.
19. González-Montellano, C., Gallego, E., Ramírez-Gómez, Á., & Ayuga, F. (2012). Three dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: Analysis of numerical results. *Comput. Chem. Eng.*, 40, 22—32.
20. Magalhães, F. G., Atman, A. P., Moreira, J. G., & Herrmann, H. J. (2016). Analysis of the velocity field of granular hopper flow. *Granul. Matter*, 18, 33.
21. Cleary, P. W., & Sawley, M. L. (2002). DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge. *Appl. Math. Model.*, 26, 89—111. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(01\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(01)00050-6).
22. Cleary, P. W. (2007). DEM modelling of particulate flow in a screw feeder model description. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal* [online], 7(2—4), 128—138. Доступно 3: <https://doi.org/10.1504/PCFD.2007.013005>.

УДК 641/642: 658.62.018.2

# INCREASING THE EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT IN FOOD PRODUCTION USING TITANIUM AND ITS ALLOYS

**I. Oshchypok***Ivan Franko National University of Lviv***Key words:**

titanium,  
alloy,  
equipment,  
food production,  
wear resistance

**Article history:**

Received 09.02.2025

Received in revised form  
12.02.2025

Accepted 27.02.2025

**Corresponding author:**

him1960@ukr.net

**ABSTRACT**

A comparative analysis of increasing the wear resistance of titanium and its alloys by means of chemical-thermal treatment and application of protective coatings is carried out. Particular attention is paid to the influence of operational factors, in particular, elevated temperatures in contact zones, high speeds and loads in friction pairs, as well as an aggressive chemical environment that causes material degradation. The behavior of titanium and its alloys under corrosion conditions is studied, including a change in the stationary potential, its relationship with the equilibrium potential, the potential of the onset of passivation and complete passivation. The mechanisms of formation of protective oxide and nitride layers and their effect on the durability of parts are evaluated. The main methods of increasing the wear resistance of titanium parts are analyzed, including oxidation, nitriding, spraying and arc coating. Their effectiveness depending on the treatment modes and type of working environment, as well as the interaction of modified surfaces with external loads, which determines the optimal operating conditions of titanium products in food equipment, is considered. Special attention is paid to the mechanism of chemical-thermal treatment (CTP), in particular, boriding, which allows to increase the wear resistance and antifriction properties of titanium. It is established that the considered methods of improving the surface characteristics of titanium parts do not provide a sufficient level of protection under conditions of intensive wear (more than 0.5 mm). These methods have limited prospects for restoring worn parts. Most of them require significant heating of titanium, which complicates the technological process. At the same time, titanium remains a promising material for food equipment due to its corrosion resistance and biocompatibility.

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-15

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ЗАСТОСУВАННЯМ ТИТАНУ ТА ЙОГО СПЛАВІВ

I. М. Ощипок, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-5427-3376

Львівський національний університет ім. І. Франка

*Проведено порівняльний аналіз підвищення зносостійкості титану та його сплавів за допомогою хіміко-термічної обробки та нанесення захисних покриттів. Розглянуто їхню ефективність залежно від режимів обробки та типу робочого середовища. Особливу увагу приділено механізму хіміко-термічної обробки (ХТО), зокрема боруванню, яке дає змогу підвищити зносостійкість та антифрикційні властивості титану. Встановлено, що розглянуті методи покращення поверхневих характеристик титанових деталей не забезпечують достатнього рівня захисту в умовах інтенсивного зношування (понад 0,5 мм). Ці методи мають обмежені перспективи для відновлення зношених деталей. Рекомендовано застосування захисних покриттів на основі алюмінідів титану.*

**Ключові слова:** титан, сплав, устаткування, харчові виробництва, зносостійкість.

**Вступ.** З розвитком науки і техніки все більше нових матеріалів впроваджується в сферу обробки та виробництва харчових продуктів, щоб підвищити його ефективність, покращити якість їжі та забезпечити безпеку й гігієну виробничого процесу. Як сучасний високоефективний матеріал титан широко використовується в галузі харчового обладнання завдяки чудовій стійкості до корозії, високих температур і біосумісності [7, 16]. Титан і його сплави знаходять широке використання у багатьох галузях промисловості. Не є винятком і харчове машинобудування. З титану виготовляють варильні котли, бочки, а також казани, в яких готують розсоли, продукти з томатів і соуси. Титан може використовуватися для виготовлення такого обладнання, як різальні машини, млинки, міксери тощо. Крім того, з нього виготовляють деталі холодильників, використання яких надає можливість зменшити витрату холодоагентів і затрати на експлуатацію в умовах підвищеного тиску. Це пов'язано з автентичним комплексом властивостей титану й титанових сплавів: високою міцністю та пластичністю, корозійною стійкістю при малій щільності. На рис. 1 показано переваги використання титану в харчовій промисловості.

Завдяки високій корозійній стійкості і різноманітності харчової сировини обладнання може зберігати високу продуктивність після тривалої експлуатації. У робочих деталях подрібнювальних машин, виготовлених з титанового сплаву, через знос деталей утворюються дрібні сколи або порошок, який не завдає шкоди людському організму при потрапленні в шлунково-кишковий тракт. Крім того, він перетворюється на оксид, наприклад, як  $TiO_2$ , який не тільки нешкідливий для організму людини, але й корисний, оскільки оксид титану є харчовою добавкою [7].

Оксид титану ( $TiO_2$ ) має кілька корисних властивостей для організму та широко використовується в різних сферах.

Безпечність у харчовій промисловості: використовується як харчовий барвник E171, що надає білий колір продуктам (хоча його безпечність у великих кількостях досліджується); має високу хімічну інертність, що знижує ризик реакцій в організмі.

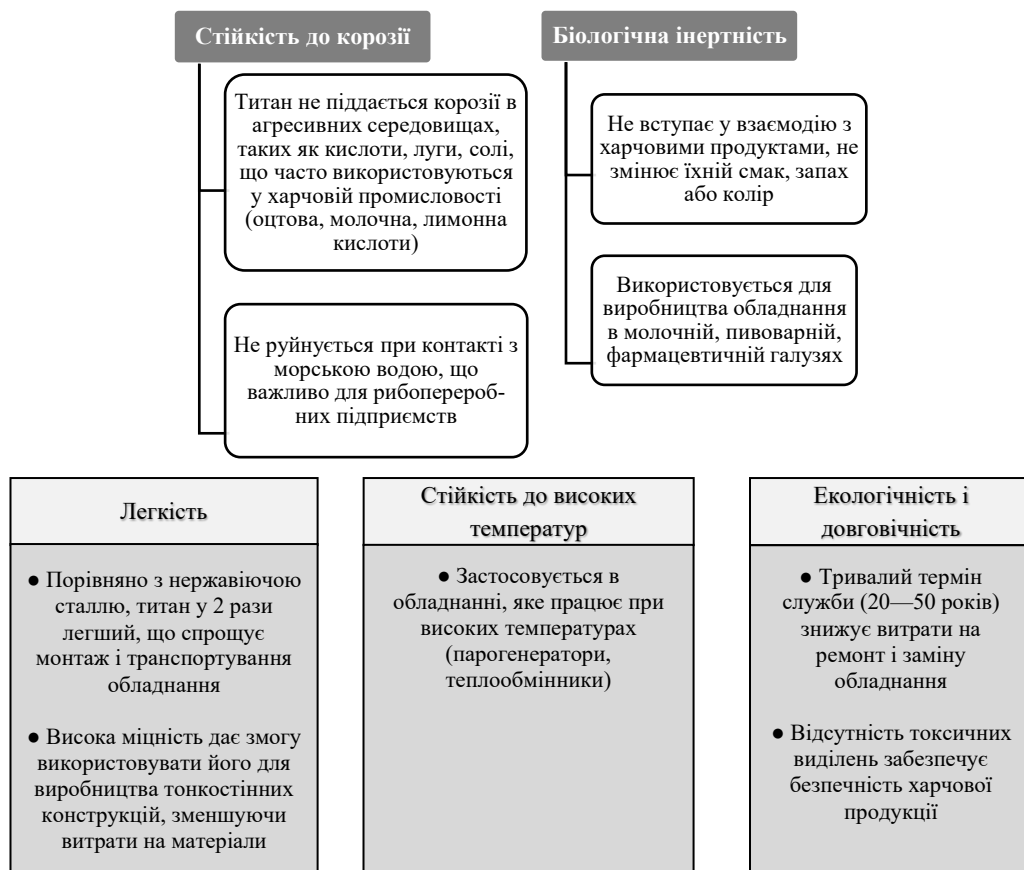


Рис. 1. Переваги використання титану в харчовій промисловості

Антибактеріальні властивості: оксид титану проявляє фотокаталітичні властивості, тобто при впливі світла розщеплює органічні забруднення та бактерії, що сприяє дезінфекції поверхонь; застосовується у фільтрах для очищення води та повітря.

Завдяки цим властивостям оксид титану вважається корисним у біомедицині, косметичі та харчовій промисловості. Однак питання його безпечності у вигляді наночастинок вимагає подальших досліджень.

Упаковка харчових продуктів є важливою ланкою в забезпеченні якості та безпечності харчових продуктів. Титан використовується для виготовлення високоточного обладнання для упаковки харчових продуктів, наприклад, дозувальних, запечатувальних, етикетувальних машин тощо. Його висока стійкість до корозії та високих температур забезпечує стабільність устаткування після тривалої роботи, зберігає значну корозійну стійкість до більшості хімічних речовин, включаючи кислоти, луги, солі тощо, які присутні в харчових продуктах. Харчові машини з титановими деталями мають тривалий термін експлуатації і зберігають хороші механічні властивості, тому титан підходить для обладнання, яке працює в несприятливих умовах під час переробки харчових продуктів.

Стійкість до корозії і нетоксичність титану роблять його ідеальним матеріалом у машинах для перевірки безпечності харчових продуктів, наприклад, створення датчиків для виявлення мікроорганізмів і хімікатів у їжі.

Титан біологічно сумісний з організмом людини, тому його можна використовувати для виготовлення спеціальних пристроїв і контейнерів, які безпосередньо контактують з харчовими продуктами, він не забруднює їжу чи навколишнє середовище.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Вміст домішок (водню, кисню, азоту та вуглецю) має велике значення для механічних властивостей титану, тому що ці домішки формують у титані тверді розчини і проміжні фази (гідриди, оксиди, нітриди і карбіди). Наявність невеликого вмісту кисню, азоту, вуглецю підвищують твердість і міцність титану, але при цьому істотно зменшують пластичність і корозійну стійкість, а також погіршують його зварювання [1, 7, 12, 16].

Відомо, що титан існує у двох поліморфних модифікаціях:  $\alpha$ -титан з гексагональною щільною упакованою решіткою, яка утворюється при температурах нижче 885 °С, і  $\beta$ -титан з кубічною об'ємноцентрованою решіткою. Відповідно, температура поліморфного перетворення  $\alpha$ -титану на  $\beta$  (для йодидного титану) становить 885 °С.

Розрахункова щільність титану характеризується утвореною кристалічною ґраткою, при температурі  $25 \pm 2$  °С становить 4,505 г/см<sup>3</sup>. Температура плавлення чистого титану становить 1668 °С, а температура кипіння — 3227 °С. Теплопровідність титану високої чистоти при температурі 20...25 °С становить 22,064 Вт/(м·К). Електричний опір титану надто залежить від його чистоти, а значення в різних джерелах подаються від  $0,42 \cdot 10^{-6}$  до  $0,78 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. При температурах вище -200 °С титан є парамагнетиком.

Титан має високу корозійну стійкість у повітрі при низьких і підвищених температурах. При нагріванні до 600 °С титан покривається оксинітридною плівкою. Через схожість структур металу і плівки остання тримається дуже міцно. Крім того, швидкість дифузії кисню через окислювальну плівку при низьких температурах дуже невелика і добре захищає метал від руйнування. Також титан стійкий у воді, у тому числі морській, і в ґрунтах з різним значенням рН. Але він нестійкий у низці безкисневих мінеральних кислот (фтористоводневої, соляної) за підвищеної концентрації й температури, добре взаємодіє з деякими висококонцентрованими органічними кислотами та лугами при нагріванні (наприклад, 40-відсотковий розчин NaOH за 80 °С). У тих випадках, коли титан кородує, його руйнування йде рівномірно по всій поверхні, а не точковими ділянками, що позитивно його характеризує, на відміну від інших металів. Розчинення азоту та кисню в  $\alpha$ -сплавах обмежене, при поглинанні зайвої їх кількості утворюється упорядкована фаза. Механізм поглинання газу залежить від швидкості дифузії в самому металі та оксиді, і він може бути сповільнений чи прискорений за допомогою наявних домішок у них. Активність до кисню у титану вища, ніж до азоту, тож у повітряній атмосфері титан поглинає кисень набагато більше, ніж азот. При температурах до 500 °С швидкість окислення титану й титанових сплавів досить невисока, тому навіть після тривалої витримки механічні властивості, внаслідок поглинання кисню, змінюються несуттєво, коли виріб не тонкостінний і не знаходиться під навантаженням. За високої температури і при значній товщині виробу спостерігається відсутність небезпеки самозаймання, оскільки швидко формується захисний окисний пласт. Окалиностійкість титану може бути підвищена або знижена за рахунок легуючих елементів. Жорсткість йодидного титану залежить від чистоти металу та методу випробувань від 0,5 до 0,88 ГПа та вище. Граничний рівень міцності

металу високої чистоти — 196...294 МПа. З підвищенням температури граничний рівень міцності зменшується — з 235 МПа при 20 °С до 137 МПа при 200 °С, зі зниженням температури до кімнатної — підвищується. Відносне видовження  $\delta$  залежить від способу обробки титану та може становити від 40 до 82%, а відносне звуження  $\psi$  — від 60 до 89%. Наявність малих кількостей домішок у титані технічної чистоти значно підвищує його міцність і зменшує пластичність. Межа міцності титану підвищується до 529...627 МПа при видовженні на 25...30% [13, 14, 15, 17].

Дослідженнями оксидування титану займалися Н. Dong, Т. Bell, А. Bloyce, Р. Н. Morton, Siva Rama Krishna, Y. L. Brama, Y. Sun та інші. У працях цих авторів досліджувалися різні прийоми оксидування, зокрема термічне, хімічне або електрохімічне оксидування [10, 12, 16].

На сьогодні у промисловості для обробки титану і його сплавів часто застосовують газове азотування. Завдяки високій хімічній інертності, твердості, зносо- та корозійної стійкості нітридного шару газове азотування титану застосовують у харчовому машинобудуванні, хімічній промисловості, медицині [2, 5]. Крім високої зносо- та корозійної міцності, до модифікованих шарів висуваються високі вимоги жароміцності, жаростійкості, опірності від окислення при високих температурах [3, 4].

Для цього необхідно використовувати термодифузійне насичення поверхні бором (борування), у результаті чого на поверхні титану утворюються бориди — TiB і TiB<sub>2</sub>. Перевагою цих шарів, порівняно з нітридною обробкою, є також їх більш високі показники жаростійкості, твердості, модуля пружності, зносостійкості, тепло- та електропровідності, жароміцності. Проте головним недоліком борування, порівняно з азотуванням, є температура ведення процесу (для борування — 1100...1500 °С; для азотування — 750...1050 °С). За таких високих температур процесу неприпустимо деградує титанова матриця, що негативно впливає на механічні його властивості, з утворенням товстих боридних шарів високої твердості та крихкості, які схильні до сколювання та відшарування під дією контактних навантажень [5, 6].

**Мета дослідження:** дослідити методи хіміко-термічної обробки деталей харчового обладнання з нанесеним захисним покриттям з титану та його сплавів, застосування яких обмежене через такі суттєві недоліки:

низька твердість і зносостійкість, що спричиняє налипання титану на інструменти або деталі, які працюють у парі тертя, та призводить до швидкого зношування;

висока хімічна активність при підвищених температурах, зокрема взаємодія з воднем (від 50...70 °С), киснем (від 400...500 °С), а також азотом, СО та СО<sub>2</sub> (від 600...700 °С).

При цьому виникає необхідність покращення зносостійкості деталей і різних конструкцій з матеріалу на основі титану при виготовленні харчового устаткування. Значні вимоги до експлуатації титанових сплавів у харчовому машинобудуванні продиктовані підвищеними температурами у контактних зонах, високими швидкостями тертя, значними механічними навантаженнями і впливом агресивного середовища. Забезпечення ефективності в роботі титанових деталей у харчовому машинобудуванні вимагає розробки сучасних результативних методів нанесення захисних покриттів з оптимальними параметрами товщини та зносостійкості.

**Матеріали і методи.** Мікроструктурний і дюрOMETричний аналізи, мікрорентгеноспектральний аналіз, випробування на жаростійкість.

**Результати досліджень.** Для титану властиві два стани: активний і пасивний. Титан і його сплави підпорядковуються загальним закономірностям переходу з активного стану в пасивний та назад. Пасивний стан досягається анодною поляризацією або додаванням окислювачів. Визначимо поведінку титану та його сплавів в умовах корозії величиною стаціонарного потенціалу та його розташуванням стосовно рівноважного потенціалу, потенціалу початку пасивації та потенціалу повної пасивації. Схильність титану до пасивації, як і інших металів і сплавів, може бути охарактеризована значенням граничного потенціалу пасивації, критичною щільністю струму пасивації та значенням критичного фокусування окислювача, при яких титан і його сплави переходять у пасивний стан [12]. На відміну від хрому та нержавіючих сталей, титан у розчинах азотної, хромової кислот та їх сумішей, а також при глибокій анодній поляризації не має схильності до перепасивації. Але у присутності активаторів (Cl<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>) при глибокій анодній поляризації в ділянці високих потенціалів може спостерігатися явище пробою, пов'язане з порушенням пасивної плівки, що характеризується підвищенням швидкості корозії з підвищенням потенціалу та локалізацією іржею виразкового виду. При підвищенні температури та введенні в розчин активаторів, особливо фтор-йонів, швидкість утворення іржі неспинно підвищується навіть у пасивному стані (наприклад, у концентрованій азотній кислоті з додаванням фторводневої). У концентрованій фторводневій кислоті швидкість корозії титану скорочується. Так, при концентрації кислоти 60...70% швидкість корозії у 100 разів нижча, ніж у 40-відсотковому розчині, що пояснюється утворенням на титані плівки з гідридів титану. За таких умов швидкість корозії не залежить від потенціалу, а визначається швидкістю розчинення гідридної плівки за рівнянням  $TiH_2 + 2H^+ \rightarrow Ti + 2H_2$ , при цьому утворюється гідридно-пасивний стан [11] в її порах. Пориста гідридна плівка швидко досягає поляризації, проте інтенсивність корозії не збільшується. У неокислювальних кислотах швидкість корозії титану залежить від перенапруженні виділення водню, яка на титані зменшується у кислих розчинах.

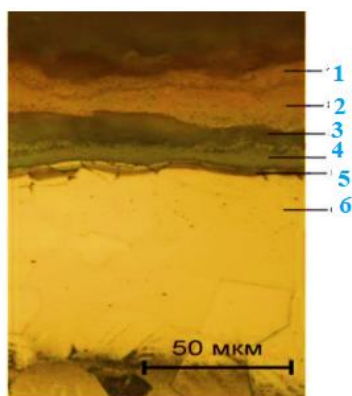
Головні способи збільшення зносостійкості титанових деталей: оксидування, азотування, напилення, дугові способи нанесення покриттів тощо.

Оксидування — це процес створення на поверхні деталей оксидної плівки в результаті окисно-відновної реакції. Для оксидування характерне нанесення шарів товщиною від 2 до 50 мкм, що часто є недостатнім для деталей, що мають зношування більше 0,5 мм [2—5].

Оксидування титану — цілком вивчений механізм, що підтверджують як дослідницькі роботи, так і нормативні документи з оксидування титанових виробів, які застосовуються на небезпечних виробничих об'єктах. Головними режимами оксидування виступають температура, час процесу та умови охолодження, які визначають товщину оксидного шару.

Термічне оксидування означає витримку деталей при температурах від 600 до 850 °C на час від 1 до 12 год, що негативно впливає на титан через підвищення розміру зерна всієї поверхні. Також можливе короблення деталей через довготривалий термічний цикл.

Хімічне оксидування полягає в обробці поверхні розчинами окиснювачів, розплавами або сухими сумішами. Далі між нанесеними елементами і поверхнею здійснюється окислювальна реакція за визначених умов. При хімічному оксидуванні важливим специфічним процесом є підготовка поверхні, яка включає шліфування і полірування.



**Рис. 2.** Мікроструктура поверхнього шару сплаву ВТ5 після окисдуванням при температурі 850 °С: 1 — зовнішній шар, збагачений оксидом алюмінію  $Al_2O_3$ ; 2 — внутрішній шар, що складається переважно з  $TiO_2$ ; 3 — внутрішній шар, у складі якого переважають оксиди титану  $TiO$  або  $TiO_2$  нестехіометричного складу (наприклад  $TiO_{1,9}$ ), які при пробопідготовці викришувались через підвищену крихкість; 4 — шар на межі з металом, у складі якого присутні інтерметаліди легуючих елементів, витіснених з оксидного шару дифундуючим киснем; 5 — шар важковизначеної природи; 6 — дифузійна зона, насичена киснем [14]

Відомі способи окисдування мають тривалий процес підготовки поверхні, що істотно збільшує час технологічного процесу. При поганій підготовці поверхні виникають типові дефекти у вигляді нещільної плівки або місця зі світлими плямами на поверхні, які вказують на відсутність плівки в цьому місці. Крім того, якщо деталь є складною за конструкцією з наявністю глухих отворів або щілин і порожнин, то можуть утворюватися вади у цих місцях чи навколо них. Не варто забувати про шкідливий вплив пари і хімічних елементів на організм людини при хімічному окисдуванні, що вимагає додаткового захисту оператора.

Електрохімічне окисдування або анодуванням полягає у витримці в електролізній ванні з хімічним розчином, у яку подається серія електричних імпульсів. Процес електрохімічного окисдування відбувається при використанні меншої кількості хімічних розчинів і за нижчих температур, ніж при термічному чи хімічному окисдуванні. Але для цього процесу потрібне більш складне і дорогівартісне обладнання. Цим способом створюються покриття малої товщини.

Азотування є ще одним способом збільшення поверхневих властивостей титанових виробів. Суть азотування полягає в хіміко-термічній обробці деталей, при якій поверхню насичують азотом. Товщина шару при азотуванні варіюється від 10 до 150 мкм.

Найбільшого поширення в промисловості набуло газове та ванне азотування. При азотуванні в соляних ваннах деталь нагрівається до 500—650 °С, а при газовому азотуванні деталь нагрівається від 400 до 800 °С [6, 7, 10], що є небажаним для титанових деталей через підвищення розміру зерна під час нагрівання деталі. Головні недоліки азотування такі: тривалість процесу насичення деталі (до 100 год), висока крихкість поверхнього шару, знижена в'язкість азотованих деталей, нестабільність азотування при застосуванні в машинах харчових виробництв.

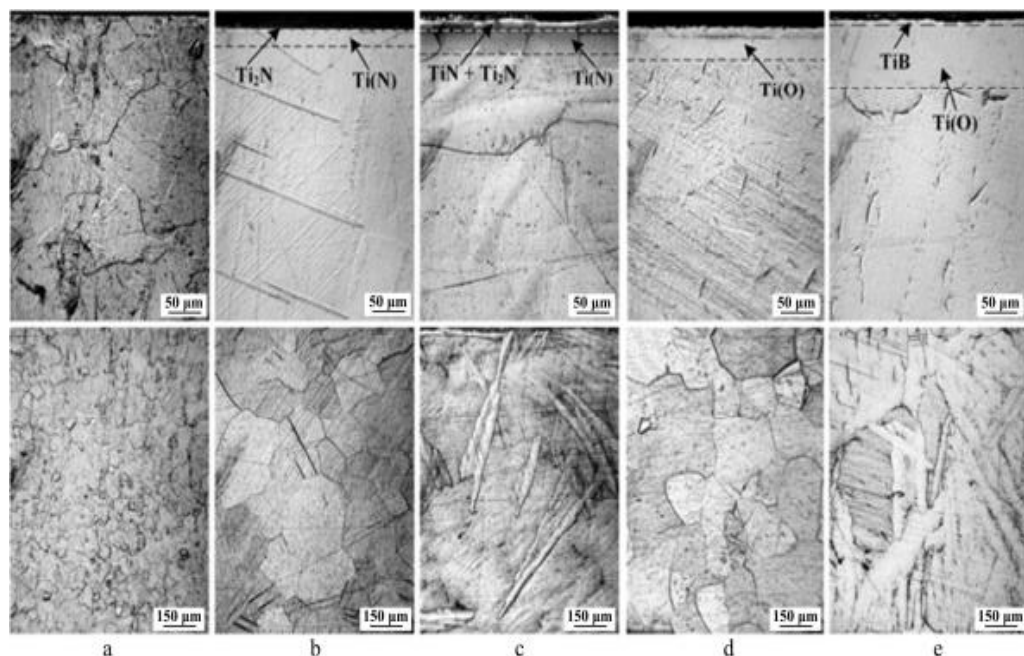
Борування — це ще один механізм хіміко-термічної обробки (ХТО), яким підвищують зносостійкість та антифрикційні властивості титану. Суть борування полягає

в дифузійному насиченні поверхневого шару титану при нагріванні і витримці в хімічно активному середовищі.

Дослідження показали, що азотування при температурі 750 °С формує тонку одnofазну поверхневу плівку, представлену нітридом нижчої валентності  $Ti_2N$ , тоді як борування при цій температурі не спричиняє змін у фазовій структурі поверхні. З підвищенням температури хіміко-термічної обробки після азотування структура плівки змінюється з одnofазної ( $Ti_2N$ ) на двофазну ( $Ti_2N+TiN$ ), а після борування на поверхні утворюється одnofазна плівка, представлена моноборидом  $TiB$ .

У промисловості найбільшого поширення набули борування в порошкових сумішах, йонне борування, електролізне борування, рідинне борування, борування з обмазок (паст) та газове борування. Стосовно титану використовують борування в порошкових сумішах і електролізне борування (у ванні з розплавом бору). Борування титану також означає нагрівання матеріалу до 1000...1200 °С від 3 до 8 год, при цьому одержують шари завтовшки до 60 мкм. Борування допомагає збільшити зносостійкість деталей харчопереробних машин з титану і його сплавів у 2 рази. Незважаючи на збільшення зносостійкості отриманих виробів, вони зазнають локального термічного впливу, що зменшує показники механічних властивостей. Ще одним значним недоліком є мала товщина шару, що наноситься, який є недостатнім для деталей, що мають знос більше 0,5 мм.

Мікросистема титану Grade 2 у вихідному стані характерна для сплавів (рис. 3, а). Система представлена поліедричними зернами  $\alpha$ -фази, розмір яких становить  $\sim 20$   $\mu m$  і не перевищує 50  $\mu m$ . Ця дрібнодисперсна структура утворюється через пластичну деформацію в температурній зоні перебування  $\alpha$ -фази та подальшого рекристалізуючого відпалу за 600...800 °С.



**Рис. 3.** Мікроструктура титану Grade 2: у вихідному стані (а) та після наступного азотування (b, c) або борування (d, e) за температури 750 °С (b, d) і 900 °С (c, e) [18]

Після хіміко-термічної обробки укріпленій градієнтний шар виявляється структурно меншими за  $\alpha$ -зерна з пониженим ступенем розтравлювання (альфованій шар) (рис. 3, b—e). Товщина нітридної плівки, отримана після азотування при температурі 750 °С, має  $\sim 3...4 \mu\text{m}$  (рис. 3, b). У результаті розчинення азоту в титановій матриці утворюється газонасичена зона — твердий розчин азоту в  $\alpha$ -титані, розмір якого становить  $\sim 26 \mu\text{m}$ , що корелює з результатами, які отримані відповідно до аналізу зміни градієнта мікротвердості поверхневого шару. Збільшення температури азотування до 900 °С потовщує азотований шар: товщина нітридної плівки становить  $\sim 5...7 \mu\text{m}$  (рис. 3, c), а альфованого шару —  $\sim 50 \mu\text{m}$ . Витримка за температури 900 °С і повільне охолодження зумовлюють розвиток  $\alpha$ -фази у вигляді одиничних пластин [18].

Встановлено, що досліджені режими азотування значно підвищують корозійну стійкість титану Grade 2 у 20-відсотковому розчині хлоридної кислоти. Водночас боровані зразки демонструють знижену корозійну стійкість у 20-відсотковому розчині HCl.

Дослідження способів збільшення поверхневих властивостей титанових деталей підтвердило, що азотування, оксидування та борування не завжди забезпечують створення захисних покриттів на титанових деталях, які працюють в умовах зношування та мають значний знос (понад 0,5 мм). Крім того, ці способи мають слабкі перспективи до відновлення деталей після зношування. Майже всі з перелічених способів передбачають суттєве нагрівання титану, що спричиняє значне зростання зерна та зменшення міцнісних властивостей, а період механізмів формування оксидних або нітридних шарів збільшує технологічний процес, який не виключає наявність недоліків при неякісній підготовці поверхонь.

Для підвищення ефективності використання титанових сплавів доцільним є застосування захисних покриттів на основі алюмінідів титану. Ключові властивості, які покращуються завдяки алюмінідуванню: зносостійкість — підвищення стійкості деталей до тертя та механічного зношування; корозійна стійкість — захист від впливу агресивних середовищ; жаростійкість — збереження механічних властивостей при високих температурах.

Основні вимоги до покриттів на базі алюмінідів титану:

1. Товщина шару — повинна бути оптимальною для забезпечення довговічності.
2. Міцність зчеплення — покриття має добре зв'язуватися з основним матеріалом.
3. Однорідність хімічного складу — рівномірний розподіл елементів у структурі покриття.
4. Конструкційна міцність — здатність витримувати механічні навантаження.
5. Можливість легування та модифікування — покращення властивостей шляхом введення додаткових елементів.

Отримане покриття має важливе значення з огляду на фінансові витрати на обслуговування та ремонт обладнання. Близько 80...90% деталей підлягають відновленню, що суттєво знижує витрати. Вартість відновлення становить 15...30% від ціни нової деталі, що робить його економічно вигідним рішенням.

На основі експериментальних даних і теоретичного аналізу встановлено, що застосування титанових сплавів сприятиме підвищенню якості продукції. Сплави мають високу корозійну стійкість, що запобігає потраплянню металевих іржавих частинок у харчові продукти. Відсутність токсичних домішок і біосумісність титану забезпечує збереження смакових і хімічних властивостей продуктів. Гладка поверхня

титанових деталей зменшує адгезію бактерій, що покращує санітарні умови. При цьому знижуються експлуатаційні витрати.

**Висновок.** Титан і його сплави широко застосовуються в обладнанні харчових виробництв завдяки своїм унікальним властивостям: високій корозійній стійкості, міцності, легкості та біологічній інертності.

Титан має низьку щільність і високу міцність, що дає змогу зменшити масу конструкцій без втрати механічних характеристик. Завдяки стійкості до хімічного впливу не вимагає частого ремонту чи заміни деталей, що знижує витрати на технічне обслуговування. Висока теплопровідність деяких титанових сплавів сприяє ефективному теплообміну, що зменшує енергоспоживання, а також збільшує термін служби обладнання.

Стійкість титану до високих температур і механічних навантажень забезпечує тривалу експлуатацію без деформацій. Титанові покриття та хіміко-термічна обробка підвищують зносостійкість деталей, що особливо важливо для рухомих і тертьових вузлів. Завдяки високій механічній міцності титанові компоненти мають тривалий ресурс роботи, що зменшує потребу в частій заміні обладнання.

З розвитком науки й техніки та безперервним удосконаленням обладнання харчової промисловості можна очікувати, що застосування титану в харчових машинах буде розширюватися, сприяючи підвищенню безпеки харчових продуктів і ефективності виробництва.

Використання алюмініду титану може підвищити ефективність використання титанового сплаву. Основними перевагами, які можна збільшити за допомогою алюмінідуванню титану, є довговічність, корозійна та теплова стійкість.

Застосування титану в харчовій промисловості виправдане його унікальними властивостями: довговічністю, безпечністю, стійкістю до корозії та агресивних середовищ.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Кондращенко, О. В. (2005). *Корозія і захист матеріалів та конструкцій*. Харків: ХНАМГ.
2. Сопрунок, П. М., Юзевич, В. М. (2005). *Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів*. Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, вид-во «СПОЛОМ».
3. Сахненко, М. Д., Вєдь, М. В., Ярошок, Т. П. (2005). *Основи теорії корозії та захисту металів*. Харків.
4. Куцова, В. З., Носко, О. А., Ковзель, М. А. (2007). *Спеціальні сплави, РЗМ та благородні метали*: навчальний посібник. Дніпропетровськ: НМетАУ.
5. Федірко, В. М., Погрелюк, І. М. (1995). *Азотування титану та його сплавів*. Київ: вид. Наукова думка.
6. Flink, A., Larsson, T., Sjolen, J. et al. (2005). Influence of Si on the microstructure of arc evaporated (Ti, Si)N thin films: evidence for cubic solid solutions and their thermal stability. *Surf. And Coat. Technol.*, 200, 1535—1542.
7. Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., Jaiswal, S. (2016). Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications. *Materials Science and Engineering*, 68(1), 948—9639. doi: 10.1016/j.msec.2016.06.020.
8. Buschow, K. H. J., van Engen, P. G. et al. (1983). Magneto-optical properties of metallic ferromagnetic materials. *J. Magn. Mater.*, 38, 1—22.
9. Palm, M., Inden, G., Thomas, N. (1995). The Fe-Al-Ti system. *J. Phase equilib.*, 6(3), 209—222.
10. Dong, H., Bell, T. (2000). Enhanced wear resistance of titanium surfaces by anew thermal oxidation treatment. *Wear*, 238, 131—7.

11. Kara, G., Purcek, G., and Yanar, H. (2017). Improvement of wear behaviour of titanium by boriding. *Industrial lubrication and tribology*, 69, 65—70.
12. Kulka, M., Makuch, N., Dziarski, P., Mikolajczak, D., and Przystacki, D. (2015). Gradient boride layers formed by diffusion carburizing and laser boriding. *Optics and Lasers in Engineering*, 67, 163—175.
13. Leyens, C., and Peters, M. (2003). *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH.
14. Liu, J., Alfantazi, A., and Asselin, E. (2014). Influence of cupric, ferric, and chloride on the corrosion of titanium in sulfuric acid solutions up to 85 °C. *Corrosion*, 70, 29—37.
15. Martin, P. J., Bendavid, A., Cairney, J. M., Hoffman, M. (2005). Nanocomposite Ti-Si-N, Zr-Si-N, Ti-Al-Si-N, TiAl-V-Si-N thin film coatings deposited by vacuum arc deposition. *Surf. And Coat. Technol.*, 200, 2228—2235.
16. Pohrelyuk, I., and Fedirko, V. (2012). *Titanium Alloys — Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications: Chemico-thermal treatment of titanium alloys — Nitriding* (Chapter 7). Ed.: Akm Nurul Amin. In *Tech.*, 141—174.
17. D. Siva Rama Krishna, Y. L. Brama, Y. Sun. (2007). Thick rutile layer on titanium for tribological applications [Текст]. *Tribology International*, 40, 329—333.
18. [https://www.ipm.lviv.ua/corrosion2018/Chapter\\_02/167\\_Lavrys.pdf](https://www.ipm.lviv.ua/corrosion2018/Chapter_02/167_Lavrys.pdf) (дата звернення 08.12.2023).

