



2023

НАУКОВІ ПРАЦІ

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Том 29 № 6

*Журнал
«Наукові праці Національного університету харчових технологій»
видається з 1938 року*

КИЇВ ✧ НУХТ ✧ 2023

Articles with the results of fundamental theoretical developments and applied research in the field of technical and economic sciences are published in this journal. The scripts of articles are reviewed beforehand by leading specialists of corresponding branch.

The journal was designed for professors, tutors, scientists, post-graduates, students of higher education establishments and executives of the food industry.

Journal "Scientific Works of National University of Food Technologies" is included into the list of professional editions of Ukraine of technical (specialties — 121, 126, 133, 141, 144, 151, 162, 181) and economic sciences (specialties — 051, 073, 075), category "B" (Decree of MES of Ukraine #975 from July 11, 2019), where the results of dissertations for scientific degrees of PhD and candidate of science can be published.

The Journal "Scientific Works of National University of Food Technologies" is indexed by the following scientometric databases:

- Index Copernicus
- EBSCOhost
- Google Scholar

The Journal is recommended for publication of research results by the Ministry of Science and Higher Education of Poland.

Editorial office address:

National University of
Food Technologies
Volodymyrska str., 68,
building B, room 412
01601 Kyiv, Ukraine

Recommended for publication by the Academic Council of the National University of Food Technologies. Minutes of meeting # 5 from 21th of December, 2023

© NUFT, 2023

У журналі публікуються статті за результатами фундаментальних теоретичних розробок і прикладних досліджень у галузі технічних та економічних наук. Рукописи статей попередньо рецензуються провідними спеціалістами відповідної галузі.

Для викладачів, наукових працівників, аспірантів, докторантів і студентів вищих навчальних закладів, керівників підприємств харчової промисловості.

Журнал «Наукові праці Національного університету харчових технологій» включено в перелік наукових фахових видань України з технічних (спеціальності — 121, 126, 133, 141, 144, 151, 162, 181) та економічних наук (спеціальності — 051, 073, 075), категорія «Б» (Наказ МОН України № 975 від 11.07.2019), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук.

Журнал «Наукові праці Національного університету харчових технологій» індексується такими наукометричними базами:

- Index Copernicus
- EBSCOhost
- Google Scholar

Журнал рекомендовано Міністерством науки і вищої освіти Польщі для публікації результатів наукових досліджень.

Адреса редакції:

Національний університет
харчових технологій
вул. Володимирська, 68,
корпус Б, к. 412,
м. Київ, 01601

Рекомендовано вченою радою Національного університету харчових технологій. Протокол № 5 від 21 грудня 2023 року

© НУХТ, 2023

Редакційна колегія

Склад редакційної колегії журналу

«Наукові праці Національного університету харчових технологій»

Головний редактор

Editor-in-Chief

Олександр Шевченко
Oleksandr Shevchenko

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

Відповідальний секретар

Accountable secretary

Анастасія Шевченко
Anastasiia Shevchenko

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

Члени редакційної колегії:

Агота Гедре Райшене
Agota Giedre Raisiene

д-р екон. наук, Литва
Ph. D. Hab., Lithuanian Institute of Agrarian Economics,
Lithuania

Атанаска Тенєва
Atanaska Teneva

д-р екон. наук, доц., Болгарія
Ph. D. Hab., As. Prof., University of Food Technologies,
Bulgaria

Анатолій Заїнчковський
Anatoliy Zainchkovskiy

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

Андрій Маринін
Andrii Marynin

канд. техн. наук, ст. наук. сп., Україна
Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Браян Мак Кенна
Brian McKenna

д-р техн. наук, проф., Ірландія
Ph. D. Hab., Prof., University College Dublin, Ireland

Валерій Мирончук
Valerii Myronchuk

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

Василь Кишенько
Vasyl Kyshenko

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

Василь Пасічний
Vasyl Pasichnyi

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

В'ячеслав Іващук
Vyacheslav Ivaschuk

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

Віктор Стабніков
Viktor Stabnikov

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

Володимир Зав'ялов
Volodymyr Zavialov

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

Галина Колісник
Halyna Kolisnyk

д-р екон. наук, проф., Україна
Ph. D. Hab., Prof., Uzhhorod National University, Ukraine

Галина Поліщук
Halyna Polishchuk

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

Герхард Шльонінг

д-р техн. наук, Австрія

Gerhard Schleining Дайва Лескаускайте Daiva Leskauskaite	Ph. D. Hab., Prof., University of Natural Resources, Austria д-р техн. наук, проф., Литва Ph. D. Hab., Prof., Kaunas University of Technology, Lithuania
Ірина Штулер Iryna Shtuler	д-р екон. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National academy of management
Кристина Сильва Cristina L. M. Silva	д-р техн. наук, проф., Португалія Ph. D. Hab., Prof., University de Catolica, Portuguesa
Лада Шірінян Lada Shirinyan	д-р екон. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Лариса Арсеньєва Larisa Arsenyeva	д-р техн. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Наталія Луцька Nataliia Lutska	канд. техн. наук, доц., Україна Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Олександр Бутнік-Сіверський Oleksandr Butnik-Siverskyi	д-р екон. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Олександр Гавва Oleksandr Gavva	д-р техн. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Олександр Кургаєв Oleksandr Kurgaev	д-р техн. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Олена Дерев'янко Olena Derevianko	д-р екон. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Олена Стабнікова Olena Stabnikova	канд. техн. наук, доц., Україна Ph. D. As., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Паола Піттія Paola Pittia	д-р техн. наук, проф., Італія Ph. D. Hab., Prof., University of Teramo, Italy
Володимир Ковбаса Volodymyr Kovbasa	д-р техн. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Світлана Бондаренко Svitlana Bondarenko	д-р хім. наук, проф., Україна Ph. D. Hab., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Світлана Літвинчук Svitlana Litvynchuk	канд. техн. наук, доц., Україна Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Сергій Чумаченко Serhii Chumachenko	д-р техн. наук, ст. наук. сп., Україна Ph. D. Hab., As. Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Хууб Лелієвельд Huub Lelieveld	д-р наук, проф., Нідерланди Ph. D. Hab., Prof., President of the Global Harmonization Initiatives, the Netherlands

ЗМІСТ

Безпека харчових продуктів і виробництв

Шульга О. С., Шульга С. І. Досягнення у сфері екологічного одноразового посуду та столових приборів 7

Біотехнології

Стабніков В., Миколаєнко Р., Стабніков Д. Видалення мікропластику зі стічних вод для захисту світового водного басейну 23

Механічна та електрична інженерія

Володін О. С., Гавва О. М., Токарчук С. В., Савчук О. С. Дослідження комунікативного дизайну виробничих систем 46

Мазуренко О. Г., Воробйов Л. Й., Декуша Л. В. Термоелектричні прилади вимірювання температури та швидкості потоку газового середовища 54

Романюк В. Т. Дослідження електричного поля навколо термокомпенсаторів 73

Фізико-математичні науки

Медвідь Н. В., Гнатівський О. В., Левчій І. Д., Сидоренко А. В. Автоматизація дифракційних вимірювань малих переміщень при модуляції апертури сенсора 83

Харчові технології

Дорохович В. В., Михальська Л. В. Застосування насіння чіа та гелю з насіння чіа для наближення нутрієнтного складу печива до складу «ідеального» харчового продукту за макронутрієнтами 94

Логінова А. О. Реакція Маяра: використання в харчових технологіях та експертизі харчових продуктів 103

Носенко Т. Т., Жупанова Д. О. Аналіз тенденцій споживання енергетичних ресурсів харчовою промисловістю України 123

Макаренко О. Г., Петренко Т. В. Проблемні питання використання діоксиду титану (Е 171) як барвника для харчових продуктів і лікарських засобів 135

Рубанка К. В., Левківська Т. М., Душчак О. В. Дослідження впливу висушеного екстракту імбіру на якість маргарину 147

CONTENTS

Food Products and Manufacturing Safety

Shulga O., Shulga S. The achievements in the field of environmentally disposable tableware and cutlery 7

Biotechnologies

Stabnikov V., Mikolayenko R., Stabnikov D. Removal of microplastics from wastewater for world water pool protection 23

Mechanical and Electrical Engineering

Volodin O., Gavva O., Tokarchuk S., Savchuk O. Research of communicative design of production systems 46

Mazurenko O., Vorobiov L., Dekusha L. Thermoelectric devices for measuring temperature and flow velocity of gas medium 54

Romaniuk V. Analysis of electric field around thermal compensators 73

Physical and Mathematical Sciences

Medvid N., Gnatovskiy O., Sidorenko A., Levchii I. Automation of diffraction measurements of small displacements by the means of sensor aperture modulation 83

Food Technologies

Dorohovych V., Mykhalska L. The application of chia seeds and chia seeds gel to approach the nutrient composition of cookies to the "ideal" food product due to macro-nutrient content 94

Loginova A. Maillard reaction: use in food technology and expertises of food products 103

Nosenko T., Zhupanova D. Using of the new enzyme preparations in processing of sunflower oil waste 123

Makarenko O., Petrenko T. The problematic issues of titanium dioxide (E 171) as a colorant for food and medicinal products 135

Rubanka K., Levkivska T., Dushchak O. Study of the effect of dried ginger extract on the quality of margarine 147

- Кучеренко В. М., Успенко О. В., Білько М. В., Бурда В. Є.* Ефективність використання кріо-концентратів виноградного суслу у виробництві напівсухих і напівсолодких натуральних вин 156 *Kucherenko V., Uspalenko O., Bilko M., Burda V.* The effectiveness of the use of cryoconcentrates of grape must in the production of semi-dry and semi-sweet natural wines

Хімічні науки

- Стаднічук Н. О., Костюченко Т. П., Кроніковський О. І.* Характеристика полімерних матеріалів, що використовуються при виробництві бутильованої питної води 169 *Stadnichuk N., Kostjuchenko T., Kronikovskiy O.* Characteristics of polymer materials, that are used in production bottled drinking water

- Зміст журналу «Наукові праці Національного університету харчових технологій» за 2023 рік 180 Contents of the journal "Scientific Works of the National University of Food Technologies" for 2023

THE ACHIEVEMENTS IN THE FIELD OF ENVIRONMENTALLY DISPOSABLE TABLEWARE AND CUTLERY

O. Shulga, S. Shulga

National University of Food Technologies

Key words:

Disposable

Edible

Ecological

Biodegradable tableware

Article history:

Received 07.11.2023

Received in revised form

28.11.2023

Accepted 05.12.2023

Corresponding author:

O. Shulga

E-mail:

shulgaos@ukr.net

Citation: О. С. Шульга, С. І. Шульга (2023). Досягнення у сфері екологічного одноразового посуду та столових приборів. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 7—22.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-3

ABSTRACT

The consumer attitude towards nature makes the current generation change the approach to many things. The pace of a modern person is very intense, so consuming food outside home is already an absolutely common thing in most countries of the world. Such food needs packaging and dishes. The economic factor led to the widespread use of polymer materials, but it is not ecological, because in natural conditions, most of the polymers do not decompose. Different methods have been developed to recycle such polymer materials, but these are additional capital investments for manufacturers, and not all polymer materials are suitable for recycling. That is why a more promising way to reduce the use of polymer materials, in particular, for disposable tableware, is a complete replacement of raw materials. For disposable tableware, synthetic polymer materials can be replaced with natural polymers or food raw materials. Reusable dishes can be used, but such take-out dishes can be offered only for drinks. The analysis of achievements in the ecological tableware field is presented in the article. Plates, bowls, cups (glasses) and accessories, as well as drinking straws, have already been developed. The classification of tableware and cutlery, the classification of raw materials that should be used for ecological tableware, and the classification of properties and quality indicators (sensory, physico-mechanical, barrier, thermal, possibly therapeutic properties) that must be controlled for such products are presented. It has been determined that waste from food production can be used as raw material, in particular, coffee grounds, bran, etc. The most promising direction of ecological disposable tableware is edible tableware, because it will perform a double function — a snack and natural disposal. In addition, it does not require the use of special raw materials, but is made from food raw materials.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-3

ДОСЯГНЕННЯ У СФЕРІ ЕКОЛОГІЧНОГО ОДНОРАЗОВОГО ПОСУДУ ТА СТОЛОВИХ ПРИБОРІВ

О. С. Шульга, С. І. Шульга

Національний університет харчових технологій

Споживацьке ставлення до природи змушує теперішнє покоління змінювати підходи до вже звичних речей. Темп сучасної людини дуже інтенсивний, тому споживання їжі поза домом вже абсолютно звична справа для більшості країн світу. Така їжа потребує пакування та посуду. Економічний фактор обумовив широке використання полімерних матеріалів, проте екологія починає відчувати навантаження, адже в природних умовах більшість використовуваних полімерів не розкладаються. Нині розроблені схеми щодо перероблення таких полімерних матеріалів, проте це додаткові капіталовкладення для виробників, крім того, не всі полімерні матеріали придатні до перероблення. Саме тому більш перспективним напрямом скорочення обсягів використання полімерних матеріалів, зокрема для одноразового посуду, є повна заміна синтетичних полімерних матеріалів на природні полімери або харчову сировину. Звісно, можна повернутися до багаторазового посуду, проте такий посуд підходить лише для напоїв.

У статті представлені результати аналізу досягнень у сфері екологічного посуду. Нині вже розроблені тарілки, миски, чашки (стакани) та приладдя, а також трубочки для напоїв. Представлена класифікація посуду та приладдя, класифікація сировини, яку доцільно використовувати для екологічного посуду та класифікація властивостей і показників якості (органолептичні, фізико-механічні, бар'єрні, термічні, фізико-хімічні можливо терапевтичні властивості), які необхідно контролювати для таких виробів. Визначено, що як сировину можна використовувати відходи харчових виробництв, зокрема кавову гущу, дробину, висівки тощо. Найбільш перспективним напрямом екологічного одноразового посуду є їстівний посуд, адже він буде виконувати подвійну функцію — перекус та природна утилізація. Крім того, такий посуд не потребує використання спеціальної сировини, адже виготовляється з харчових відходів.

Ключові слова: одноразовий, їстівний, екологічний, біodeградабельний посуд.

Постановка проблеми. Вперше одноразовий посуд з'явився в США у середині XX ст. і міцно увійшов до повсякденного побуту людини. Зараз його широко використовують вдома і закладах ресторанного господарства по всьому світу. Такий посуд полегшує влаштування пікніків і виїзних свят, він гігієнічний й позбавляє споживача від необхідності мити його, а під час оформлення дитячих свят ще й додає барв на західі (Dolya, 2023).

У 2016 р. в усьому світі було вироблено 485 млрд поліетилентерефталатних (ПЕТ) пляшок, у 2021 р. вироблено 583 млрд цих пластикових пляшок. У США щодня використовується приблизно 500 млн одноразових пластикових соломинок, тоді як у Європі це приблизно 25,3 млрд на рік. Світовий ринок пластикових столових приборів у 2017 р. оцінювався приблизно в 2,6 млрд дол. США. Особливості, які роблять пластик дуже бажаним, є прокляттям для навколишнього се-

редовища. Вважається, що світ буквально заповнений пластиком, і лише 9% вироблених синтетичних полімерів переробляються (Dybka-Ściepień, K. та ін., 2021).

З огляду на надзвичайні кліматичні ситуації та екологічні тенденції, їстівне столове приладдя обмежує використання пластику та повністю біорозкладається. Крім того, їстівні столові прилади, виготовлені природним способом з борошна, фруктів і трави містять клітковину, білок, мінеральні речовини (залізо, кальцій) та інші корисні поживні речовини, що робить їх здоровою альтернативою пластиковим столовим приладам. Оскільки вважається, що пластикові столові прилади є основною причиною поширення раку та інших захворювань, саме тому поширення їстівних столових приладів зростає значними темпами. Зростання виробництва столових приладів з борошна і трави є основним напрямом світового ринку їстівних столових приладів. Крім того, зростання кількості веганів стимулює попит на натуральні й органічні продукти, що, у свою чергу, як очікується, сприятиме зростанню світового ринку впродовж прогнозованого періоду (Andrea, 2020).

За даними Євростату (Eurostat, 2020), у 2018 р. домогосподарства в ЄС витратили понад 600 млрд євро на «послуги громадського харчування»: ресторани, кафе, їдальні, кейтерингові заходи тощо. У XXI ст. індустрія громадського харчування стикається із серйозним викликом, оскільки велика частина замовлень у ресторанах здійснюється із собою або доставляється. Пандемія COVID-19 сприяла величезному збільшенню кількості замовлень на винос (Andrea, 2020). Варто підкреслити, що масове споживання одноразового пластикового посуду суттєво зростає в літні місяці, особливо в сезон пікніків і шашликів. Іншим важливим сектором є промисловість цивільної авіації, яка потребує величезної кількості матеріалів для пакування харчових продуктів. Водночас споживання готових до вживання напівфабрикатів, а також дієтичне харчування набули значного інтересу в останні роки, особливо в контексті незалежного способу життя та збільшення кількості людей, які живуть самі.

Крім того, також побуває думка, що проміжні речовини одноразового посуду, технологічні добавки, розчинники, а також продукти хімічного розпаду здатні проникати в їжу та негативно впливати на людину (Нещадим, Слободян, & Заєць, 2014).

Ще один вид разових стаканів — це пінопластові стакани, які є більш дешевими порівняно з паперовими. Полістирол, з якого виготовлені пінопластові стакани, є інертним, тому й більш екологічним порівняно з іншими полімерами. Нещодавнє дослідження вмісту сміттєзвалищ (Jung та ін., 2011) впродовж 21 р., показало, що пінопластові чашки та контейнери складають менше ніж 1/3 від 1% до загальної кількості відходів на звалищах. Пінопластові чашки також можна безпечно спалювати з метою виробництва енергії зі сміття. Однак такий вид чашок не є повністю біодеградабельним.

Отже, полімерний одноразовий посуд досить активно використовується в різних сферах життя, проте доцільність його використання викликає сумніви через негативний вплив на організм людини та довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зважаючи на необхідність зменшення обсягів використання полімерного одноразового посуду, дослідники в усьому світі пропонують свої розробки як посуду, так і приладдя. Крім того, вже досить тривалий час використовується вафельний стаканчик для морозива, що є

прикладом одноразового посуду (Dolya, 2023).

У (Dordevic, Necasova, Antonic, Jancikova, & Tremlová, 2021) запропоновано виготовлення біодеградабельних ложок з трьох видів борошна (пшеничне, пшона та виноградне) в різних співвідношеннях. Усі інгредієнти змішували до утворення твердого тіста, яке заливали в силіконову форму для ложки. Ложки випікали 10 хв за температури 180—240 °C і сушили за температури 60 °C впродовж 60 хв у сушарці.

Індія займає 12-е місце в рейтингу країн, що скидають пластик в океани (Garfield, 2016), саме тому індійська компанія Bakey's розробила їстівні ложки, які виготовляються з соргового, рисового та пшеничного борошна. Такий продукт містить мінімальну кількість глютену. Ложка пропонується для морозива, йогурту та супів (Munir, 2023). Ще одна індійська компанія Ediblepro пропонує дуже широкий асортимент практично всіх столових приборів, які виготовляються з пшона (EdiblePRO, 2023).

Дизайн-студія PriestmanGoode (Велика Британія) нещодавно представила інноваційну та екологічну концепцію підносів для їжі в авіаперельоті, що включає їстівну упаковку. Екологічний дизайн є частиною проекту студії Get Onboard, який спрямований на боротьбу з впливом пластикових відходів з особливим акцентом на авіаційну промисловість. Щороку на пасажирських рейсах утворюється близько 5,7 млн тонн відходів у салоні, починаючи від одноразового пластику і закінчуючи дорожніми наборами, навушниками та харчовими відходами. Остаточна концепція бортового лотка включає багаторазовий лоток, виготовлений з кавової гуші і лушпиння, змішаної з лігніном як сполучною речовиною; багаторазовий посуд-основу з пшеничних висівок; кришку гарніру з водоростей чи бананового листа; їстівну десертну кришку з вафлі; багаторазову ложку-виделку з кокосового дерева; невеликі капсули, що використовуються для соусів або молока з розчинних морських водоростей; багаторазову чашку із зовнішньою поверхнею з рисового лушпиння, з'єднаного PLA, і підкладки з водоростей; кришку для гарячої основної страви, зроблену з бамбука (рис. 1, а).

Команда дизайнерів також розробила нове рішення для дорожньої пляшки з водою, виготовленої з біорозкладального біопластику та пробки. Пляшку з водою можна повторно використовувати впродовж короткострокового періоду, в ідеалі на час відпустки, і вона призначена для забезпечення альтернативи одноразовій пластиковій пляшці, що продається в аеропортах. Форма пляшки також зручніша для авіаперельотів, ідеально поміщається в кишені спинки сидіння літака (рис. 1, б).

Екологічний посуд також є необхідним і для закладів ресторанного господарства, зважаючи на збільшення попиту серед споживачів на харчування поза домом (Громаченко, & Яковишина, 2021).

Їстівне столове приладдя — це посуд для напоїв, тарілки, стакани, чашки, виделки, ложки тощо. Його можна виготовляти з нарізаної селери, яку використовують як палички для їжі, а також як ложку для вершкового сиру і соусів. Як ложку використовують листя капусти, а як виделки або шампури можна використовувати загострені морквяні палички.