УДК: 621.798.3:004.4 (043.3)

## DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE BIONIC GRIPPING DEVICE BASED ON COAXIAL SHELLS

**O. Chentsov, M. Iakymchuk***National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

bionic gripping devices,  
packaged food products,  
mathematical modeling,  
holding force,  
vacuum

---

**Article history:**

Received 13.02.2025  
Received in revised form  
12.05.2025  
Accepted 14.05.2025

---

**Corresponding author:**

chentsovov@gmail.com

---

**ABSTRACT**

This study explores the development of an adaptive bionic gripping device inspired by the anatomical and functional characteristics of the marine polychaete worm *Glycera Phyllodocida*. This organism's unique ability to evert its jaw structure for prey capture has served as a biological model for designing a novel robotic gripper. The proposed design is based on a series of coaxial elastomeric shells capable of inverting and returning to their original form through pneumatic actuation. The gripper incorporates a guiding cylinder to control the inversion direction, concentric reinforcement ribs to regulate membrane deformation, and a variable wall thickness for enhanced adaptability.

The device demonstrates a high level of conformity to objects with diverse geometries and materials. The gripping process is divided into three stages: initial contact, membrane wrapping, and retention, ensuring secure holding with minimal deformation of the target object. Experimental validation has confirmed the effectiveness of the device in handling cylindrical, conical, and spherical samples with diameters ranging from 92% to 116% of the guiding cylinder's diameter.

Furthermore, mathematical modeling has been employed to predict gripping forces, membrane behavior under varying internal pressures, and the effect of membrane stiffness and geometry on operational efficiency. Integration of vacuum assistance enhances retention strength, especially for heavier objects, and improves membrane retraction speed.

The findings highlight the potential of this bioinspired gripper for use in food processing and packaging industries, where objects of varying sizes and delicate surfaces must be handled with precision and adaptability. Compared to traditional rigid or pneumatic soft grippers, the developed prototype provides a balanced combination of flexibility, structural stability, and control.

This research contributes a promising advancement in the field of soft robotics and biomimetic engineering, paving the way for the design of next-generation adaptive manipulators suitable for real-world applications.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-16

---

## РОЗРОБКА АДАПТИВНОГО БІОНІЧНОГО ПРИСТРОЮ ЗАХОПЛЕННЯ НА ОСНОВІ КОАКСІАЛЬНИХ ОБОЛОНОК

О. В. Ченцов, аспірант, ORCID ID: 0009-0002-3677-4035

М. В. Якимчук, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-1905-3546

Національний університет харчових технологій

*У статті наведено результати дослідження адаптивного біонічного пристрою захоплення, який копіює принцип функціонування живого організму *Glycera Phyllodo-cida*. Запропонована конструкція пристрою захоплення базується на коаксіальних оболонках, що мають здатність до трансформації одна в іншу. Результатами дослідження встановлення залежності між силою захоплення та характеристиками об'єкта захоплення: розміру, форми та геометрії поверхні. Авторами виготовлено прототип пристрою захоплення, перевірено адекватність роботи та підтверджено високий ступінь адаптивності до захоплення об'єктів різних форм.*

**Ключові слова:** біонічні пристрої захоплення, паковані харчові продукти, математичне моделювання, зусилля утримання, вакуум.

**Постановка проблеми.** Для подолання існуючих обмежень пристроїв захоплення харчових виробів, які мають труднощі захоплення та утримання пакованих харчових продуктів при зміні їх форм, розмірів і характеристик, виникає необхідність у розробці нових конструктивних рішень. Традиційні жорсткі пристрої захоплення демонструють низьку ефективність, наприклад, при маніпулюванні складними за формою упаковками, що суттєво обмежує їхнє використання.

У цьому контексті звернення до природних організмів, які мають високу адаптивність і ефективність до захоплення та утримання різних за формою об'єктів, є перспективним підходом.

Природні аналоги, такі як рухи хобота слона, щупальця восьминога, лапи гекона чи язик хамелеона, слугують джерелом натхнення для інженерних рішень. Унікальні біологічні особливості цих організмів демонструють, як можна ефективно адаптуватися до захоплення об'єктів різної форми та матеріалу. Особливою моделлю універсального пристрою захоплення є рука людини, яка відзначається гнучкістю, чутливістю та швидкодією.

Однак навіть серед різноманітних конструкцій біонічних пристроїв захоплення існують проблеми. Наприклад, м'які багатопальцеві пристрої захоплення, активовані стисненим повітрям, демонструють гарну адаптивність і безпеку, але недостатню жорсткість кінцевих ефекторів, що обмежує їх здатність працювати з великими по масі або «м'якими» упаковками.

А тому для вирішення існуючих задач в харчовій промисловості є нагальна необхідність у створенні нових інноваційних пристроїв захоплення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових праць дав змогу зробити висновок, що запропоновані підходи до проектування біонічних пристроїв захоплення на базі тороподібних гідростатів, не дають належного ефекту, тому що призводять до значного збільшення їх габаритів, потребують складної системи керування та мають невеликі зусилля затискання. Спрощено принцип роботи пристрою захоплення на основі тороподібного гідростату пояснено у праці [10]. При-

стрій, розглянутий в [1], має жорсткий зовнішній каркас і жорсткі механізми керування, що відповідають за рух тороподібного гідростату. На відміну від нього, пристрій [9] не має жорстких елементів органу захоплення, але керується складною системою приводів і має обмеження у керуванні напрямку інверсії органу захоплення. Рух поверхні тороподібного гідростату пристрою захоплення [2] зумовлений переміщенням декількох тросів, що пропущені через вісь органу захоплення. Це накладає обмеження на габарити пристрою, яке зумовлене наявністю складної системи жорстких шківів.

У праці [3] розглянуто біонічний пристрій захоплення, що імітує роботу перистальтики стравоходу шляхом симетричного скорочення та послаблення «м'язів» через переміщення об'єкта вздовж осі пристрою. Автор досліджень стверджує, що такі системи ефективні лише за умови низького тертя між стінками пристрою захоплення та об'єктом з постійним зовнішнім змащенням. У праці [4] розглянуто принцип пневматичної інверсії внутрішньої трубчастої мембрани, який був застосований у ліаноподібному пристрої захоплення, що імітує механізм росту рослин для навігації у невідомому середовищі. Схожий за принципом дій механізм, що досліджується у [8], має спільні з ним риси, але демонструє здатність м'якого механізму до просування крізь отвори, значно менші за габарити пристрою. Пристрій захоплення з телескопічними пальцями [5] та [6], що виготовлені з м'якого еластомеру, демонструє здатність до подовження робочих органів захоплення шляхом багатоступеневого вивертання силфоноподібних мембран під дією тиску, але кінцева результативна сила захоплення обмежена лише силою тертя між невеликим кінцевими сегментами. В основі біонічного пристрою захоплення, дослідженого в [11], лежить живий прототип того самого організму *Glycera Phyllodocida*, але його характерною рисою є застосування жорстких елементів конструкції та кінцевого ефектора, що складається за принципом оригамі. Серед усього різноманіття наявних пристроїв захоплення, що побудовані на базі живих прототипів [12], на окрему увагу заслуговує пристрій, що копіює поведінку міноги при захопленні об'єкта [15]. Комбінація двох етапів захоплення за допомогою вакууму та радіальне обтискання об'єкта гарантує виску ефективність, але обов'язковою умовою для початку його роботи є занурення об'єкта захоплення у внутрішню порожнину пристрою. Той самий принцип роботи застосовано у пристрої, що описаний у [13], але тут його використано для навігації у невідомому середовищі.

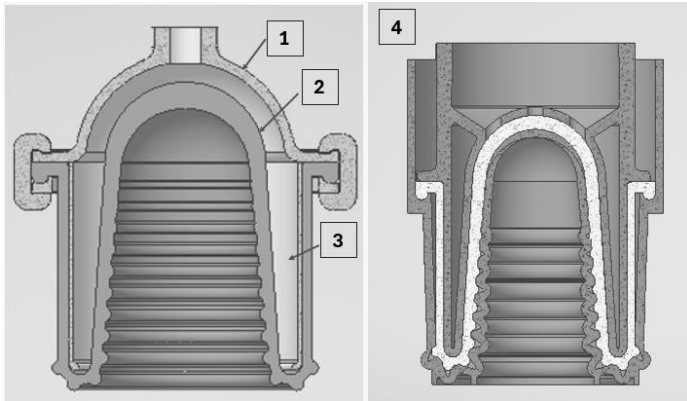
Спільною рисою більшості конструкцій наведених біонічних пристроїв захоплення є внутрішні стінки, які рухаються одночасно з об'єктом. Такі пристрої побудовані на базі тороподібного гідростату заповненого рідиною та активуються шляхом механічного переміщення. Недоліком таких пристроїв є складність форм конструкції і, як наслідок, великі витрати на виготовлення, що унеможлиблює їх комерційне застосування.

**Мета дослідження:** визначення функціональних характеристик запропонованого біонічного пристрою захоплення з подальшою оптимізацією його конструкції, що передбачає використання елементів жорсткого ендоскелету, впровадження концентричних ребер жорсткості на поверхні еластомерних оболонок і збільшення адгезії шляхом структурування контактної поверхні.

**Матеріали і методи.** Об'єктом дослідження є характеристики біонічного пристрою захоплення методами проведення активного експерименту, спрямованого на опис умов утримання упаковок з харчовим продуктом різних форм і розмірів.

**Результати та обговорення.** Філософія роботи запропонованого біонічного пристрою ґрунтується на функціонування живого організму *Glycera Phyllodocida*. *Glycera Phyllodocida* — це морський поліхетний черв'як, який належить до класу багатощетинкових кільчастих червів (*Polychaeta*) і родини *Glyceridae*. Цей організм є частиною морських екосистем і зустрічається переважно в прибережних водах океанів. Він має унікальну анатомію та поведінкові особливості. Для біомеханіки та біоінженерії цікавим є будова *Glycera* та функціонування його стравоходу зі щелепами, які знаходяться всередині тіла і можуть вивертатися назовні через дистальний отвір, щоб захопити їжу, а потім згортатися назад для транспортування їжі всередину організму. Характерні особливості будови його тіла розглянуті у [8].

Філософія роботи запропонованого біонічного пристрою захоплення передбачає, що переміщення мембрани 2 (рис. 1) відбувається прикладеним тиском. При цьому переміщення мембрани при її розгортанні зумовлюється варіюванням товщини стінок і зміною геометрії мембрани. Спостерігається зменшення товщини стінок мембрани від центру до периферії. Для уникнення надмірного роздуття сегментів мембрани при розгортанні запропоновано установку допоміжних ребер жорсткості, що надає процесу розгортання східчастий характер.



**Рис. 1.** Запропоновані конструкції біонічного пристрою захоплення.

Елементи конструкції: 1 — жорсткий корпус; 2 — еластична мембрана; 3 — внутрішня напрямна; 4 — литтєва форма мембрани

Характерною рисою запропонованої конструкції біонічного пристрою захоплення від наявних конструкцій є використання коаксіально розташованих циліндричних сегментів мембрани та циліндричної напрямної 3 (рис. 1), яка дає змогу контролювати напрямок інверсії. Тиск повітря, прикладений до мембран зсередини, поступово вивертає її, а напрямна скеровує напрямок деформації. При скиданні тиску повітря з біонічного пристрою захоплення мембрана, під дією пружних сил, повертається до початкового стану.

Особливістю конструкції запропонованого біонічного пристрою захоплення є різниця в товщині між внутрішньою та зовнішньою стінкою мембрани, що запобігає втраті стійкості внутрішньої частини та сприяє ефективності процесу захоплення (рис. 2, 3).

Результати математичного моделювання дали змогу визначити залежності щодо геометрії мембрани (рис. 4) та розміру об'єкта захоплення.

За результатами моделювання було виготовлено експериментальні зразки запропонованого біонічного пристрою захоплення та побудовано дослідну установку для оцінки параметрів пристрою. Для виготовлення мембран були використані силікони на платиновому каталізаторі твердістю в діапазоні від 15HSA до 20HSA.

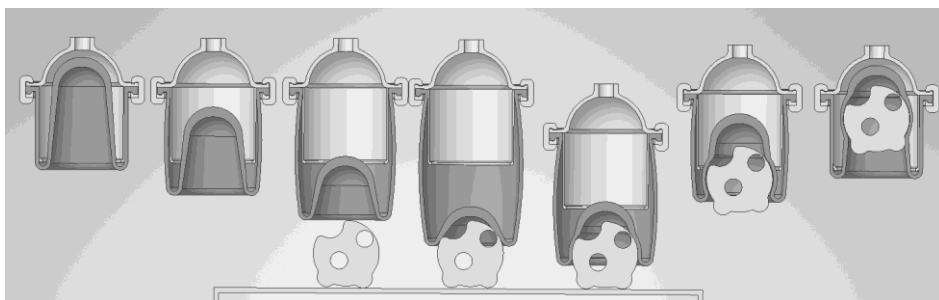


Рис. 2. Процес захоплення об'єкта біонічним пристроєм захоплення за умов, коли розмір об'єкта менший за діаметр внутрішньої напрямної мембрани

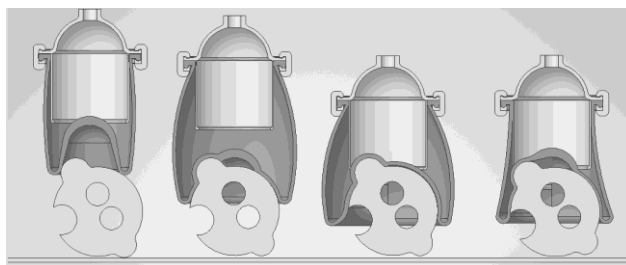


Рис. 3. Процес захоплення об'єкта біонічним пристроєм захоплення за умов, коли розмір об'єкта перевищує діаметр внутрішньої напрямної мембрани

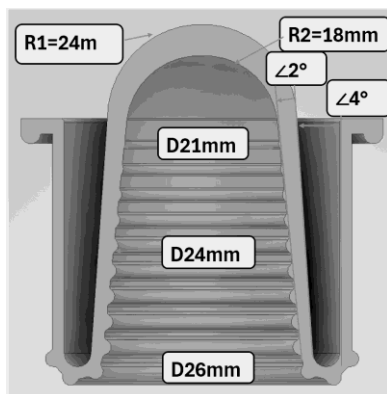


Рис. 4. Геометричні розміри мембрани для запропонованої конструкції біонічного пристрою захоплення

Стратегія захоплення біонічним пристроєм передбачає три основні етапи, які забезпечують ефективне та надійне утримання упаковок з харчовим продуктом без деформації їх форм.

На першому етапі початкового контакту пристрою захоплення з об'єктом сила, що генерується внутрішнім тиском повітря, прикладається до поверхні упаковки. Як показують дослідження, величина цієї сили значно менша за опір матеріалу поверхні

упаковки, що дає змогу уникнути будь-яких її пошкоджень. Крім цього, слід зазначити, що рівномірне розподілення зусилля захоплення по поверхні упаковки забезпечує надійний контакт елемента захоплення з об'єктом.

На другому етапі відбувається огортання упаковки зовнішньою стінкою мембрани. Конструкція мембрани дає змогу компенсувати надмірний тиск, що може виникати при зануренні упаковки в порожнину мембрани. При цьому розподілення зусилля мембрани по поверхні упаковки залишається постійним, а площа контакту мембрани з її поверхнею суттєво збільшується, що додатково захищає об'єкт від пошкоджень.

На третьому етапі відбувається утримання упаковки. Для цього припиняється подача повітря і мембрана повертається до свого початкового стану, втягуючи упаковку всередину. Завдяки особливим характеристикам еластичності матеріалу мембрани вона легко адаптується до форми та матеріалу поверхні упаковки. Утримання упаковки забезпечується комбінованим зусиллям шляхом одночасного притискання та дії сил тертя, що виникає між поверхнею упаковки та внутрішньою стінкою мембрани.

Для зменшення часу роботи біонічного пристрою захоплення на етапі повернення мембрани до початкового стану після відпускання упаковки пропонується використовувати асистування вакуумом. Використання вакууму також дає змогу ефективно захоплювати упаковки великої ваги шляхом зменшення еластичності мембрани під дією внутрішнього розрідження, що підвищує її опір до вивертання.

Приклади утримання об'єктів різної форми та матеріалів за допомогою біонічного пристрою наведено на рис. 5.



**Рис. 5.** Способи утримання різних за формами та матеріалами об'єктів біонічним пристроєм захоплення: 1 — скляна куля; 2 — дерев'яна куля; 3 — упаковка з картону; 4 — гладкий пластиковий корпус; 5 — паперовий конус; 6 — резиноподібне покриття; 7 — пластикова місткість з рідиною; 8 — паперовий багатокутник; 9 — гладка скляна поверхня

За результатами експериментальних досліджень було встановлено, що пристрій надійно захоплює та утримує об'єкти, розмір яких або розмір частини їхньої поверхні, яка використовується для захоплення, перебуває в межах від 92% до 116% від діаметра жорсткої внутрішньої напрямної. Винятком становлять об'єкти, матеріал поверхні яких має великий коефіцієнт тертя при взаємодії з силіконовою гумою, з якої виготовлена мембрана.

Експериментально було досліджено роботу біонічного пристрою захоплення із зразками, що мають різну геометрію, зокрема циліндром, сферою та усіченим конусом, який повторює геометрію внутрішніх стінок мембрани. Визначено, що для досліджених розмірів пристрою максимальне розкриття внутрішньої напрямної становить 32 мм, жорсткість мембрани дорівнює 15 HSA, а ребра жорсткості мають діаметр 2 мм та поверхню, структуровану додатковими зачіпами довжиною 2 мм. З урахуванням товщини стінок мембрани максимальний діаметр зразка, який може бути занурений у порожнину пристрою, становить 28 мм.

Експериментально досліджено, що максимальна здатність до утримання без використання асистування вакуумом залежить від власної еластичності мембрани. Застосування вакууму допомагає збільшити силу утримання, однак її величина суттєво впливає на мінімальний розмір упаковки, оскільки внутрішня частина мембрани розширюється під дією атмосферного тиску ззовні.

На другому етапі були проведені експериментальні дослідження щодо визначення сили утримання об'єктів різної форми та розмірів біонічним пристроєм захоплення. Результати дослідження наведені на графіку на рис. 6—8.

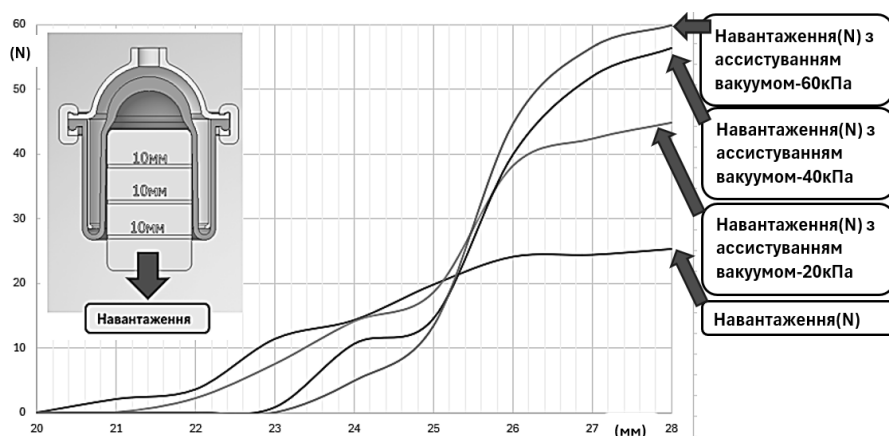


Рис. 6. Графік залежності зусилля утримання від діаметра дослідженого зразка циліндричної форми (мм) та глибини асистуючого вакууму

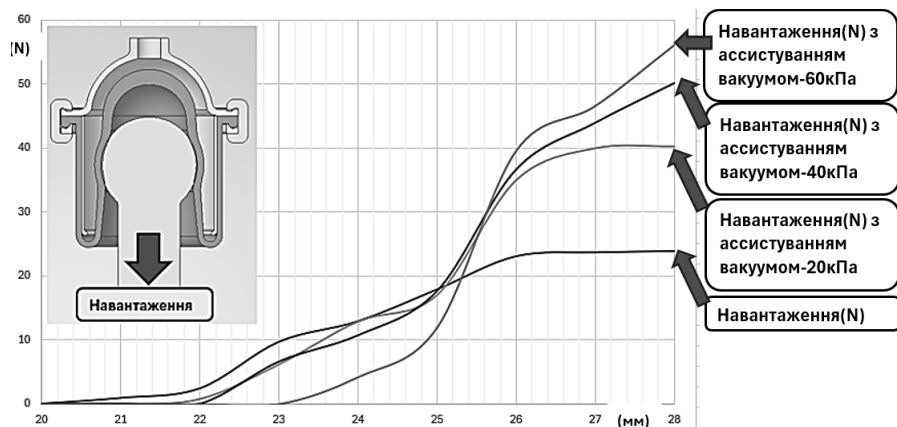


Рис. 7. Графік залежності зусилля утримання від діаметра дослідженого зразка сферичної форми (мм) та глибини асистуючого вакууму

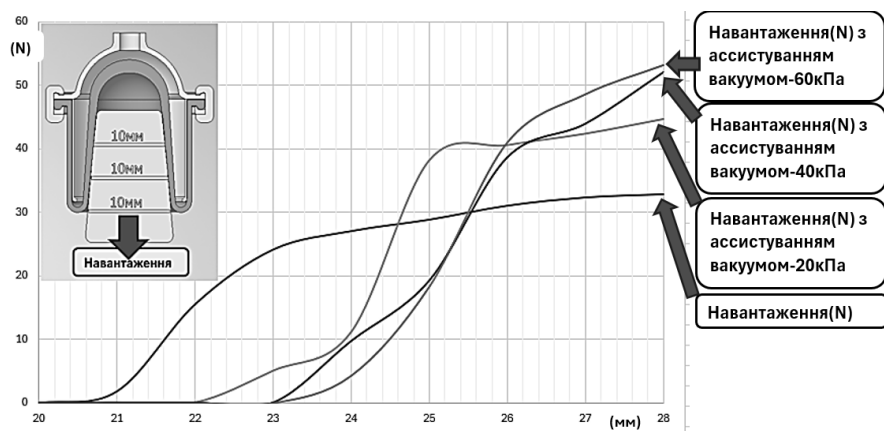


Рис. 8. Графік залежності зусилля утримання від діаметра (по середній лінії) дослідженого зразка конусної форми (мм) та глибини асистуючого вакууму

Результати тестування показали, що найбільшу силу утримання біонічний пристрій захоплення демонструє у взаємодії зі зразками циліндричної форми, діаметр яких знаходиться у межах від 92% до 116% від середнього значення внутрішнього діаметра мембрани для всіх режимів роботи.

Зведені результати експериментальних досліджень щодо надійності утримання об'єктів різноманітних форм, розмірів і матеріалів наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Надійність утримання об'єктів різноманітних форм, розмірів і матеріалів

| № п/п | Об'єкт   | Кількість спроб | Кількість вдалих спроб | Надійність утримання, % |
|-------|--|-----------------|------------------------|-------------------------|
| 1.    | Скляна куля Ø 21 мм  | 20              | 20                     | 100                     |
| 2.    | Акриловий багатокутник 21 мм                                     | 20              | 20                     | 100                     |
| 3.    | Дерев'яна куля Ø 40 мм   | 20              | 15                     | 75                      |
| 4.    | Прямокутна картонна упаковка 40 мм×20 мм×20 мм, торцева поверхня | 20              | 20                     | 100                     |
| 5.    | Пластиковий корпус прямокутний 50 мм×30 мм×25 мм                 | 20              | 17                     | 85                      |
| 6.    | Флакон зі сферичною пластиковою кришкою Ø 25 мм                  | 20              | 20                     | 100                     |
| 7.    | Великий флакон із циліндричною пластиковою кришкою Ø 23 мм       | 20              | 16                     | 80                      |
| 8.    | Флакон з металевою кришкою Ø 22 мм                               | 20              | 20                     | 100                     |
| 9.    | Акрилова іграшка складної форми                                  | 20              | 19                     | 95                      |
| 10.   | Конус паперовий 35°  | 20              | 15                     | 75                      |
| 11.   | Конус паперовий 50°  | 20              | 20                     | 100                     |
| 12.   | Конус паперовий 65°  | 20              | 20                     | 100                     |
| 13.   | Конус паперовий 80°  | 20              | 18                     | 90                      |
| 14.   | Конус паперовий 90°  | 20              | 16                     | 80                      |
| 15.   | Шестигранна піраміда паперова 35°                                | 20              | 15                     | 75                      |
| 16.   | Шестигранна піраміда паперова 50°                                | 20              | 19                     | 95                      |
| 17.   | Шестигранна піраміда паперова 65°                                | 20              | 20                     | 100                     |
| 18.   | Шестигранна піраміда паперова 80°                                | 20              | 17                     | 85                      |
| 19.   | Шестигранна піраміда паперова 90°                                | 20              | 12                     | 60                      |

У взаємодії з об'єктами складної форми (табл. 1) найкращі результати біонічний пристрій захоплення демонструє з об'єктами, які частково були занурені всередину робочої порожнини, включаючи об'єкти значно більшого розміру за робочу камеру пристрою, зокрема експериментально встановлено, що у взаємодії зі зразками «конус» і «піраміда» найкращі результати отримані для зразків з кутом при вершині, що полягає у межах від  $50^\circ$  до  $80^\circ$  для обох зразків.

Матеріал об'єкта захоплення суттєво впливає на якість його утримання. На початкових етапах досліджень встановлено, що взаємодія запропонованого біонічного пристрою захоплення зі скляними, полімерними та пластиковими поверхнями забезпечує високий рівень надійності утримання. Крім того, відмічено, що геометрія та жорсткість мембрани, початковий і кінцевий тиск можуть впливати на ефективність захоплення. Пристрій може захоплювати об'єкти, значно більші за габарити самого пристрою, а його ефективність залежить від таких факторів, як форма та розмір цілі, механічні властивості поверхні й тиск повітря. Це ускладнює виведення універсального виразу для максимальної ваги об'єкта довільної форми, що можуть бути захоплені пристроєм. Наприклад: спрощена модель для осесиметричних об'єктів, максимальна сила утримання яких може бути оцінена, як

$$F_{max} = (2\pi \int_0^H (f(z) dz * \mu + F_e) P_v),$$

де  $H$  — висота сегмента мембрани, що контактує з поверхнею об'єкта;  $F_e$  — сила обтискання;  $\mu$  — коефіцієнт тертя між поверхнею об'єкта та мембраною;  $P_v$  — тиск у порожнині пристрою.

Вплив ребер жорсткості: збільшують стійкість мембрани, їх можна врахувати через ефективну жорсткість:  $Deff = D + krib \cdot n$ , де  $krib$  — жорсткість одного ребра,  $n$  — кількість ребер. Загальне рівняння для деформації мембрани:

$$D\nabla^4 w(z) = P(z) - kw(z),$$

де  $D$  — жорсткість мембрани;  $w(z)$  — прогин мембрани;  $P(z)$  — розподілений тиск;  $k$  — коефіцієнт пружної основи (залежить від ребер жорсткості).

Динаміка процесу виражається рівнянням, що показує зміну тиску в часі  $P_v(t)$ :

$$\frac{dP_v}{dt} = \frac{Q}{V} - \alpha \frac{P_v - P_{ext}}{\tau},$$

де  $Q$  — потік повітря;  $V$  — об'єм порожнини;  $\alpha$  — коефіцієнт витоку;  $\tau$  — характерний час процесу.

**Висновки.** Результати дослідження показали, що запропонована конструкція біонічного пристрою захоплення забезпечує надійне захоплення й утримання об'єктів різних форм і матеріалів їх поверхонь завдяки адаптивним властивостям еластичної мембрани, рівномірного розподілу навантаження на стінки об'єкта. Встановлено, що раціональними параметрами пристрою захоплення є жорсткість мембрани в межах 15 HSA та кут нахилу стінок робочої камери, що становить близько  $4^\circ$ , раціональний діапазон розрідження при асистуванні вакуумом полягає у межах від  $-15$  до  $-25$  kPa. Середній коефіцієнт надійності утримання складає 92,6% для всього діапазону протестованих зразків. Розміри об'єкта захоплення або переріз частини його поверхні, що взаємодіє з біонічним пристроєм захоплення, повинні бути у межах від 92% до 116% середнього діаметра внутрішньої поверхні мембрани. Запропонована технологія ефективна для роботи з пакованими харчовими продуктами малої маси, зокрема пластиковими контейнерами, картонними упаковками, пляшками. Пристрій демонструє переваги у випадках, де важливі обережність захоплення, відсутність деформації упаковки та необхідність обслуговування широкого спектра форм без переналаштування. Водночас потенційним обмеженням конструкції є складність

забезпечення високоточного позиціонування захоплених об'єктів під час подальших операцій, зокрема при укладанні в транспортну тару. Для вирішення цього завдання може бути застосовано додаткове інтегрування з напрямними елементами, сенсорними системами або візуальним контролем положення об'єкта.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Sui, D. et al. (2020). A Bioinspired Soft Swallowing Gripper for Universal Adaptable Grasping. *Soft Robotics*. URL: <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0106> (date of access: 04.12.2024).
2. Root, S. E. et al. (2021). Bio-inspired design of soft mechanisms using a toroidal hydrostat. *Cell Reports Physical Science*, 100572. URL: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100572> (date of access: 04.12.2024).
3. Chen, F. J. et al. (2014). Soft Actuator Mimicking Human Esophageal Peristalsis for a Swallowing Robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(4), 1300—1308. URL: <https://doi.org/10.1109/tmech.2013.2280119> (date of access: 04.12.2024).
4. Hawkes, E. W. et al. (2017). A soft robot that navigates its environment through growth. *Science Robotics*, 2(8), eaan3028. URL: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aan3028> (date of access: 04.12.2024).
5. Gao, G. et al. (2021). A Pneumatically Driven, Disposable, Soft Robotic Gripper Equipped with Multi-Stage, Retractable, Telescopic Fingers. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 3(3), 573—582. URL: <https://doi.org/10.1109/tmrb.2021.3097143>.
6. Gerez, L., Chang, C.-M., Liarokapis, M. (2020). A Hybrid, Encompassing, Three-Fingered Robotic Gripper Combining Pneumatic Telescopic Mechanisms and Rigid Claws. *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 4–6 November.
7. Ockelmann, K. W., Vahl, O. (1970). On the biology of the polychaete *Glycera alba*, especially its burrowing and feeding. *Ophelia*, 8(1), 275—294. URL: <https://doi.org/10.1080/00785326.1970.10429564>.
8. Orekhov, V., Yim, M., Hong, D. (2010). Mechanics of a Fluid Filled Everting Toroidal Robot for Propulsion and Going Through a Hole. *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Montreal, Quebec, Canada, 15—18 August. URL: <https://doi.org/10.1115/detc2010-29053>.
9. Li, H. et al. (2020). A Bioinspired Soft Swallowing Robot Based on Compliant Guiding Structure. *Soft Robotics*, 7(4), 491—499. URL: <https://doi.org/10.1089/soro.2018.0154>.
10. Zang, H. et al. (2020). Bionic torus as a self-adaptive soft grasper in robots. *Applied Physics Letters*, 116(2), 023701. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5128474>.
11. Zhu, Z. et al. (2023). "Bobbitt Worm" — Inspired Soft Adaptive Grasper with Self-Generated Triboelectric Force Sensor. *Advanced Sensor Research*. URL: <https://doi.org/10.1002/adsr.202300154>.
12. Nguyen, V. P. et al. (2023). Bioinspiration and Biomimetic Art in Robotic Grippers. *Micromachines*, 14(9), 1772. URL: <https://doi.org/10.3390/mi14091772>.
13. Perez, N. G. B., Coad, M. M. (2022). Self-Propelled Soft Everting Toroidal Robot for Navigation and Climbing in Confined Spaces. *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Kyoto, Japan, 23—27 October. URL: <https://doi.org/10.1109/iros47612.2022.9981175>.
14. Sui, D. et al. (2020). A Bioinspired Soft Swallowing Gripper for Universal Adaptable Grasping. *Soft Robotics*. URL: <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0106>.
15. Wang, D. et al. (2021). A Pneumatic Novel Combined Soft Robotic Gripper with High Load Capacity and Large Grasping Range. *Actuators*, 11(1), 3. URL: <https://doi.org/10.3390/act11010003>.

УДК 664.346.028.2

## SUBSTANTIATION OF THE DOSING MODULE PARAMETERS WITH PISTON INJECTION FOR VISCOUS FOOD PRODUCTS

**V. Musiichuk, O. Gavva, O. Chepeliuk, O. Chepeliuk***National University of Food Technologies***Key words:**

dosing,  
dosing module,  
viscous product,  
productivity,  
piston,  
modeling

**Article history:**

Received 02.04.2025

Received in revised form  
15.04.2025

Accepted 22.04.2025

**Corresponding author:**

gavvaoleksandr@gmail.com

**ABSTRACT**

One of the operations in the technological scheme for the portioned food products production is their dosing. The problem of accurate dosing in the food industry is one of the key ones, determining its efficiency, material consumption and compliance with regulatory requirements. The manufacturing lines productivity also significantly depends on the speed of packaging operations in general and dosing in particular. The entire range of food products includes viscous products, the precise dosing of which is an important issue for the confectionery, canning, dairy processing and other industries.

The object of research is a semi-automatic volumetric dosing module of piston type with crane valves and pneumatic drive.

During the physical experiment, the effect of pressure and the configuration of the outlets on the product dose delivery by the piston dosing module was determined. Six series of experiments were conducted with different nozzles, the experiment in each series was repeated three times.

Dosing viscous products with a piston dosing module provides sufficient accuracy and performance. For uniform filling over the entire container area, it is advisable to direct the product through several channels, but this leads to an increase in hydraulic resistance. The most efficient dosing is achieved with the four-hole nozzle with a diameter of 8 mm for larger volumes and the three-hole nozzle with a diameter of 3.6 mm for smaller volumes.