а



б

Рис. 1. Зовнішній вигляд розробленого набору для авіапольотів (а) та пляшки для води (Borgobello B., 2019)

Крім цього, їстівні миски й тарілки готують з великого листя дерев, таких як банан, які вважаються травами та корисними для здоров'я. Крім того, їстівні столові прилади можна зробити із шоколаду та інших ароматизованих фруктів чи крему. Їстівні столові прилади, такі як миски, чашки, тарілки, приготовані з використанням цукрової пасти, використовувалися впродовж століть у різних частинах світу. Крім того, в таких країнах, як Індія, М'янма, Індонезія, Непал, Пакистан та Шрі-Ланка, листя банана та мигдалю використовуються для виготовлення мисок і тарілок. Вважається, що вони приносять різну користь для здоров'я, наприклад, допомагають схуднути, покращити систему травлення та здоров'я серця. З їстівними столовими приладами пов'язано безліч позитивних фактів, які роблять їх найкращим продуктом порівняно з традиційними виробами із пластику (Andrea, 2020).

Світовий ринок їстівних столових приладів сегментований за продуктами, сировиною, добавками та регіонами. За продуктами ринок поділяється на ложки, виделки, ножі та палички для їжі. За сировиною його поділяють на кукурудзяний,

пшеничний, рисовий тощо. Залежно від застосування — на побутовий і комерційний. За регіонами — Північна Америка, Європа, Азійсько-Тихоокеанський регіон (Andrea, 2020).

Отже, частина розробок екологічного одноразового посуду нині вже впроваджена у виробництво. Крім того, сировина для такого посуду та приладдя може різнитися залежно від регіону.

Мета дослідження: проаналізувати сучасний стан галузі виробництва екологічної альтернативи одноразового посуду та систематизувати теперішні здобутки, визначити проблеми та перспективи даної галузі.

Матеріали і методи. Аналіз і систематизація результатів здобутків світової наукової спільноти у сфері екологічного одноразового посуду та сфер їх застосування. Аналіз проблем і перешкод щодо промислового виробництва екологічного одноразового посуду як у світі, так і в Україні.

Викладення основних результатів дослідження. Найважчий на ринку одноразовий посуд класифікується таким чином:

за сферою застосування:

- посуд для харчування на свіжому повітрі;
- для дитячих кафе і свят (барвистий, цікавий і безпечний);
- для виїзних заходів;
- для фаст-фудів;
- для літніх кафе (в такі набори повинні входити виделки, ножі, ложки та палички для суші);

за призначенням: для напоїв, супів, закусок, гарніру;

за обсягом ємності та формою посуду;

за матеріалом:

- з поліпропілену (стійкий до нагрівання, підходить для гарячих страв і напоїв);
- з полістиролу (посуд з цього матеріалу підходить тільки для закусок і холодних напоїв);
- з картону (для захисту від намокання вкритий спеціальною плівкою);
- з алюмінієвої фольги (контейнери та кришки).

за кольором:

- білий або кольоровий;
- з малюнком або без;

за фактурою:

- матовий;
- прозорий;

за видом посуду: мішалки, миски, пляшки і кришки, тримачі, столові прибори, тарілки, посуд для суші, ланч-бокси (контейнери) (Dolya, 2023).

Наведена класифікація надає можливість встановити напрямок досліджень щодо екологічної альтернативи існуючого одноразового посуду.

Екологічність одноразового посуду можна реалізувати за такими напрямками:

- перейти на багаторазовий традиційний посуд і приладдя;
- біодеградабельний неїстівний посуд і приладдя;
- біодеградабельний їстівний посуд і приладдя.

Багаторазові чашки — це найбільш оптимальний спосіб, проте найменш зручний для реалізації, адже змусити носити чашку за собою неможливо через ряд

причин: для цього потрібно мати вільне місце в сумці; уникати її розбиття; санітарний стан чашки після перебування у сумці тощо (Allison та ін., 2021). Заохотити споживачів віддати перевагу можна за рахунок надання знижки за умови придбання кави в багаторазовій чашці (Ziada H., 2009). Так, одна з найвідоміших світових мереж кав'ярень — Starbucks, впровадила цю практику.

Додаткові мотиваційні фактори включають екологічні зобов'язання, фінансову підтримку, корпоративні ініціативи, попит клієнтів і тиск громадськості (Ma, 2014).

Дані 14-ти тижневого інтервенційного експерименту із загальною кількістю проданих 23946 гарячих напоїв (18019 в одноразових стаканчиках і 5927 у багаторазових чашках) свідчать про те, що динамічна норма впливу на стале споживання, допомагає клієнтам зменшувати кількість використання одноразових стаканчиків і збільшує використання багаторазового посуду на 17,3% (Loschelder, Siepelmeyer, Fischer, & Rubel, 2019). Багаторазові чашки, паперові без пластику та інші альтернативи запропоновано в публікації (Ziada, 2009).

Отже, заміна одноразових чашок на фарфорові або металеві можлива, крім того, нині є багаторазові чашки які здатні зберігати температуру напою (термочашки), що неможливо зробити для одноразового посуду з полімерних матеріалів.

Інший напрямок екологічного посуду — це біодеградабельний неїстівний, який перш за все представлений паперовим (Van der Harst, & Potting, 2013), проте водонепроникність такого посуду створюється за рахунок ламінації поліетиленом, який не є біодеградабельним матеріалом, тож віднесення до цієї групи є суперечливим. Проте в цьому сегменті є перспективи за рахунок заміни поліетилену на біодеградабельний матеріал, наприклад, з природних полімерів (Mahinpei, 2021).

Усі природні полімери, на які можна замінити поліетилен, класифікуються за походженням (рис. 2).

Отже, паперові матеріали як екологічна альтернатива дійсно є перспективною сировиною, проте вони водонепроникні, тому потребують полімерного прошарку, який не є екологічним. Природні полімери, які наведено на рис. 2, звісно є повноцінною заміною, проте виникають питання щодо адгезивних властивостей наведених полімерів і паперових матеріалів, крім того, вартість природних полімерів суттєво вища за їхні синтетичні аналоги.

Дійсно екологічний посуд потребує екологічної сировини, тому нині досить інтенсивно відбуваються розробки посуду з харчової сировини. Так, зокрема, автори (Sazeli, Zailani, Tajudin, & Hamka, 2021) запропонували виготовляти одноразовий посуд і столові прилади з кукурудзи та ячменю.

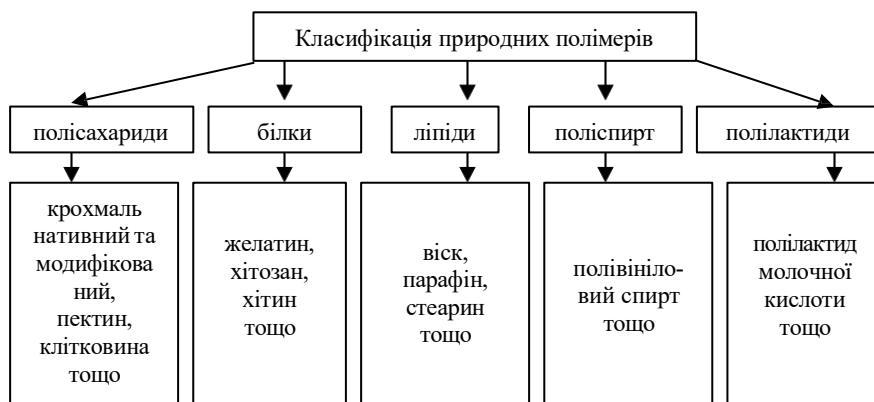


Рис. 2. Класифікація замінників поліетилену для паперового посуду (Шульга, 2019)

Дослідники (Liu та ін., 2020) розробили повністю природний біологічно розкладний, гігієнічний, стійкий до води та олії, механічно міцний, з низьким рівнем викидів CO₂ і недорогий столовий посуд з використанням екологічно чистого волокна цукрової тростини та бамбукового волокна за допомогою масштабованого методу формування целюлози.

Нині вже є розробки, які впроваджено у виробництво, зокрема компанія Inferra Pack виробляє біодеградабельний посуд з різної природної сировини: макухи цукрової тростини, кукурудзяного крохмалю та кавових відходів. Завдяки інноваційній технології вторинного оброблення целюлози, крафт-посуд містить на 30% більше вторинно переробленої сировини, ніж звичайний паперовий посуд. Унікальність такої екологічної продукції полягає в тому, що термін її повної утилізації в ґрунті становить близько 180 діб. Перевагою використання екологічно чистого одноразового пакування з біопластику є можливість його компостування (Blahopoluchna, Neshchadym, & Liakhovska, 2022).

Стаття (George A. S., & George A. H., 2023) присвячена використанню пшеничних та рисових висівок і кукурудзяного крохмалю як сировини для виробництва біологічно розкладального посуду та пакувальних виробів.

Окремий сегмент становлять істівні стакани та/або чашки. Виробники, які вже займаються виробництвом такого разового посуду, найчастіше позиціонують їх як кондитерський виріб — печиво у формі чашки/стакана. Зокрема, світова компанія швидкого харчування KFC в окремих країнах пропонує каву саме в таких чашках (West, 2015). Приклад такого стакану наведено на рис. 3.

Розробники (Kaya, Sargin, & Erdonmez, 2016) запропонували виробництво хітинових і хітозанових чашок із червонного екзоскелета комахи *Pimelia* sp. як альтернативу синтетичним матеріалам у харчовій промисловості. Як хітинові, так і хітозанові чашки виявляли антимікробну активність проти двох поширених харчових патогенів *C. albicans* and *L. monocytogenes*.



Рис. 3. Зовнішній вигляд їстівного стакану для кави KFC (УНІАН, 2015)

Розроблено технологію нового виду одноразових стаканчиків з біопластику на основі відпрацьованої кавової гущі та з використанням натуральних зв'язувальних харчових компонентів (Бідюк, & Серeda, 2020).



Рис. 4. Зовнішній вигляд стаканів з кавової гущі (Бідюк, & Серeda, 2020)

Екоупаковку для кавових напоїв можна розробити з таких матеріалів:

- кукурудзяний крохмаль. Стакан з такого матеріалу набагато міцніший, ніж пластик, має кремовий відтінок і не виділяє шкідливі речовини під час нагрівання;
- кавова гуща, з якої виготовляють легкі чашки, але цей процес досить складний; за структурою нагадує дерев'яні волокна, такі чашки набирають популярності в кав'ярнях;
- апельсинова кірка. Чашку з такого матеріалу використовують для кавових напоїв. Це оригінальне та екологічне рішення, чашки досить міцні та мають приємний запах, легкі в переробці;
- бамбук, з якого виготовляють різноманітний посуд, зокрема стакани для кавових напоїв. Дуже міцний та екологічний матеріал, але не рекомендований для використання напоїв з високими температурами;
- цукрова тростина. Посуд з такого матеріалу досить міцний і приємний на дотик, низька теплопровідність матеріалу дає змогу витримувати високі температури (Савченко, Омельченко, & Рубанка, 2021).

Також авторами цієї статті було розроблено біodeградебельний стакан, який є їстівним і може бути перекусом або ласощами до кави. Такий стакан після кави не

буде шкодити довкіллю, адже виготовляється він з харчової сировини. Зовнішній вигляд розробленого стакану представлено на рис. 5.



Рис. 5. Зовнішній вигляд розробленого авторами біодеградабельного їстівного стакану для гарячих напоїв

Представлений стакан має відмінні споживчі властивості і може бути перекусом після споживання кави.

Хоча соломинка не є обов'язковим атрибутом для споживання кави, проте багато споживачів віддають перевагу споживання саме таким способом. Негативний вплив пластикових соломинок на морське життя призвело до дедалі суворішого законодавства в цій сфері. Деякі країни вже планують законодавчо заборонити пластикові соломинки, зокрема Тайвань планує це зробити з 2030 р., оскільки в цій країні споживається три мільярди нерозкладаних пластикових соломинок (Cheng, & Shieh, 2022).

Столові прибори або столове приладдя — інструменти, призначені для маніпуляцій з їжею безпосередньо за столом. Їстівну ложку можливо виготовляти із суміші пшеничного, соргового та рисового борошна (Rashid, 2019).

Автори статті (Choeymbundit, Shiekh, Rachtanapun, & Tongdeesoontorn, 2022) запропонували виготовлення столових приборів з ізоляту соєвого білка з додаванням 5—20% сирієї клітковини зі стебел іпомеї. Виготовлення зазначених біодеградабельних столових приборів передбачає гідравлічне гаряче пресування за температури 160 °C впродовж 5 хвилин.

Їстівні тарілки можливо виготовляти з екстракту шпинату, рисового та соргового борошна, сорбіту (Sood, & Deepshikha, 2018). З метою скорочення відходів пивоварного виробництва з дробини можна виготовляти одноразові тарілки (Іщенко, Плаван, Москаль, & Медяньська, 2022). Наявність дробини у складі тарілки (70—80%) покращує термічні та механічні властивості матеріалу.

Екологічно чисті, біодеградабельні тарілки можна виготовляти з листя ареки (Nayak, Barik, & Jena, 2021). Для біодеградабельних мисок також використовують пшеничні висівки, пшеничне борошно, олію, насіння канולי, сіль і чай ройбуш (Poonia, & Yadav, 2017).

Виготовлення біополімерного одноразового посуду у вигляді їстівних вітамінних креманонок пропонується з плодів гарбуза (Соп'яненко, & Понич, 2021).

Отже, нині у світі вже розроблено екологічний одноразовий посуд та столові прибори. Сировиною є природні полімери, харчова сировина або відходи харчової промисловості. Проте масового промислового впровадження поки що наведені розробки не набули. Саме тому подальші розробки щодо екологічних аналогів одноразового посуду та приборів є необхідним.

На основі представленого аналізу існуючих розробок (Гуща, 2018; Chen та ін., 2023) сировину, яку використовують, можна класифікувати таким чином (рис. 6).

У світі нині є вже приклади промислового впровадження екологічного посуду в масове виробництво: компанія Bakey's (Індія) виробляє ложки, виделки та палички; компанія Rice-Design (Японія) пропонує тарілки, миски та палички для їжі; компанія Do Eat (Бельгія) виробляє контейнери для їжі; компанія Biotrem (Польща) пропонує споживачам миски і тарілки; компанія Munchbowls (ПАР) виробляє миски; компанії Loliware, ChocAmo (США) виробляє чашки та стаканчики з печива (Natarajan, Vasudevan, Vivekk Velusamy, & Selvaraj, 2019).

В Україні, як і в світі, нині немає єдиного нормативного документа на екологічний одноразовий посуд. Варто зауважити, що одноразовий посуд може бути харчовим продуктом, тому єдиного документа бути й не може. Саме тому нині немає єдиного переліку показників, за якими доцільно оцінювати властивості екологічного одноразового посуду. На рис. 7 представлена класифікація споживчих властивостей екологічного посуду на основі аналізу літературних джерел.

Автори статті (Roy, & Morya, 2022) також пропонують екологічний посуд, який має терапевтичні властивості, тобто його можуть споживати люди, хворі на цукровий діабет, ожиріння, рак, целиакію, ішемічну хворобу серця тощо.

Крім наряду розроблення виробів з матеріалів, які є екологічними, науковці також досліджують питання способів утилізації з метою зменшення екологічного навантаження. Так, автори (Biswal, Kumar, & Singh, 2013) запропонували спосіб утилізації паперових стаканів термічним піролізом. Відходи паперових стаканів утилізували в напівперіодичному реакторі в діапазоні температур від 325 до 425 °C та зі швидкістю нагріву 20 °C/хв. Фізичні властивості отриманої піролітичної оливи були аналогічні іншим піролітичним оливам і неякісного палива.

Дослідники (Nagarajan та ін., 2020) запропонували одержання целюлозних наноматеріалів на біоекооснові з використаних паперових стаканчиків за рахунок гідролізу лимонної кислоти.

Посуд з полілактиду за 3 місяці може повністю розкластися до води та Карбону. Для розкладання необхідні температури не менше +55...+70 °C та вологість, які можуть забезпечити тільки комерційні установки для компостування. Крім цього, під час виробництва біополімеру виділяється набагато менше вуглекислого та інших парникових газів. Перехід зі звичайного пластику на біопластик зменшив би викиди парникових газів до 25%. Використання полілактиду дасть змогу зменшити залежність від полімерних матеріалів на нафтовій основі, що, у свою чергу, зменшить попит на неї (Ziada, Changwihan, & Gheewala, 2020).

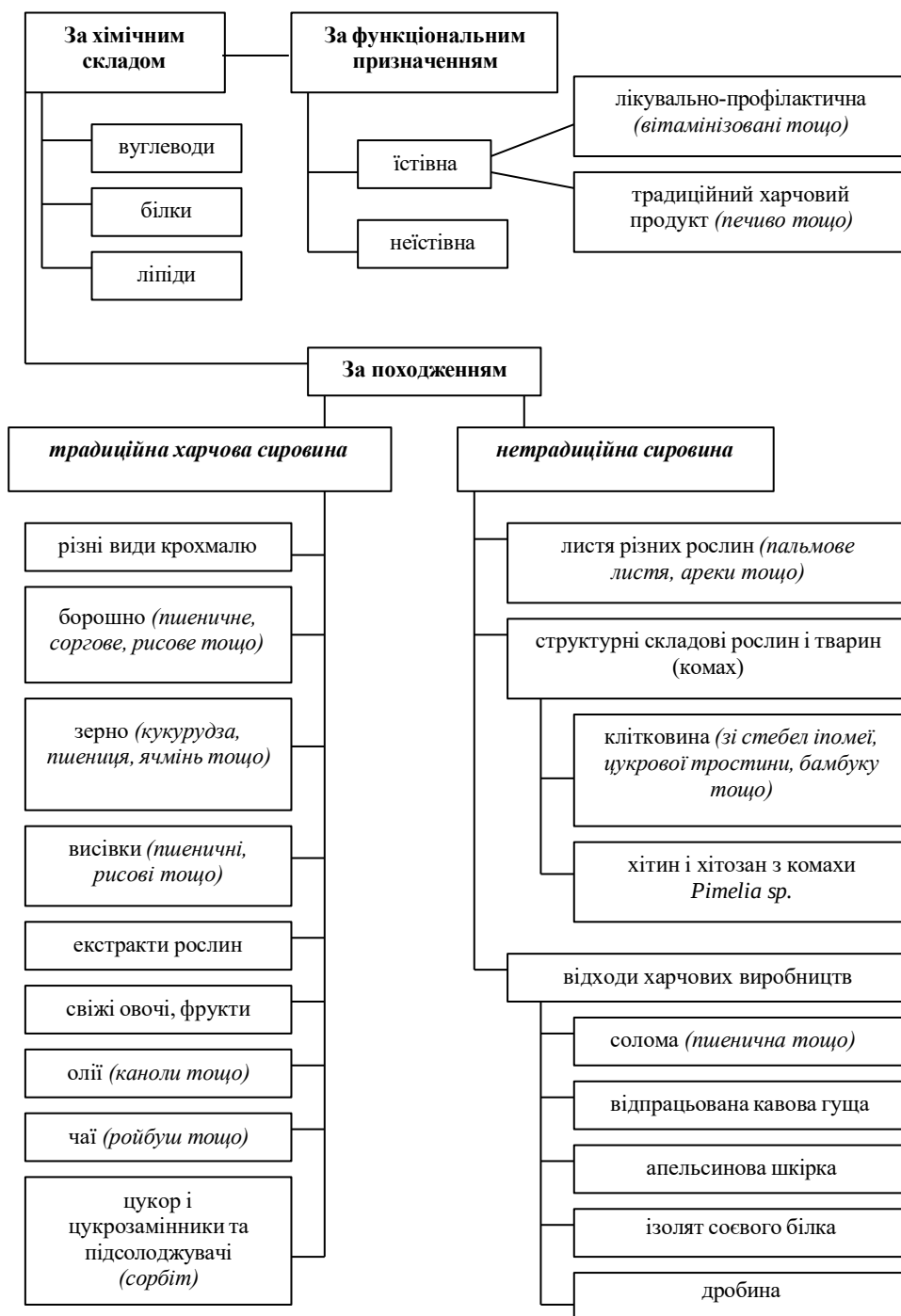


Рис. 6. Класифікація сировини для виробництва екологічного одноразового посуду

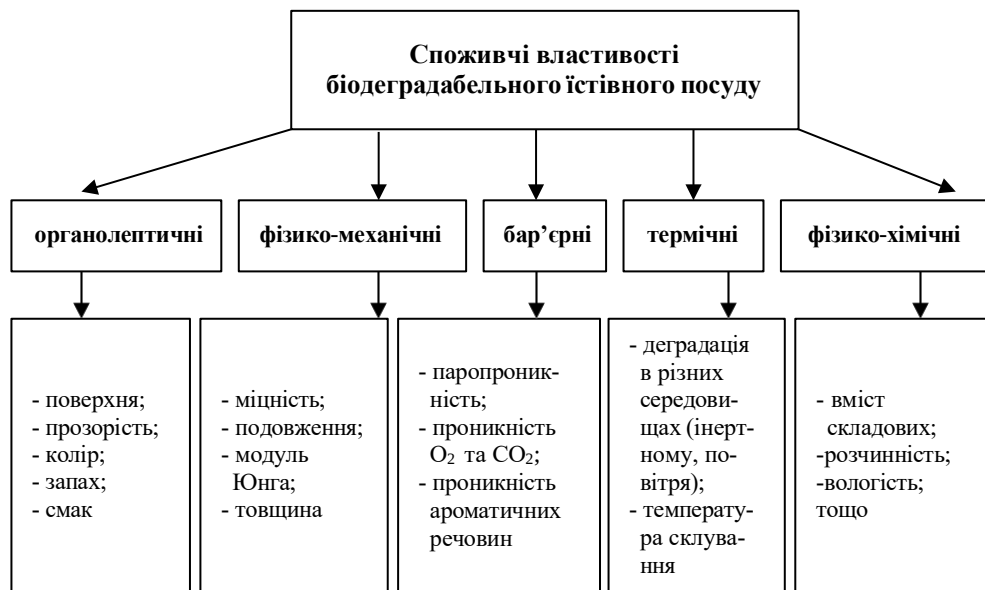


Рис. 7. Класифікація показників якості екологічного одноразового посуду

Висновки

1. Екологічні альтернативи одноразового посуду нині здійснюються у трьох напрямках: багаторазовий фарфоровий або металевий посуд, біодеградабельний неїстівний посуд та їстівний посуд.