The simulation of the process of dosing viscous food products in the SolidWorks Flow Simulation software package was performed for all six nozzle options under consideration and showed similar results to the physical experiments. The parameter that was compared was the product flow rate, m/s. The average product velocity of 1.68 m/s corresponds to the production data within an error of 5.2%.

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-17

## ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДОЗУВАЛЬНОГО МОДУЛЯ З ПОРШНЕВИМ НАГНІТАННЯМ ДЛЯ В'ЯЗКИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

**В. М. Мусійчук, аспірант**

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

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

**О. О. Чепелюк, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-5417-9398**

*Національний університет харчових технологій*

*Для дослідження процесу дозування в'язких харчових продуктів використані методи фізичного (виробничий експеримент) і обчислювального моделювання в пакеті Solid Works, додаток Flow Simulation. Дозування в'язкої продукції поршневым дозувальним модулем забезпечує достатню точність і продуктивність. Для рівномірного наповнення по всій площі тари доцільно спрямовувати продукт кількома каналами, однак це призводить до збільшення гравітаційного опору. Найбільш ефективно дозування відбувається з насадкою з чотирма отворами діаметром 8 мм для дозування більших об'ємів продукції та насадкою з трьома отворами діаметрами 3,6 мм для менших об'ємів.*

**Ключові слова:** дозування, дозувальний модуль, в'язкий продукт, продуктивність, поршень, моделювання.

**Вступ.** Однією з операцій у технологічній схемі виробництва порційних харчових продуктів є їх дозування (за вагою, об'ємом, часом). Вагове дозування здійснюється за допомогою ваговимірювальних пристроїв (використовується переважно для сипкої продукції). Дозування рідин і в'язких продуктів здійснюється за об'ємом. При дозуванні за часом через отвір постійного перерізу при сталому тиску за одиницю часу проходить однакова кількість рідини.

Проблема точного дозування на підприємствах харчової промисловості є однією з ключових, визначаючи його ефективність, витрати матеріалів і дотримання вимог нормативних документів. Продуктивність технологічних ліній також значно залежить від швидкості виконання операцій пакування взагалі і дозування зокрема.

З усього асортименту харчових продуктів значну частину складають в'язкі продукти, точне дозування яких є актуальним питанням для кондитерської, консервної, молокопереробної та інших галузей [1, 2].

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Під час дозування здійснюється відокремлення визначеної дози продукту від загальної маси та переміщення її у певному напрямку. У процесі такого переміщення продукт (сировина, напівфабрикат) розтягується, стискається, зсувається, тобто перебуває в умовах складного напруженого стану, тому раціональний підбір режимів дозування і геометричних параметрів елементів обладнання має суттєвий вплив на фасування продукту.

Виробники обладнання з поршневым дозуванням підтверджують доцільність вибору дозувальних модулів саме такого типу для однорідних помірно в'язких продуктів. Завдяки поршню, що робить зворотно-поступальний рух, продукт спочатку забивається в заздалегідь встановленому об'ємі і потім видається в тару. Складнощі насамперед можуть виникати через особливості текстури і склад продуктів, особливо високов'язких та з дрібними включеннями, для яких складно забезпечити рівномірне

і точне наповнення дозувальної камери, а за наявності дрібних включень у продукті — ще й довговічність елементів робочих органів. Є проблеми і зі стабільністю доз, спричинених пульсацією потоку і зміною в'язкості продукту [3, 4].

Дозувальні модулі з примусовим переміщенням поршня за допомогою стисненого повітря, хоча і мають меншу вартість, порівняно з аналогічним обладнанням з механічним приводом в рух, але в процесі експлуатації вимагають значних витрат на обслуговування, є енергоємними і потребують надійної мережі стисненого повітря. Однак за умови використання поршневого нагнітача для дозування рекомендованих видів матеріалів таке обладнання здатне забезпечити необхідну точність дозування з похибкою до 1%.

Розроблення ефективного технологічного обладнання для дозування і пакування в'язких харчових продуктів має проводитись з урахуванням фізико-хімічних і реологічних властивостей зазначених продуктів і їх впливу на робочі органи обладнання [5].

На точність дозування поршневими дозаторами, серед іншого, впливають первинні похибки виготовлення виконавчих механізмів і робочих органів дозувальних пристроїв — кривошипно-шатунного механізму та запірної арматури [8]. Інша вагома причина — наявність повітряних включень, які зменшують точність дозування при об'ємному принципі відмірювання дози. Використання ерліфтного об'ємного способу формування дози та електропневматичної системи автоматичного керування в обладнанні функціонально-модульної будови [9] є одним з варіантів вирішення цієї проблеми.

Дозувальні пристрої напірного витікання характеризуються наявністю розділювального елемента, встановленого у мірній місткості (поршень, еластична мембрана, сильфон тощо), що передає тиск рідині. Об'єм дози рідини визначається величиною переміщення розділювального елемента. Тому в тих випадках, коли розділювальний елемент потребує додаткових зусиль для його деформації (сильфон, мембрана) чи для переміщення (ущільнений чи важкий поршень), перепад тиску  $\Delta P$  дозатора, необхідний для забезпечення витрати продукту, потрібно збільшити на величину напору  $\Delta P_{\text{доп}}$ , необхідного для подолання сил протидії [10].

Складність розроблення обладнання для дозування полягає в тому, що потрібно одночасно вирішувати цілий комплекс питань, до яких входить забезпечення точності дозування продукту, достатньо високої продуктивності обладнання, значного варіювання величини дози і асортименту продукції різної в'язкості при мінімальних витратах часу на переналагодження.

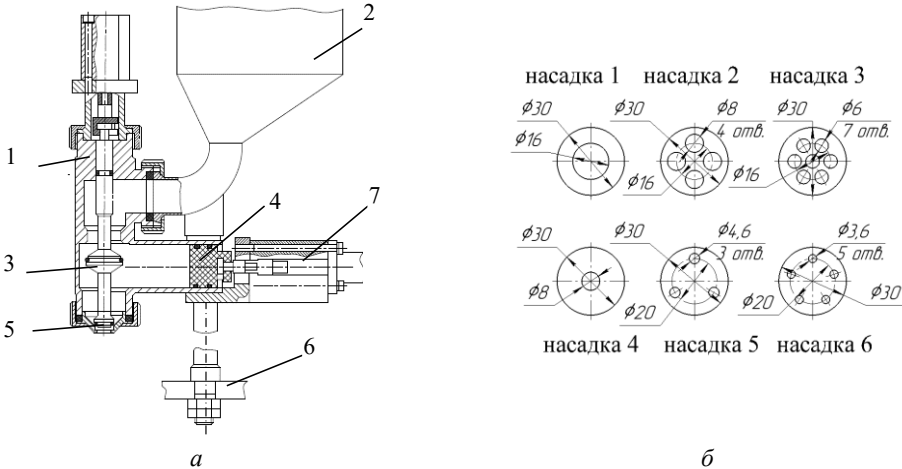
Врахування зазначених питань під час створення методик розрахунку і проектування окремих вузлів і механізмів обладнання для дозування в'язких продуктів можливе тільки на основі повного дослідження операцій переміщення продуктів у процесі дозування.

**Мета досліджень:** виявити можливі напрямки удосконалення конструкції елементів обладнання для поршневого дозування, визначити раціональні режими роботи для дозування в'язких харчових продуктів при забезпеченні заданої продуктивності дозатора.

**Матеріали і методи.** Об'єктом досліджень є напівавтоматичний об'ємний дозувальний модуль поршневого типу з крановою запірною арматурою та пневматичним приводом на робочому органі та запірній арматурі (без попереднього підігрівання продукту). Дозатор призначений для дозування (поділу на дози) рідких щільних і в'язких продуктів (молочні продукти, джеми, кетчупи, соуси тощо).

Продукт завантажується в приймальний бункер об'ємного дозатора і для видачі дози оператору необхідно ввімкнути дозатор в роботу. Також є можливість працювати на дозаторі в автоматичному режимі, коли оператор підставляє лише тару.

Дозувальний модуль (рис. 1, а) може використовуватися для фасування різного роду в'язких харчових продуктів, видавати порцію продукту в тару або упаковку. Наявний накопичувальний бункер дає змогу працювати з дуже густими продуктами, видавати дози точно і швидко.



**Рис. 1.** Пневматичний поршневий дозувальний модуль: а — схема дозувального модуля; б — схема насадки: 1 — корпус; 2 — бункер; 3 — клапан; 4 — поршень; 5 — насадка; 6 — кріплення; 7 — пневмоциліндр

При дозуванні в'язких густих продуктів, зокрема соусів, молокопродуктів, є сенс розглянути можливість дозування продукції в тару через кілька отворів. Це надасть можливість заповнювати одразу більшу площу тари, що сприяє більш рівномірному заповненню і зменшує ймовірність піноутворення. На основі аналізу особливостей дозування в'язких продуктів було розроблено серію насадок, які можуть мати широкі застосування і задовольнити розв'язок поставленої задачі (рис. 1, б). Процес дозування майонезу жирністю 20% досліджувався методом фізичного моделювання (виробничий експеримент) і шляхом проведення обчислювальних експериментів в пакеті Solid Works, додаток Flow Simulation.

Під час проведення фізичного експерименту визначався вплив тиску і конфігурації випускних отворів на видачу дози продукту. Проведені шість серій дослідів (насадки 1—6), експеримент в кожній серії повторювався тричі.

Важливим параметром є час, протягом якого поршень переміститься з одного крайнього положення в інше, а також вплив різних факторів і конструктивних параметрів на процес дозування. Для фіксування переміщення поршня пневмоциліндра застосовувалася відеокамера, розташована навпроти штока пневмоциліндра. Під штоком було прикріплено таровану паперову смугу та встановлено секундомір.

Принцип фіксування переміщення штока пневмоциліндра такий: під час руху поршня відеокамера фіксує переміщення штока. За рахунок того, що шток жорстко зв'язаний з пневмоциліндром, можемо вважати, що переміщення штока і поршня

пневмоциліндра однакові. Під час оброблення запису заносимо в таблицю дані переміщення штока в часі. Час визначено за допомогою секундоміра, встановленого в зоні знімання.

Величину виданої дози, за відомого переміщення поршня, визначаємо:

$$V = s \cdot \frac{\pi \cdot d_o^2}{4}, \quad (1)$$

де  $s$  — переміщення поршня пневмоциліндра;  $d_o$  — діаметр робочої порожнини дозатора.

Результати виробничих експериментів оброблені з використанням табличного процесора Microsoft Excel.

Експерименти, проведені у виробничих умовах, дають найбільш точні результати серед інших можливих методів досліджень, адже враховують усі особливості і випадкові явища реального процесу. Однак широке їх використання обмежено, зокрема й через суттєві матеріальні витрати. Тому доцільно створювати імітаційні моделі процесів, перевіряючи їх адекватність шляхом зіставлення з даними фізичних експериментів. Обчислювальний експеримент проведений в пакеті Solid Works, додаток Flow Simulation. Розглянуто дозування поршневым дозатором майонезу, жирність якого 20%, а течія описується рівнянням Гершеля-Балклі:

$$\tau = 90 + 30 \cdot \dot{\gamma}^{0,25}.$$

**Результати досліджень.** Дозувальні пристрої напірного витікання, як правило, працюють при змінному перепаді тиску на виконавчому пристрої і слугують стабілізуючою ланкою під час забезпечення заданого середнього значення витрат.

Найбільша продуктивність дозувального пристрою визначається максимальною частотою видачі окремих доз рідини при мінімальному перепаді тиску на дозувальному пристрої.

Частота коливань потоку визначається властивостями рідини, що дозується, такими як динамічний коефіцієнт в'язкості  $\mu$  і об'ємна маса  $\rho$ , а також параметрами дозатора і магістралі, яка підводить, такими як перепад тиску  $\Delta P$ , довжина магістралі, що підводить,  $l$  та її діаметр  $d$ , шорсткість труб  $\varepsilon$ , місцеві опори  $\xi$  і конструктивний фактор  $k$ . В загальному випадку:

$$f = \psi(\mu, \rho, \Delta P, l, d, \varepsilon, \xi, k).$$

Промислові дослідження підтверджують, найбільші зміни у процесі роботи спричиняє перепад тиску  $\Delta P$ ; зміна  $\mu$  і  $\rho$  впливає на 1—2 порядки менше, зміни значення  $\xi$  починають істотно позначатися лише під час зміни режиму руху рідини.

Перші три серії дослідів проведені для насадок 1, 2, 3 (рис. 1, б). Їх об'єднує сумарна площа поперечного перерізу отворів, яка дорівнює  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  (насадка 1 — один отвір діаметром 16 мм, насадка 2 — чотири отвори діаметром 8 мм, насадка 3 — сім отворів діаметром 6 мм кожний).

На основі величини переміщення поршня за формулою (1) визначено видану дозу  $V$  за 1 с, отримані дані зведені в табл. 1 та наведені на рис. 2.

Збільшення кількості отворів в дозувальних насадках при однаковій загальній площі поперечного перерізу каналів дає змогу забезпечити більшу рівномірність заповнення тари продуктом, але має і зворотну сторону, пов'язану зі збільшенням опору для проходження продукту.

Таблиця 1. Результати серії дослідів для насадок 1—3

| Тиск у робочій камері пневмоциліндра, МПа | Насадка 1                              |   | Насадка 2                              |   | Насадка 3                              |   |
|---|--|---|--|---|--|---|
|   | переміщення поршня, $s \cdot 10^3$ , м | видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> | переміщення поршня, $s \cdot 10^3$ , м | видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> | переміщення поршня, $s \cdot 10^3$ , м | видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> |
| 0,15                                      | 117,37                                 | 316   | 117,00                                 | 315   | 114,03                                 | 307   |
| 0,20                                      | 120,34                                 | 324   | 121,09                                 | 326   | 118,86                                 | 320   |
| 0,30                                      | 128,52                                 | 346   | 127,03                                 | 342   | 124,43                                 | 335   |
| 0,40                                      | 134,09                                 | 361   | 131,49                                 | 354   | 126,29                                 | 340   |

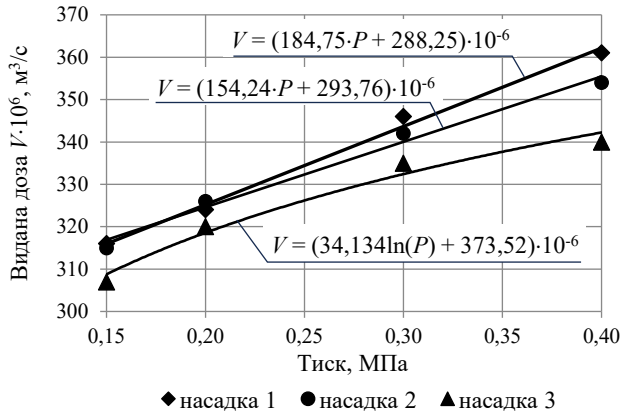


Рис. 2. Залежність між величиною тиску в робочій порожнині пневмоциліндра та продуктивністю дозатора для насадок 1—3

Наведені на рис. 2 залежності між величиною тиску в робочій порожнині пневмоциліндра та продуктивністю дозатора мають для насадок 1 і 2 лінійний характер. Але при збільшенні загального периметра отворів (насадка 3) залежність набуває логарифмічної форми, що підтверджує недоцільність суттєвого збільшення кількості отворів у насадці. При цьому необхідно підвищувати тиск повітря в пневмоциліндрі для забезпечення заданої продуктивності, що потребує додаткових енергетичних витрат.

Видана доза при дозуванні в'язких продуктів залежить від загального периметра отворів насадок, які використовуються (рис. 3).

Це обумовлено збільшенням поверхні контакту між шаром рухомого продукту і поверхнею каналів насадки, причому при різних тисках в порожнині робочого циліндра залежності є подібними — суттєве зменшення витрати спостерігається при значенні периметра 0,10—0,11 м. Відповідно, можна зробити висновок, що перевищувати ці значення для насадок з площею поперечного перерізу отворів 0,0002 м<sup>2</sup> недоцільно. Значення периметра 0,10—0,11 м відповідає насадці з отворами діаметром 8 мм в кількості 4 шт.

Наступні серії дослідів проведені для насадок 4, 5, 6 (рис. 1, б). Для кожної з них сумарна площа поперечного перерізу отворів дорівнює  $5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup> (насадка 4 — один отвір діаметром 8 мм, насадка 5 — три отвори діаметром 4,6 мм, насадка 6 — п'ять отворів діаметром 3,6 мм кожний). Їх результати узагальнені в табл. 2 і наведені на рис. 4.

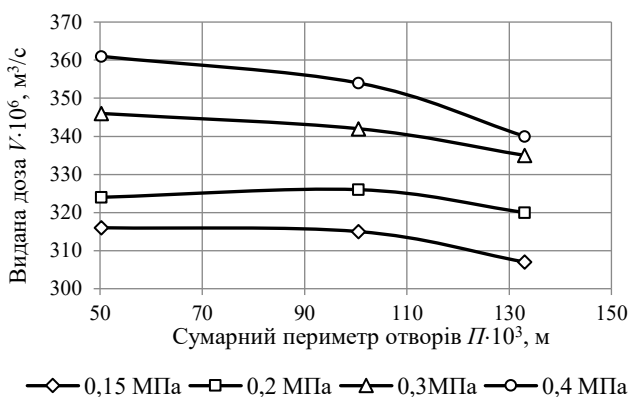


Рис. 3. Залежність витрати продукту від загального периметра отворів при різних тисках в робочій порожнині пневмоциліндра для насадок 1, 2, 3

Таблиця 2. Результати серії дослідів для насадок 4—6

| Тиск у робочій камері пневмоциліндра, МПа | Насадка 4                                     |   | Насадка 5                                     |   | Насадка 6                                     |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
|   | переміщення поршня, $s \cdot 10^3, \text{ м}$ | видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6, \text{ м}^3$ | переміщення поршня, $s \cdot 10^3, \text{ м}$ | видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6, \text{ м}^3$ | переміщення поршня, $s \cdot 10^3, \text{ м}$ | видана доза за 1 с, $V \cdot 10^6, \text{ м}^3$ |
| 0,15                                      | 109,94  | 296   | 105,12  | 283   | 98,06   | 264   |
| 0,20                                      | 113,66  | 306   | 109,20  | 294   | 101,77  | 274   |
| 0,30                                      | 119,23  | 321   | 113,29  | 305   | 106,23  | 286   |
| 0,40                                      | 124,80  | 336   | 118,86  | 320   | 116,63  | 314   |

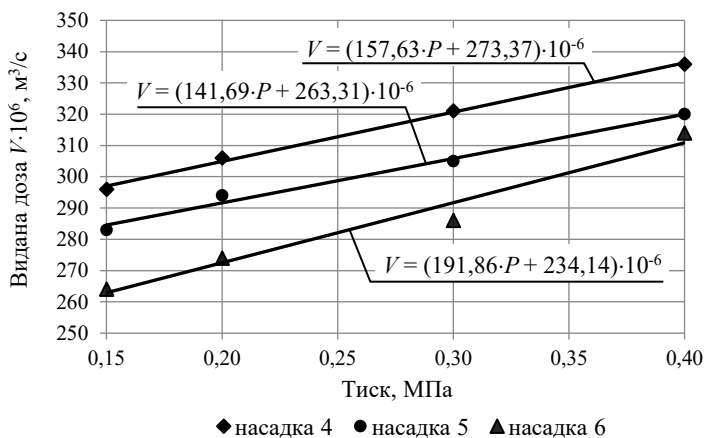
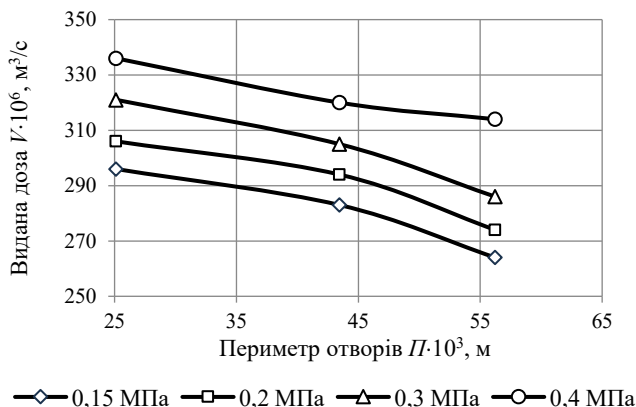


Рис. 4. Залежність між величиною тиску в робочій порожнині пневмоциліндра та продуктивністю дозатора для насадок 4, 5, 6

Для насадок 4 і 5, аналогічно насадкам 1—3, збільшення кількості отворів призводить до зменшення кута нахилу залежностей між величиною тиску в робочій порожнині пневмоциліндра та продуктивністю дозатора. Але для насадки 6 помітний інший тренд, що може бути пояснено можливою неточністю вимірювань для цієї

насадки при тиску 0,4 МПа, і, відповідно, потребує додаткових досліджень для цих значень.



**Рис. 5.** Залежність витрати продукту від загального периметра отворів при різних тисках у робочій порожнині пневмоциліндра для насадок 4–6

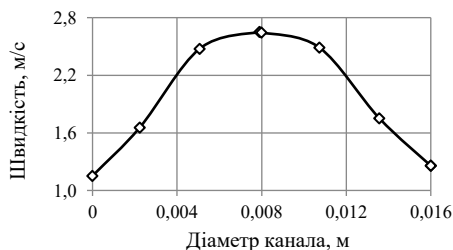
При використанні насадок з площею поперечного перерізу отворів  $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  залежність між витратою продукту і загальним периметром отворів насадок має подібну закономірність — при збільшенні периметра видана доза зменшується. Особливо ця тенденція помітна при сумарному периметрі отворів орієнтовно від 45 мм, а це відповідає трьом-чотирьом отворам. Винятком є значення для тиску повітря в пневмоциліндрі 0,4 МПа, зокрема для насадки 6.

При витіканні маси через окремі отвори насадки швидкості в кожному отворі відрізняються між собою через різні значення відстані для проходження продукту. Це негативно впливало на точність при багатоканальному дозуванні, але оскільки дозування відбувається в одну тару, то важливим є сумарна маса продукту, яка проходить через усі отвори.

Імітаційне моделювання процесу дозування в'язких харчових продуктів у програмному комплексі SolidWorks Flow Simulation виконано для всіх шести розглянутих варіантів насадок і показало подібні до даних фізичних експериментів результати. Параметром, який зіставляли, була швидкість витікання продукту, м/с. На рис. 6 наведено графічні залежності зміни швидкості вздовж осі відвідного каналу (т. 0 відповідає крайній точці клапана) та в його поперечному перерізі. Усереднене значення швидкості продукту 1,68 м/с відповідає виробничим даним в межах похибки 5,2%.



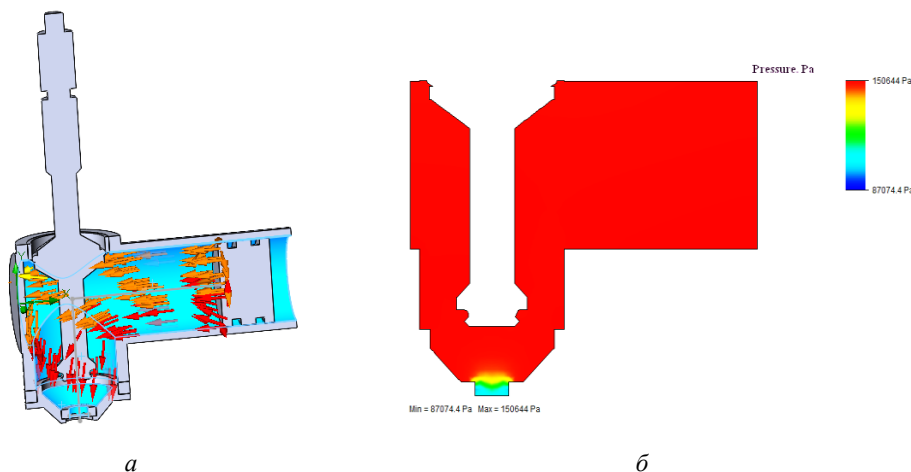
а



б

**Рис. 6.** Зміна швидкостей продукту на виході з дозатора в повздовжньому (а) і поперечному (б) перерізах

Розроблена імітаційна модель надасть можливість аналізувати дозування інших харчових продуктів та визначати вплив зміни геометрії конструкційних елементів на цей процес. Зокрема, стає можливим дослідити вплив клапанів на цей процес і відслідкувати різні режими течії всередині дозатора (рис. 7).



**Рис. 7. Імітаційне моделювання процесу дозування в'язких харчових продуктів:**  
а — поле швидкостей; б — розподіл тиску в перерізі дозувального каналу

**Висновки.** Дозування в'язкої продукції поршневым дозувальним модулем забезпечує достатню точність і продуктивність. Для рівномірного наповнення по всій площі тари доцільно спрямовувати продукт кількома каналами, однак це призводить до збільшення гідралічного опору. Для випадку одночасного наповнення кількох одиниць тари це може бути критичним, для дозування в одну тару суттєвої втрати точності не відбувається. Для забезпечення видачі заданої дози соусів з жирністю 20% та аналогічних за густиною і в'язкістю продуктів доцільно використовувати насадку з чотирма отворами діаметром 8 мм для дозування більших об'ємів продукції та насадку з трьома отворами діаметрами 3,6 мм для менших об'ємів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Гавва, О. М., Безпалько, А. П., Волчко, А. І., Кохан, О. О. (2010). *Пакувальне обладнання*: підручник. Київ: ІАЦ «Упаковка».
2. Волинець, Н. С., Федоров, С. Ф. (2012). Дослідження процесу дозування в'язких молочних продуктів з метою вдосконалення конструкції фасувального автомату М-2. *Ukrainian Food Journal*, 1(3), 54—58.
3. Гуць, В. С. (1999). Прикладна реологія та інтенсифікація процесів харчових виробництв: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Укр. держ. ун-т харч. техн.
4. Martinez-Padilla, L. (2023). Rheology of liquid foods under shear flow conditions: Recently used models. *Journal of Texture Studies*, 55. 10.1111/jtxs.12802.
5. Токарчук, С. В., Гавва, О. М., Чуприна, А. В. (2004). Модульна система проектування обладнання для пакування в'язких харчових продуктів. *Упаковка*, 4, 35—40.
6. Мусяйчук, В. М., Гавва, О. М. (2002). Обладнання для дозування в'язких продуктів. *Упаковка*, 2, 36—38.
7. Мусяйчук, В. М., Гавва, О. М. (2004). Дозування в'язких харчових продуктів дозаторами поршневого типу. *Упаковка*, 1, 20—22, 27.

8. Токарчук, С. В. (2009). Наукове обґрунтування параметрів функціональних модулів обладнання для пакування в'язких харчових продуктів у споживчу тару: автореф. дис. ... канд. техн. наук, Нац. ун-т харч. технологій.

9. Токарчук, С. В., Гавва, О. М., Кривопляс-Володіна, Л. О. (2009). Вплив точності виготовлення поршневого дозатора на точність дозування в'язких продуктів. *Упаковка*, 3, 46—49.

10. Гавва, О. М., Мусійчук, В. М. (2004). Розрахунок дозувальних пристроїв з пневматичним приводом для в'язких харчових продуктів. *Харчова промисловість*, 3, 149—151.

УДК 66.047.3

## ANALYSIS OF SPRAYING DEVICES DESIGNS FOR DRYING LIQUID FOOD PRODUCTS

**D. Bondarchuk, R. Yakobchuk***National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

spraying devices,  
drying apparatus,  
liquid food products,  
rotary disc,  
nozzle,  
ejection phenomenon

---

**Article history:**

Received 09.04.2025

Received in revised form  
22.04.2025

Accepted 25.04.2025

---

**Corresponding author:**

yakroman@ukr.net

---

**ABSTRACT**

The article presents a comprehensive analysis of atomizing device designs used in food drying equipment, particularly in spray drying systems. The feasibility of using rotary disk and nozzle-type atomizers is substantiated based on the physicochemical properties of the material to be dried, operating conditions of the dryer, and requirements for the final product. The working principles, structural features, and operational advantages of each atomizer type are described in detail.

Special attention is given to the materials used in the manufacture of atomizers. A comparative analysis of steel grades, ceramics, and polymers according to international standards is provided, evaluating their thermal resistance, wear resistance, and suitability for contact with food substances. The interdependence between atomizer design, material properties, and the quality of the final dried product is explored.

Various airflow schemes within the drying chamber — co-current, counter-current, and mixed flow — are analyzed separately. The study demonstrates how the choice of flow scheme affects the efficiency of heat and mass transfer. The integration of rotary atomizers with ejector-type devices is highlighted as a promising approach for intensifying the drying process, improving spray uniformity, and reducing energy consumption.

The results obtained can be used in the design of new drying equipment and in the modernization of existing systems. Future research directions are proposed, including experimental testing of combined atomizer-ejector designs and numerical modeling of heat and mass transfer processes within the drying chamber.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-18

---

# АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПРИСТРОЇВ РОЗПИЛЕННЯ АПАРАТІВ ДЛЯ СУШІННЯ РІДКИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Д. С. Бондарчук, ORCID ID: 0009-0006-8915-0372

Р. Л. Якобчук, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-9777-5790

Національний університет харчових технологій

*У статті проведено аналіз пристроїв розпилення, що застосовуються в сушильних апаратах розпилювального типу для різних харчових продуктів. Розглянуто конструкції основних типів пристроїв розпилення, принципи роботи, переваги та недоліки. Досліджено вплив схем подачі теплоносія на ефективність процесу сушіння та якість кінцевого продукту. Запропоновано перспективний напрям удосконалення дискових розпилювачів шляхом їх поєднання з ежекційними пристроями для підвищення ефективності масообміну та енергоефективності процесу сушіння. Зроблено висновок про ключову роль вибору розпилювального пристрою та режиму сушіння для досягнення оптимальних характеристик порошкоподібних харчових продуктів.*

**Ключові слова:** пристрої розпилення, апарат сушіння, рідкі харчові продукти, диск, форсунка, ежекційне явище.

**Постановка проблеми.** Сушіння є одним із ключових методів консервації харчових продуктів, що значно подовжує термін їх зберігання, не змінюючи при цьому харчову цінність. У промислових масштабах для цього процесу широко застосовують сушильні апарати, серед яких особливе місце займають розпилювальні апарати. Вони дають змогу отримувати порошкоподібні продукти із чітко визначеними характеристиками вологості, гранулометричного складу й органолептичними властивостями [33].

У розпилювальних сушильних апаратах відбувається процес перетворення рідких харчових продуктів (наприклад, молока, кави, фруктових соків) на сухі порошки зі збереженням їхньої поживної цінності [33]. Цей метод, відомий як розпилювальне сушіння, поширений у харчовій промисловості. Принцип роботи таких сушильних апаратів полягає в розпиленні рідини на дуже дрібні краплі, які потім швидко висушуються в потоці гарячого теплоносія (зазвичай повітря) [31]. Завдяки великій площі поверхні контакту крапель з гарячим повітрям створюються умови для інтенсивного випаровування вологи, що призводить до утворення сухих частинок продукту [31].

Центральним елементом конструкції таких апаратів є розпилювальний пристрій. Він визначає спосіб введення рідкого матеріалу в сушильну камеру і суттєво впливає на ефективність процесу випаровування вологи та якість кінцевого продукту [20]. Найбільш поширеними типами розпилювачів є дискові та форсункові, кожен з яких має свої конструктивні особливості та переважні сфери застосування. Вибір оптимального розпилювального пристрою залежить від низки факторів, таких як в'язкість продукту, бажаний розмір частинок кінцевого продукту у вигляді порошку, необхідна продуктивність сушильного апарата та інші технологічні вимоги [32].

Дискові розпилювачі працюють за рахунок відцентрової сили. Рідина подається на поверхню диска, що обертається з високою швидкістю. Під дією відцентрових сил рідина розпадається на дрібні краплі на периферії диска [3]. Ця технологія забезпечує досить рівномірний розподіл крапель і дає змогу регулювати їх розмір, змінюючи

швидкість обертання диска. Проте для стабільної роботи необхідно мінімізувати вібрацію диска та забезпечити рівномірну подачу рідини в його центральну частину [3].

Форсункові розпилювачі створюють дрібнодисперсний аерозоль за допомогою енергії стисненого повітря (пневматичні форсунки) або високого тиску самої рідини (гідролічні форсунки). Рідина під тиском проходить через малий отвір (зазвичай 1,0—1,4 мм), утворюючи факел дрібних крапель. Цей метод особливо ефективний для рідин з низькою в'язкістю, які не містять твердих частинок, оскільки вузькі канали форсунок схильні до забивання. Регулювання продуктивності форсункових розпилювачів є складним завданням, оскільки зміна швидкості потоку рідини безпосередньо впливає на розмір крапель, що утворюються [5, 16].

Окрім типу розпилювача, важливим аспектом процесу сушіння є схема організації потоку теплоносія відносно розпиленого продукту в сушильній камері. Ця схема визначає умови теплообміну та суттєво впливає на якісні характеристики кінцевого продукту [24]. Вибір між прямиоточною, протиточною чи змішаною схемами подачі теплоносія є критично важливим для забезпечення енергоефективності процесу та рівномірності сушіння продукту [29].

Аналіз пристроїв розпилення є необхідним етапом у вдосконаленні технології розпилювального сушіння, оскільки саме ці компоненти визначають ефективність диспергування рідкої сировини, рівномірність формування крапель, швидкість випаровування вологи та, відповідно, якість і однорідність готового порошкоподібного продукту. Вивчення конструктивних особливостей розпилювачів, їхнього впливу на розмір крапель, а також адаптивність до різних фізико-хімічних властивостей сировини дає змогу оптимізувати технологічні режими сушіння, підвищити енергоефективність процесу та мінімізувати втрати корисних компонентів у продукті.

**Мета досліджень:** аналіз конструктивних особливостей і принципів роботи пристроїв розпилення рідких харчових продуктів, що використовуються в сушильних апаратах розпилювального типу, тенденції розвитку, а також оцінювання впливу режиму подачі теплоносія на якість процесу сушіння.

**Матеріали і методи.** Дослідження базується на аналізі науково-технічної літератури, присвяченої сушінню рідких харчових продуктів методом розпилювання, конструктивним особливостям розпилювальних пристроїв та їх застосуванню. Узагальнення і виділення основних напрямів розвитку розпилювального методу сушіння.