2. Найбільш перспективним напрямом екологічного одноразового посуду є їстівний посуд, адже буде виконувати подвійну функцію — перекус і природна утилізація. Крім того, не потребує використання спеціальної сировини, а виготовляється з харчової сировини.

3. Реалізація напряму біодеградабельного неїстівного посуду дасть змогу скоротити відходи харчових виробництв, адже посуд виготовляється з висівок, дробини, клітковини тощо. Використання частин рослин як посуду характерно для країн з більш теплим кліматом, ніж в Україні (тропічних, екваторіальних тощо).

4. Оскільки повний перехід на екологічні альтернативи в найближчі роки неможливий, перш за все через економічні причини, то розроблення екологічних способів утилізації є необхідним.

5. Споживчі властивості екологічного посуду представлені органолептичними, фізико-механічними, бар'єрними, термічними, фізико-хімічними, а також терапевтичними властивостями. Перелік показників якості для кожного виду посуду буде різнитися залежно від його виду та призначення.

Література

- Бідюк, Д. О., Середа, О. Г. (2020). Новий вид біорозкладувальної тари. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Сер. «Технічні науки»*, 31(70), 2 (2), 85—94.
- Громаченко, К. Ю., Яковишина, М. С. (2021). Екологічні практики також вкрай. Екологічні практики ресторанного господарства м. Рівне. *Вісник НУВГП. Серія «Сільськогосподарські науки»*, 3(95), 34—46.
- Гуща, Є. А. (2018). *Біопосуд: види та переваги використання*. Гостинність, сервіс, туризм: досвід, проблеми, інновації: тези доповідей V Міжнар. наук.-практ. конф., Київ: Вид. центр КНУКіМ.
- Іщенко, О. В., Плавач, В. П., Москаль, Р. М., & Медяньська, В. В. (2022). *Екопосуд на основі термопластичного крохмалю з наповненням целюлозними відходами харчової промисловості*, Дорожня карта реалізації Закону України «Про управління відходами»: збірка матеріалів Національного форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології». м. Київ: Центр екологічної освіти та інформації.
- Карпенко, О. (2020). Попит на кур'єрську доставку їжі зростає: в деяких службах — на 20—25%. *Економічна правда*. Взято з <https://www.epravda.com.ua/news/2020/03/13/658022/>.
- Нещадим, Л. П., Слободян, О. П., Заєць, В. А. (2014). *Небезпеки, які приховує пластиковий посуд*. Природокористування і сталий розвиток: економіка, екологія, управління: збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції. м. Ірпінь: Нац. ун-т ДПС України.
- Савченко, Ю. О., Омельченко, Г. В., Рубанка, А. І. (2021). *Систематизація різновидів екоупаковки для кавових напоїв*. Стан і перспективи розвитку хімічної, харчової та парфумерно-косметичної галузей промисловості: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Херсон: ХНТУ.
- Соп'яненко, Н., Понич, Т. В. (2021). *Виготовлення біополімерного одноразового посуду у вигляді їстівних вітамінних креманок на основі плодів гарбуза*. Молодь. Наука. Природа: Матеріали II Всеукраїнської наукової конференції-конкурсу, м. Суми: ФОП Цьома С. П.
- УНІАН. (2015). У британських KFC з'явилися кавові стаканчики з печива й шоколаду. УНІАН. Взято з <https://www.unian.ua/curiosities/1049086-u-britanskih-kfc-zyavilisya-kavovi-stakanchiki-z-pechiva-y-shokoladu.html>.
- Шульга, О. С. (2019). *Наукове обґрунтування та розроблення технології біодеградабельного їстівного покриття для кондитерських і хлібобулочних виробів*. (Дис. д-ра техн. наук). Національний університет харчових технологій, Київ.
- Allison, A. L., Lorencatto, F., Miodownik, M., Michie, S. (2021). Influences on single-use and reusable cup use: a multidisciplinary mixed-methods approach to designing interventions reducing plastic waste, *UCL Open Environment*, 3, 1—17. doi: 10.14324/111.444/000059.v1.
- Andrea. (2020). Edible Cutlery Market by Product, Raw Material and Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2019—2026. Взято з <https://www.researchandmarkets.com/reports/5019925/edible-cutlery-market-by-product-raw-material>.
- Biswal, B., Kumar, S., Singh, R. K. (2013). Production of hydrocarbon liquid by thermal pyrolysis of paper cup waste. *Journal of Waste Management*. Available Взято з: <https://downloads.hindawi.com/archive/2013/731858.pdf>. doi. 10.1155/2013/731858.
- Blahopoluchna, A. H., Neshchadym, L. M., Liakhovska, N. O. (2022). The use of biodegradable utensils in restaurants, *Ekonomichni horyzonty*, 1(19), 12—21. doi: 10.31499/2616-5236.1(19).2022.259396.
- Borgobello, B. (2019). In-flight meal tray reinvented with eco-friendly and edible packaging. *New Atlas*. Взято з <https://newatlas.com/>.
- Changwichan, K., Gheewala, S. H. (2020). Choice of materials for takeaway beverage cups towards a circular economy, *Sustainable Production and Consumption*, 22, 34—44. doi: 10.1016/j.spc.2020.02.004.

Chen, X., Chen, F., Yang, Q., Gong, W., Wang, J., Li, Y., & Wang, G. (2023). An environmental food packaging material part I: A case study of life-cycle assessment (LCA) for bamboo fiber environmental tableware. *Industrial Crops and Products*, 194, 116279. doi:10.1016/j.indcrop.2023.116279.

Cheng, S. Y., Shieh, M. D. (2022). Development of eco-friendly bubble tea take-away cups. Взято з: <https://dl.designresearchsociety.org/drs-conference-papers/drs2022/researchpapers/114/>. doi: 10.21606/drs.2022.409.

Choeybundit, W., Shiekh, K. A., Rachtanapun, P., & Tongdeesontorn, W. (2022). Fabrication of edible and biodegradable cutlery from morning glory (*Ipomoea aquatic*) stem fiber-reinforced onto soy protein isolate. *Heliyon*, 8(5). doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09529.

Dolya. (2023). Одноразовий посуд коли з'явився та який буває. Взято з <https://dolya.in.ua/odnorazovij-posud-koli-z-yavivsy-ta-yakij-buvaye/>.

Dybka-Stępień, K., Antolak, H., Kmiołek, M., Piechota, D., & Koziróg, A. (2021). Disposable food packaging and serving materials-trends and biodegradability. *Polymers*, 13(20), Взято з <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/20/3606>. doi: 10.3390/polym13203606.

Dordevic, D., Necasova, L., Antonic, B., Jancikova, S., & Tremlová, B. (2021). Plastic cutlery alternative: Case study with biodegradable spoons. *Foods*, 10(7), 1612. doi: 10.3390/foods10071612.

EdiblePRO. (2023). Офіційний сайт компанії. Взято з <https://ediblepro.com/>.

Eurostat. (2020). How much are households spending on eating-out? Взято з <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/EDN-20200101-2>.

Garfield, L. (2016). These real-life Willy Wonka edible spoons could help solve our growing plastic problem. Взято з <https://www.businessinsider.com/bakeys-makes-edible-cutlery-and-launches-kickstarter-2016-3?IR=T>.

George, A. S., & George, A. H. (2023). Biodegradable Ecofriendly Sustainable Tableware and Packaging: A Comprehensive Review of Materials, Manufacturing, and Applications. *Partners Universal International Research Journal*, 2(2), 202—228. doi: 10.5281/zenodo.8051038.

Jung, L. W., Al-Shehhi, M. R., Saffarini, R., Warshay, B., Arafat, H. A. (2011). *Paper or plastic? Clearing misconceptions on environmental impacts of coffee cups using life cycle assessment (LCA)*. International Conference on Water, Energy and Environment. Sharjah, United Arab Emirates.

Kaya, M., Sargin, I., Erdonmez, D. (2016). Microbial biofilm activity and physicochemical characterization of biodegradable and edible cups obtained from abdominal exoskeleton of an insect, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 36, 68—74. doi: 10.1016/j.ifset.2016.05.018.

Liu, C., Luan, P., Li, Q., Cheng, Z., Sun, X., Cao, D., Zhu, H. (2020), Biodegradable, hygienic, and compostable tableware from hybrid sugarcane and bamboo fibers as plastic alternative, *Matter*, 3(6), 2066—2079. doi: 10.1016/j.matt.2020.10.004.

Loschelder, D. D., Siepelmeyer, H., Fischer, D., Rubel, J. A. (2019). Dynamic norms drive sustainable consumption: Norm-based nudging helps café customers to avoid disposable to-go-cups, *Journal of Economic Psychology*, 75, 102146. doi: 10.1016/j.joep.2019.02.002.

Mahinpei, R. (2021). Minimizing the Use of Polyethylene inside Paper Coffee Cups, *STEM Fellowship Journal*, 6(1), 60—68. doi: 10.17975/sfj-2020-011.

Ma, J. (2014). Exploring the feasibility and desirability of in-house diversion programs for disposable hot beverage cups at the store level in Halifax Regional Municipality. Взято з: <https://dalspace.library.dal.ca/handle/10222/76526>.

Munir, S. (2023). Edible Cutlery: The Future of Eco Friendly Utensils. Взято з <https://www.kickstarter.com/projects/1240116767/edible-cutlery-the-future-of-eco-friendly-utensils>

Natarajan, N., Vasudevan, M., Vivekk Velusamy, V., & Selvaraj, M. (2019). Eco-friendly and edible waste cutlery for sustainable environment. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1S4), 615—623. doi: 10.35940/ijeat.A1031.1291S419.