**Результати дослідження.** Розпилювальні сушильні апарати є ключовим обладнанням у харчовій промисловості, забезпечуючи ефективне перетворення рідких продуктів у стабільну порошкоподібну форму. Конструкція цих апаратів безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту [29]. Основними компонентами розпилювального сушильного апарату є:

- камера сушіння — сновний об'єм, де відбувається процес розпилення рідини та її контакт з гарячим теплоносієм;
- пристрій розпилення — механізм (дисковий або форсунковий), що перетворює рідину на дрібні краплі;
- система подачі теплоносія — забезпечує контрольоване надходження гарячого повітря (або іншого теплоносія) в сушильну камеру;
- система збору продукту — включає циклонні сепаратори, фільтри або інші пристрої для відокремлення сухого порошкоподібного продукту від потоку відпрацьованого теплоносія.

Існують різні конфігурації розпилювальних сушильних апаратів [29]:

- одноступеневий розпилювальний сушильний апарат. Рідина розпилюється у верхній частині вертикальної камери і контактує з гарячим повітрям, що рухається переважно зверху вниз (прямотік). Сухий продукт збирається в нижній частині камери, а відпрацьоване повітря виводиться через верхні патрубки;

- тристадійний розпилювальний сушильний апарат. Процес сушіння відбувається у три етапи: первинне розпилення та сушіння в основній камері; додаткове досушування у вбудованому шарі (наприклад, киплячому); фінальне сушіння та/або охолодження в окремому апараті (наприклад, інстантайзері). Така схема дає змогу досягти рівномірнішого видалення вологи та покращити якість кінцевого продукту.

Ефективність процесу сушіння значною мірою визначається схемами організації руху теплоносія та подачі продукту в сушильну камеру [29]. Основними схемами є:

- прямотечійна схема. Гарячий теплоносій і розпилений продукт рухаються в одному напрямку, зазвичай зверху вниз. Розпилення відбувається у верхній частині камери, і краплі рухаються вниз разом із потоком гарячого повітря. Ця схема забезпечує швидке початкове випаровування вологи, знижує ризик термічного пошкодження продукту (оскільки краплі контактують з найгарячішим повітрям на початку, коли вони ще містять багато вологи) і сприяє збереженню його якості;

- протитечійна схема. Гарячий теплоносій подається знизу вгору, тоді як розпилений продукт рухається зверху вниз. Це створює зустрічний рух потоків, що покращує ефективність теплопередачі на кінцевих стадіях сушіння та сприяє досягненню нижчої кінцевої вологості продукту;

- змішана схема. Поєднує елементи прямотечійної та протитечійної схем. Наприклад, гаряче повітря може подаватися тангенційно, створюючи закручений потік у камері. Це сприяє більш рівномірному розподілу температури та інтенсифікує теплообмін у сушильній камері.

Вибір схеми подачі теплоносія та продукту залежить від типу використовуваного розпилювального пристрою [30].

Для дискових розпилювачів, які розпилюють рідину переважно в горизонтальній площині на високих швидкостях, ефективними можуть бути як прямотечійна, так і протитечійна схеми. Прямотечійна схема (повітря зверху вниз) дає змогу краплям рухатися разом із потоком теплоносія, мінімізуючи час їх перебування в зоні високих температур і знижуючи ризик перегріву.

Для форсункових розпилювачів, які створюють спрямований факел крапель під високим тиском, частіше застосовують протитечійну схему (повітря знизу вгору). Це забезпечує ефективну зустріч крапель з потоком теплоносія, підвищуючи інтенсивність теплопередачі та сприяючи більш рівномірному висушуванню.

Вибір між дисковими та форсунковими розпилювачами залежить від властивостей продукту та вимог до процесу сушіння:

- дискові розпилювачі, зазвичай, забезпечують кращу однорідність розміру крапель і добре підходять для роботи з в'язкими рідинами;

- форсункові розпилювачі ефективні для рідин з низькою в'язкістю, але потребують ретельної фільтрації продукту для запобігання забиванню сопел.

Для досягнення оптимального результату сушіння необхідно враховувати взаємозв'язок між конструкцією сушильної камери, параметрами повітряного потоку та обраним типом розпилювача, адаптуючи їх один до одного [22, 31, 32].

Інтенсифікація процесів сушіння рідких продуктів спрямована на прискорення тепло- та масообмінних процесів між краплями рідини та теплоносієм. У промисловій практиці для цього використовуються декілька основних підходів:

- оптимізація розпилення. Зменшення середнього розміру крапель розпиленого продукту та підвищення однорідності їх розміру (монодисперсності);
- підвищення відносної швидкості руху фаз. Забезпечення інтенсивнішого контакту частинок продукту з теплоносієм шляхом збільшення їхньої відносної швидкості;
- збільшення потенціалу сушіння. Застосування вищих температур теплоносія для прискорення випаровування вологи;
- попереднє підігрівання рідини. Зменшення енерговитрат на випаровування вологи шляхом попереднього нагрівання продукту перед розпиленням [9, 11].

Розпилювальні пристрої, що використовуються в сучасних сушильних апаратах, здатні забезпечити досить тонке розпилення продукту, з середнім розміром сухих частинок до 50 мкм [10]. Однак надто дрібні частинки ускладнюють їх уловлювання в системах аспірації (наприклад, циклонах) з потоку відпрацьованого теплоносія. Втім удосконалення конструкцій циклонів та інших систем пиловловлення дає змогу ефективно видаляти навіть дрібнодисперсні частинки [17]. Таким чином, досягнення вищої монодисперсності крапель під час розпилення є важливим напрямом інтенсифікації сушіння. Це не лише покращує економічні показники процесу, але й підвищує ефективність роботи допоміжного обладнання.

Аспекти інтенсифікації сушіння шляхом збільшення відносної швидкості руху частинок і теплоносія детально розглянуті в низці досліджень [20, 22, 31—33]. Цей підхід демонструє найкращі результати на початкових етапах сушіння (період сталої швидкості), однак його ефективність знижується на завершальному етапі зневоднення [13].

Ще одним перспективним напрямком інтенсифікації сушіння рідких продуктів є підвищення температури теплоносія [2]. Збільшення температури гарячого повітря на вході в сушильний апарат сприяє зростанню продуктивності процесу. Проте це також призводить до підвищення температури відпрацьованого теплоносія, що може негативно вплинути на якість термочутливих харчових продуктів.

Зазначені методи інтенсифікації найбільш ефективні на етапі сталої швидкості сушіння, коли відбувається інтенсивне випаровування вільної вологи з поверхні крапель. У розпилювальних сушильних апаратах цей етап переважно локалізований у зоні факела розпилення, де видаляється основна маса вологи [3, 5, 22, 33].

Подальший розвиток технологій сушіння рідких харчових продуктів передбачає комплексне вдосконалення обладнання, зокрема: розробку удосконалених конструкцій сушарок; створення ефективних систем розподілу теплоносія; розробку надійних механізмів для видалення сухого продукту та відпрацьованого теплоносія; а також покращення конструкцій самих пристроїв розпилення.

Сучасні дослідження в галузі сушіння харчових продуктів спрямовані на вдосконалення конструкцій розпилювачів та оптимізацію всього процесу [20, 32]. У працях [9, 11, 30] розглядаються новітні технології та обладнання, що дають змогу підвищити ефективність сушіння та покращити якість кінцевого продукту. Додатково у дослідженнях [9, 11, 30, 32] аналізується вплив конструкції розпилювачів на аеродинамічні характеристики потоків у сушильній камері та на кінцеві властивості одержуваного порошку.

Методи розпилення рідини можна класифікувати за фізичними принципами, що лежать в основі процесу диспергування. Основними з них є: гідравлічний, пневматичний, механічний, електростатичний, пульсаційний, метод з попереднім газонасиченням та акустичний [24, 30].

*Гідравлічне розпилення.* Руйнування суцільності потоку рідини відбувається під дією тиску нагнітання. Проходячи через малий отвір сопла, рідинний потік набуває високої швидкості, що призводить до його дестабілізації та розпаду на краплі (у формі суцільного струменя, плівки або великих крапель) [7, 23]. Конструкція форсунки суттєво впливає на характер розпилення та форму факела [23, 33]. За принципом дії гідравлічні форсунки поділяють на струменеві, із зіткненням струменів, ударно-струменеві, відцентрові, відцентрово-струменеві та комбіновані [23, 24]. У струменевих форсунках рідина витікає під високим тиском через малий отвір, формуючи полідисперсний факел з малим кутом розкриття [14, 18, 23, 24]. Геометрія отвору форсунки (щілинні, циліндричні, кільцеві, з круговим розрізом) визначає форму факела (плоский, циліндричний, конічний, радіальний) та характеристики аерозолі. Гідравлічний метод характеризується високим ККД (2—4 кВт на тонну рідини) і дає змогу отримувати краплі в широкому діапазоні розмірів (10—2600 мкм) [8, 24]. Однак він не дозволяє формувати монодисперсний факел. Необхідність використання форсунок з малими діаметрами отворів ускладнює їх виготовлення та підвищує вимоги до чистоти рідини, оскільки навіть незначні домішки можуть призвести до засмічення каналів. Це обмежує застосування даного методу [8, 24].

*Пневматичне розпилення.* Диспергування рідини відбувається внаслідок її динамічної взаємодії з високошвидкісним потоком газу (зазвичай повітря) [23, 24]. Газовий потік передає свою кінетичну енергію рідині, спричиняючи її розпад на струмені, а потім на краплі. Розмір крапель (зазвичай 100—2000 мкм) визначається відносною швидкістю газу та рідини [14, 18, 24, 29]. Пневматичні форсунки класифікують за рівнем перепаду тиску, місцем контакту фаз (внутрішнє або зовнішнє змішування), розподілом маси, характером руху потоків та їх взаємною орієнтацією [23, 24]. У форсунках внутрішнього змішування контакт відбувається всередині конструкції, що сприяє попередньому утворенню більших крапель, які потім додатково подрібнюються аеродинамічними силами. Перевагою пневматичного методу є гнучкість регулювання продуктивності та дисперсності шляхом зміни параметрів потоків рідини та газу. До недоліків відносять можливі хімічні зміни у складі рідини через контакт з газом і потенційне підвищення тиску в замкнених системах. Пневматичний спосіб вважається найефективнішим для процесів сушіння рідких харчових продуктів у киплячому шарі з нанесенням на інертний носій [10, 12, 33].

*Механічне (відцентрове) розпилення.* Енергія для диспергування надається рідині за рахунок тертя об швидкообертний робочий елемент (зазвичай диск) [20, 23, 24, 32]. Під дією відцентрових сил рідина відривається від краю робочого елемента і розпадається на краплі, утворюючи факел з дисперсністю 50—150 мкм. Пристрої класифікують за способом подачі рідини та конструкцією робочого елемента (дисківі, чашкові, конусні, зіркові тощо) [24]. Форма факела залежить від конструкції робочого елемента. Наприклад, чашкові розпилювачі формують широкий конічний факел, а повітря, що проходить через центр, сприяє додатковому подрібненню рідинної плівки. Цей метод доцільно використовувати в сушильних апаратах, але він має обмеження: відносно груба дисперсність аерозолі, низький ККД (близько 15 кВт на тонну рідини) [24] та обмежені можливості регулювання через зв'язок між продуктивністю та дисперсністю.

*Електростатичне розпилення.* Під дією сильного електричного поля на поверхні рідинної плівки виникає нерівномірний розподіл тиску, що призводить до її деформації, втрати стійкості та руйнування на дрібні краплі [23, 24]. Процес реалізується

шляхом подачі високого електричного потенціалу до рідини у спеціальних електро-статичних форсунках. Залежно від призначення, форсунки бувають для розпилення рідин, нанесення покриттів або розпилення порошків. Особливістю методу є можливість отримання монодисперсного розпилу за низької витрати рідини та досягнення краплями релєвського критерію нестабільності. Утворюються довгі рідинні нитки (для низьков'язких рідин), які розпадаються на окремі краплі під дією кулонівських, гідродинамічних та гравітаційних сил. Отримані краплі мають високий електричний заряд. Розмір крапель, зазвичай, становить 140—420 мкм [20, 24, 32]. Висока швидкість процесу ускладнює стабілізацію факела та кероване транспортування аерозолу. Однак перевагою для сушильних апаратів є можливість контрольованого спрямованого руху аерозолу вздовж силових ліній поля, що мінімізує втрати. Застосування методу обмежене високою вартістю обладнання, значними енерговитратами, зниженою надійністю високовольтних систем та потребою у кваліфікованому персоналі.

*Пульсаційне розпилення.* Рідко використовується самостійно, частіше поєднується з іншими методами (гідралічним, пневматичним, механічним, електростатичним). Руйнування потоку рідини відбувається шляхом накладання пульсацій (механічних або тиску), що збільшує поверхневу енергію, порушує стійкість потоку та інтенсифікує диспергування. Пульсації створюються шляхом періодичного перекриття каналів або генерації коливань тиску перед форсункою [24]. Форма факела та дисперсність аерозолу залежать від частоти пульсацій. Наприклад, при використанні форсунок з механічним переривником, зменшення частоти пульсацій зменшує кут розпилу та щільність факела. Технічні обмеження часто не дають змогу підвищувати частоту понад 20 Гц. Перевагою поєднання пульсаційного методу з іншими є покращена якість та однорідність дроблення рідини на краплі (дисперсність 30—100 мкм) [24] без значного збільшення енерговитрат чи ускладнення конструкції.

На основі аналізу можна сформулювати ключові вимоги до пристроїв розпилення для сушіння: забезпечення малої дисперсності аерозолу, вузький діапазон розмірів крапель (висока монодисперсність), можливість електронного регулювання продуктивності в широкому діапазоні, висока надійність і технологічність конструкції.

Розпилювальне сушіння залишається одним з найефективніших методів отримання порошків у харчовій промисловості. Ефективність процесу значною мірою залежить від вибору розпилювача, який впливає на розмір частинок, якість порошку, стабільність біоактивних компонентів та енергоефективність [24].

Традиційно широко використовуються дискові ротаційні розпилювачі та форсунки, що працюють під тиском.

*Дискові розпилювачі* забезпечують високу продуктивність і стабільний розмір крапель, що сприяє рівномірності сушіння. Однак вони споживають значну кількість енергії, а їх ефективність знижується при роботі з в'язкими рідинами [4, 20, 32].

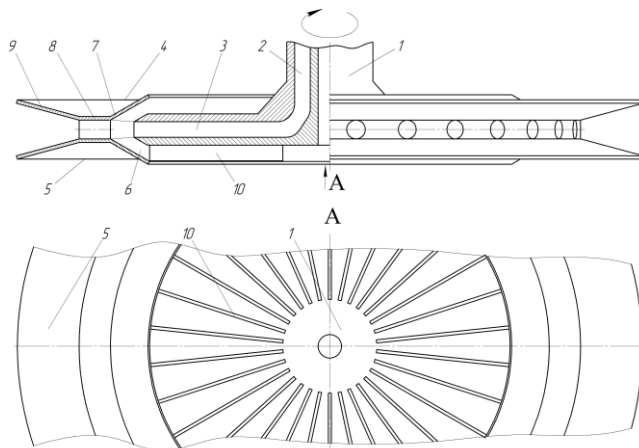
Форсунки, що працюють під тиском, дають змогу точніше контролювати розмір частинок, але мають вищий ризик закупорювання сопел, що може порушити стабільність процесу [33].

Сучасні тенденції спрямовані на зниження енерговитрат, підвищення стабільності біоактивних сполук та оптимізацію розмірів частинок порошку.

*Струменеві форсунки.* Перспективне рішення, що дає змогу працювати з рідинами високої в'язкості та формувати монодисперсні краплі. Це покращує однорідність порошку та зменшує енергоспоживання завдяки більш рівномірному висиханню [22].



- розташування радіальних лопатей на нижній стороні корпусу розпилювального диска;
- додаткове закріплення верхньої та нижньої профільних пластин до корпусу диска, які формують конфузур, горловину та дифузур навколо зони виходу рідини з соплових отворів;
- наявність зазору між торцями соплових отворів диска та горловиною профільних пластин для забезпечення ежекції сушильного агента.



**Рис. 2. Розпилювальний диск з ежекційним пристроєм:** 1 — корпус; 2 — розподільні канали; 3 — соплові отвори; 4 — верхня профільна пластина; 5 — нижня профільна пластина; 6 — зазор між корпусом диска та профільними пластинами; 7 — конфузурна частина; 8 — горловина; 9 — дифузур; 10 — радіальні лопаті

Принцип роботи удосконаленого диска. Рідина подається через розподільні канали до соплових отворів. Під дією відцентрової сили при обертанні диска (до 10 000 об/хв) рідина диспергується у вигляді крапель у зоні конфузора, утвореного профільними пластинами. Високошвидкісний потік крапель, що виходить із сопел, створює розрідження в зоні горловини, що призводить до ежекції (підсмоктування) сушильного агента (гарячого повітря) через зазор з центральної зони сушильної камери. Таким чином, конфузурна частина виконує функцію приймальної камери ежектора. Радіальні лопаті на нижній частині диска сприяють активному втягуванню додаткової кількості теплоносія з периферійної зони камери та його подачі під надлишковим тиском в зону розпилення.

У горловині та дифузурі відбувається інтенсивний контакт розпиленних крапель з підсмоктаним та поданим лопатями гарячим теплоносієм, що ініціює процес сушіння. Частково висушена суспензія далі надходить в основний об'єм сушильної камери, де процес досушування продовжується під дією гравітаційних сил та основного потоку теплоносія.

Перевагами такої конструкції диску є те, що принцип ежекції дає змогу ефективно залучити до процесу сушіння центральний потік сушильного агента, який у традиційних системах використовується неефективно. Масообмінні процеси в зоні ежектора (конфузур, горловина, дифузур) відбуваються з високою інтенсивністю.

Активне перемішування крапель з теплоносієм та подача додаткового теплоносія лопатями під тиском сприяють більш рівномірному та інтенсивному висушуванню. Збільшення дальності польоту крапель завдяки зниженню аеродинамічного опору

(однонаправленість потоків) подовжує час контакту фаз, що покращує тепло- та масообмін і якість кінцевого продукту.

Інтенсифікація масообміну в зоні ежектора дає змогу підвищити загальну енергоефективність сушильного апарата без значних додаткових енерговитрат на подачу теплоносія. Можливе підвищення енергоспоживання приводу диска через додаткові лопаті може бути компенсоване зменшенням діаметра диска без погіршення якості розпилення.

Запропоновані рішення дають змогу оптимізувати процес сушіння, забезпечуючи гарантований рівень вологості продукту, підвищуючи ефективність тепло- та масопередачі та зменшуючи втрати тепла з відпрацьованим теплоносієм.

Оптимальний вибір типу розпилювального пристрою залежить від комплексу факторів: фізико-хімічних властивостей рідини (в'язкість, корозійна активність, температура), вимог до розміру крапель, продуктивності, економічних аспектів (вартість обладнання) та умов експлуатації.

Матеріал, з якого виготовлено дисковий розпилювач, відіграє вирішальну роль у забезпеченні ефективності розпилення, довговічності конструкції та загальної продуктивності процесу. Критеріями вибору матеріалу є стійкість до агресивних середовищ, температурна витривалість, механічна міцність і вартість.

У конструкції розпилювачів широко застосовуються жаростійкі та корозійно-стійкі матеріали, зокрема нержавіючі сталі марок AISI 304, AISI 316 та їх аналоги, які забезпечують високу стійкість до дії агресивних середовищ і температур. Керамічні матеріали, як-от оксид алюмінію ( $Al_2O_3$ ) або карбід кремнію (SiC), використовуються для виготовлення зносостійких вставок у форсунках, де потрібна висока твердість і стабільність при абразивному зношуванні. Серед полімерних матеріалів найбільш застосовуваними є фторопласт (PTFE), поліпропілен (PP) і поліетилен високої щільності (HDPE), що відзначаються хімічною інертністю, низьким коефіцієнтом тертя та допустимістю контакту з харчовими продуктами. Вибір матеріалу визначається умовами експлуатації розпилювача — температурою, тиском, агресивністю середовища та в'язкістю сировини.

Раціональний підбір матеріалу диска та конструкції розпилювача є ключовим для ефективності розпилення, якості продукту, економічності експлуатації та продуктивності процесу.

Вибір схеми подачі теплоносія, зокрема при використанні дискових розпилювачів, має суттєвий вплив на ефективність масо- та теплообміну всередині сушильної камери. Як показано в [9, 11, 20—22, 29, 32], характер подачі повітря (прямотечійна, протитечійна чи змішана) визначає динаміку сушіння, ступінь утворення агломератів, рівномірність висушування та розмір частинок кінцевого продукту. Встановлено, що оптимізація режимів подачі теплоносія дає змогу не лише інтенсифікувати процес випаровування вологи, а й істотно зменшити питомі енерговитрати, що є критично важливим для промислових масштабів виробництва.

**Висновки.** Проведений аналіз підтверджує, що конструкція розпилювального пристрою, вибір матеріалів його виготовлення та режим подачі теплоносія мають вирішальне значення для ефективності процесу розпилювального сушіння. Зокрема, конструктивні особливості розпилювачів визначають дисперсність крапель, рівномірність розпилення, швидкість випаровування вологи, енергоефективність процесу та фізико-хімічні характеристики кінцевого продукту.

Серед існуючих типів дискові розпилювачі є одними з найефективніших для обробки в'язких рідин завдяки здатності забезпечити стабільну продуктивність, рівномірний розподіл частинок і високу якість продукту. Їх перевагою також є регульованість процесу шляхом зміни швидкості обертання та простота конструкції.

Для інтенсифікації масо- та теплообміну перспективним напрямом є поєднання дискових розпилювачів з ежекційними пристроями, що дає змогу активніше втягувати теплоносії до зони розпилення, посилювати турбулентність і теплопередачу, зменшити розмір крапель і час висушування. Таке комбіноване технічне рішення може суттєво підвищити енергоефективність сушильних апаратів і знизити експлуатаційні витрати.

Практичне значення наведеного аналізу полягає в систематизації конструктивних рішень для розпилювальних пристроїв, аналізі матеріалів їх виготовлення, а також в обґрунтуванні доцільності використання комбінованих схем подачі теплоносія та рідини.

Подальші дослідження будуть зосереджені на комп'ютерному моделюванні процесів розпилення та сушіння для різних конфігурацій апаратів; експериментальній перевірці ефективності поєднаних конструкцій пристроїв розпилення; оптимізації параметрів теплоносія та гідродинаміки в сушильних камерах; дослідженні зношування елементів розпилювачів з різних матеріалів у промислових умовах.

Отже, результати цього аналітичного дослідження формують теоретичну та прикладну базу для проектування новітніх енергоефективних сушильних апаратів із покращеними експлуатаційними характеристиками.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Askari Vaselabadi, S., Gharibzahedi, S. M. T., Greiner, R., Vale, J. M., Oveneri, A. C., Rashidinejad, A., Roohinejad, S. (2025). Advancements in spray-drying for the microencapsulation of fat-soluble vitamins: stability, bioavailability, and applications. *Journal of Food Biochemistry*, 1, 1—20. <https://doi.org/10.1155/jfbc/9974476>.
2. Dantas, A., Costa, D., Felipe, X., Gou, P. (2023). Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application. *Applied Food Research*, 4(1), 100382. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>.
3. Dutta, S., De Wilde, J., Pati, J. (2021). Experimental study of the temperature distribution and water evaporation in an axial dual-zone vortex chamber spray dryer. *Drying Technology*, 40(13), 2794—2811. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1966635>.
4. Huang, L., Kumar, K., Mujumdar, A. (2006). A comparative study of a spray dryer with rotary disc atomizer and pressure nozzle using computational fluid dynamic simulations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(6), 461—470. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2005.11.004>.
5. Huang, X., Edrisi, M., Langrish, T. (2018). Review of some common commercial and noncommercial lab-scale spray dryers and preliminary tests for a prototype new spray dryer. *Drying Technology*, 36(15), 1900—1912. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1459679>.
6. Isik, S., Yildiz, C. (2022). A new spray dryer supported with freely rotatable propellers enables more efficient drying of milk samples. *Thermal Science*, 26(2), C, 1871—1882. <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI210223205I>.
7. Jackiw, I. M., Ashgriz, N. (2021). On aerodynamic droplet breakup. *Journal of Fluid Mechanics*, 913(A33). <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.7>.
8. Jaworek, A., Sobczyk, A. T., Krupa, A. (2018). Electro-spray application to powder production and surface coating. *Journal of Aerosol Science*, 125, 57—92. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.04.006>.
9. Khanzharov, N. S., Abdizhapparova, B. T., Ospanov, B. O., Dosmakanbetova, A. A., Baranenko, A. V., Kumisbekov, S. A., Serikuly, Zh. (2018). Designs of dryers based on combination of vacuum and atmospheric drying of food products. *NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 431(5), 141—149. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170x.20>.

10. Li, J., Pan, Y., Chen, G., Mujumdar, A., Zhou, M. (2004). Fluidized-bed drying of biological materials: Two case studies. *Chin. J. Chem. Eng.*, 12, 840—842.
11. Misirli, C., Şahin, M., Yildirim, B. (2015). Properties analysis of the spray nozzles in drying plant. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 21, 469—484.
12. Mohideen Batcha, M. F., Amirmordin, S. H., Md Yudin, A. S. (2023). 4-Fluidized Bed Dryers. In *Drying Technology in Food Processing*. Jafari, S. M., Malekjani, N., Eds. Woodhead Publishing: Sawston, UK, 67—122. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819895-7.00006-7>.
13. Nik Abd Rahman, N. F. N., Zubairi, T. D. S., Hashim, H., Yaakob, H. (2024). Revolutionizing spray drying: An in-depth analysis of surface stickiness trends and the role of physicochemical innovations in boosting productivity. *Journal of Food Quality*, 1, 8929464. <https://doi.org/10.1155/2024/8929464>.
14. Ponomarenko, V., Pushanko, N. (2015). *Sprays fluid: an effective way to intensify the processes in the food*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing.
15. Ponomarenko, V., Sliusenko, A., Liulka, D., Lementar, S., Forostiuk, I., Yakymchuk, M. (2022). Process of sugar solutions sulfitation in terms of hygienic requirements for equipment operation. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 40, 3—12. URL: <https://keypublishing.org/jhed/jhed-volumes/volume-40/> (дата звернення: 01.02.2025).
16. Ponomarenko, V., Sliusenko, A., Liulka, D., Yakobchuk, R. (2023). Determination of the ejection coefficient of a liquid-gas ejector with a combined mixing chamber. *Ukrainian Food Journal*, 12(3), 419—432. <http://dx.doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-3-8>.
17. Samborska, K., Jedlińska, A., Barańska-Dołomisiewicz, A., Wiktor, A., Michalska-Ciechanowska A., Goula, A. (2024). Chapter 6 — *Spray drying of sugar-rich food products*. *Spray Drying for the Food Industry*, 145—188. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819799-8.00018-1>.
18. Sliusenko, A., Ponomarenko, V. (2021). Water-air ejector with conical-cylindrical mixing chamber / transl. by I. Forostiuk. *Acta Polytechnica*, 61(6), 768—776. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0768>.
19. Thakur, C., Kaushal, M., Vaidya, D., Verma, A., Gupta, A., Sharma, R. (2024). Unlocking the potential of spray drying for agro-products: exploring advanced techniques, carrier agents, applications, and limitations. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 1181—1220. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03544-4>.
20. Tufekchi, V., Veresotskyi, Y. (2022). Investigation of aerodynamic properties of louver distribution of heat carrier in spray-drying complexes. *Food Reviews International*, 39(9), 6602—6610. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2122991>.
21. Кривоніс, Л. Е. (2017). Фактори, що впливають на збереження якісних характеристик продукта при сушінні в розпилювальних сушарках. *Матеріали XLVI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 21—24 березня. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-ftbtegr/all-ftbtegr-2017/paper/view/2955> (дата звернення: 01.02.2025).
22. Лементар, С. Ю., Пономаренко, В. В., Вересоцький, Ю. І., Якобчук, Р. Л. (2017). Моделювання процесу розпилення молока дисками з різними конструкціями сопел. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. Київ, 23(4), 98—104.
23. Луговський, О. Ф., Ляшок, А. В., Пижиков, Ю. О. (2011). Способи та пристрої для отримання рідкого аерозолі. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія машинобудування, 1(61), 107—113.
24. Луговський, О. Ф., Шульга, А. В., Берник, І. М., Гришко, І. А., Мовчанюк, А. В., Зілінський А. І. (2022). *Ультразвукові технологічні процеси. Розпилення та екстрагування*: монографія. Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю. В.
25. Патент на корисну модель № 105637 UA, МПК В05В 3/12 (2006.01). Диск розпилювальний / О. О. Ревтов, А. О. Сушко, С. І. Костик, В. Ю. Шибецький; заявник О. О. Ревтов, А. О. Сушко, С. І. Костик, В. Ю. Шибецький. № u201510046; заявл. 15.10.2015; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6.
26. Патент на корисну модель № 134312 UA, МПК А23С1/00, А23С1/04 (2006.01). Розпилювальна сушильна установка для рідких продуктів з двоступеневим роторним розпилювальним пристроєм / М. М. Пушанко, А. С. Дубівко, А. В. Середюк; заявник Національний університет харчових технологій. № u201812378; заявл. 13.12.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9.
27. Патент на корисну модель № 117728 UA, МПК В01F5/00, В01F5/18 (2006.01). Розпилювач рідини / П. А. Пацуровський, Л. І. Лейбович; заявник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. № u201613289; заявл. 26.12.2016; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

28. Патент на корисну модель № 107374 UA, МПК В05В3/02, В05В3/12 (2006.01). Канальний відцентровий розпилювач рідин / Л. М. Черняк; заявник Л. М. Черняк. № а201500910; заявл. 05.02.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 13.

29. Сидоров, Ю. І. (2012). Розпилювальні сушарки в біотехнології. *Biotechnology*, 5(4), 46—54. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/biot\\_2012\\_5\\_4\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/biot_2012_5_4_6) (дата звернення: 01.02.2025).

30. Тихтило, Б. В., Костенко, О. М., Дрожжана, О. У. (2022). Характеристика розпилювальних сушильних установок. *Інноваційні аспекти системи безпеки праці, захисту інтелектуальної власності: матеріали VII всеукр. наук.-практ. інтернет-конф.*, м. Полтава, 24—25 берез. Полтава: ПДАУ.

31. Турчина, Т., Малецька, К., Авдєєва, Л., & Макаренко, А. (2023). Інтенсивність масопереносу при сушінні колоїдних розчинів та рідких гетерогенних систем. *Scientific Works*, 87(1), 56—61. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2691>.

32. Туфекчі, В., Вересоцький, Ю. (2022). Розпилювальне сушіння молочних продуктів — дослідження швидкісних характеристик теплоносія та продукту в дисковому розпилювальному комплексі. *Наука онлайн*, 12, 1—13.

33. Якобчук, Р. Л., Яровий, В. Л. (2012). Визначення висоти зони активного теплообміну у процесі сушіння пивних дріжджів у вібропсевдозрідженому шарі інертного матеріалу. *Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. праць*. Донецьк: ДонНУЕТ ім. Туган-Барановського, 2(29), 71—78.

УДК 664.66

# DETERMINATION OF THE RATIONAL DESIGN OF A VACUUM CHAMBER OF A DEVICE FOR VACUUM COOLING OF BAKERY PRODUCTS UNDER CONTINUOUS PRODUCTION CONDITIONS

O. Kozak, M. Desyk, V. Telychkun  
*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

apparatus,  
vacuum chamber,  
sealing,  
simulation modeling

---

**Article history:**

Received 02.04.2025  
Received in revised form  
22.04.2025  
Accepted 24.04.2025

---

**Corresponding author:**

oleksandrkozak2@gmail.com

---

**ABSTRACT**

The article addresses the issue of improving the design of the vacuum chamber of a vacuum cooling apparatus for bakery products in continuous-flow production conditions. The relevance of the study is driven by the need to reduce the cooling time of baked goods after baking in order to lower energy consumption and enhance the quality of the final products. Modern approaches to organizing the cooling process in the baking industry are analyzed, particularly the use of vacuum cooling methods, which significantly reduce the cooling duration while preserving the porous structure and organoleptic properties of the products.

The aim of the study is to determine a rational design of the vacuum chamber, taking into account real operating conditions, ensuring the tightness of joints, sufficient structural strength, and optimal placement of bakery products during cooling. Geometrical and design calculations were performed to justify the shape and dimensions of the vacuum chamber. In particular, the required contact area of the sealing with the vacuum chamber was determined to ensure airtightness under a vacuum pressure of 4 kPa. It was established that the minimum contact area should be no less than 0.0389 m<sup>2</sup>.

Using SOLIDWORKS Simulation software, a stress-strain analysis of the vacuum chamber design was carried out. The simulation considered the influence of external atmospheric pressure on the vacuum chamber walls and the compressive force acting on the chamber's seal. The simulation results confirmed that the maximum stress values do not exceed the allowable limits for the selected material (stainless steel AISI 316L), and the structural deformations remain within acceptable limits.

The developed design ensures sufficient rigidity, airtightness, and manufacturability, confirming its suitability for use in continuous production environments. The obtained results can be used for further optimization of energy consumption and reduction of the vacuum cooling time of bakery products.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-19

---

## ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ БУДОВИ ВАКУУМНОЇ КАМЕРИ АПАРАТА ДЛЯ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ В УМОВАХ ПОТОКОВОГО ВИРОБНИЦТВА

О. С. Козак, аспірант, ORCID-ID: 0009-0004-7112-6302

М. Г. Десик, канд. техн. наук, ORCID-ID: 0000-0001-8016-466X

В. І. Теличкун, канд. техн. наук, ORCID-ID: 0000-0002-3132-6447

Національний університет харчових технологій

*У статті представлено результати визначення раціональної конструкції вакуумної камери для охолодження батона (0,5 кг) в потоковому виробництві. За допомогою SOLIDWORKS Simulation проведено перевірку напружень і деформацій різних варіантів конструкції.*

*Визначено, що для герметичності та довговічності вузла вакуумування площа контакту з ущільненням має бути  $\geq 0,0389$  м<sup>2</sup>. З урахуванням геометричних параметрів батона та потреби одночасного охолодження чотирьох батонів за допомогою імітаційного моделювання визначено раціональну будову вакуумної камери апарата.*

**Ключові слова:** апарат, вакуумна камера, ущільнення, імітаційне моделювання.

**Вступ.** Охолодження є завершальним і найдовшим етапом виробництва хлібобулочних виробів, тому останнім часом особливу увагу приділяють оптимізації цього процесу, оскільки він є ключовим для забезпечення якості виробів [1, 9, 13]. Охолодження впливає на структуру, смакові властивості та мікробіологічну безпеку виробів, тому активно проводяться дослідження, спрямовані на зменшення енергетичних витрат, скорочення часу охолодження та поліпшення якості продукції через впровадження новітніх способів охолодження [12].

На хлібопекарських виробництвах використовують три способи охолодження хлібобулочних виробів: природне (конвективне), охолодження за допомогою кондиціонованого повітря та вакуумне охолодження [9].

Природний (конвективний) спосіб охолодження є найпростішим та найдешевшим, але потребує багато часу, великих виробничих площ і не забезпечує рівномірного охолодження, що може вплинути на якість готової продукції [8]. Охолодження за допомогою кондиціонованого повітря зменшує час охолодження, однак вимагає використання складного обладнання, потребує значних енергетичних витрат і дотримання параметрів робочого повітря [7].

Одним із перспективних напрямків інтенсифікації процесу охолодження хлібобулочних виробів є використання вакуумного охолодження, яке базується на відведенні тепла через випаровування вологи з продуктів з достатньою газо- та паропроникністю [6]. Цей спосіб дає змогу значно зменшити час охолодження, забезпечуючи рівномірний розподіл температури всередині виробу, що позитивно впливає на його якість. Вакуумне охолодження також покращує структурно-механічні властивості, подовжує термін зберігання і знижує ризик мікробіологічного забруднення [5].

Однак вакуумний спосіб охолодження хлібобулочних виробів наразі не реалізований в умовах потокового виробництва, через що виникає необхідність у розробці апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового

виробництва [12—14]. Розроблену схему розміщення конструктивних елементів апарата представлено на рис. 1.



Рис. 1. Схема розміщення конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва

Ключовим і найбільш навантаженим вузлом цього апарата (рис. 1) є вузол вакуумування, який складається з вакуумної камери ущільнення та столика вакуумування. Для забезпечення герметичності та довговічності вузла вакуумування необхідно провести дослідження з визначення раціональної будови вакуумної камери, яка відповідатиме умовам експлуатації апарата.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Останніми часом дослідники значну увагу приділяють оптимізації процесу охолодження хлібобулочних виробів, оскільки цей етап є ключовим для забезпечення високої якості та безпеки готової продукції. Оптимізація процесу сприятиме підвищенню ефективності виробництва хлібобулочних виробів [7, 12]. Охолодження — важливий завершальний етап, який впливає на структуру, смакові властивості та мікробіологічну безпеку продукції [9], тому активно проводяться дослідження, спрямовані на зменшення енергетичних витрат, скорочення часу охолодження та покращення якості продукції за допомогою впровадження новітніх способів охолодження [6].

З огляду на необхідність удосконалення традиційних методів охолодження (природного та охолодження кондиціонованим повітрям) дослідники звертаються до інноваційних підходів, серед яких вакуумне охолодження займає одну з провідних позицій [5, 10, 12]. Проведені дослідження демонструють, що вакуумне охолодження має значні переваги, серед яких: скорочення часу охолодження з кількох годин до хвилин, покращення структурно-механічних властивостей виробів та зниження ризику мікробіологічного забруднення [13]. Однак вакуумний спосіб охолодження досі не впроваджений у умовах потокового виробництва.

Сучасні дослідження орієнтовані на вдосконалення існуючих способів охолодження та пошук нових, інноваційних технологій, зокрема вакуумного охолодження [6]. Ця технологія має великий потенціал для значного підвищення ефективності процесу охолодження хлібобулочних виробів і може стати перспективною альтернативою традиційним способам охолодження. Завдяки своїм численним перевагам вакуумне охолодження може стати основою для створення більш енергоефективного й економічного обладнання, що інтенсифікує виробничі процеси в хлібопекарській промисловості [10, 11].

**Мета досліджень:** визначення раціональної будови вакуумної камери, яка відповідатиме умовам експлуатації та забезпечить безперебійну роботу апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва для батона з пшеничного борошна вищого гатунку масою 0,5 кг.

**Матеріали і методи.** При розробці обладнання необхідно перевіряти найбільш навантажені конструктивні елементи [15]. Для забезпечення безперебійної роботи потрібно обирати матеріали з допуском до контакту з харчовими продуктами, які забезпечують міцність, герметичність і не впливають на якість продукції. Також слід провести випробування елементів на міцність і деформацію для забезпечення їх надійності в експлуатації [15].

Для точного аналізу міцності та деформації конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження було проведено чисельне моделювання за допомогою програмного середовища SOLIDWORKS Simulation. Це середовище дає змогу детально досліджувати механічну поведінку конструкцій під різними навантаженнями, використовуючи метод скінченних елементів (МСЕ) для розв'язання задач, пов'язаних з міцністю, деформацією, тепловими та іншими фізичними процесами в матеріалах [11, 15].

Методика дослідження конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження на міцність і деформацію за допомогою середовища SOLIDWORKS Simulation:

#### 1. Створення 3D-моделей конструктивних елементів.

Першим кроком є створення тривимірних моделей конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження. Компоненти проектуються відповідно до реальних розмірів і конфігурацій, з точним моделюванням геометрії кожного елемента за допомогою інструментів SOLIDWORKS, що дає змогу застосовувати ефективні методи аналізу й оцінки міцності [11, 15].

#### 2. Вибір матеріалів і фізичних властивостей.

Для кожного конструктивного елемента визначаються матеріали, що використовуються в реальній конструкції апарата для вакуумного охолодження. Ураховуються фізичні характеристики матеріалів, такі як модуль пружності, межа міцності, коефіцієнт теплового розширення та в'язкості, що важливі для коректного моделювання поведінки матеріалу під навантаженням і забезпечують точність розрахунків [15].

Для ущільнення обрано силіконову гуму, EPDM 50-60 Shore A, що є оптимальним вибором завдяки стійкості до температур, вологи, хімічних впливів і відповідності міжнародним стандартам. Для вакуумної камери обрано матеріалом сталь AISI 316L, яка має високу корозійну стійкість і міцність, з товщиною стінки 3 мм.

#### 3. Визначення навантажень і граничних умов.

Для коректного моделювання визначено фактичні навантаження на конструктивні елементи за допомогою розподіленого тиску. Граничні умови враховували реальні контакти між елементами конструкції [15].

#### 4. Запуск симуляції.

Після попередніх кроків запускається симуляція, під час якої модель піддається навантаженню за заданими умовами. SOLIDWORKS Simulation використовує метод скінченних елементів для розподілу навантажень і розрахунку їх впливу на міцність і деформацію. Аналіз змін напружень і деформацій дає змогу виявити критичні зони, що можуть призвести до пошкоджень або несправностей [15].

#### 5. Аналіз результатів моделювання.

Після моделювання результати дають змогу проаналізувати розподіл напружень і деформацій, виявити зони з найбільшими напруженнями, що можуть призвести до пошкоджень або зношування матеріалів. Особлива увага приділяється «гарячим точкам» — ділянкам з максимальними напруженнями, що допомагає визначити місця для посилення конструкції чи зміни матеріалів для підвищення надійності [11, 15].

## 6. Оптимізація конструкції.

На основі аналізу результатів моделювання вносяться необхідні зміни, такі як коригування геометрії елементів і посилення певних частин конструкції. Оптимізація конструкції дає змогу досягти балансу між міцністю, вагою та витратою матеріалів, що є важливим при розробці обладнання [15].

**Результати досліджень. Визначення площі контакту вакуумної камери з ущільненням.** Для забезпечення ефективної роботи вузла вакуумування і довговічності його роботи необхідно правильно підібрати площу контакту вакуумної камери з ущільненням. Для цього був зроблений розрахунок, щоб уникнути руйнування гуми і забезпечити належний рівень герметичності в системі.

З огляду на те, що у вакуумній камері буде створюватись розрідження до 4 кПа на вакуумну камеру і, відповідно, на ущільнення буде діяти зовнішній тиск 97,352 кПа, виконано розрахунок необхідної площі контакту ущільнення з вакуумною камерою [12].

Розрахунок проводиться за формулою напруги стиску [15]:

$$\sigma_c = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

де  $\sigma_c$  — напруження, Па;  $P$  — сила стискання, Па;  $F$  — площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>.

Звідси:

$$F = \frac{P}{\sigma_c}. \quad (2)$$

Межу міцності на стиск приймаємо  $[\sigma_c] = 5 \text{ МПа} = 5\,000\,000 \text{ Па}$ , оскільки коефіцієнт запасу міцності (КЗМ) для еластомерів, таких як EPDM (етилен-пропіленовий каучук), може варіюватися залежно від конкретних умов експлуатації, включаючи температуру, навантаження й тривалість впливу, що зазвичай, коливається в межах від 2 до 4, то межа міцності на стиск буде  $\sigma_c = \frac{5\,000\,000}{2} = 2\,500\,000 \text{ Па}$ .

Розраховуємо площу контакту вакуумної камери з ущільненням [15]:

$$F = \frac{97352}{2\,500\,000} = 0,0389 \text{ м}^2. \quad (3)$$

На рис. 2 зображено область контакту вакуумної камери з ущільненням, враховуючи необхідні розміри для розміщення в середині 4 батонів.

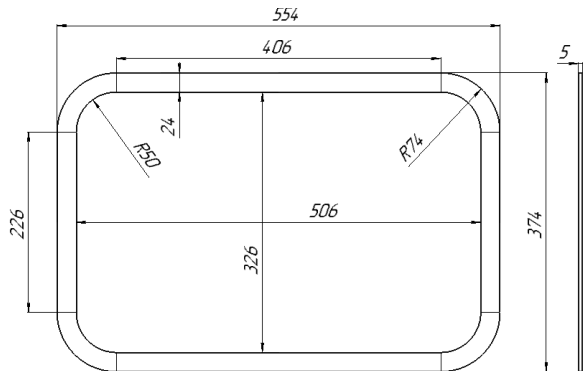


Рис. 2. Область контакту вакуумної камери з ущільненням

Розраховуємо площу поверхні ділянки контакту вакуумної камери з ущільненням:

$$F_1 = (0,406 \cdot 0,024) \cdot 2 = 0,019488 \text{ м}^2; \quad (4)$$

$$F_2 = (0,23 \cdot 0,01) \cdot 2 = 0,010848 \text{ м}^2; \quad (5)$$

$$F_3 = (\pi \cdot 0,06^2) - (\pi \cdot 0,05^2) = 0,009345 \text{ м}^2; \quad (6)$$

$$F = 0,019488 + 0,010848 + 0,009345 = 0,039681 \text{ м}^2. \quad (7)$$

Проводимо перевірку розрахунків гуми на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS, креслення гуми наведено на рис. 3.



Рис. 3. 3Д креслення профіля гуми, над яким проводилися моделювання

На рис. 4 зображено схему прикладення навантаження та фіксація моделі в просторі в середовищі SOLIDWORKS.

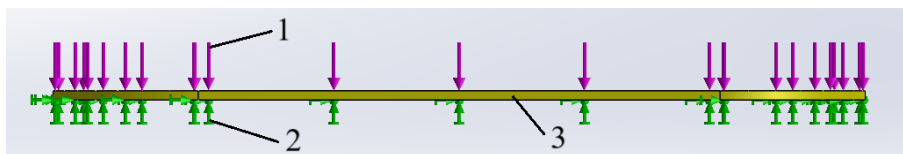


Рис. 4. Схема прикладення навантаження та фіксація моделі у просторі в середовищі SOLIDWORKS: 1 — зображення прикладеного навантаження в 97325 Па; 2 — зображення жорсткої фіксації площини в просторі; 3 — профіль вакуумної гуми EPDM

Результати перевірки розрахунків гуми EPDM на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS наведено на рис. 5.

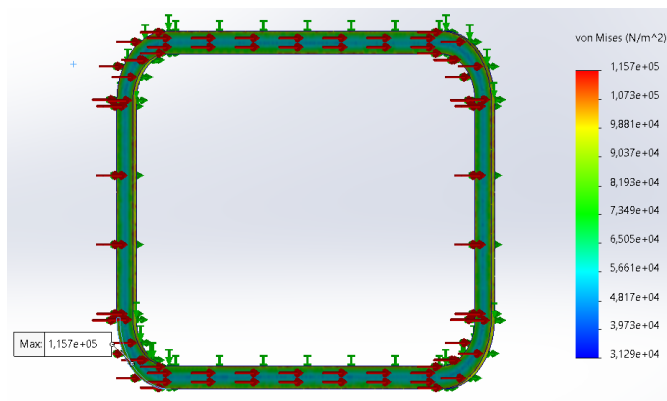


Рис. 5. Результати перевірки розрахунків гуми EPDM на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS

За результатами проведеного моделювання максимальне навантаження становить  $\sigma_{max} = 1,157 \cdot 10^5$  Па. Перевіряємо умову міцності матеріалу:  $\sigma_c \geq \sigma_{max} - 2,5 \cdot 10^6 > 1,157 \cdot 10^5$ . Отже, умова міцності виконується.

Обрана марка гуми, розрахована площа контакту та розроблена 3Д модель ущільнення задовольняють умови експлуатації.

**Визначення раціональної будови вакуумної камери.** Марка сталі яка використовується для виготовлення вакуумної камери AISI 316L (X2CrNiMo17-12-2). Враховуючи геометричні параметри ділянки контакту вакуумної камери з ущільненням, визначимо оптимальну будову вакуумної камери шляхом проведення перевірки на міцність та деформацію за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS.

На рис. 6 зображено креслення вакуумної камери простої форми.

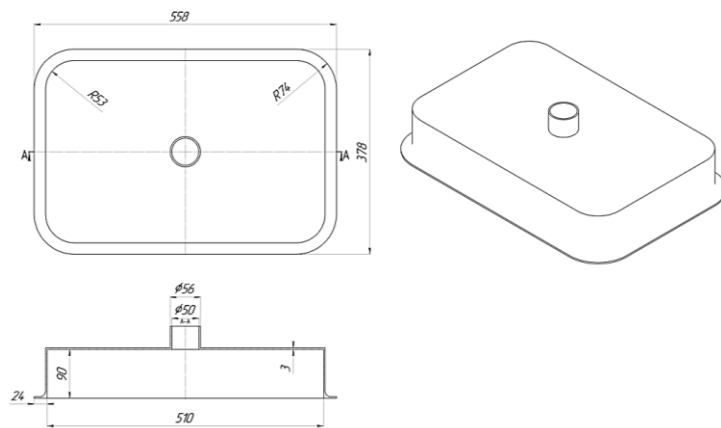


Рис. 6. Креслення вакуумної камери простої форми

З метою визначення критичних зон напруги та деформації проведемо дослідження в середовищі SOLIDWORKS Simulation.

Схему прикладення навантаження та фіксація моделі в просторі в середовищі SOLIDWORKS зображено на рис. 7.

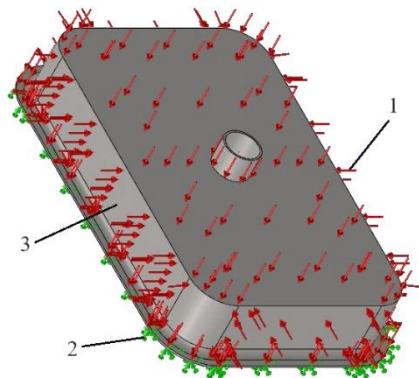


Рис. 7. Схema прикладення навантаження та фіксація моделі в просторі в середовищі SOLIDWORKS: 1 — зображення прикладеного навантаження в 97325 Па; 2 — зображення жорсткої фіксації площини в просторі; 3 — вакуумна камера

Результати перевірки вакуумної камери простої форми на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS наведено на рис. 8.

За результатами проведеного моделювання (рис. 8) максимальне навантаження становить  $\sigma_{max} = 3,855 \cdot 10^8$  Па. Перевіряємо умову міцності матеріалу:  $\sigma_c \geq \sigma_{max} — 6 \cdot 10^8 > 3,855 \cdot 10^8$ . Отже, умова міцності виконується.

Результати перевірки вакуумної камери простої форми на деформацію за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS наведено на рис. 9.

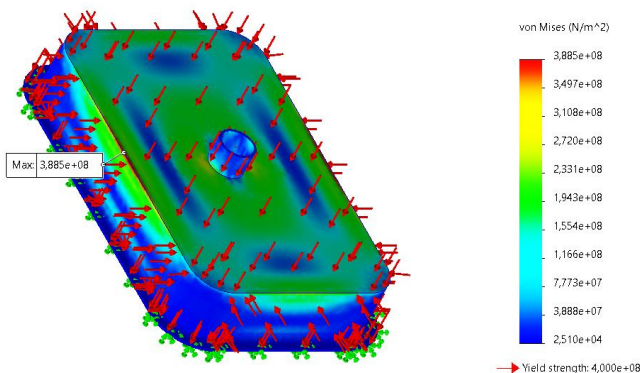


Рис. 8. Результати перевірки вакуумної камери простої форми на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS

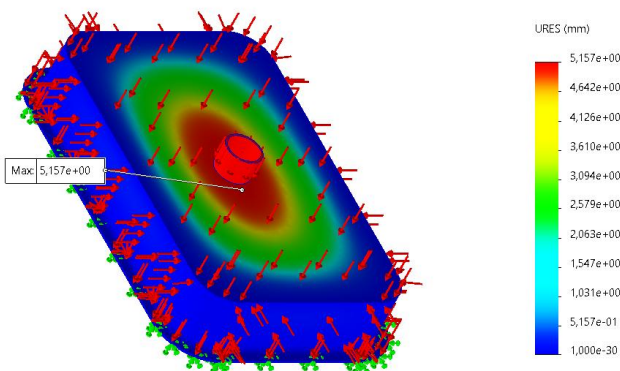


Рис. 9. Результати перевірки вакуумної камери простої форми на деформацію за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS

У зоні найбільшої деформації висота камери складає 90 мм, в результаті навантаження деформація складає 5,1 мм, отже, залишкова висота складає 84,9 мм. Висота батона 80 мм, отже, батон в процесі вакуумування не буде замінатися, але деформація на рівні 5,1 мм, що виникатиме за кожним циклом охолодження, негативно впливатиме на довговічність матеріалу, поступово знижуючи його експлуатаційні характеристики (рис. 9).

У результаті моделювання були визначені зони максимальних напруг і деформацій. Одним із шляхів усунення концентрації напруг і деформацій, а також збільшення жорсткості конструкції та зменшення вільного об'єму вакуумної камери є наближення її будови до сферичної форми.

На рис. 10 зображено 3Д моделі вакуумної камер із радіусом заокруглення верхньої кромки 10, 20, 30, 40 та 50 мм.

У результаті перевірки вакуумних камер із заокругленням верхньої кромки на міцність (рис. 11—15) максимальне навантаження становить: радіус заокруглення 10 мм —  $\sigma_{max} = 3,309 \cdot 10^8$  Па; радіус заокруглення 20 мм —  $\sigma_{max} = 2,813 \cdot 10^8$  Па;

радіус заокруглення 30 мм —  $\sigma_{max} = 2,64 \cdot 10^8$  Па; радіус заокруглення 40 мм —  $\sigma_{max} = 2,366 \cdot 10^8$  Па; радіус заокруглення 50 мм —  $\sigma_{max} = 2,099 \cdot 10^8$  Па.  $\sigma_c \geq \sigma_{max}$  —  $6 \cdot 10^9 > 3,309 \cdot 10^8 \dots 2,099 \cdot 10^8$  Па. Отже, умова міцності виконується в усіх варіантах конструкції.

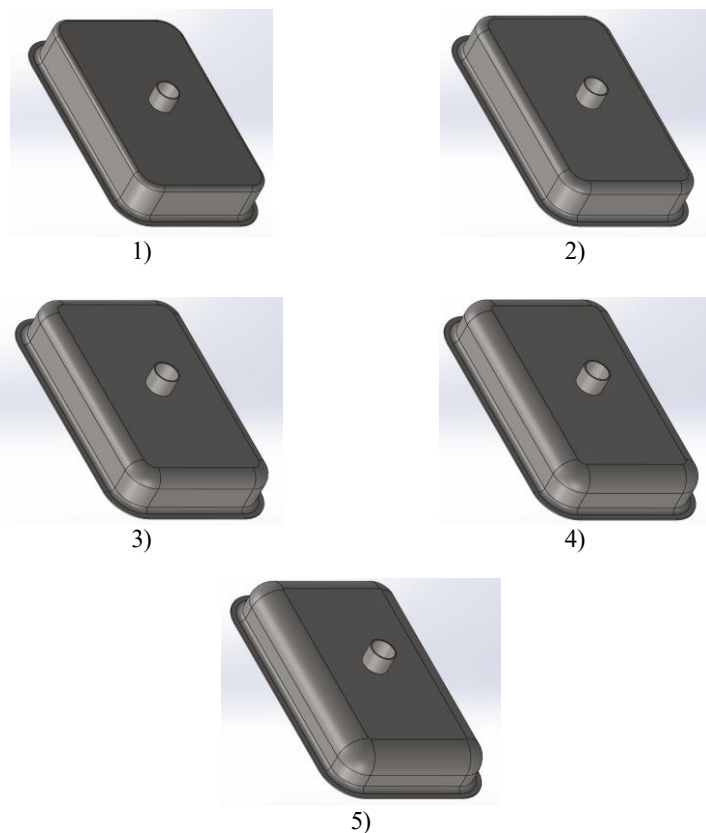


Рис. 10. 3Д моделі вакуумних камер із радіусом заокруглення верхньої кромки:  
1 — 10 мм; 2 — 20 мм; 3 — 30 мм; 4 — 40 мм; 5 — 50 мм

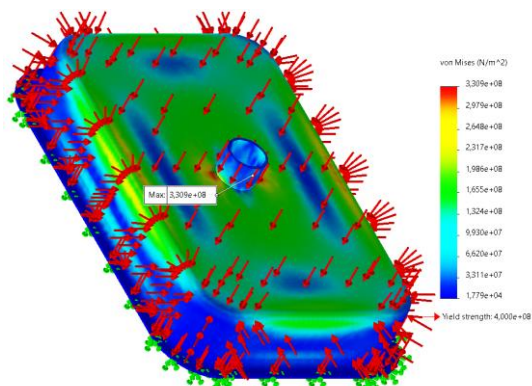


Рис. 11. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 10 мм

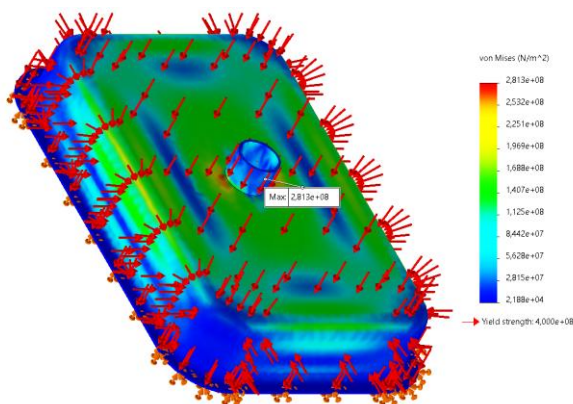


Рис. 12. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 20 мм

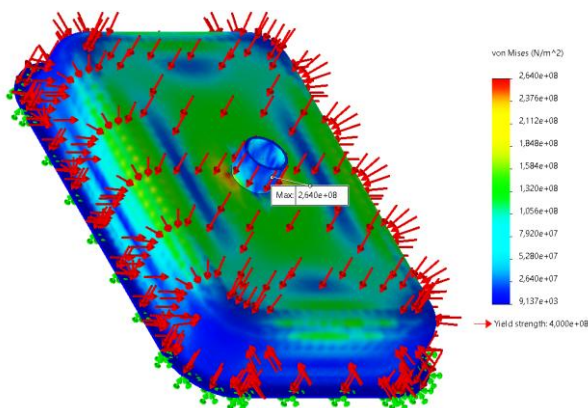


Рис. 13. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 30 мм

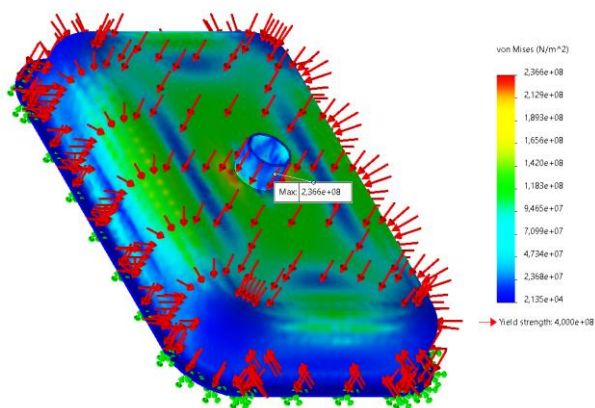
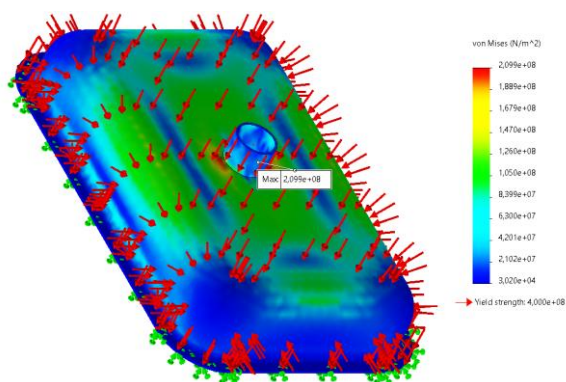
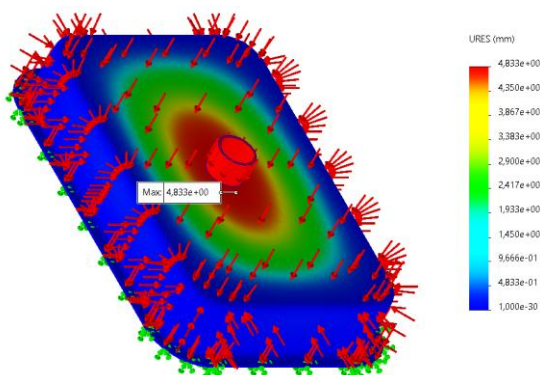


Рис. 14. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 40 мм

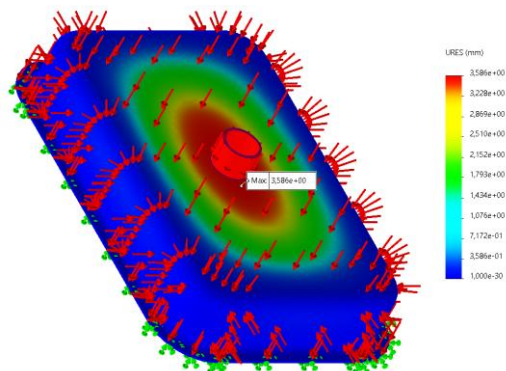


**Рис. 15.** Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм

У результаті перевірки вакуумних камер із заокругленням верхньої кромки на деформацію (рис. 16—20) максимальне значення становить: радіус заокруглення 10 мм деформація — 4,8 мм; радіус заокруглення 20 мм деформація — 3,58 мм; радіус заокруглення 30 мм деформація — 3,091 мм; радіус заокруглення 40 мм деформація — 2,53 мм; радіус заокруглення 50 мм деформація — 2,07 мм.



**Рис. 16.** Результати перевірки вакуумної камери на деформацію з радіусом заокруглення верхньої кромки 10 мм



**Рис. 17.** Результати перевірки вакуумної камери на деформацію з радіусом заокруглення верхньої кромки 20 мм

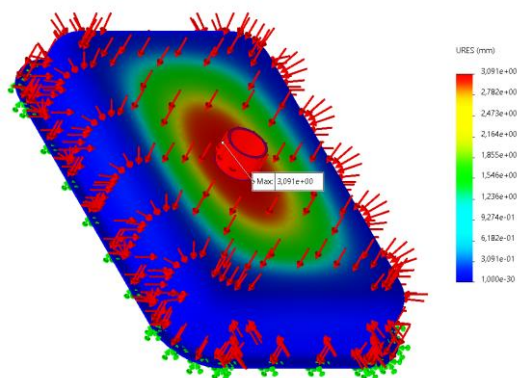


Рис. 18. Результати перевірки вакуумної камери на деформацію з радіусом заокруглення верхньої кромки 30 мм

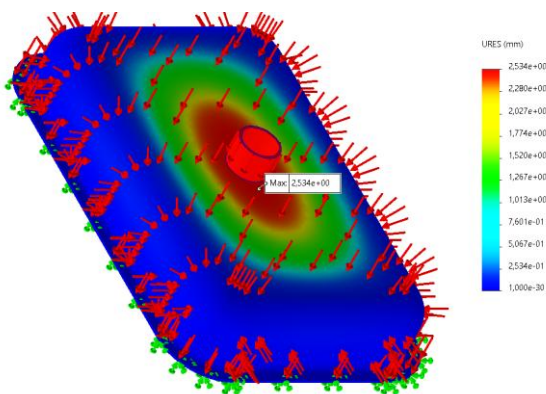


Рис. 19. Результати перевірки вакуумної камери на деформацію з радіусом заокруглення верхньої кромки 40 мм

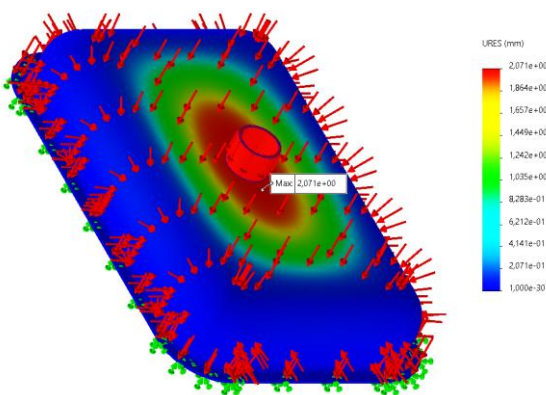


Рис. 20. Результати перевірки вакуумної камери на деформацію з радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм

Заокруглення верхньої кромки вакуумної камери радіусом 50 мм дало змогу зменшити деформацію, що виникає в результаті зовнішнього тиску, з 5,1 мм до 2,07 мм.

Подальше збільшення радіусу заокруглення є недоцільним, оскільки це збільшує ризик пошкодження продукту всередині.

У зоні найбільшої деформації висота камери складає 90 мм. У результаті моделювання деформація становить 2,07 мм, тому залишкова висота камери дорівнює 87 мм. Оскільки висота батона складає 80 мм, батон під час вакуумування не буде заминатися. При такій конструкції деформація є мінімальною, отже, будова вакуумної камери задовольняє умови експлуатації.

**Висновки.** 1. У ході дослідження визначено оптимальні конструктивні параметри ущільнення та вакуумної камери, які забезпечують ефективну роботу та довговічність апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів.

2. Розрахунки показали, що площа контакту ущільнення має становити 0,0389 м<sup>2</sup> для забезпечення герметичності. Як матеріал обрано гуму EPDM (50—60 Shore A), яка вирізняється пружністю, зносостійкістю та стійкістю до вакуумного середовища. Моделювання в SOLIDWORKS підтвердило, що ущільнення витримує навантаження без перевищення допустимих напружень.

3. Аналіз міцності вакуумної камери простої форми показав, що при вакуумуванні максимальне напруження становить  $3,855 \cdot 10^8$  Па, що не перевищує допустиме для сталі AISI 316L (X2CrNiMo17-12-2). Водночас деформація 5,1 мм є надмірною та може негативно впливати на довговічність конструкції й стабільність внутрішньої геометрії камери.

4. У результаті моделювання конструкцій з різними радіусами заокруглення верхньої кромки визначено, що оптимальним є радіус 50 мм. Це дає змогу зменшити деформацію до 2,07 мм, що покращує жорсткість конструкції, стабільність геометрії камери та рівномірність охолодження хлібобулочних виробів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ajani, C. K., Zhu, Z., Sun, D. W. (2022). In situ investigation of cellular water transport and morphological changes during vacuum cooling of steamed breads. *Food Chemistry*, 381. Article ID: 132211. ISSN 0308-8146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132211>.
2. Alibas, I., Koksak, N. (2015). Forced-air, vacuum, and hydro precooling of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis cv. Freemont): Part II. Determination of quality parameters during storage. *Food Science and Technology* (Campinas), 35(1), 45—50. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.6457>.
3. Bahroni, S. A., Monteau, J. Y., Rezzoug, S. A., Loisel, C., Macce-Rezzoug, Z. (2014). Physics-based modeling of simultaneous heat and mass transfer intensification during vacuum steaming processes of starchy material. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 85, 216—226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.09.005>.
4. Burfoot, D., Hayden, R., Badran, R. (1989). *Simulation of a pressure cook/water and vacuum cooled processing system. Process Engineering in the Food Industry: Developments and Opportunities*. Eds. R. W. Field, J. A. Howell.
5. Cheng, H. P., Lin, C. T. (2007). The morphological visualization of the water in vacuum cooling and freezing process. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 569—576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.025>.
6. Chhanwai, N., Tank, A., Raghavarao, K. S. M. S., Anandhamakrishnan, C. (2012). Computational fluid dynamics (CFD) modeling for bread baking process — a review. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1157—1172. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0804-y>.
7. Demarchi, S. M., Irigoyen, R. M. T., Giner, S. A. (2018). Vacuum drying of rosehip leathers: Modeling of coupled moisture content and temperature curves as a function of time with simultaneous time-varying ascorbic acid retention. *Journal of Food Engineering*, 233, 9—16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.027>.
8. Erdogdu, F., Balaban, M. O., Chau, K. V. (1998). Modeling of heat conduction in elliptical cross section: I. Development and testing of the model. *Journal of Food Engineering*, 38(2), 223—239. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00100-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00100-9).

9. Everington, D. W. (1993). Vacuum technology for food processing. *Food Technology International Europe*, 71—74.
10. Gao, J., Wang, Y., Dong, Z., Zhou, W. (2018). Structural and mechanical characteristics of bread and their impact on oral processing: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(4), 858—872. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13671>.
11. Hy, Z., Sun, D. W. (2000). CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air-blast chilling process. *Journal of Food Engineering*, 46(3), 189—197. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00082-0).
12. Huang, Z., Kan, A., Lu, J., Li, F., Wang, T. (2021). Numerical simulation and experimental study of heat and mass transfer in cylinder-like vegetables during vacuum cooling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 68, Article 102607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102607>.
13. Kozak, O., Telychkun, V. (2024). Mathematical model of vacuum cooling process for wheat bread. *Ukrainian Food Journal*, 13(4), 780—793. DOI: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-4-11>.
14. Козак, О. С., Теличкун, В. І. (2023). Визначення газової проникності скоринки та м'якушки батона в процесі вакуумного охолодження. *Харчова промисловість*, 33—34, 62—70. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2916-2023-33-34-9>.
15. Козак, О. С., Теличкун, Ю. С., Теличкун, В. І. (2024). Визначення реологічних характеристик м'якушки батона для розрахунку параметрів процесу вакуумного охолодження. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 99—108. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-4-9>.