Nagarajan, K. J., Balaji, A. N., Rajan, S. T. K., Ramanujam N. R. (2020). Preparation of bio-eco based cellulose nanomaterials from used disposal paper cups through citric acid hydrolysis. *Carbohydrate polymers*, 235, 115997. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.115997.

Nayak, S., Barik, S., Jena, P. K. (2021). Eco-friendly, bio-degradable and compostable plates from areca leaf. *Biopolymers and Biocomposites from Agro-Waste for Packaging Applications*, 127—139. doi: 10.1016/B978-0-12-819953-4.00002-1.

Poonia, A., Yadav, P. (2017). Trends in Edible Cutlery and Tableware. *Beverage & Food World*. 44(10), 36—38.

Rashid, M. S. (2019). *Edible Cutlery as Sustainable Sub-stitute for Plastic Cutlery*. (Doctoral dissertation). BRAC University, Dhaka, Bangladesh.

Roy, T. R., Morya, S. (2022). Edible cutlery: An eco-friendly replacement for plastic cutlery. *Journal of Applied and Natural Science*, 14(3), 835—843. doi: 10.31018/jans.v14i3.3627.

Sazeli, Z., Zailani, A., Tajudin, I., Hamka, A. (2021). Biodegradable Cupas A Substitute for Single Use Plastic, *Multidisciplinary Applied Research and Innovation*, 2(2), 197—205. doi: 10.30880/mari.2021.02.02.025.

Sood, S., Deepshikha. (2018). Development and Quality Evaluation of Edible Plate. ARC (Academicians Research Center). *Journal of Nutrition and Growth*, 4(2), 1—4. doi: 10.20431/2455-2550.0402001.

Van der Harst, E., Potting, J. (2013). A critical comparison of ten disposable cup LCAs. *Environmental impact assessment review*, 43, 86—96. doi: 10.1016/j.eiar.2013.06.006.

West, L. (2015). KFC Has Wack-Ass Idea for Edible Coffee Cups, Blames It on Millennials. Взято з: <https://www.gq.com/story/kfc-has-wack-ass-idea-for-edible-coffee-cups-blames-it-on-millennials>.

Ziada, H. (2009). Disposable coffee cup waste reduction study, *McMaster University: Hamilton, ON, Canada*. Взято з: https://www.eng.mcmaster.ca/sites/default/files/uploads/disposable_coffee_cup_waste_reduction.pdf.

УДК 504.06, 628.31

REMOVAL OF MICROPLASTICS FROM WASTEWATER FOR WORLD WATER POOL PROTECTION

V. Stabnikov¹, R. Mikolayenko¹, D. Stabnikov^{1,2}

¹ National University of Food Technologies

² University of Wrocław, Wrocław, Poland

Key words:

Microplastics
Wastewater
Cleaning
Biosorbents

Article history:

Received 06.11.2023
Received in revised form
22.11.2023
Accepted 01.12.2023

Corresponding author:

V. Stabnikov

E-mail:

vstabnikov1@gmail.com

Citation: В. Стабніков, Р. Миколаєнко, Д. Стабніков (2023). Видалення мікропластику зі стічних вод для захисту світового водного басейну. Наукові праці НУХТ, 29(6), 23—44.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-4

ABSTRACT

Microplastics are one of the new pollutants and are a threat to natural aquatic ecosystems as well as human health. After entering natural reservoirs, microplastic particles are quickly settled and covered with surfactants of microbial origin. This fundamentally changes the properties and behavior of MP in water: particles become highly hydrophilic and acquire the ability to absorb many pollutants, such as metal ions and pharmaceuticals. This changes the properties and behavior of microplastics in water: particles become highly hydrophilic and acquire the ability to absorb many pollutants, such as metal ions and pharmaceuticals. Particles of microplastics are not removed during the treatment of wastewater at municipal treatment plants and in large quantities enter with purified waters in natural reservoirs. Therefore, it is necessary to develop additional measures for microplastic removal from purified wastewater after their treatment at municipal treatment plants. The present review considers techniques aimed to remove microplastics from purified wastewater to protect the environment.

It has been found that when treating wastewater using traditional technology, it is possible to remove from 83% to 98% of microplastics from its initial amount. However, given the huge volumes of treated wastewater entering natural reservoir, this causes a real threat to the environment.

To further remove microplastics, it is possible to use flocculation or filtration as a modification of existing water treatment systems, as well as tertiary treatment methods, such as purification in a membrane bioreactor, reverse osmosis or ultrafiltration units. All of these technologies can significantly increase the percentage of removed microplastic, but are expensive, making them difficult to use at a large scale. A promising approach is the use of biosorbents (biomass of agricultural or forest waste).

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-4

ВИДАЛЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ ЗІ СТІЧНИХ ВОД ДЛЯ ЗАХИСТУ СВІТОВОГО ВОДНОГО БАСЕЙНУ

В. Стабніков¹, Р. Миколасенко¹, Д. Стабніков^{1,2}

¹ Національний університет харчових технологій

² Вроцлавський університет, Вроцлав, Польща

Мікропластик є одним з нових забруднювачів, що створює загрозу для природних водних екосистем, а також для здоров'я людини. Після потрапляння в природні водойми частинки мікропластику швидко заселяються і покриваються поверхнево-активними речовинами мікробного походження. Це докорінно змінює властивості та поведінку мікропластику у воді: частки стають високогідрофільними та набувають здатності поглинати багато забруднюючих речовин, таких як іони металів і фармацевтичні препарати. Частинки мікропластику не видаляються при обробці стічних вод на міських очисних спорудах і у великій кількості потрапляють з очищеними водами у природні водойми, тому необхідно розробити додаткові заходи щодо доочищення стічних вод після їх обробки на очисних спорудах. У представленому огляді аналізуються технологічні прийоми, спрямовані на видалення мікропластику зі стічних вод з метою підвищення рівня безпеки навколишнього середовища.

Встановлено, що при очищенні стічних вод за традиційною технологією можна видалити від 83 до 98% мікропластику від його первинної кількості. Однак, враховуючи величезні об'єми очищених стічних вод, які потрапляють у природні водойми, це становить реальну загрозу для довкілля.

Для подальшого видалення мікропластику можливо використання флокуляції або фільтрації як модифікації існуючих систем очищення води, а також методів третинного очищення, зокрема очищення в мембраному біореакторі, на установці зворотного осмосу або ультрафільтрації. Всі ці технології дають змогу значно підвищити відсоток видаленого мікропластикового забруднення, однак висока вартість ускладнює їх використання для масштабного вживання.

Перспективним підходом додаткового очищення води від мікропластику може стати використання біосорбентів (біомаси сільськогосподарських чи лісових відходів).

Ключові слова: мікропластик, стічні води, очищення, біосорбенти.

Постановка проблеми. Пластикове забруднення стало одним із найпоширеніших стійких забруднювачів навколишнього середовища. У 2019 р. річне виробництво пластику склало 368 млн тонн, очікується, що до 2050 р. його виробництво збільшиться до 33 млрд тонн (Bellasi та ін., 2020). Згідно з оцінюванням, 76% усього виробленого пластику вивозиться на звалища або розповсюджується у природному середовищі (Geyer, 2020). Дрібні частинки пластикових відходів (мікропластики, нанопластики) відносяться до групи забруднювачів довкілля зі значним несприятливим впливом на навколишнє середовище. Термін «мікропластик» вперше з'явився при дослідженні дрібних пластикових частинок правильної або неправильної форми розміром від 1 мкм до 5 мм. Вважається, що мікропластики (МП) стають основним джерелом антропогенного забруднення океанів (Bowley та ін., 2021). Кількість пластикових відходів, що потрапляють у морське середовище, становить 8 млн тонн на рік (Rodrigues та ін., 2019), а кількість шматочків

пластику оцінюється від 15 до 51 трильйона (Bowley та ін., 2021). Пластик вважається нерозкладним матеріалом через (1) високу молекулярну масу, що унеможливає транспортування великих молекул через клітинну мембрану мікроорганізмів; (2) високу гідрофобність, яка запобігає прикріпленню мікробних клітин до гідрофільних поверхонь; (3) недостатню кількість належних функціональних груп (Cai та ін., 2023; Wilkes & Aristilde, 2017). Все це зумовлює постійне зростання кількості мікропластику в довкіллі.

Мікропластик був виявлений у прісній і питній воді, ґрунті, а також у продуктах харчування (Eerkes-Medrano та ін., 2019; Rainieri та ін., 2020; Sewwandi та ін., 2022). Вміст мікропластику в сильно забруднених річках може досягати 100 мг на л води. Частинки мікропластику було виявлено практично всюди: в океанах, морях, річках, у морському льоді, полярних регіонах, навіть в океанічних поверхневих водах та осадах Антарктичного півострова (Audrézet та ін., 2020; Peng та ін., 2018), у повітрі (O'Brien та ін., 2023), ґрунті (Guo та ін., 2020) та в живих істотах (Rainieri, & Baccaro, 2019).

Мікропластики служать місцем існування мікроорганізмів, зокрема патогенних, місцем утворення біоплівки і засобом транспортування мікробів на нові території (Dudek та ін., 2020; Hoellein та ін., 2014; Oberbeckmann, & Labrenz, 2020; Stabnikova та ін., 2021). Мікроорганізми, прикріплені до поверхні частинок мікропластику, взаємодіють з ними, використовують їх як субстрати для живлення, змінюють властивості та біорозкладають (Kelly та ін., 2021). Після потрапляння в природні водойми частинки мікропластику швидко колонізуються та покриваються мікробними поверхнево-активними речовинами (Stabnikova та ін., 2022). Враховуючи велику площу поверхні та її гідрофобність, мікропластики можуть виступати як сорбенти для інших забруднювачів навколишнього середовища, таких як стійкі органічні забруднювачі, вуглеводні, фармацевтичні препарати, важкі метали тощо (Fan та ін., 2021; Klavins та ін., 2022; Sun та ін., 2021).

Одним із механізмів токсичності мікропластику є десорбція забруднюючих речовин при потраплянні частинок у живий організм. Причому набагато більший передбачуваний ризик заподіяння шкоди біоті, що створюється невеликими за розміром частинкам мікропластику діаметром усього в кілька мікрометрів і нанометрів ніж більшими оскільки (1) їх концентрації в навколишньому середовищі будуть набагато вищими, і (2) збільшується ризик потрапляння дрібних частинок у клітини та тканини. Крім того, частинки мікропластику меншого розміру мають набагато більшу площу поверхні, готову сорбувати та десорбувати ряд хімічних речовин, оскільки вони легше проникають у клітини, більш імовірний несприятливий вплив мікропластику на організми (Triebkorn та ін., 2018). Наприклад, пластикові кубики розміром 10 мкм мають питому площу 0,67 м²/г, а пластикова пластинка завтовшки 1 мм має питому площу 0,001 м²/г. Отже, швидкість дифузії розчинних потенційно токсичних компонентів з пластикової частинки розміром 10 мкм може бути майже у 670 разів вищою, ніж з пластикової пляшки чи пластикової плівки (Vaseashta та ін., 2021). Таким чином, мікропластик має тенденцію адсорбувати шкідливі речовини і, потрапляючи в організм людини, може вилугувати певні добавки, що викликають ендокринні порушення та мають канцерогенні властивості.