УДК 622.73:602

# BEAD MILLS FOR DESTRUCTION OF MICROBIAL CELLS IN PRODUCTION OF MICROBIAL SYNTHESIS PRODUCTS

M. Kasyniuk, K. Hrininh, A. Ponomarenko, O. Gubenia, K. Omelianenko  
*National University of Food Technologies*

**Key words:**

microorganism,  
destruction,  
beads,  
mill,  
structure

**Article history:**

Received 17.01.2025

Received in revised form  
21.03.2025

Accepted 25.03.2025

**Corresponding author:**

vaz2115turbobit@gmail.com

**ABSTRACT**

The method of disruption the microorganism cells in bead mills is used to disrupt the cells of mycelial fungi, yeasts and certain types of unicellular algae, with the aim of further extracting a wide range of valuable components from the liquid or solid phase of cells — proteins, polysaccharides, lipids, enzymes, biodegradable polymers, amino acids, vitamins and other substances with therapeutic properties.

The bead mill consists of the following main parts: working chamber; working elements; working bodies (beads); bead separator; cooling jacket of the working chamber; suspension circulation system; suspension cooling system; drive of working elements; drive of the bead separator; frame; fixing device of the working chamber.

The orientation of the working chamber — vertical, horizontal and conical affects its functionality and slightly affects productivity.

The working elements of bead mills are discs, fingers or turbines. Disc working elements can have a flat surface or grooves (gaps) — blind and through, straight and complex, usually spiral-shaped. The main purpose of the grooves is to create intensive circulation of beads in the working chamber of the mill. The rotational speed of the working elements of the bead mill is usually 1000—2500 rpm.

The diameter of beads for disruption of the microbial cells is usually 0.4—0.6 mm; the turbine-type working elements allows the use of a smaller bead size. The slot, cartridge and centrifugal separators can be used for separation the processed suspension of microorganisms from the beads. Most often, a combination of a cartridge and centrifugal separator is used.

The proposed classification of bead mills and its elements can be used in educational literature, as well as when choosing conditions and modes of destruction of microbial cells and intensification of the process.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-20

---

## БІСЕРНІ МЛИНИ ДЛЯ РУЙНУВАННЯ КЛІТИН МІКРООРГАНІЗМІВ У ВИРОБНИЦТВІ ПРОДУКЦІЇ МІКРОБНОГО СИНТЕЗУ

М. О. Касинюк, ORCID ID: 0009-0000-2273-6797

К. Р. Грінінг, ORCID ID: 0009-0003-3927-7672

А. М. Пономаренко

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

К. А. Омеляненко, аспірант, ORCID ID: 0009-0007-7142-5056

Національний університет харчових технологій

*Огляд охоплює аналіз продуктів мікробного синтезу, технологія отримання яких включає механічне руйнування клітин; способи і режими руйнування клітин мікроорганізмів у бісерних млинах; узагальнені машинно-апаратні схеми оброблення суспензій мікроорганізмів, які передбачають руйнування їх клітин на прикладі виробництва бета-глюкану, інсуліну та продуктів комплексного перероблення одноклітинних водоростей; аналіз структури та конструкцій бісерних млинів, їх робочих камер, робочих органів і робочих тіл (бісеру) та сепараторів для відділення суспензії від бісеру.*

**Ключові слова:** руйнування, надтонке подрібнення, клітина, бісерний млин, машинно-апаратна схема, мікробний синтез.

**Вступ.** Бактерії, дріжджі, гриби та одноклітинні водорості продукують білки, жири, полісахариди та різноманітні біологічно активні сполуки, зокрема із терапевтичними властивостями, які складно або неможливо синтезувати хімічними методами. Ці речовини знаходяться в рідкій фазі клітини (цитоплазмі) та клітинній стінці. Вони можуть бути виділені із клітин і використані у виробництві харчових добавок, кормів, біорозкладних плівок, добрив, косметики, лікарських засобів та біопалива [11, 34, 66].

Зазвичай, для отримання цінних компонентів клітини мікроорганізмів потрібно зруйнувати для вивільнення практично цінних метаболітів [27].

Відомі такі методи руйнування клітин мікроорганізмів:

*Немеханічні методи:*

- заморожування-розморожування [4];

- оброблення у полі надвисокої частоти [48];

- осмотичний шок (проникнення великої кількості рідини у клітину і її розрив) [59];

- у полі електричних розрядів [4];

- хімічні методи із використанням розчинників (толуол, ефір, бензол, метанол, етилендіамінтетраоцтова кислота, поверхнево-активні речовини та фенілетилловий спирт) [27];

- ферментативні методи (використання ферментів, які руйнують стінку клітини) [19].

*Механічні методи* [4, 97]:

- оброблення у бісерних млинах за рахунок напружень зсуву, стискання і удару, які виникають у клітині під час контакту з бісером;

- ультразвуковий метод, який включає оброблення охолодженої суспензії ультразвуковими хвилями;

- у гомогенізаторах високого тиску, продавлюванням клітинної суспензії через довгу тонку щілину;

- механічна гомогенізація у високошвидкісних блендерах лопатевого типу, проте цей метод більш доцільний для руйнування тканин.

Руйнування клітин мікроорганізмів, наприклад, дріжджів, у лабораторних умовах можливо в ступці бісером, що теж відноситься до механічних методів [4].

В усіх згаданих методах оброблюються водна суспензія клітин, хоча відомі окремі випадки оброблення замороженої біомаси клітин у бісерних млинах [80].

Представники компаній, які виготовляють обладнання для руйнування клітин мікроорганізмів як у лабораторному, так і промисловому масштабі, наголошують, що нині перевага надається механічним методам руйнування клітин мікроорганізмів через високу продуктивність, уникнення контамінації і збереження корисних компонентів [80].

Тема руйнування клітин мікроорганізмів у промислових масштабах розкрита в науковій та довідковій літературі недостатньо. Наявний брак систематизованої інформації про структуру, класифікацію та режими роботи обладнання для механічно-го руйнування, зокрема бісерних млинів.

У пропонованому огляді **поставлено за мету** систематизувати інформацію про руйнування клітин мікроорганізмів у бісерних млинах, зокрема:

- систематизувати інформацію про продукти мікробного синтезу, які отримуються із застосуванням механічних способів руйнування клітин мікроорганізмів;

- розглянути способи і режими руйнування клітин мікроорганізмів у бісерних млинах;

- скомпонувати типові машинно-апаратурні схеми біотехнологічних виробництв із застосуванням бісерних млинів;

- описати конструкції бісерних млинів і запропонувати їх класифікацію.

**Матеріали і методи.** Розглядаються способи та обладнання для руйнування клітин мікроорганізмів — бактерій, дріжджів, міцеліальних грибів і мікроводоростей у бісерних млинах.

Морфологічний аналіз кластерів наукових знань про руйнування клітин мікроорганізмів у бісерних млинах виконано на основі презентацій і рекламної інформації виробників технологій та обладнання, а також наукових статей за тематикою руйнування клітин мікроорганізмів і суміжних напрямків.

**Результати і обговорення.** *Термінологія.* Процес порушення цілісності клітини мікроорганізмів правильно називати «руйнування» (англ. — *disruption*). У науковій літературі також зустрічаються терміни «подрібнення» (англ. — *grinding*), «дезінтеграція» (англ. — *disintegration*). Проте завдання подрібнити клітину на частини не ставиться, зазвичай потрібно порушити цілісність її стінки [97].

Термін «дезінтеграція» з точки зору механічної інженерії означає «процес, коли щось стає слабшим або руйнується шляхом розбиття на менші частини або шматки» [16], проте у біотехнології він також означає «процес незворотного порушення анатомічної цілісності клітин». Тому для уникнення подвійного розуміння в огляді використано лише термін «руйнування».

Для опису руйнування клітин мікроорганізмів шляхом пропускання їх суспензії під високим тиском через тонку щілину традиційно використовують термін «гомогенізація» (англ. — *homogenization*) або «гомогенізація високим тиском» (англ. — *high pressure homogenization*, абр. НРН). В інженерії термін «гомогенізація» означає

процес перетворення незмішуваних рідин у емульсію шляхом механічного перемішування, хімічного чи температурного впливу на них [47]. Під цим терміном також розуміють поєднані процеси подрібнення та рівномірного розподілу частинок у суспензії або емульсії [99]. Хоча клітину не потрібно подрібнювати і рівномірно розподіляти її частинки у суспензії, проте термін «гомогенізація» став загальнозжованим для опису руйнування клітин під тиском у вузькій щілині (див. табл. 2).

*Продукти мікробного синтезу, технологія отримання яких включає механічне руйнування клітин.* Таблиця 1 демонструє різноманітність цінних речовин, синтезованих мікроорганізмами, для отримання яких необхідним етапом є руйнування клітинної стінки.

**Таблиця 1. Продукти мікробного синтезу, технологія отримання яких включає механічне руйнування клітин**

| Мікроорганізм                               | Продукти, які отримують  | Джерело |
|---|--|---------|
| Дріжджі та міцеліальні гриби                |  |         |
| <i>Saccharomyces cerevisiae</i>             | Фермент глюкозо-6-фосфатдегідрогеназа  | 83      |
|   | Фермент інвертази  |         |
|   | Вивільнений розчинний білок  |         |
| <i>S. uvarum, S. carlsbergensis</i>         | Бета-глюкан  | 7, 8    |
| <i>S. cerevisiae</i>                        | Біомолекули для синтезу біопалива  | 27      |
| <i>Kluyveromyces marxianus</i>              | Протеїни   |         |
| <i>Aspergillus flavus</i>                   | Фермент каталаза   | 38      |
|   | Афлатоксини  |         |
| <i>Mortierella isabellina</i>               | Ліпіди   | 62      |
| Одноклітинні водорості                      |  |         |
| <i>Chlorella vulgaris</i>                   | Протеїни   | 43      |
|   | Ліпіди   | 2       |
|   | Білки  | 69      |
|   | Пігменти (хлорофіли та каротиноїди), $\alpha$ -токоферол   |         |
|   | Полісахарид $\beta$ -1,3-глюкан  | 60      |
|   | Рекомбінантні білки  | 88      |
| <i>Chlorella sorokiniana</i>                | Ліпіди   | 59      |
| <i>Scenedesmus</i> sp.                      | Ліпіди   | 59      |
|   | Рекомбінантні білки  | 88      |
| <i>Botryococcus</i> sp.                     | Ліпіди   | 62      |
| <i>Phaeodactylum tricornutum</i>            | Ліпіди   |         |
| <i>Tetradesmus dimorphus</i>                | Метиллові ефіри жирних кислот (компоненти біодизелю)   | 42, 59  |
| <i>Euglena gracilis</i>                     | Вітамін Е  | 60      |
| <i>Tetraselmis suecica</i>                  | Ліпіди   | 59, 76  |
| <i>N. Gaditana, Tetraselmis suecica</i>     | Ліпіди   | 58, 59  |
| <i>Nannochloropsis oculata</i>              | Вітаміни групи В, D3 і K2  | 44, 50  |
|   | Поліненасичені жирні кислоти, зокрема, ейкозапентаєнова кислота, пігмент зеаксантин, $\alpha$ -токоферол | 60      |
| <i>Nannochloropsis</i> sp.                  | Протеїни, ліпіди, поліненасичені жирні кислоти   | 13, 69  |
|   | Ліпіди   | 89      |
| <i>Neochloris oleoabundans</i>              | Білки, ліпіди  | 70      |
| <i>N. oceanica, T. suecica, N. gaditana</i> | Білки, вуглеводи і ліпіди  | 58      |

Продовження таблиці 1

|   |  |            |
|---|--|------------|
| <i>Porphyridium cruentum</i>  | Жирні кислоти, ліпіди, пігменти  | 50         |
|   | Вуглеводи, екзополісахариди  | 63         |
|   | Сульфатовані полісахариди  | 50         |
|   | Пігмент фікоеритрин  | 79         |
| <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>  | Антитіла, вакцини, еритропоетин і рекомбінантний білок 28(VP28)        | 60, 88     |
| <i>Dunaliella salina</i>  | Рекомбінантні білки HBsAg і VP, $\alpha$ -галактозидаза і фітаза       | 26, 37, 88 |
|   | Пігменти: бета-каротин, лютеїн, зеаксантин                             | 60         |
| <i>Isochrysis galbana</i> ,<br><i>Nitzschia laevis</i> ,<br><i>Porphyridium cruentum</i> ,<br><i>Phaeodactylum tricorutum</i> | Поліненасичені жирні кислоти, зокрема, ейкозапентаєнова кислота        | 60         |
| <i>Cryptocodinium cohnii</i> ,<br><i>Ulkania sp.</i> , <i>Schizochytrium limacinum</i>  | Докозагексаєнова кислота   | 60         |
| <i>Haslea ostrearia</i>   | Пігмент маренін  | 60         |
| <i>Eicenia bicyclis</i> ,<br><i>Hijikia fusiformis</i>  | Пігменти фукоксантин   | 60         |
| <i>Rhodophyta</i>   | Полісахариди — альгінати, целюлоза, карагенан                          | 60         |
| Бактерії, ціанобактерії   |  |            |
| Рекомбінантна <i>E. coli</i>  | Інсулін  | 1, 64, 72  |
|   | Рекомбінантний одноланцюговий фрагмент змінної області антитіла (scFv) | 21         |
|   | Білок та інтерферон- $\alpha$ 2b                                       | 61         |
|   | Рекомбінантні терапевтичні білки                                       | 60         |
| <i>Lactococcus lactis</i>   | Внутрішньоклітинні структури   | 25         |
| <i>Arthrospira</i> (Спіруліна)  | Фікоціанін і фенольні сполуки  | 41         |
|   | Ліпіди   | 42         |
|   | Октадекатрієнова кислота ( $\gamma$ -ліноленова кислота, GLA)          | 60         |
|   | Фікоціанін   |            |
| <i>Alcaligenes latus</i>  | Полігідроксидобутірат і полігідроксиалканоат                           | 77         |
|   | Амінокислоти   | 12         |
| <i>Bacillus sp.</i>   | Полімер полігідроксиалканоат   | 14         |
| Ціанобактерії   | Мікроколіни А і В  | 60         |

Після руйнування клітинної стінки механічним способом, наступним етапом є розподіл суміші рідкої та твердої фаз, оскільки цільові продукти можуть міститися в різних компонентах клітини, наприклад, бета-глюкан [7, 8] та фермент інвертаза [83] акумулюються в стінках клітин одноклітинної водорості *Porphyridium cruentum* [50]; рекомбінантні білки HBsAg і VP 28 знаходяться в ядрі, а ферменти  $\alpha$ -галактозидаза та фітаза [37] містяться в хлоропласті одноклітинної водорості *Dunaliella salina*; інсулін концентрується в тільцях включень у клітинах бактерій *Escherichia coli* [1, 64, 72], водночас велика кількість інших цінних речовин перебувають у рідкій фазі.

Клітини дріжджів є джерелом ферментів, білків, вуглеводів для синтезу біопалива, протеїнів, полісахаридів, зокрема, бета-глюкану. Одноклітинні водорості є цінними природними джерелами біоактивних сполук — вітамінів, незамінних амінокислот, поліненасичених жирних кислот, мінералів, каротиноїдів, ферментів та клітковини. Нині мікроводорості стають одними із інноваційних джерел нових функціо-

нальних харчових продуктів [46]. Бактерії *Alcaligenes latus* продукують полігідроксидбутират (PHB) та полігідроксиалканоат (PHA) — компоненти біорозкладного пластику [75].

Звертається увага на перспективи розвитку фармацевтичної біотехнології, що базується на використанні мікроорганізмів і технології рекомбінантної ДНК для виробництва лікарських засобів [60]. Генетично-змінені одноклітинні водорості є потенційним джерелом біологічних сполук для фармацевтичної галузі — антибіотиків, субодиничних вакцин, моноклональних антитіл, гепатотоксичних та нейротоксичних сполук, гормонів, ферментів тощо [37, 65]. Пігменти одноклітинних водоростей використовуються у препаратах для лікування та профілактики ряду хвороб [36, 37].

Деякі одноклітинні водорості, наприклад, *Nannochloropsis oculata*, під впливом ультрафіолетових променів накопичують вітаміни групи B, D<sub>3</sub> і K<sub>2</sub> і вважаються їх веганським натуральним джерелом [44, 50].

Генетично-змінені одноклітинні водорості, дріжджі та бактерії продукують рекомбінантні білки. Наприклад, *E. coli* продукує рекомбінантні білки артемізинін, паклітаксел (таксол), елеутеробін, еритроміцин, епотилон C і D, хумулін, протропін, роферон А, інтерферони, тазонермін, гуматроп та багато інших [60]. Широко використовуються у фармацевтичній біотехнології водорості *Chlamydomonas reinhardtii* [60], *Dunaliella salina* [26, 37, 88].

Безліч цінних біологічно-активних сполук отримується із бактерій. Найбільшого застосування, зокрема у фармацевтичній галузі, знайшла *E. coli*, а важливим продуктом нею продуктом є рекомбінантний людський інсулін [64].

**Способи та режими руйнування клітин мікроорганізмів.** У промислових масштабах клітини мікроорганізмів руйнуються в основному на бісерних млинах і гомогенізацією під високим тиском. Набуває поширення руйнування клітин мікроорганізмів під дією ультразвуку, проте цей метод потребує значних питомих енерговитрат, і поки що є низькопродуктивним, використовується в основному в лабораторних випробуваннях [48, 91].

Розглянемо основні способи та режими руйнування клітин різних мікроорганізмів у бісерних млинах, паралельно наводячи приклади застосування гомогенізації під високим тиском (табл. 2). Звернемо увагу, що для руйнування деяких мікроорганізмів використовуються обидва методи.

Таблиця 2. Способи та режими руйнування клітин мікроорганізмів

| Мікроорганізм  | Обладнання і режими руйнування   | Джерело |
|--|--|---------|
| Міцеліальні гриби та дріжджі                         |  |         |
| <i>Saccharomyces cerevisiae</i>                      | бісерний млин:<br>$n$ — 2000—6000 об/хв; $d$ — 0,38—0,88 мм; $\tau$ — до 3 хв  | 49      |
|  | горизонтальний бісерний млин:<br>$V$ — 1 л; $D$ — 80 мм; $d$ — 1 мм; $n$ — 2400 об/с   | 31      |
|  | бісерний млин конусного типу (CoBall-Mill):<br>$V$ — 0,51 л; $n$ — 1250, 1900, 2550 об/хв; $C$ — до 70% (об/об); $\tau$ — 70 с | 88      |
|  | бісерний млин горизонтальний і вертикальний:<br>$d$ — 0,5—1,25 мм; $C$ — 80—85%  | 27      |
| <i>Kluyveromyces marxianus</i>                       | бісерний млин: $d$ — 0,5—1,25 мм   | 27      |
| <i>Saccharomyces carlsbergensis</i> <i>S. uvarum</i> | центрифуга лабораторна, заповнена бісером  | 8       |

Продовження таблиці 2

|  |   |        |
|--|---|--------|
| <i>Aspergillus flavus</i>  | бісерний млин (Omni® Bead Ruptor 12 Homogenizer):<br>$w$ — 2,1—6 м/с; $\tau$ — 6 циклів по 20 с; матеріал бісеру — скло; $d$ — 0,5 мм   | 38     |
| <i>Mortierella isabellina</i>  | бісерний млин:<br>$d$ — 0,4 мм; $n$ — 2800 об/хв; $Cs$ — 25 г/л; $\tau$ — 5 хв  | 87     |
| Одноклітинні водорості   |   |        |
| <i>Chlorella vulgaris</i>  | бісерний млин (DYNO®-MILL Model MULTI LAB RL):<br>матеріал бісеру — Yttria-стабілізований цирконій<br>$d$ — 0,4—0,6 мм; $V$ — 0,6 л; $n$ — 2000 об/хв; $Cs$ — 6% (w/w); швидкість рециркуляції суспензії — 1,5 л/хв | 30     |
|  | бісерний млин:<br>$w$ — 10 м/с; $d$ — 0,4 мм; $C$ — 80% (об/об); витрата суспензії — 200 мл/хв; $Cs$ — 30—90 г/л  | 43     |
|  | бісерний млин:<br>матеріал бісеру — скло; $d$ — 0,3—1,7 мм; $C$ — 80—90%  | 62     |
|  | бісерний млин:<br>матеріал бісеру — скло; $d$ — 0,4—0,6 мм; $n$ — 1500 об/хв; $\tau$ — 20 хв  | 62, 91 |
|  | бісерний млин:<br>$d$ — 0,4 мм; $n$ — 2039 об/хв; $Cs$ — 25 г/л; $\tau$ — 10 хв   | 2, 62  |
|  | бісерний млин:<br>$d$ — 0,1 мм; $n$ — 2800 об/хв; $Cs$ — 0,5 г/л; $\tau$ — 5 хв   | 42, 62 |
|  | бісерний млин:<br>$d$ — 1,0—1,6 мм; $n$ — 2500 об/хв; $\tau$ — 1—30 хв  | 62, 68 |
|  | бісерний млин:<br>$Cs$ — 25—145 г/кг; $w$ — 6—12 м/с; $\tau$ — 3 хв   | 55, 62 |
|  | гомогенізатор високого тиску (НРН):<br>$P$ — 150 МПа; $k$ — 1—10<br><i>примітка:</i> при великій кількості проходів процес сповільнюється через накопичення клітинних фрагментів                                    | 71     |
|  | гомогенізатор високого тиску (НРН):<br>$P$ — 100 МПа; $k$ — 1—4;  | 13     |
|  | гомогенізатор високого тиску (НРН):<br>$P$ — 270 МПа; $Cs$ — 2%; $k$ — 2  | 69     |
| гомогенізатор високого тиску (УНРН):<br>(ультра високоефективна гомогенізація); $P$ — 250 МПа; $k$ — 1—4 | 13  |        |
| <i>Chlorella sorokiniana</i> (Trebouxiophyceae)  | бісерний млин:<br>$n$ — 2800 об/хв; $Cs$ — 25 г/л; $\tau$ — 5 хв  | 87     |
| <i>Scenedesmus</i> sp. (Chlorophyceae)   | бісерний млин:<br>$d$ — 0,1 мм; $n$ — 2800 об/хв; $Cs$ — 0,5 г/л; $\tau$ — 5 хв   | 42, 62 |
| <i>Botryococcus</i> sp. (Trebouxiophyceae)   | бісерний млин:<br>$d$ — 0,1 мм; $n$ — 2800 об/хв; $Cs$ — 0,5 г/л; $\tau$ — 5 хв   | 42, 62 |
| <i>Phaeodactylum tricoratum</i> (Bacillariophyceae)  | бісерний млин:<br>$n$ — 2000 об/хв; $\tau$ — 10 хв; $Cs$ — 100 мг/л   | 62, 67 |
| <i>Tetradesmus dimorphus</i> (Chlorophyceae)   | бісерний млин:<br>матеріал бісеру — боросилікат; $d$ — 0,1 мм; $Cs$ — 40 г/л; $\tau$ — 5 хв   | 42, 62 |
| <i>Tetraselmis suecica</i>   | бісерний млин:<br>$d$ — 0,4 мм; $n$ — 2040 об/хв; $Cs$ — 100 г/л; $\tau$ — 30 хв  | 62, 76 |

Продовження таблиці 2

|   |  |        |
|---|--|--------|
| <i>Neochloris oleoabundans</i>                                  | гомогенізатор високого тиску:<br>$P$ — 30—150 МПа; $k$ — 1   | 70     |
| <i>Porphyridium cruentum</i>                                    | гомогенізатор високого тиску:<br>$P$ — 40 МПа; $V$ — 10 мл; $Dn$ — 180 мкм   | 50     |
| <i>Nannochloropsis oceanica</i> ,<br><i>Tetraselmis suecica</i> | бісерний млин:<br>матеріал бісеру — цирконій; $d$ — 0,4 мм; $w$ — 10 м/с;<br>$Cs$ — 10 г/кг                                  | 62, 67 |
| <i>Nannochloropsis oculata</i>                                  | гомогенізатор високого тиску:<br>$P$ — 140 МПа; $V$ — 10 мл; $Dn$ — 180 мкм  | 50     |
| Бактерії та ціанобактерії                                       |  |        |
| <i>Alcaligenes latus</i>  | бісерний млин  | 77     |
| <i>Arthrospira</i>  | бісерний млин або кульовий млин  | 41     |
|   | бісерний млин  | 54     |
| <i>Bacillus</i> sp.   | бісерний млин: $d$ — 0,5 мм  | 14     |
| <i>E. coli</i>  | гомогенізатор високого тиску:<br>руйнують як заморожені ( $-20$ °C), так і незаморожені клітини; $P$ — 150 МПа; $k$ — до 1—5 | 21     |
|   | бісерний млин: $d$ — 0,5 мм  | 61     |
| <i>Lactococcus lactis</i>                                       | гомогенізатор високого тиску: $P$ — 200 МПа; $k$ — 1—10;<br>в'язкість рідини — 2,5—7,9 МПа·с; $Dn$ — 80 мкм                  | 25     |

**Примітка:**  $n$  — частота обертання ротора;  $d$  — діаметр бісеру;  $C$  — концентрація бісеру;  $Cs$  — концентрація сухої клітинної маси;  $\tau$  — тривалість оброблення;  $w$  — колова швидкість ротора;  $V$  — об'єм робочої камери;  $D$  — діаметр робочої камери;  $Dn$  — діаметр сопла;  $k$  — кількість проходів суспензії.

Узагальнено дані табл. 2 про методи та режими руйнування клітин мікроорганізмів механічним способом:

а) більшість літературних джерел вказує, що для руйнування клітин грибків, зокрема дріжджів, доцільно використовувати оброблення їхніх суспензій у бісерних млинах;

б) для руйнування одноклітинних водоростей використовують як бісерні млини, так і гомогенізатори високого тиску;

в) для руйнування клітин бактерій використовують гомогенізатори високого тиску.

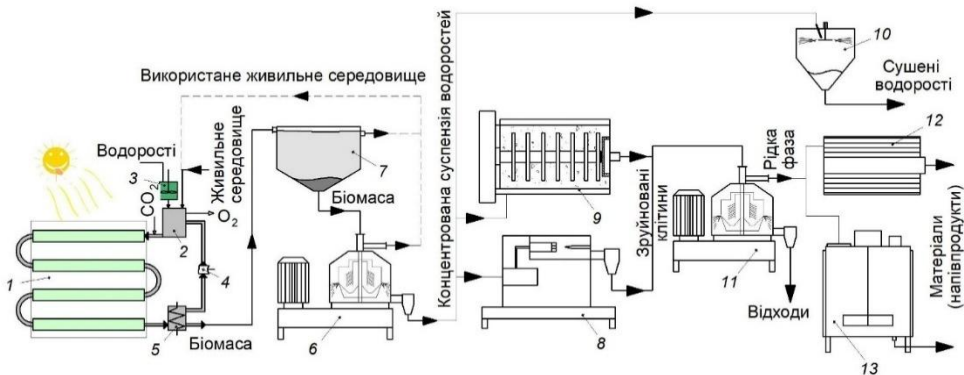
Лише в одному із джерел наводиться приклад руйнування бактерій *E. coli* у бісерному млині при діаметрі бісеру 0,5 мм [61], проте інші дослідники не повідомляють про таку можливість.

Під час оброблення суспензій мікроорганізмів у бісерних млинах діаметр бісеру, зазвичай, складає 0,1—1,5 мм, найчастіше — 0,4—0,6 мм. Використання менших і більших діаметрів бісеру можливе, проте ускладнене на звичайних бісерних млинах з пальцевими і дисковими робочими органами [97]. Для лабораторних досліджень використовується як скляний бісер, так і керамічний або металевий. У промислових масштабах, зазвичай, використовують металевий або керамічний бісер. Металевий бісер дає змогу проводити процес з більшою продуктивністю, проте має високу вартість, яка може складати понад 100 євро за кілограм, а вартість скляного бісеру починається від 10 євро за кілограм.

*Машинно-апаратні схеми виробництва біотехнологічних продуктів із використанням механічних способів руйнування клітин. Узагальнена машинно-апаратна схема виробництва і перероблення одноклітинних водоростей. У промислових масштабах найчастіше переробляються одноклітинні зелені водорості, такі як *Chlorella**

sp., *Nannochloropsis* sp., ціанобактерії *Arthrospira* (спіруліна) [36] (див. табл. 1). Передбачаються такі процеси та використання технологічного обладнання (рис. 1) [11, 66]:

- культивування водоростей. Зазвичай процес відбувається у фотобіореакторі 1 або штучних водоймах;
- збирання і концентрування клітинної біомаси у відстійниках 7, флокуляторах, центрифугах або сепараторах 6;
- руйнування клітин у бісерних млинах 9 або гомогенізаторах високого тиску 8;
- розділення твердої та рідкої фаз зруйнованої клітини у центрифугах або сепараторах 11;
- виділення цільових компонентів із суспензії зруйнованих клітин мікрowodоростей у екстракторах 13, апаратах для мембранного розділення 12 тощо, та їх очищення;
- використання компонентів клітин у виробництві харчових добавок [17, 20], косметики [66], кормів для тварин [84], компонентів косметичних і лікарських засобів [37], біопалива [28] тощо.



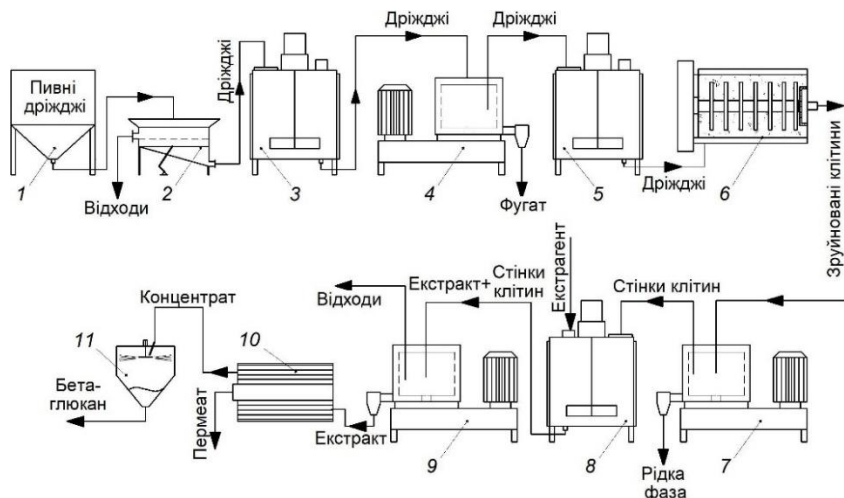
**Рис. 1.** Узагальнена машинно-апаратна схема [66, 97] виробництва і перероблення одноклітинних водоростей із застосуванням руйнування їх клітин: 1 — фотобіореактор; 2 — живильник; 3 — інокулятор; 4 — насос; 5 — фільтр-охолоджувач; 6, 11 — сепаратори соплові; 7 — відстійник; 8 — гомогенізатор високого тиску; 9 — бісерний млин; 10 — розпилювальна сушарка; 12 — мембранний фільтр; 13 — екстрактор

Отримання більшості продуктів із мікрowodоростей, за винятком харчових добавок, потребує операцій їх механічного руйнування у бісерних млинах або на гомогенізаторах під високим тиском. Гомогенізатори високого тиску не використовуються для руйнування клітин водоростей, які утворюють ниткоподібні структури.

*Машинно-апаратна схема виробництва бета-глюкану із використаних пивних дріжджів.* Пивні дріжджі продукують бета-глюкан у складі клітинних стінок [6]. Перед екстрагуванням бета-глюкану клітинні стінки потрібно відділити від рідкої фракції. Тривалість руйнування клітин дріжджів хімічними методами може становити до 36 годин. Проте руйнування клітин механічним способом із використанням бісерного млина [7] відбувається інтенсивно, за декілька хвилин.

Схема (рис. 2) передбачає вилучення крупних домішок із клітинної біомаси на просіювачі 2, видалення гірких сполук у реакторі 3, концентрування клітин у центрифугі 4, попередній автолізис клітин у реакторі 5, руйнування клітин у бісерному млині 6, відділення рідкої фази від стінок на центрифугі або сопловому сепараторі 7, екстрагування бета-глюкану із стінок клітин у екстракторі 8, відділення твердої фази від екстракту на центрифугі або сепараторі 9, концентрування бета-глюкану шляхом діалізу на мембранних фільтрах 10 та його сушіння у розпилювальній сушарці 11.

Якщо проводити процес у напівпромислових масштабах, то використання однієї центрифуги є достатнім на етапах промивання дріжджової суспензії, відділення твердої і рідкої фази клітин, відділення клітинних залишків від екстракту. Для високопродуктивного безперервного виробництва на кожному етапі доцільно використати сепаратори соплового типу.

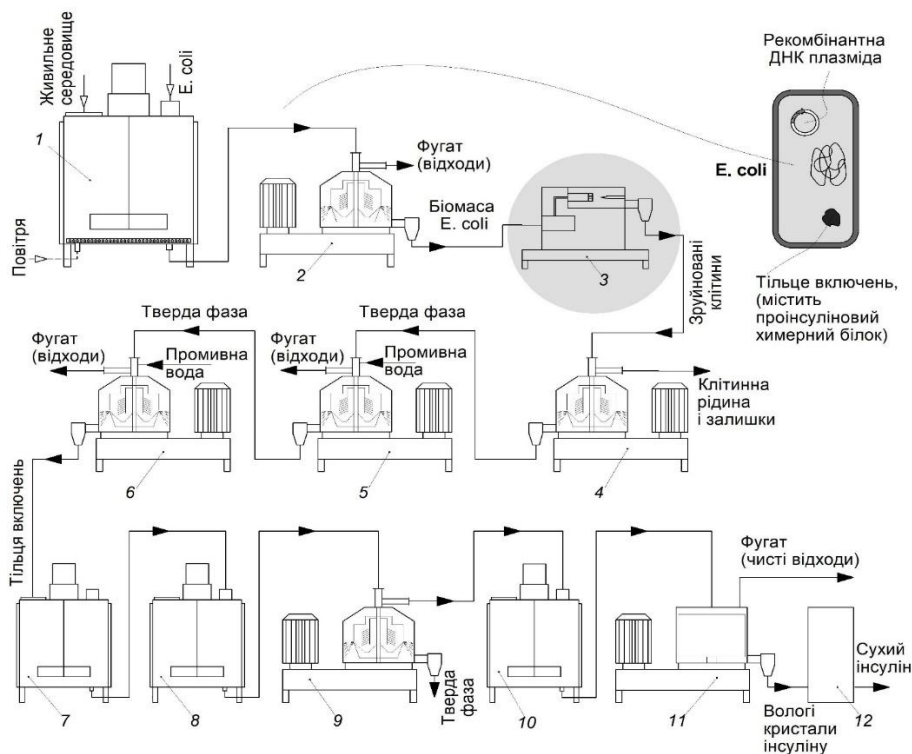


**Рис. 2. Машинно-апаратурна схема виробництва бета-глюкану із використаних пивних дріжджів [6, 97]:** 1 — ємність із дріжджами; 2 — фільтр; 3 — реактор з мішалкою; 4 — сопловий сепаратор для суспензій; 5 — реактор для автолізу клітин; 6 — бісерний млин; 7 — центрифуга або сопловий сепаратор; 8 — екстрактор; 9 — центрифуга або сопловий сепаратор; 10 — мембранний фільтр; 11 — сушильний апарат розпилювального типу

Руйнування клітин відбувається у бісерному млині. Рекомендований розмір бісеру — 0,5 мм. Оптимальними параметрами для руйнування клітин є концентрація клітинної суспензії 5%, співвідношення дріжджова суспензія/бісер 1:2 об/об, кількість циклів оброблення у бісерному млині — 3. За таких параметрів ефективність руйнування складає 99,8% [6].

**Машинно-апаратурна схема виробництва рекомбінантного людського інсуліну із тілець включень *E. Coli*.** Інсулін накопичується в тільцях включень генетично-модифікованих штамів бактерії *E. coli*. Схема виробництва передбачає руйнування бактерій *E. coli* у гомогенізаторах під високим тиском, відділення тілець включень та вилучення з них інсуліну [72] (рис. 3).

Культура бактерій *E. coli* вирощується у ферментаторі 1 і концентрується у сопловому сепараторі 2. Клітини *E. coli* руйнують у гомогенізаторі 3 під тиском 300 МПа продуктивністю 150 мл/хв (звернемо увагу на брак даних відкритого доступу про спосіб і режими руйнування клітин). Відділення рідини та клітинного сміття відбувається у сепараторі 4. Двоетапне відділення і промивання отриманої твердої фази з метою вилучення тілець включень відбувається в сепараторах 5 і 6. Тільця включень оброблюються в реакторі 7 з метою згортання білків та у реакторі 8 для осадження чужорідних білків. Відділення твердих відходів відбувається у сепараторі 9, кристалізація інсуліну — у кристалізаторі 10, відділення вологи із кристалів — на центрифугу 11. Сушіння інсуліну відбувається в сублимаційному сушильному апараті 12.



**Рис. 3. Машинно-апаратна схема виробництва рекомбінантного людського інсуліну із тілець включень *E. coli*** (сірим виділено етап руйнування клітин *E. coli*): 1 — ферментатор; 2 — сопловий сепаратор; 3 — гомогенізатор високого тиску; 4, 5, 6, 9 — соплові сепаратори; 7, 8 — реактори; 10 — кристалізатор; 11 — центрифуга; 12 — сублімаційний сушильний апарат

Незважаючи на ефективність та широке застосування механічних методів руйнування клітин, вони можуть погіршити якість білка в тілцях включення більше, ніж методи на основі лізоциму [74].

Компанія Eli Lilly також використовує спосіб виробництва інсуліну з клітин дріжджів, який не передбачає їх механічного руйнування [1].

**Конструкції бісерних млинів.** У бісерних млинах руйнування клітин мікроорганізмів відбувається між твердими частинками — бісером, в основному за рахунок напружень зсуву і стискання [32]. Під руйнуванням клітин розуміємо розрив клітинних стінок і мембран. Подальший процес оброблення, коли клітинні стінки і мембрани розділяються на менші елементи, доцільно називати подрібненням, проте воно не є раціональним і призводить до зайвих витрат енергії.

Зазвичай, млин має нерухому робочу камеру (також використовуються назви «Стакан» і «Барабан») циліндричної форми, у якій робочі тіла — бісер, отримують рух від ротора. У цьому разі робочі тіла — бісеринки, розглядаються як частина машини. Бісер, зазвичай, буває металевим, керамічним або скляним [95]. Скляний бісер використовується в лабораторних бісерних млинах або млинах невеликого об'єму. Ротор бісерного млина — це вал з робочими органами, зазвичай, пальцеподібної або дископодібної форми. Частота обертання ротора у більшості випадків складає від 500 до 3000 об/хв.

Основна задача ротора — надати рух всьому об'єму бісеру. Слід зауважити, що бісер у стакані млина здійснює складний рух [15]. Отримуючи рух під час контакту з

робочими органами — пальцями або дисками, бісер під дією відцентрової сили відкидається до стінок млина. У зоні контакту з робочими органами швидкість руху бісеру більша, і він інтенсивніше рухається до стінок. У проміжках між робочими органами, із віддаленням від їх поверхні, швидкість бісеринок знижується, і бісер у цій зоні циркулює до осі обертання ротора.

За рахунок циркуляції бісерної маси та нерівномірного тиску у її об'ємі частота і напрям обертання бісеринок є різними, тому на клітини, які знаходяться між бісеринками, діють зусилля зсуву, які у поєднанні із стисканням розривають їх стінки.

У деяких дослідженнях, презентаціях виробників обладнання висувається гіпотеза про ударні навантаження під час оброблення клітин у бісерних млинах [24]. Удар, зазвичай, розглядається як взаємодія двох тіл, яка відбувається зі значними силами (прискоренням) впродовж короткого проміжку часу [93]. Проте у бісерному млині не виникає умов для значної різниці швидкостей, і відповідно, прискорень між частинками, тому автори статті не розглядають удар як значущу рушійну силу руйнування клітин між бісеринками.

Діаметр бісеру для руйнування клітин зазвичай складає від 0,4 до 1,5 мм (див. табл. 2), проте в інших сферах застосування, наприклад, у спеціальних конструкціях бісерних млинів для отримання наночастинок використовують бісер діаметром менше 0,01 мм, а у виробництві фарбувальних матеріалів розміри бісеру може перевищувати 2 мм.

Виробники бісеру наголошують, що діаметр бісеру має бути у 10—20 разів більшим за розмір частинки, яка обробляється [95]. Проте це правило на завжди виконується, що видно із табл. 2.

Звернемо увагу на типову помилку проєктувальників обладнання та дослідників-початківців, які намагаються руйнувати клітини мікроорганізмів або подрібнювати різні тверді частинки в бісері малого діаметру. Зі зменшенням розміру бісеру понад певну межу, зазвичай це 0,3—0,4 мм, ефективність (продуктивність) процесу різко знижується [97]. Це пояснюється тим, що сипкість бісерної маси зі зменшенням діаметра бісеру знижується. Рух отримує лише невеликий об'єм бісеру, який контактує з робочими органами, а до віддалених шарів бісеру рух не передається. Про це явище не згадується в науковій літературі та рекламних матеріалах виробників бісерних млинів.

В окремих рекламних презентаціях виробників наводяться спеціальні конструкції бісерних млинів, зокрема з турбіноподібними робочими органами [18] або без виражених робочих органів, проте з інтенсивними різнонаправленим рухом ємкостей з бісером (флаконів невеликого об'єму). Зазвичай, не наводиться пояснення й обґрунтування таких конструкцій, проте очевидно, що вони інтенсифікують рух бісеру і його циркуляцію в стакані млина. Це дає змогу використати бісер малого діаметра — менше за 0,3—0,4 мм, що неможливо реалізувати в типових конструкціях млинів, і, відповідно, збільшити продуктивність процесу руйнування клітин або забезпечити подрібнення твердих частинок до нанорозмірів.

Іноді дослідники використовують для руйнування клітин мікроорганізмів звичайні флаконні лабораторні центрифуги або барабанні центрифуги періодичної дії, які наповнюються бісером [6, 7].

Звернемо увагу, мета оброблення клітин — це порушення їх цілісності з подальшим відділенням рідкого вмісту клітини від клітинних стінок, мембран, а також відділення тілець включень. У літературі не зазначається, що в бісерному млині під дією значних відцентрових сил вивільняється вміст клітини. Це помітно на прикладі того, що в полі зору мікроскопа не спостерігається зафарбованих (інактивованих) клітин

(або їх дуже мало). Спостерігаються або живі клітини на початку оброблення, або «пусті» клітини, їх клітиноподібні стінки та фрагменти [98]. Можна зробити припущення, що в бісерних млинах під дією відцентрових сил із клітин з порушеною стінкою миттєво вивільняється рідкий вміст. Подальше оброблення на центрифугах і сепараторах завершить повне відділення твердої і рідкої фаз.

*Вибір орієнтації робочої камери бісерного млина.* Висока частота обертання робочих органів, яка становить від 1000 до 3000 об/хв (табл. 2), робить бісерні млини подібні до центрифуг, оскільки відцентрова сила, яка діє на бісер, значно (у десятки і сотні разів) перевищує силу тяжіння. Тому вплив гравітації (сили тяжіння) на процес оброблення є мізерним порівняно з відцентровою складовою. Отже, немає принципової різниці у продуктивності оброблення у млинах із вертикальною і горизонтальною робочими камерами [18, 20, 25].

Однак з точки зору функціональності, працездатності та обслуговування існують певні переваги та недоліки (табл. 3).

Таблиця 3. Порівняння функціональності бісерних млинів [18]

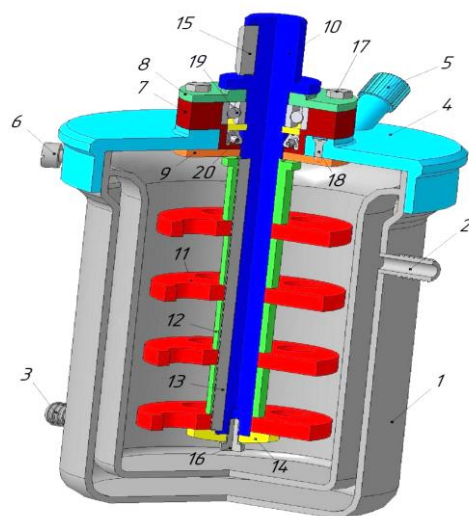
| Тип робочої камери | Переваги   | Недоліки   |
|--------------------|--|--|
| Горизонтальна      | Менша пускова потужність (бісер не навантажує робочі органи). Заміна деталей і ремонт вузлів простий | Більша виробнича площа. Більший час вивантаження залишків суспензії та бісеру                          |
| Вертикальна        | Менша виробнича площа. Менший час вивантаження залишків суспензії та бісеру                          | Більша пускова потужність (бісеру навантажує робочі органи). Заміна деталей і ремонт вузлів складніший |

*Бісерні млини із робочою камерою вертикального типу.* Бісерні млини з робочою камерою вертикального типу, зазвичай періодичної дії, мають малий об'єм робочої камери (1—5 дм<sup>2</sup>) і застосовуються для виробництв низької продуктивності або у лабораторіях. Проте нині виробники пропонують конструктивні рішення високопродуктивних вертикальних млинів безперервної дії [81].

Розглянемо приклад лабораторного бісерного млина з робочою камерою вертикального типу, який є частиною експериментального стенду для дослідження процесів руйнування клітин мікроорганізмів та надтонкого подрібнення компонентів косметичних і фармацевтичних засобів [32]. У робочій камері бісерного млина (рис. 4) знаходиться вал 10 з робочими органами — дисками 11, частота обертання якого регулюється від 130 до 2700 об/хв за допомогою перетворювача частоти. У стакан 1 закидається бісер і оброблювальна суспензія. Стакан закривається кришкою 4, яка також тримає підшипниковий вузол 7 із валом 10. Хвостовик валу з'єднується з приводною муфтою, робоча камера фіксується на станині млина. Утворена теплота відводиться через охолоджувальну сорочку.

Недолік такого типу млинів — необхідність розбирання робочої камери, видалення її вмісту для відділення обробленої суспензії від бісеру і промивання бісеру. При цьому значна частина продукту залишається на поверхні бісеринок та втрачається під час його промивання.

*Бісерні млини із робочою камерою горизонтального типу.* Такі млини, зазвичай, працюють у безперервному режимі та оснащені пристроями для відділення суспензії від бісеру і зовнішніми контурами для циркуляції суспензії.



**Рис. 4.** Схема робочої камери лабораторного бісерного млина вертикального типу: 1 — стакан; 2, 3 — патрубки для охолоджувальної рідини; 4 — кришка; 5 — пробовідбірник; 6 — фіксатор кришки; 7 — підшипниковий вузол; 8 — кришка; 9 — шайба; 10 — вал; 11 — диск; 12 — втулка; 13 — шпонка; 14 — шайба; 15 — шпонка; 16, 17, 18 — гвинти; 19 — підшипник

На рис. 5 показані часто вживані конструкції бісерних млинів із робочою камерою горизонтального типу, з пальцевими (а) та дисковими (б) робочими органами [5].

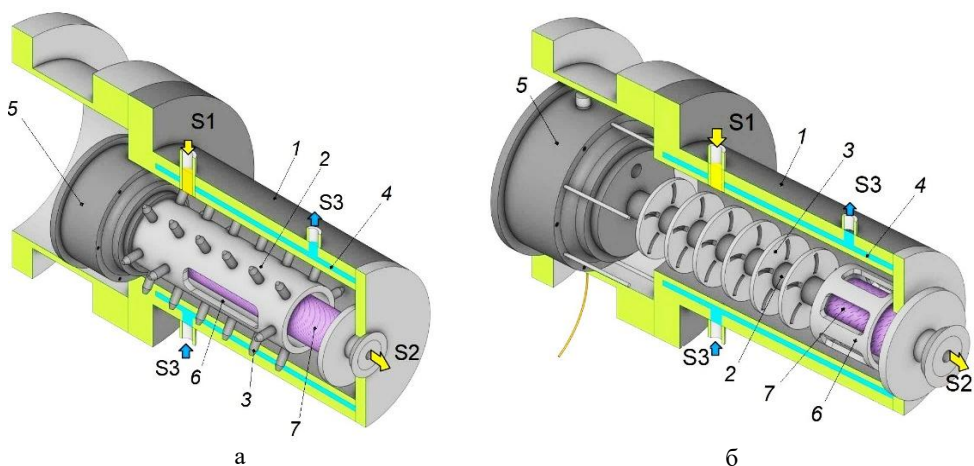
Пальці або диски 3 кріпляться на валу (роторі) 2, який обертається з частотою 1000—2000 об/хв. Оброблювальна суспензія безперервно подається через патрубок S1 і відводиться через патрубок S2. Перед відведенням суспензія проходить пристрої для відділення бісеру — відцентровий 6 і патронний 7 сепаратори. У випадку з пальцевими робочими органами (рис. 5, а), відцентровий сепаратор виготовлений у вигляді вікон у роторі, а у випадку із дисковими робочими органами (рис. 5, б) — у вигляді окремого вузла 6. Охолоджувальна рідина безперервно подається і відводиться із охолоджувальної сорочки 8 через патрубки S3.

Перевагами таких конструкцій є можливість безперервного процесу оброблення, керування швидкістю подрібнення частинок суспензії або руйнування клітин мікроорганізмів, організація зовнішнього контуру оброблювальної суспензії та уникнення застійних зон. Процес миття бісеру та гігієнічного оброблення робочої камери не потребує розбирання млина; млин може бути підключений до СІР систем миття та стерилізації [6, 22].

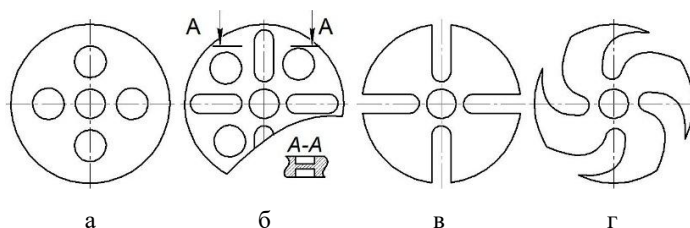
Щодо вибору пальцевих або дискових робочих органів у науковців і виробників немає єдиної думки. У більшості випадків для руйнування клітин мікроорганізмів (див. табл. 2) використані дискові робочі органи. У презентаціях виробників теж переважають млини з дисковими робочими органами. Пальцеві робочі органи дають змогу незначно підвищити продуктивність оброблення [98], проте призводять до зниження довговічності бісеру, особливо скляного.

*Види дискових робочих органів бісерних млинів.* Завдання швидкообертового диска — за рахунок контакту із бісером надати інтенсивного руху всій масі бісеру та забезпечити його циркуляцію у робочій камері млина.

Диски з плоскою поверхнею (рис. 6, а) надають обертового руху прилеглим шарам бісеру, який під дією відцентрової сили відкидається до стінок робочої камери і далі знову витісняється потоком бісеру до осі робочої камери.



**Рис. 5.** Узагальнені конструкції бісерних млинів з робочою камерою горизонтального типу: а — з пальцевими робочими органами; б — з дисковими робочими органами; 1 — стакан; 2 — ротор; 3 — робочі органи (пальці або диски); 4 — охолоджувальна сорочка; 5 — підшипниковий вузол з ущільненнями; 6 — відцентровий сепаратор бісеру; 7 — патронний сепаратор бісеру; 8 — охолоджувальна сорочка. Патрубки: S1 — вводу суспензії; S2 — виходу суспензії; S3 — входу і виходу рідини в охолоджувальну сорочку



**Рис. 6.** Види дискових робочих органів дискових млинів: а — диск з плоскою поверхнею та отворами для руху суспензії; б — диск із глухими пазами (канавками); в — диск із прямими наскрізними канавками; г — диск із наскрізними канавками складної (спіралеподібної) форми

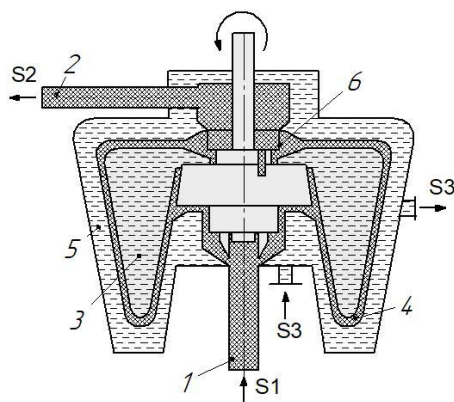
Більш складні конструкції дисків [5, 18, 22, 23] передбачають наявність пазів (канавок) глухих (рис. 6, б) або наскрізних (рис. 6, в), прямих (рис. 6, в) або складної форми, зазвичай спіральної (рис. 1, г), виконаних на певну довжину (рис. 6, б) або на всю довжину, до бічної поверхні (рис. 6, г). Такі конструкції забезпечують контакт бісеру з диском не лише на бічній поверхні, а й на всій поверхні канавок. Зчеплення бісеру з диском відбувається не лише за рахунок сил тертя, а й за рахунок притискання боковими поверхнями канавок, що надає бісеру додаткового імпульсу за рахунок відцентрової сили, забезпечує його інтенсивну циркуляцію в об'ємі робочої камери й обертання бісеринок з різною швидкістю. Відповідно, на частинки оброблювальної суспензії діють більші зусилля зсуву та стиснення.

Деякі виробники комбінують різні типи дискових робочих органів у одній робочій камері [23], зокрема диски із плоскою поверхнею і диски з наскрізними пазами складної спіралеподібної форми.

*Бісерні млини з робочою камерою конусного типу.* Бісерні млини з робочою камерою конусного типу з кільцевим зазором (також відомі як CoBall) рекомендуються

компанією-виробником ProXES GmbH для подрібнення компонентів фармацевтичних засобів. Для руйнування клітин мікроорганізмів млини такого типу рекомендуються фахівцями біотехнологічної галузі [80].

Продукт вводиться в камеру подрібнення за допомогою зовнішнього насоса. Руйнування клітин (або подрібнення частинок суспензії) здійснюється в просторі між статорно-конічною робочою камерою і конічним ротором [56] (рис. 7).



**Рис. 7. Бісерний млин із робочою камерою конусного типу [56]:** 1 — канал введення оброблювальної суспензії; 2 — канал відведення обробленої суспензії; 3 — конусний ротор з охолоджувальною сорочкою; 4 — зазор між ротором і статором; 5 — статор з охолоджувальною сорочкою; 6 — вузол відділення суспензії від бісеру і повернення бісеру у робочу камеру. Патрубки: S1 — входу суспензії; S2 — виходу обробленої суспензії; S3 — подачі і виходу води в охолоджувальну сорочку

Розмір зазору між ротором і статором — 6,5—17,0 мм. Рух ротора викликає радіальне переміщення бісеру. У міру просування бісерної маси з продуктом швидкість руху збільшується, ймовірно, за рахунок збільшення відцентрових сил внаслідок збільшення діаметра робочої камери. Відповідно, зростають напруження зсуву. Після проходження зазору суспензія відокремлюється від бісеру на ситі та відводиться, а бісер через канал повертається в робочу камеру.

Виробник звертає увагу, що на якість готового продукту впливають [56]:

- частота обертання ротора;
- зазор між ротором і статором у зоні руйнування (подрібнення);
- матеріал і діаметр бісеру;
- швидкість потоку;
- навантаження на бісер.

Можна припустити, що навантаження на бісер залежить від частоти обертання ротора і густини бісеру.

Наголошується, що такі млини надають продукту у 4 рази більше енергії, ніж млини звичайних конструкцій, тому під час оброблення виділяється значна кількість теплоти. З метою інтенсивного охолодження статор млина має водяну сорочку, а у пустагілий ротор також подається охолоджувальна рідина.

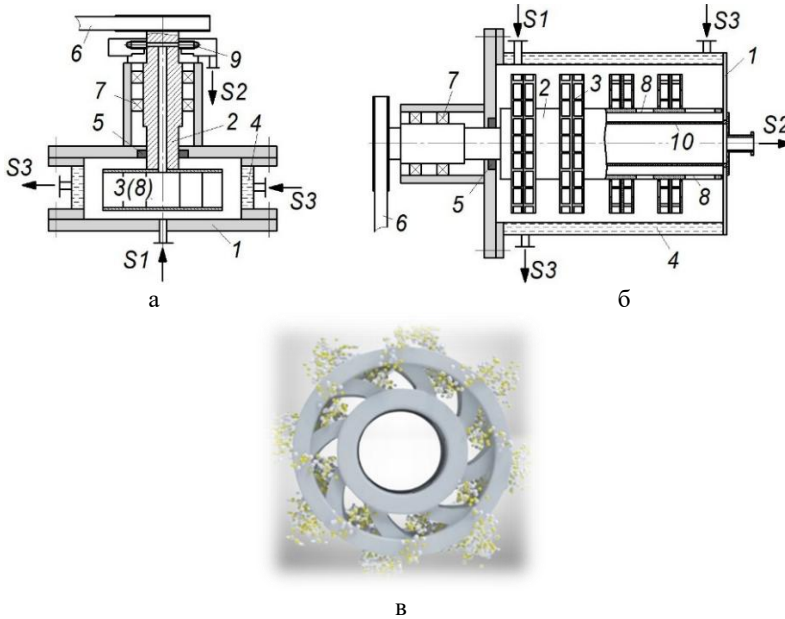
Переваги бісерних млинів з робочою камерою конусного типу [56]:

- якісний гранулометричний склад готового продукту;
- якісний контроль температури суспензії під час оброблення;
- ефективний для високов'язких продуктів;
- швидке переналагодження на інші продукти;

- очищення відбувається без видалення бісеру;
- економне використання мийних засобів і сумісність із системами СІР;
- відповідають умовам застосування у виробництві компонентів фармацевтичних засобів.

*Бісерні млини з робочими органами турбінного типу.* Звертається увага на використання такого типу млинів для делікатного оброблення наночастинок без значних пошкоджень кристалів [18], і, аналогічно, для руйнування клітини без пошкодження її цінних компонентів.

Робочий орган таких млинів (рис. 8, а) виконаний у вигляді турбінного колеса [18] і нагадує конструкцію відцентрового сепаратора бісеру (для порівняння, див. рис. 5 і 9). Інших робочих органів у робочій камері немає.



**Рис. 8. Конструкції бісерних млинів із робочими органами турбінного типу:** а — млин із одним турбінним колесом [18]; б — млин із набором турбінних коліс [Boyee, 2025]; в — ілюстрація циркуляції бісеру у млині із турбінним робочим органом [15]; 1 — стакан; 2 — ротор; 3 — робочі органи (турбінні колеса); 4 — охолоджувальна сорочка; 5 — ущільнення; 6 — привід; 7 — підшипниковий вузол; 8 — відцентровий сепаратор; 9 — пристрій відведення суспензії; 10 — патронний сепаратор бісеру. Патрубки: S1 — вводу суспензії; S2 — виходу суспензії; S3 — входу і виходу рідини у охолоджувальну сорочку

Відомі млини з декількома робочими турбіноподібними органами [15] (рис. 8, б). Ефективність роботи таких млинів пояснюється тим, що суспензія мікроорганізмів або твердих частинок разом з бісером під дією відцентрової сили викидається з турбіни до стінок робочої камери, далі виштовхується до осі ротора і знову всмоктується в турбіну [15] (рис. 8, в). Отже, такий тип млинів надає достатнього руху бісеру малого діаметра. На типових конструкція млинів із робочими органами пальцевого і дискового типів такого ефекту досягти неможливо.

Особливість робочих органів турбінного типу полягає в тому, що вони виконують функції як перемішування, так і розділення бісеру. Розробники звертають увагу на оптимізацію конструкції сегментних пластин турбіни (сепаратора) вертикального ти-

пу шляхом низького співвідношення його висоти до діаметра. Ротор забезпечує високу роздільну здатність бісеру навіть за низької відцентрової сили. Низька відцентрова сила призводить до низької енергії удару бісеринок, і, наночастинки або компоненти клітини під час оброблення не пошкоджуються. Ротор із низьким співвідношенням висоти до діаметра забезпечує рівномірний потік суспензії, завдяки чому уникають локальних пошкоджень продукту [18].

*Пристрої для відділення суспензії від бісеру.* Інноваційні бісерні млини безперервної дії передбачають наявність пристрою для відділення суспензії від бісеру. За відсутності сепаратора бісеру неможливо організувати безперервне оброблення суспензії, робочу камеру бісерного млина потрібно розбирати та відділяти суспензію від бісеру на ситі [33]. За такої умови значна кількість суспензії залишається на поверхні бісеру і втрачається під час його миття.

Найпростішим сепаратором бісеру є щілинний: зазвичай, між патрубком відведення суспензії і пластиною за допомогою гвинтового механізму встановлюється зазор, через який проходять частинки суспензії з рідиною і не проходить бісер. Нині виробники обладнання рідко пропонують такі конструкції. Проте відомий механізм, який виявляє зміну внутрішнього тиску, що пов'язана з опором потоку суспензії в щілинному зазорі, і автоматично регулює щілинний зазор [18]. Цей механізм запобігає засміченню щілини, що забезпечує тривалу стабільну роботу. Водночас щілинні сепаратори фіксованого типу можуть бути закупорені грубими частинками або бісером. Щілинні сепаратори в основному застосовується при подрібненні частинок від субмікрон до десятків мікрметрів із застосуванням бісеру розміром від 0,5 до 3 мм. Такий тип сепаратора розділяє суспензій в'язкістю до 10 000 МПа·с.

Сепаратор (фільтр) патронного типу (див. рис. 5, а, б, поз. 7; рис. 9, в, поз. 10) виконується з пористого матеріалу, сита або намотуванням на перфоровану трубку тонкого дроту. Зазвичай, використовується для бісеру розміром понад 0,1 мм [18]. Такі конструктивні рішення не є ефективними у разі значної концентрації бісеру у зоні розділення.

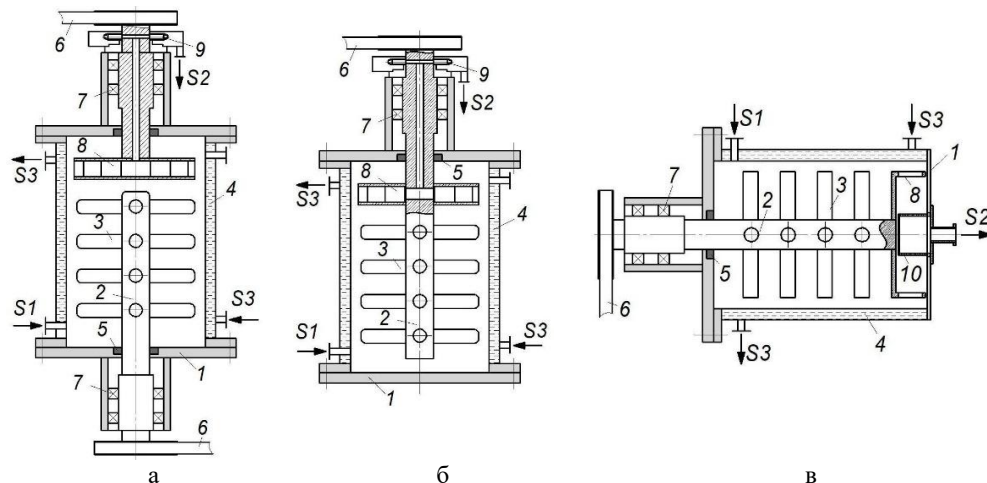
Відцентровий сепаратор бісеру (рис. 9) є ефективнішим порівняно із щілинним або патронним. Дає змогу відділяти від суспензії найдрібніші види бісеру, до 15 мкм [18].

Сепаратор виготовляється у вигляді турбінного колеса, насадженого на пустотілий ротор бісерного млина (див. рис. 5, а, б, поз. 6; рис. 9, а, б, с, поз. 8). На зовнішній циліндричній поверхні колеса вирізані вікна, у які потрапляє суспензія з подрібненим продуктом або зруйнованими мікроорганізмами, і відводиться через пустотілий ротор.

Швидкість осадження частинок у гравітаційному і відцентровому полях залежить від розміру — менші частинки осідають повільніше. Діаметр бісеринок — 0,3—2,0 мм, а частинок суспензії — менше за 0,05 мм, тому бісер під дією відцентрових сил рухається до стінок бісерного млина зі швидкістю значно більшою, ніж частинки [96].

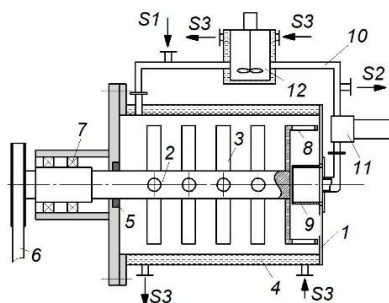
Умова роботи відцентрового сепаратора: витрату суспензії потрібно підібрати так, щоб швидкість її руху вглиб сепаратора була більшою за швидкість руху частинок назовні під дією відцентрових сил. Бісер під дією відцентрових сил рухається назовні швидше за частинки суспензії і викидається із сепаратора, а частинки разом з рідиною відводяться через пустотілий ротор. Конструкція, у якій сепаратор отримує рух від окремого приводу, є раціональнішою, тому що дає змогу налаштувати оптимальні режими подрібнення і відділення бісеру [39].

Отже, відцентровий сепаратор бісерного млина дає змогу якісно розділити суспензію від бісеру за умови раціонального вибору швидкості обертання.



**Рис. 9. Конструкції робочих камер бісерних млинів [18]:** а — вертикальний бісерний млин із спільним приводом ротора і відцентрового сепаратора; б — вертикальний бісерний млин із окремим приводом відцентрового сепаратора; в — горизонтальний бісерний млин із відцентровим та патронним сепараторами; 1 — стакан; 2 — ротор; 3 — робочі органи; 4 — охолоджувальна сорочка; 5 — ущільнення; 6 — привід; 7 — підшипниковий вузол; 8 — відцентровий сепаратор; 9 — пристрій відведення суспензії; 10 — патронний сепаратор бісеру. Патрубки: S1 — вводу суспензії; S2 — виходу суспензії; S3 — входу і виходу рідини у охолоджувальну сорочку

*Бісерні млини із зовнішнім контуром циркуляції суспензії.* Деякі виробники виділяють окрему класифікацію бісерних млинів за структурою робочого циклу — періодичної дії, безперервної дії прохідні і безперервної дії циркуляційні. Більшість промислових бісерних млинів безперервної дії є циркуляційними і оснащені системами зовнішніх контурів для циркуляції суспензії [5, 18, 22, 92]. Узагальнена схема бісерного млина із зовнішнім контуром суспензії показана на рис. 10.



**Рис. 10. Бісерний млин, оснащений зовнішнім контуром циркуляції суспензії:** 1 — стакан; 2 — ротор; 3 — робочі органи; 4 — охолоджувальна сорочка; 5 — ущільнення; 6 — привід; 7 — підшипниковий вузол; 8 — відцентровий сепаратор; 9 — патронний сепаратор; 10 — зовнішній контур циркуляції суспензії; 12 — охолоджувальна камера для суспензії. Патрубки: S1 — вводу суспензії; S2 — виходу суспензії; S3 — входу і виходу рідини у охолоджувальну сорочку

Суспензія після відділення від бісеру подається насосом 11 у зовнішній контур 10 циркуляції і знову повертається у бісерний млин. У разі організації безперервної структури робочого циклу незначна частина суспензії відводиться із контуру, а інша — повертається назад у млин. У деяких випадках у зовнішньому контурі передбачена проміжна камера 12 для охолодження суспензії. Більшість виробників наводять її лише на схемах оброблення суспензії твердих частинок і не передбачають її застосування для охолодження суспензії мікроорганізмів.

Хоча кількість циклів циркуляції суспензії не наводиться, на основі аналізу (див. табл. 2) і згадок у презентаціях виробників можна узагальнити, що вона не перевищує 10 і, зазвичай, складає 3—5.

Системи циркуляції суспензії зовнішнім контуром встановлюються частіше на бісерних млинах із горизонтальною робочою камерою, але іноді їх встановлюють і на млинах з вертикальною камерою [92].

*Види робочих тіл бісерних млинів.* Робочі тіла бісерних млинів — бісер, тобто кульки невеликого діаметра. Зазвичай, діаметр бісеру для руйнування клітин мікроорганізмів — від 0,1 до 2,0 мм, проте може сягати менше за 0,03 мм для отримання наночастинок, та понад 3,0 мм — у хімічному виробництві (найчастіше — під час виготовлення фарб). Бісер виготовляють зі скла [51, 53, 73], кераміки [51, 53, 73] або сталі [51].

Скляний бісер часто використовують у лабораторних млинах та в невеликих виробництвах. Зазвичай, використовують скло:

- боросилікатне;
- натрієво-вапняне;
- алюміній-борсилікатне;
- кварцове (синтетичний діоксид кремнію).

Керамічний бісер більш поширений за скляний. Приклади матеріалу керамічного бісеру:

- оксид цирконію;
- суміш карбиду вольфраму і оксиду цирконію;
- оксид церію;
- цирконій-алюміній-оксид;
- спечений силікат цирконію;
- оксид алюмінію;
- діоксид кремнію.

Для покращення характеристик керамічні суміші додатково стабілізують ітрієм або церієм.

Сталевий бісер виготовляють з підшипникової та хромованої сталі.