Мікропластик споживають різні водні мешканці — від зоопланктону до вищих трофічних рівнів (риби та ссавці) (Costa та ін., 2020). Пластикове сміття було виявлено в рибах, мідях і молюсках, призначених для споживання людиною (Rochman та ін., 2020). Фактично була доведена присутність мікропластику у приблизно 80% основних видів виловлених риб (Walkinshaw та ін., 2020). Трофічне перенесення, біоаккумуляція та біомагніфікація мікропластику в морепродуктах створюють реальний спосіб його надходження до організму людини (Vázquez-Rowe та ін., 2021).

Показано негативний вплив мікропластику на водні та ґрунтові живі організми через порушення репродукції, недоїдання, внутрішні садна та закупорки (Kumar та ін., 2020; Sun та ін., 2021), а також виявлено несприятливий вплив на здоров'я людини (Ghosh та ін., 2023; Kirstein та ін., 2016; Smith та ін., 2018). Наприклад, показана цитотоксичність мікропластику (в основному полістирол товщиною 10 мкм) на церебральних та епітеліальних клітинах людини (Schirrinzi та ін., 2017). Також повідомлялося, що полістирол ($0,25 \pm 0,06$ мкм) буде поглинатися кератиноцитами людини (Triebkorn та ін., 2019).

Питна вода, що надходить із прісноводних природних ресурсів, містить частинки мікропластику і є джерелом цього забруднення в раціоні людини, оскільки при обробці води з допомогою коагуляції-флокуляції видаляється лише до 88% мікропластику (Pivokonsky та ін., 201). Водопровідна вода в Китаї містила частинки мікропластику, в основному поліетилену та поліпропілену, від 440 ± 75 частинок/л (Tong H. та ін., 2020). Визначення мікропластику у воді, взятій з різних природних джерел, показало, що вміст коливався від 1473 до 3605 частинок на 1 л, а вміст мікропластику в очищеній питній воді варіювався від 338 до 628 частинок на 1 л (Pivokonsky та ін., 201).

Однак лише частинки мікропластику розміром менше 20 мкм здатні проникати в органи. Частки розміром менше 10 мкм можуть потрапляти у всі органи та проникати через клітинні мембрани (Vaseashta та ін., 2021). Хоча вплив споживання мікропластику на здоров'я людини досі недостатньо вивчений і натепер немає чітких науково підтверджених даних про те, що мікропластик негативно впливає на здоров'я людини, однак видалення мікропластику з організмів ускладнено, і частки мікропластику можуть накопичуватися в організмі. Вважається, що мікропластик може викликати запалення шлунково-кишкової системи та у разі, коли частинки мікропластику служать переносниками хімічних речовин із навколишнього середовища, вони можуть викликати токсичні наслідки та пошкодження органів у людини. Наявність мікропластику в організмі людини збільшує ризик раку (Li та ін., 2023).

Відомо, що мікропластики не видаляються при очищенні стічних вод на міських очисних спорудах (МОС) і у великій кількості потрапляють з очищеними водами у природні водойми. Підраховано, що у 1 м³ стоків МОС у Німеччині міститься в середньому 6400 частинок МП. Мікропластик в очищених стічних водах є носієм для перенесення у водне середовище мікроорганізмів, що містяться в стічних водах, а також важких металів і різних стійких органічних сполук. Частинки мікропластику можуть бути покриті також патогенними мікроорганізмами, що можуть бути переносниками патогенних мікроорганізмів людини. Показано, що біоплівки мікропластику з очищених стічних вод характеризувалися

наявністю умовно-патогенних бактерій роду *Acinetobacter* та бактерій родів *Klebsiella*, *Pseudomonas* і *Sphingomonas*, які вважаються здатними до деградації пластику. Біоплівки на мікропластику в стічних водах очисних споруд містять різноманітні бактеріальні угруповання, тож мікропластик може слугувати вектором переносу умовно патогенних і патогенних мікроорганізмів, що містяться у стічних водах, у довкілля (Kelly та ін., 2021; McCormick та ін., 2014; Oberbeckmann, & Labrenz, 2020).

Очевидна необхідність вживання заходів для додаткового очищення стічних вод після їх обробки на МОС для зниження кількості мікропластику, що потрапляє в природні водоймища.

Мета статті: узагальнення літературних даних щодо методів виділення мікропластику зі стічних вод для захисту світового водного басейну.

Матеріали і методи. Матеріалом дослідження стали наукові публікації у провідних періодичних і спеціалізованих світових виданнях, що стосуються створення та використання сучасних технологій видалення мікропластику з очищених стічних вод. Для проведення літературного дослідження було використано класичний підхід пошуку за ключовими словами, такими як мікропластик у поєднанні з стічними водами, забрудненням, ідентифікацією, видаленням, вилученням, деградацією та переробкою. Використовувалися найпоширеніші пошукові системи, такі як Google Scholar, Web of Science, а також провідних видавництв (ACS, Elsevier, Hindawi, MDPI, RSC, Springer та Wiley).

Викладення основних результатів дослідження. *Скиди очисних споруд як джерело мікропластику.* Очищені стічні води відіграють роль джерела мікропластику і мають суттєвий вклад у транспортуванні мікроорганізмів з очищених стічних вод у водне середовище (McCormick та ін., 2014). Мікропластик, присутній у стічних водах, поділяють на дві групи: 1) первинний мікропластик (15 до 31% мікропластику в океанах), що надходить від прання синтетичного одягу (35% первинного мікропластику); стирання шин при їзді (28%); мікрокульки діаметром зазвичай менше 1 мм, які широко використовуються в засобах особистої гігієни, таких як зубні паста, скраби для обличчя й тіла (2%); 2) вторинний мікропластик, що утворюється в результаті фрагментації великих пластикових предметів, таких як пластикові пакети, пляшки або рибальські мережі через механічну дію або хімічні процеси (69—81% мікропластику, виявленого в океані) (Browne та ін., 2011; News European Parliament, 2018; Raju та ін., 2018). Спалах коронавірусу додав нове джерело забруднення води мікропластиком — за рік пандемії до океану потрапило від 0,15 до 0,39 млн тонн пластикового сміття від масок для обличчя (Chowdhury та ін., 2021). Взагалі, частинки мікропластику, які знаходяться у стічних водах, можна розділити за розміром на великий мікропластик (від 1 до 5 мм), дрібний мікропластик (від 100 до 1 мм) та нанопластик (від 1 до 100 нм) (Herbort та ін., 2018). Форма фрагментів дуже різноманітна: волокна, мікрокульки, плівки, пінопласти та гранули (Hartmann та ін., 2019).

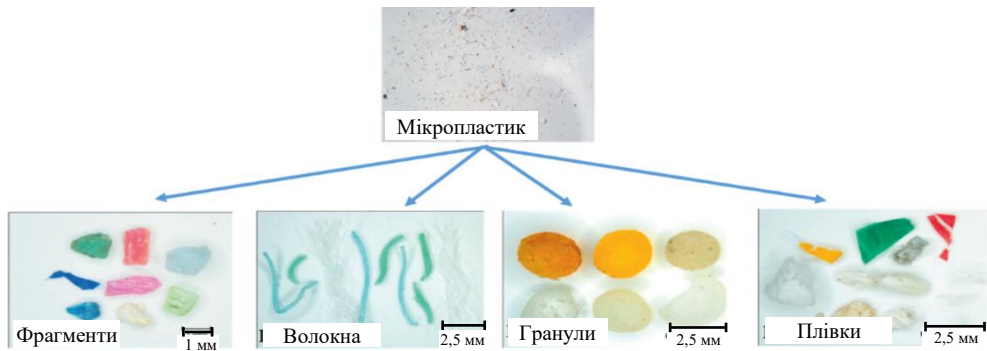


Рис. 1. Типи мікропластику у воді (Karthik et al., 2018; Singh et al. 2021)

Але класифікація не враховує відмінності у хімічному складі та властивостях пластику. Основні полімерні складові мікропластику, виявлені у воді, були ідентифіковані як поліетилен, поліпропілен, полістирол і поліетилентерефталат, що становить 70% від загальної кількості, але зустрічаються також фрагменти, що містять полівінілхлорид, поліуретан, поліакрилонітрил, каучук, а також різні кополімери (Frias та ін., 2019; Li та ін., 2020). Аналіз мікропластику 12 очисних споруд Німеччини показав, що він складався з таких синтетичних полімерів, як поліетилен, поліпропілен, поліамід, полістирол, поліуретану, поліестер та силікон, при цьому переважали частинки з пропілену (у середньому 59%) і поліпропілену (у середньому 16%) (Mintenig та ін., 2017).

Звичайні міські очисні споруди (МОС) не повністю видаляють мікропластик, тому очищені традиційними методами стічні води містять значну його кількість. Скидання цих стічних вод у природні водойми призводить до потрапляння мікропластику в ланцюг постачання питної води (Murphy та ін., 2016). Підраховано, що в 1 м³ стічних вод міських очисних споруд у Німеччині міститься до 9000 часток мікропластику розміром 0,5 мм, серед яких переважає поліетилен (Mintenig та ін., 2017).

Тверді біологічні речовини або осади, які отримують на очисних спорудах, багаті на поживні речовини і тому використовуються як добрива в сільськогосподарській і ландшафтній практиці багатьох країнах (Stabnikova та ін., 2005). Однак мікропластик, що залишився в анаеробному мулі, часто разом з ним потрапляє на поля фільтрації (Yuan та ін., 2022) або на сільськогосподарські землі, що призводить до забруднення підземних вод завдяки перколяційним процесам (Milojevic, & Cydzik-Kwiatkowski, 2021) (рис. 2).

Частинки мікропластику (в основному у вигляді кульок і волокон) проникають у ґрунтове середовище шляхом застосування твердих біологічних відходів у громадських місцях, присадибних садибах, звалищах, на реабілітаційні ділянки та ліси (Gray et al. 2017). У Європі, де урядова політика заохочує використання осаду стічних вод на звалищах, сміттєспалювальних заводах та у сільському господарстві, близько 10 млн тонн осаду було отримано на очисних спорудах у 2010 р. (Raju та ін., 2008). Світова кількість сухих осадів муніципальних очисних споруд становила у 2017 р. 45 млн тонн (Lombardi та ін., 2017). Для зменшення накопичення мікропластику в природі та захисту прісноводних і морських екосистем

необхідно розробити та впровадити в реальне життя методи видалення мікропластику з очищених стічних вод, що скидаються у водні об'єкти, з метою зменшення на них навантаження й захисту водного середовища.