Керамічний бісер з оксиду цирконію, стабілізованого ітрієм, доречно використовувати для роботи з компонентами лікарських засобів і руйнування клітинної стінки мікроорганізмів [53, 73], а бісер з підшипникової сталі рекомендований для роботи з харчовими продуктами [18].

Існують певні правила підбору виду та роду бісеру [51]:

- для продуктів, що легко подрібнюються, використовуються робочі тіла меншого розміру;
- для продуктів, які важко подрібнюються, доречно обрати робочі тіла більшого розміру;
- робочі тіла повинні бути в 2—3 рази більшими, ніж зазор (пори) сепаратора або фільтра у млині (наприклад, щілинне сито, ситовий патрон);

- робочі тіла мають бути принаймні в 5 разів меншими за відстань між краєм робочого органу (диска або пальця) та стінкою робочої камери;
- розмір робочих тіл повинен бути приблизно у 20—30 разів більший за початковий розмір частинок ( $d_{95}$ ) подрібнюваного продукту;
- цільовий середній розмір частинок ( $d_{50}$ ) продукту після подрібнення становить приблизно 1/1 000 розміру робочого тіла, наприклад [51, 73]:

$$\text{розмір робочого тіла } 2 \text{ мм} \rightarrow d_{50} = 0,002 \text{ мм} = 2,0 \text{ мкм.}$$

Спостерігається тенденція до використання робочих тіл набагато менших розмірів (<100 мкм) для нанонізації компонентів лікарських засобів [45].

*Інші приклади використання бісерного оброблення клітин.* Компанія «BioSpec Products» (США) виробляє лабораторні пристрої, які руйнують клітини мікроорганізмів всередині мікрофлаконів об'ємом 2,0 мл. Пристрій підключається до резервуара з рідким азотом для охолодження суспензії до  $-196$  °С, у результаті чого суспензія стає порошкоподібною, а не рідкою [80].

*Узагальнення і систематизація структури бісерних млинів.* У науковій і навчальній літературі недостатньо систематизованої інформації про конструкції бісерних млинів. На основі цього огляду пропонується систематизувати бісерні млини за структурою, типом робочої камери, типом робочих органів і сепараторів бісеру. Інформація буде корисною для підготовки навчальної та довідкової літератури.

Узагальнена структура бісерного млина показана на рис. 11.

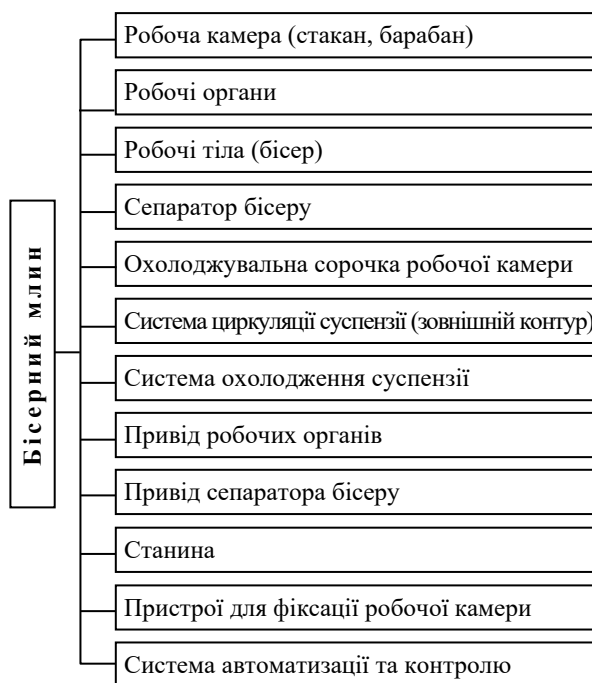


Рис. 11. Структура бісерного млина

Класифікацію бісерних млинів за типом робочої камери показано на рис. 12, за типом робочих органів — на рис. 13, за типом сепаратора бісеру — на рис. 14; типи дискових робочих органів наведені на рис. 15.



Рис. 12. Типи робочих камер бісерних млинів

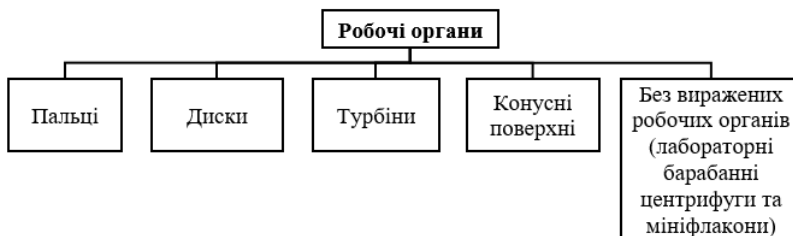


Рис. 13. Типи робочих органів бісерних млинів



Рис. 14. Типи сепараторів бісеру

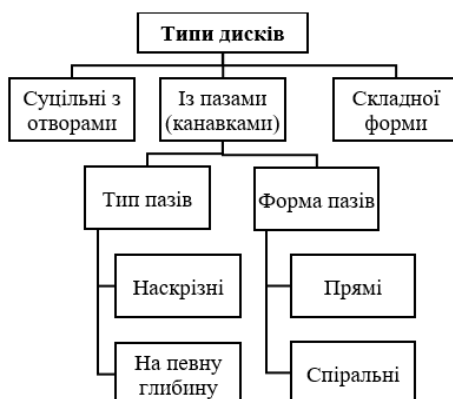


Рис. 15. Типи дискових робочих органів бісерних млинів

**Висновки.** Клітини міцеліальних грибів, дріжджів, одноклітинних водоростей і бактерій містять цінні компоненти, зокрема білки, полісахариди, ліпіди, ферменти, пігменти, фенольні сполуки, компоненти для виробництва біопалива, біорозкладні

полімери, вітаміни, амінокислоти тощо, а деякі клітини, зокрема генетично-змінені мікроорганізми та одноклітинні водорості, продукують речовини з терапевтичними властивостями — рекомбінантні білки, складові вакцин, антитіла, інсулін тощо.

Багато із цих речовин неможливо або складно синтезувати іншими способами, тому для видобутку цінних компонентів клітини мікроорганізмів потрібно зруйнувати.

Механічні способи руйнування клітин мікроорганізмів використовують для порушення цілісності клітин, з метою їх подальшого розділення на рідку і тверду фази та видобування цінних компонентів.

Метод руйнування клітин мікроорганізмів у бісерних млинах є перспективним і застосовується в основному для оброблення суспензій міцеліальних грибів, дріжджів та окремих видів одноклітинних водоростей, які мають порівняно великий розмір клітини. Інші механічні методи, зокрема гомогенізація під високими тиском, застосовуються в основному для оброблення суспензій бактерій та одноклітинних водоростей.

У технологічних комплексах перероблення клітинної біомаси бісерний млин, зазвичай, знаходиться на початку машинно-апаратної схеми, після етапів культивування та концентрування клітин мікроорганізмів у центрифугах і сепараторах. Наступними операціями після оброблення в бісерних млинах є відцентрове розділення суспензії зруйнованих клітин на тверду і рідку фазу в центрифугах або сепараторах; вилучення цінних речовин із рідкої фази або клітинних стінок в екстракторах, абсорберах тощо; концентрування отриманих розчинів у мембранних апаратах або випарювання і сушіння.

Бісерний млин складається з таких основних частин: робоча камера (стакан, барабан); робочі органи; робочі тіла (бісер); сепаратор бісеру; охолоджувальна сорочка робочої камери; система циркуляції суспензії (зовнішній контур); система охолодження суспензії; привід робочих органів; привід сепаратора бісеру; станина; пристрій для фіксації робочої камери; система автоматизації та контролю.

Конструкція робочої камери бісерного млина може бути вертикальна, горизонтальна, конусна або без вираженої робочої камери у вигляді набору мініфлаконів. Орієнтація робочої камери незначно впливає на продуктивність бісерного млина, проте впливає на його функціональність. Об'єм робочої камери промислових бісерних млинів зазвичай складає 10—20 дм<sup>3</sup>.

Робочі органи бісерних млинів — диски, пальці або турбіни. В окремих випадках немає виражених робочих органів, наприклад, під час бісерного оброблення суспензій мікроорганізмів у барабанних центрифугах або мініфлаконах. Частота обертання робочих органів бісерного млина зазвичай складає 1 000—2 500 об/хв.

Дискові робочі органи можуть мати плоску поверхню або пази (канавки) — глухі і наскрізні, прямі і складної, зазвичай спіралеподібної форми. Основна мета пазів — створення інтенсивної циркуляції бісеру у робочій камері млина.

Бісер є складовою частиною машини — бісерного млина. У промислових умовах використовується бісер керамічний і металевий. Діаметр бісеру для руйнування клітин мікроорганізмів складає 0,4—0,6 мм, проте застосування робочих органів турбінного типу дає змогу використати менший розмір бісеру та підвищити продуктивність процесу.

Для відділення обробленої суспензії мікроорганізмів від бісеру використовуються сепаратори щільного, патронного та відцентрового типів. Найчастіше застосовують поєднання патронного і відцентрового сепаратора. Запропонована класифікація бісерних млинів та їх елементів може бути використана а навчальному процесі, під час вибору умов, режимів руйнування клітин мікроорганізмів та інтенсифікації процесу.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Akram, F. (2015). *Industrial Manufacturing of Insulin*. Режим доступа: <https://www.slideshare.net/slideshow/indusmanufacturing-of-insulin/49670824>.
2. Alavijeh, R. S., Karimi, K., Wijffels, R. H., van den Berg, C., Eppink, M. (2020). Combined bead milling and enzymatic hydrolysis for efficient fractionation of lipids, proteins, and carbohydrates of *Chlorella vulgaris* microalgae. *Bioresource Technology*, 309—321. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123321>.
3. Alhattab, M., Kermanshahi-Pour, A., Brooks, M. S.-L. (2019). Microalgae disruption techniques for product recovery — influence of cell wall composition. *Journal of Applied Phycology*, 31, 61—88. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1560-9>.
4. Aryal, S. (2021). Cell disruption — definition, methods, types, significance. *Microbe Notes*. Режим доступа: <https://microbenotes.com/cell-disruption-methods/>.
5. Ashizawa. (2015). Principles of Bead Mill Technology. Ashizawa Fenetech LTD. Режим доступа: [https://www.ashizawa.com/en/technology/bead\\_mills.html](https://www.ashizawa.com/en/technology/bead_mills.html).
6. Avramia, I. (2022). *Research on the extraction of  $\beta$ -glucans from spent brewer's yeast and their valorization in bioactive films*. Doctoral thesis. Suceava: "Ștefan cel Mare" University Of Suceava.
7. Avramia, I., Amariei, S. (2022a). A simple and efficient mechanical cell disruption method using glass beads to extract  $\beta$ -glucans from spent brewer's yeast. *Applied Sciences*, 12(2), 648.
8. Avramia, I., Amariei, S. (2021). Spent brewer's yeast as a source of insoluble  $\beta$ -glucans, *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 825. <https://doi.org/10.3390/ijms22020825>.
9. Avramia, I., Amariei, S. (2022). A simple and efficient mechanical cell disruption method using glass beads to extract  $\beta$ -glucans from spent brewer's yeast. *Applied Sciences*, 12(2), 648. <http://dx.doi.org/10.3390/app12020648>.
10. Bai, M.-D., Chen, C.-Y., Lu, W.-C., Wan, H.-P., Ho, S.-H., Chang, J.-S. (2015). Enhancing the oil extraction efficiency of *Chlorella vulgaris* with cell-disruptive pretreatment using active extracellular substances from *Bacillus thuringiensis* itri-g1. *Biochemical Engineering*, 101, 185—190. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.05.020>.
11. Bajhaiya, A. K. (2012). *Approaches and prospectives for algal fuel*, In: The Science of Algal Fuels, ed. Gordon Richard, Seckbach Joseph, Springer.
12. Batt, C. A. (2014). Alcaligenes. In: Batt, C. A., Tortorello, M. L. (eds.). *Encyclopedia of Food Microbiology (2 ed.)*, 38—41. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00006-9>.
13. Bernaerts, T. M. M., Gheysen, L., Foubert, I., Hendrickx, M. E., Loey, A. M. V. (2019). Evaluating microalgal cell disruption upon ultra high pressure homogenization. *Algal Research*, 42. 101616. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101616>.
14. Bhat, G. S., Deekshitha, B. K., Thivaharan, V., Divyashree, M. S. (2024). Physicochemical cell disruption of *Bacillus* sp. for recovery of polyhydroxyalkanoates: future bioplastic for sustainability. *3 Biotech*, 14, 59. <https://doi.org/10.1007/s13205-024-03913-y>.
15. Boyee. (2025). Boyee NANO bead mill machine for laboratory-boyee patent turbine rotor structure. Boyee. Режим доступа: <https://www.boyee-mill.com.cn/boyee-nmm-laboratory-bead-mill-multi-functional-experimental-bead-mill-1-2l-turbine-rotor.html>.
16. Cambridge. (2025). *Disintegration*. Cambridge University Press & Assessment. Режим доступа: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/disintegration>.
17. Chacón-Lee, T. L., González-Mariño, G. E. (2010). Microalgae for "Healthy" foods — possibilities and challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(6), 655—675. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00132.x>.
18. Chemtech. (2025). *Bead Mill — Grinding & Dispersing*. Chemtech division. Режим доступа: <http://www.hiroshimamm-chemtech.com/en/knowledge/detail01/>.
19. Demuez, M., Mahdy, A., Tomás-Pejó, E., González-Fernández, C., Ballesteros, M. (2015). Enzymatic cell disruption of microalgae biomass in biorefinery processes. *Biotechnology and Bioengineering*, 112(10), 1955—1966. <https://doi.org/10.1002/bit.25644>.
20. Draaisma, R. B., Wijffels, R. H., Slegers, P. M. E., Brentner, L. B., Roy, A., Barbosa, M. J. (2013). Food commodities from microalgae. *Current Opinion in Biotechnology*, 24(2), 169—177. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2012.09.012>.

21. Eggenreich, B., Rajamanickam, V., Wurm, D. J. (2017). A combination of HPLC and automated data analysis for monitoring the efficiency of high-pressure homogenization. *Microbial Cell Factories*, 16, 134. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0749-y>.
22. ELE. (2025). Bead Mill. ELE® company. Режим доступу: <https://www.ele-mix.com/bead-mill/bead-mills.html>.
23. ELE. (2025a). Disc Type Bead Mill. ELE® company. Режим доступу: <https://www.ele-mix.com/bead-mill/disc-type-bead-mill.html>.
24. ELE. (2025b). Working Principle of Bead Mill. ELE® company. Режим доступу: <https://www.ele-mix.com/news/working-principle-of-bead-mill-24426552.html>.
25. García, P., Fredes, C., Cea, I., Lozano-Sánchez, J., Leyva-Jiménez, F. J., Robert, P., Vergara, C., Jimenez, P. (2021). Recovery of bioactive compounds from pomegranate (*Punica granatum* L.) peel using pressurized liquid extraction. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(2), 203. <https://doi.org/10.3390/foods10020203>.
26. Georgianna, D. R., Hannon, M. J., Marcuschi, M., Wu, S., Botsch, K., Lewis, A. J., Hyun, J., Mendez, M., Mayfield, S. P. (2013). Production of recombinant enzymes in the marine alga *Dunaliella tertiolecta*. *Algal Research*, 2(1), 2—9. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2012.10.004>.
27. Gomes, T. A., Zanette, C. M., Spier, M. R. (2020). An overview of cell disruption methods for intracellular biomolecules recovery. *Preparative Biochemistry Biotechnology*, 50(7), 635—654. <https://doi.org/10.1080/10826068.2020.1728696>.
28. Gouveia, L., Oliveira, A. C. (2009). Microalgae as a raw material for biofuels production. *Journal of Industrial Microbiology Biotechnology*, 36(2), 269—274. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0495-6>.
29. Greenwell, H. C., Laurens, L. M. L., Shields, R. J., Lovitt, R. W., Flynn, K. J. (2010). Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. *Journal of the Royal Society Interface*, 7(46), 7703—7726. <http://doi.org/10.1098/rsif.2009.0322>.
30. Günerken, E., D'Hondt, E., Eppink, M., Elst, K., Wijffels, R. (2017). Flow cytometry to estimate the cell disruption yield and biomass release of *Chlorella* sp. during bead milling. *Algal Research*, 25, 25—31. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.04.033>.
31. Heim, A., Kamionowska, U., Solecki, M. (2007). The effect of microorganism concentration on yeast cell disruption in a bead mill. *Journal of Food Engineering*, 83(1), 121—128. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.047>.
32. Hrininh, K., Hordeichuk, R., Gubenia, O. (2018). Comparative analysis of equipment and research the superfine grinding process of titanium dioxide and quinacridone red suspensions in the bead mill. *Ukrainian Journal of Food Science*, 6(1), 82—94.
33. Hrininh, K., Hordeichuk, R., Gubenia, O. (2018a). Investigation the process of superfine grinding of components of pharmaceutical and cosmetic products on the bead mill. *Proceedings of University of Ruse*, 57(10.3), 41—45.
34. Ivanov, V., Shevchenko, O., Marynin, A., Stabnikov, V., Gubenia, O., Stabnikova, O., Shevchenko, A., Gavva, O., Saliuk, A. (2021). Trends and expected benefits of the breaking edge food technologies in 2021—2030. *Ukrainian Food Journal*, 10(1), 7—36. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-1-3>.
35. Kandilian, R., Lee, E., Pilon, L. (2013). Radiation and optical properties of *Nannochloropsis oculata* grown under different irradiances and spectra. *Bioresource Technology*, 137, 63—73. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.058>.
36. Khanra, S., Mondal, M., Halder, G., Tiwari, O. N., Gayen, K., Bhowmick, T. K. (2018). Downstream processing of microalgae for pigments, protein and carbohydrate in industrial application: A review. *Food and Bioproducts Processing*, 110, 60—84. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.02.002>.
37. Khavari, F., Saidijam, M., Taheri, M., Nouri, F. (2021). Microalgae: therapeutic potentials and applications. *Molecular Biology Reports*, 48(5), 4757—4765. <https://doi.org/10.1007/s11033-021-06422-w>.
38. Kovač, T., Stuburić, M., Crevar, M., Kovač, M., Nevistić, A., Lončarić, A., Šarkanj, B. (2019). Disruption of *Aspergillus flavus* cells: a bead mill homogenization method. *Food in Health and Disease, Scientific-Professional Journal of Nutrition and Dietetics*, 8(1), 13—18.
39. Kozyskyi, K., Osadchyi, D., Omelianenko, K., Hrininh, K. (2025). Improvement of the separation device of the bead mill. *91st International scientific conference of young scientist and students "Youth scientific achievement to the 21st century nutrition problem solution"*, April, 7—11. Book of Abstract. Part 2. Kyiv: NUFT, 45.

40. Kryzhova, Yu., Antonuk, M., Stabnikov, V., Stabnikova, O. (2021). Stability of selenium and iodine in the functional meat products prepared with seaweeds under different cooking procedures. *Ukrainian Food Journal*, 10(1), 136—144. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-1-12>.
41. Larrosa, A. P. Q., Camara, Á. S., Moura, J. M., Pinto, L. A. A. (2018). *Spirulina* sp. biomass dried/disrupted by different methods and their application in biofilms production. *Food Science and Biotechnology*, 27(6), 1659—1665. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0397-y>.
42. Lee, J. Y., Yoo, C., Jun, S. Y., Ahn, C. Y., Oh, H. M. (2010). Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. *Bioresource Technology*, 101, 75—77. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.058>.
43. Liu, S., Gifuni, I., Mear, H., Frappart, M., Couallier, E. (2021). Recovery of soluble proteins from *Chlorella vulgaris* by bead-milling and microfiltration: Impact of the concentration and the physicochemical conditions during the cell disruption on the whole process. *Process Biochemistry*, 108, 34—47. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.05.021> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511321001720>).
44. Ljubic, A., Thulesen, E. T., Jacobsen, E. T., Jakobsen, J. (2021). UVB exposure stimulates production of vitamin D<sub>3</sub> in selected microalgae. *Algal Research*, 59, 102472. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102472>.
45. Loh, Z. H., Samanta, A. K., Heng, P. W. S. (2015). Overview of milling techniques for improving the solubility of poorly water-soluble drugs. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 10, 255—274. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2014.12.006>.
46. Matos, J., Cardoso, C., Bandarra, N. M., Afonso, C. (2017). Microalgae as healthy ingredients for functional food: A review. *Food Function*, 8(8), 2672—2685. <https://doi.org/10.1039/C7FO00409E>.
47. McClements, D. J. (2008). *Lipid-based emulsions and emulsifiers*. In: Akoh, C. C.; Min, David B. (eds.). *Food Lipids: Chemistry, Nutrition, and Biotechnology*. Food Science and Technology (Third ed.). Boca Raton: CRC.
48. McMillan, J. R., Watson, J. R., Ali, M., Jaafar, W. (2013). Evaluation and comparison of algal cell disruption methods: Microwave, waterbath, blender, ultrasonic and laser treatment, *Applied Energy*, 103, 128—134. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.020>.
49. Melendres, A. V., Honda, H., Shiragami, N., Unno, H. (1991). A kinetic analysis of cell disruption by bead mill. The influence of bead loading, bead size and agitator speed. *Bioseparation*, 2(4), 231—236.
50. Montalescot, V., Rinaldi, T., Touchard, R., Jubeau, S., Frappart, M., Jaouen, P., Bourseau, P., Marchal, L. (2015). Optimization of bead milling parameters for the cell disruption of microalgae: process modeling and application to *Porphyridium cruentum* and *Nannochloropsis oculata*. *Bioresource Technology*, 196, 339—346. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.075>.
51. Netzsch. (2025). *Grinding Dispersing*. Режим доступа: <https://www.netzsch-grinding.com>.
52. Omelianenko, K., Kasyniuk, M., Gubenia, O., Avramia, I. (2025). Assessment of destruction of microorganism cells during processing in bead mill. *91st International scientific conference of young scientist and students "Youth scientific achievement to the 21st century nutrition problem solution"*, April, 7—11, 2025. Book of abstract. Part 2, Kyiv: NUFT.
53. Patravale, V. B., Date, A. A., Kulkarni, R. M. (2004). Nanosuspensions: a promising drug delivery strategy. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 56(7), 827—840. <https://doi.org/10.1211/0022357023691>.
54. Pohndorf, R. S., Álisson, S., Camara Ana P. Q., Larrosa Cláudio, P., Pinheiro Monique, M., Strieder Luiz, A. A., Pinto. (2016). Production of lipids from microalgae *Spirulina* sp.: Influence of drying, cell disruption and extraction methods. *Biomass and Bioenergy*, 93, 25—32. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.020>.
55. Postma, P. R., Miron, T. L., Olivieri, G., Barbosa, M. J., Wijffels, R. H., Eppink, M. H. M. (2015). Mild disintegration of the green microalgae *Chlorella vulgaris* using bead milling. *Bioresource Technology*, 184, 297—304. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.033>.
56. ProXES. (2014). Stirrer Bead Mill 2014. Режим доступа: <https://pdf.directindustry.com/pdf/proxes-gmbh/stirrer-bead-mill-2014/67556-565079.html>.

57. Quesada-Salas, M., Delfau, G., Willig, G., Pr at, N., Allais, F., Ioannou, I. (2021). Article optimization and comparison of three cell disruption processes on lipid extraction from microalgae. *Processes*, 9(2), 369. <https://doi.org/10.3390/pr9020369>.
58. Quesada-Salas, M. C., Delfau-Bonnet, G., Willig, G., Pr at, N., Allais, F., Ioannou, I. (2021). Optimization and comparison of three cell disruption processes on lipid extraction from microalgae. *Processes*, 9, 369. <https://doi.org/10.3390/pr9020369>.
59. Rahman, M. M., Hosano, N., Hosano, H. (2022). Recovering microalgal bioresources: a review of cell disruption methods and extraction technologies. *Molecules*, 27(9), 2786. <https://doi.org/10.3390/molecules27092786>.
60. Ramana, K. V., Xavier, J. R., Sharma, R. K. (2017). Recent trends in pharmaceutical biotechnology, *Pharmaceutical Biotechnology: Current Research*, 1(5). Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8142882>.
61. Ramanan, R. N., Ling, T. C., Ariff, A. B. (2008). The performance of a glass bead shaking technique for the disruption of *Escherichia coli* cells. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 13, 613—623. <https://doi.org/10.1007/s12257-008-0047-y>.
62. Rahman, M. M., Hosano, N., Hosano, H. (2022). Recovering microalgal bioresources: a review of cell disruption methods and extraction technologies. *Molecules*, 27(9), 2786. <https://doi.org/10.3390/molecules27092786>.
63. Razaghi, A., Godhe, A., Albers, E. (2014). Effects of nitrogen on growth and carbohydrate formation in *Porphyridium cruentum*. *Open Life Sciences*, 9(2), 156—162. <https://doi.org/10.2478/s11535-013-0248-z>.
64. Riggs, A. D. (2021). Making, cloning, and the expression of human insulin genes in bacteria: the path to humulin. *Endocrine Reviews*, 42(3), 374—380. <https://doi.org/10.1210/edrv/bnaa029>.
65. Rizwan, M., Mujtaba, G., Memon, S. A., Lee, K., Rashid, N. (2018). Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 394—404. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.034>.
66. R sch, C., Ro mann, M., Weickert, S. (2018). Microalgae for integrated food and fuel production. *GCB Bioenergy*, 11, 326—334. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12579>.
67. Ryckebosch, E., Muylaert, K., Foubert, I. (2012). Optimization of an analytical procedure for extraction of lipids from microalgae. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89, 189—198. <https://doi.org/10.1007/s11746-011-1903-z>. [DOI].
68. Safi, C., Frances, C., Ursu, A. V., Laroche, C., Pouzet, C., Vaca-Garcia, C., Pontalier, P.-Y. (2015). Understanding the effect of cell disruption methods on the diffusion of *Chlorella vulgaris* proteins and pigments in the aqueous phase. *Algal Research*, 8, 61—68. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.01.002>.
69. Safi, C., Ursu, A. V., Laroche, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P.-Y., Vaca-Garcia, C. (2014). Aqueous extraction of proteins from microalgae: Effect of different cell disruption methods. *Algal Research*, 3, 61—65. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.12.004>.
70. Sathish, A., Marlar, T., Sims, R. C. (2015). Optimization of a wet microalgal lipid extraction procedure for improved lipid recovery for biofuel and bioproduct production. *Bioresource Technology*, 193, 15—24. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.052> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852415008433>).
71. Siddiki, Sk. Y. A., Mofijur, M., Kumar, P. S., Ahmed, S. F., Inayat, A., Kusumo, A., Badrudin, I. A., Khan, L. D., Nghiem, L. D., Ong, H. C., Mahlia, T. (2022). Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: An integrated biorefinery concept. *Fuel*, 307, 121782. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121782>.
72. Siew, Y. Y., Zhang, W. (2021). Downstream processing of recombinant human insulin and its analogues production from *E. coli* inclusion bodies. *Bioresources and Bioprocessing*, 8, 65. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00419-w>.
73. SiLi. (2025). *Sigmund Lindner GmbH*, Режим доступу: <https://www.sigmund-lindner.com>.
74. Singhvi, P., Saneja, A., Srichandan, S., Panda, A. K. (2020). Bacterial inclusion bodies: a treasure trove of bioactive proteins. *Trends in Biotechnology*, 38(5), 474—486. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.12.011>.
75. Steinb chel, A. (2002). *Biopolymers*. Wiley-VCH.

76. Suarez, G. E., van Leeuwen, J., Safi, C., Sijtsma, L., Eppink, M. H. M., Wijffels, R. H., van den Berg, C. (2018). Selective and energy efficient extraction of functional proteins from microalgae for food applications. *Bioresource Technology*, 268, 197—203. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.131>.

77. Tamer, I., Moo-Young, M., Chisti, Y. (1998). Optimization of poly ( $\beta$ -hydroxybutyric acid) recovery from *Alcaligenes latus*: combined mechanical and chemical treatments. *Bioprocess Engineering*, 19, 459—468. <https://doi.org/10.1007/PL00009030>.

78. Tang, Z., Zhao, J., Ju, B., Li, W., Wen, S., Pu, Y., Qin, S. (2016). One-step chromatographic procedure for purification of B-phycoerythrin from *Porphyridium cruentum*. *Protein Expression and Purification*, 123, 70—74. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2016.01.018>.

79. Thermofisher. (2024). R-phycoerythrin (R-PE). Режим доступу: <https://www.thermofisher.com/ua/en/home/life-science/cell-analysis/fluorophores/r-phycoerythrin.html>.

80. Tennenhouse, E. (2017). Better cell disruption with beads, getting a quick grind without breaking the bank. *Lab Manager*. Режим доступу: <https://www.labmanager.com/better-cell-disruption-with-beads-2711>.

81. Tonghui. (2025). Vertical Bead Mill. Suzhou Tonghui. Режим доступу: <https://tonghuimix.com/dcd-vertical-bead-mill/>.

82. Tsykhanovska, I., Stabnikova, O., Oliinyk, S., Lazarieva, T., Gubsky, S. (2024). Application of combined food additive based on iron oxide nanoparticles and kombu in a rye-wheat bread technology. *Ukrainian Food Journal*, 13(3), 576—596. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-3-10>.

83. Van Gaver, D., Huyghebaert, A. (1991). Optimization of yeast cell disruption with a newly designed bead mill. *Enzyme and Microbial Technology*, 13(8), 665—671. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(91\)90082-L](https://doi.org/10.1016/0141-0229(91)90082-L).

84. Viganì, M., Parisi, C., Rodríguez-Cerezo, E., Barbosa, M. J., Sijtsma, L., Ploeg, M., Enzing, C. (2015). Food and feed products from micro-algae: Market opportunities and challenges for the EU. *Trends in Food Science Technology*, 42(1), 81—92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.12.004>.

85. Wang, Yi., Hammes, F., De Roy, K., Verstraete, W., Boon, N. (2010). Past, present and future applications of flow cytometry in aquatic microbiology. *Trends in Biotechnology*, 28(8), 416—424. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.04.006>.

86. Wijffels, R. H., Barbosa, M. J., Eppink, M. H. (2010). Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4, 287—295. <https://doi.org/10.1002/bbb.215>.

87. Yu, X., Dong, T., Zheng, Yu., Miao, Ch., Chen, S. (2014). Investigations on cell disruption of oleaginous microorganisms — hydrochloric acid digestion is an effective method for lipid extraction. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(5), 730—737. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400195>.

88. Yan, N., Fan, C., Chen, Y., Hu, Z. (2016). The potential for microalgae as bioreactors to produce pharmaceuticals. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(6), 962. <https://doi.org/10.3390/ijms17060962>.

89. Yap, B. H. J., Dumsday, G. J., Scales, P. J., Martin, G. J. O. (2015). Energy evaluation of algal cell disruption by high pressure homogenisation. *Bioresource Technology*, 184, 280—285. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.049>.

90. Zahra, Z., Samin, K., Maryam, R., Kamiar, Z. (2024). Antifungal drug susceptibility profile of *Candida kefyr* isolated from clinical samples and dairy products. *Canadian Journal of Infectious Diseases and Medical Microbiology*, 1. <https://doi.org/10.1155/2024/6594366>.

91. Zheng, H., Yin, J., Gao, Z., Huang, H., Ji X., Dou, C. (2011). Disruption of *Chlorella vulgaris* cells for the release of biodiesel-producing lipids — a comparison of grinding, ultrasonication, bead milling, enzymatic lysis, and microwaves. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 164, 1215—1224. <https://doi.org/10.1007/s12010-011-9207-1>.

92. Zulhijah, R., Suhendi, R., Yoshimi, K., Kartikowati, C. W., Ogi, C. W., Iwaki, T., Okuyama, K. (2015). Low-Energy Bead-Mill Dispersion of Agglomerated Core-Shell  $\alpha$ -Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\alpha$ "-Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ferromagnetic Nanoparticles in Toluene. *Langmuir*, 31(22), 6011—6019. <http://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b00901>.

93. Бондаренко, А. А., Дубінін, О. О., Переяславцев, О. М. (2004). *Теоретична механіка. У 2-х т. Ч. 2. Динаміка*. Київ: Знання.

94. Грінінг, К. Р., Губеня, О. О. (2023). Зміна реологічних властивостей суспензії лікарських і косметичних засобів під час подрібнення в бісерних млинах. *Харчова промисловість*, 33—34. 106—115. <https://doi.org/10.24263/2225-2916-2023-33-34-14>.

95. Грінінг, К. Р., Пономаренко, А. М., Губеня, О. О. (2023a). Робочі тіла бісерних млинів. *Тренди Leap-виробництва та пакування харчової продукції: матеріали 12-ї Міжн. спеціалізованої науково-практичної конференції, 20 вересня 2023 р., м. Київ*. Київ: НУХТ.

96. Малежик, І. Ф., Зав'ялов, В. Л., Шевченко, О.Ю. та ін. (2021). *Процеси і апарати харчових виробництв* / за ред. І. Ф. Малежика. Київ: НУХТ, 2021.

97. Омеляненко, К. А. (2024). Механічні способи руйнування клітин мікроорганізмів у виробництві продукції біотехнологічного синтезу. *Тренди Leap-виробництва та пакування харчової продукції: матеріали 13-ї Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 17 вересня 2024 р., м. Київ*. Київ: НУХТ, 2024.

98. Омеляненко, К., Осадчий, Д., Грінінг, К., Губеня, О. (2025a). Вплив типу робочих органів на продуктивність руйнування клітин мікроорганізмів у бісерному млині. *91st International scientific conference of young scientist and students "Youth scientific achievement to the 21st century nutrition problem solution", April, 7—11, 2025. Book of Abstract. Part 2*. Київ: NUFT.

99. Теличкун, В. І., Гавва, О. М., Теличкун, Ю. С., Десик, М. Г., Чепелюк, О. М. (2017). *Технологічні комплекси харчових виробництв*. Київ: Видавництво «Сталь».

100. Теличкун, В. І., Теличкун, Ю. С., Губеня, О. О., Стефанов, С. В., Дамянова С. Т. (2024). *Технологічне обладнання харчових виробництв*. Київ: Видавництво «Сталь».

## 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 опубліковані раніше статті, що містять результати фундаментальних теоретичних розробок та найзначніших прикладних досліджень викладачів, наукових співробітників, доцентів, 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** роздруковок 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 ризикою, 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 (кожне 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, відповідно 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.

Використовувати 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

№ 37

Журнал «Харчова промисловість» затверджений наказом МОН України (постанова № 32 від 15.01.2018) як наукове видання з технічних наук.  
Ресестаційне 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. № 02/25. Зам. № 23-16

НУХТ, 01601, Київ-33, вул. Володимирська, 68  
Свідоцтво про реєстрацію серія ДК № 1786 від 18.05.2004