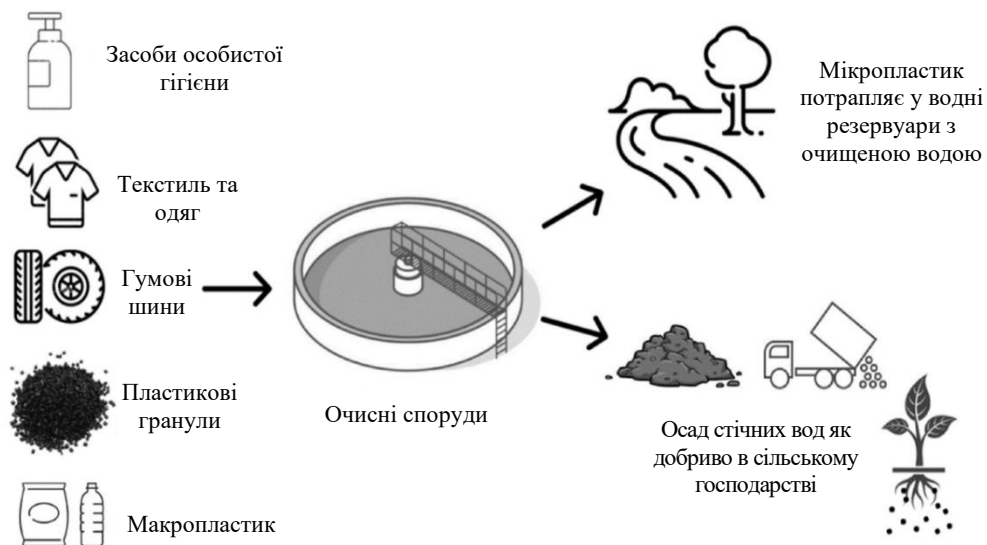


Рис. 2. Екологічні ризики пов'язані з мікропластиком в продуктах очищення стічних вод (Milojevic, & Cydzik-Kwiatkowski, 2021)

Видалення мікропластику зі стічних вод. Видалення мікропластику зі стічних вод при традиційному процесі очищення. На очисні споруди щодня надходять побутові, промислові та сільськогосподарські стічні води, що містять велику кількість мікропластику. Первинний метод очищення стічної води призначений для скринінгу великого сміття зі стічної води, відділення плавучих матеріалів, таких як жир та олія, а також для осадження твердих частинок. Більшість частинок мікропластику та волокон видаляються на ранніх стадіях при знятті піни та відстоюванні — при первинній обробці стоків, яка виявилася одним із ефективних методів видалення мікропластику (Carr та ін., 2016). Так, стічні води містили високі концентрації мікропластику — від 260 до 320 частинок на літр, але при первинному очищенні концентрація знизилась до 50—120 частинок на літр (Dris та ін., 2015). Синтетичні волокна, зазвичай, є домінуючим типом мікропластику у стічній воді, яка надходить на очисні споруди, мабуть, і вони залишаються в осаді після первинних відстійників (Carr та ін., 2016; Talvitie та ін., 2015; Ziajahromi та ін., 2017). У процесі вторинного очищення мікроорганізми видаляють розчинену та зважену органіку зі стічних вод в аеротенках, ставках або лагунних системах. Ефективне біологічне очищення було отримано на одній французькій очисній станції — збільшено ефективність видалення з 83% до 95% (Dris та ін., 2015).

Дослідження поведінки мікропластику в процесі очищення стічних вод показали, що ступень його виділення на різних етапах залежить від типу стічних вод і технології, що використовується (Liu та ін., 2021).

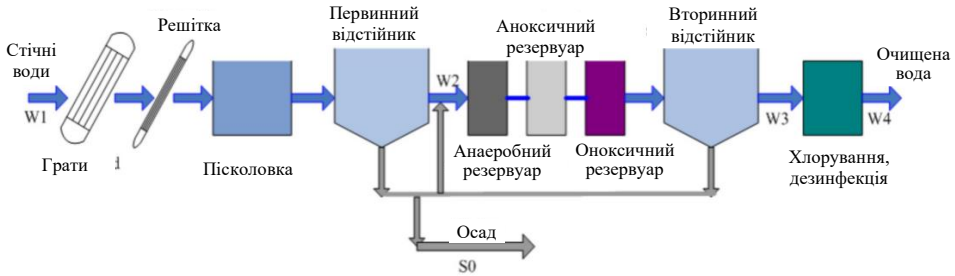


Рис. 3. Схема традиційного процесу очищення стічної води (Liu та ін., 2021)

Кількість мікропластику в стічних водах, що поступали на очисні споруди, становила $W1=79,9\pm9,3$ частинок на літр і знижувалася до $W2=47,4\pm7$ після первинного відстійника $W3=34,1\pm9,4$, після вторинного — $W4=28,4\pm7,0$ в очищених стічних водах. Отже, загальна ефективність видалення мікропластику становила 64,4%. Середній розмір частинок мікропластику змінювався, мкм: частинки у початковій стічній воді ($W1$) мали найбільші розміри, 571,5 мкм; розмір становив 235,7 мкм після стадії $W2$; 422,1 мкм після стадії $W3$, та 348,2 мкм після стадії $W4$. Автори припускають, що перше зниження з $W1$ до $W2$ було пов'язане в основному з видаленням крупніших за розміром частинок мікропластику в осад у первинних відстійниках, а друге зниження ($W3$ до $W4$) може бути пов'язане з деградацією мікропластику при хлоруванні. Що стосується збільшення з $W2$ на $W3$, причина може бути пов'язана з тим, що піна, яка містить головним чином мікропластик маленького розміру (240,1 мкм) становила найбільшу фракцію в $W2$ та містила нижчу фракцію волокон з відносно великими розмірами (1069,7 мкм), ніж $W3$. Але виділений зі стічної води мікропластик залишається в осаді $S0$, у цьому разі вміст його становив 240,3 частинок на г сухого мулу при середньому розмірі 222,6 мкм, який також стає потенційним джерелом розповсюдження мікропластику в довкіллі (Liu та ін., 2021). Осад зі стічних вод як побічний продукт очищення води, що потрапляє в навколишнє середовище, часто несе значне навантаження мікропластиком. Згідно з (Sun та ін., 2019) вище 20000 частинок мікропластику були присутні в кілограмі сухого осаду, що був отриманий після вторинних відстійників. В інших дослідженнях осади очисних споруд містили такі кількості мікропластику на кг сухої ваги: 16700 (Magnusson, & Norén, 2014); 1000 (Mintenig та ін., 2017); від 4196 до 15385 (Mahon та ін., 2017). Підраховано, що від 63000 до 430000 тонн мікропластику потрапляє через осади стічних вод на європейські сільськогосподарські угіддя щорічно (Piehl та ін., 2018).

Згідно з даними різних авторів попередня та первинна обробка (сортування, видалення піску та жиру, осадження) видаляє від 40% (Dris et al., 2015) або 45% (Habib та ін., 2021; Murphy та ін., 2016) до 77% загальної кількості мікропластику (Tagg та ін., 2020). Вторинна обробка (біологічне очищення та осадження) забезпечує додаткове видалення приблизно 50% завдяки хімічним флокулянтам і бактеріальним клітинам, які осаджуються з адсорбованим на них мікропластиком у вторинних відстійниках (Enfrin та ін., 2019). Показано, що відсоток видаленого мікропластику при традиційній обробці стічної води може становити від 83 до

98% від первинної кількості (Dris et al., 2015; Sun та ін., 2019). Однак, беручи до уваги кількість очищених вод, що потрапляє у відкриті водойми, ці, здавалося б низькі кінцеві концентрації мікропластику в результаті потрапляння значної їх кількості в навколишнє середовище завдають йому непоправної шкоди. Так, розрахункова річна кількість часток мікропластику, що потрапляла в довкілля від підприємства з очищення стічних вод (еквівалент чисельності населення 650000 осіб) при ступені видалення мікропластику після етапу вторинної обробки 98,41% і остаточній концентрації мікропластику у кінцевих водах 250 частинок на м³ становила 23812 млн (Murphy та ін., 2016). Згідно з (Mintenig та ін., 2017) з очисних споруд Німеччини в довкілля потрапляє від 10 до 5000 млн частинок мікропластику з розмірами менш ніж 500 мкм на рік.

Видалення мікропластику з використанням модифікації існуючих систем очищення води. Видалення мікропластику з використанням існуючих систем очищення води дуже бажане порівняно з будь-якою новою технологією через простоту експлуатації вже існуючих очисних споруд і низькі витрати.

Флокуляція. Було запропоновано використання солі на основі алюмінію ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) та заліза ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для видалення мікропластику в процесі очищення стічних вод за допомогою коагуляції, що дало змогу отримати видалення частинок мікропластику з розміром <0,5 мм до 36,89% у разі застосування солі алюмінію. Проте солі заліза були неефективні для осадження мікропластику (Ma та ін., 2019). Цікавою особливістю було те, що більш висока ефективність видалення була отримана для часток малого розміру, у той час як для мікропластику великого розміру поступово знижувалася (4,51% для часток з розмірами від 2 до 5 мм). Основними механізмами були нейтралізація заряду та флокуляція частинок. Оскільки розмір пластівців, що утворюються при використанні солей на основі Al, був меншим, ніж у солей на основі Fe, це забезпечувало більшу площу поверхні і, отже, більшу ефективність видалення. Крім того, солі на основі Al забезпечували більш високий позитивний дзета-потенціал порівняно із солями на основі Fe, що сприяло легкій нейтралізації заряду частинок мікропластику з негативним дзета-потенціалом. Застосування таких коагулянтів, як хлорид заліза або хлорид поліалюмінію в дозах, які традиційно використовуються для доочищення стічних вод, призвело до ефективності видалення полістирольних сфер розміром 1 мкм та 6,3 мкм на 99,4% (Rajala et al., 2020) (рис. 4).

Основний недолік флокуляції мікропластику хімічними методами полягає в тому, що вона становить потенційну загрозу вторинного забруднення. Використання методу електрокоагуляції із застосуванням алюмінію забезпечило видалення близько 90% мікрокульок (Perren та ін., 2018).

Фільтрація. Мікропластик можна також видалити на етапі фільтраційного очищення стічних вод (Michielssen та ін., 2016). Для видалення мікропластику використовуються мікрофільтрація (0,1—1 мкм), ультрафільтрація (2—100 мкм) та нанофільтрація (~2 нм) (Poerio та ін., 2019).

Агломерація частинок мікропластику дає змогу виділяти мікропластик з стічних вод за допомогою простої системи, такої як пісковловлювач (Herbort та ін., 2018). Показано можливість збільшення обсягу вихідної частки мікропластику в 666 разів з використанням алкоксилільних сполук.

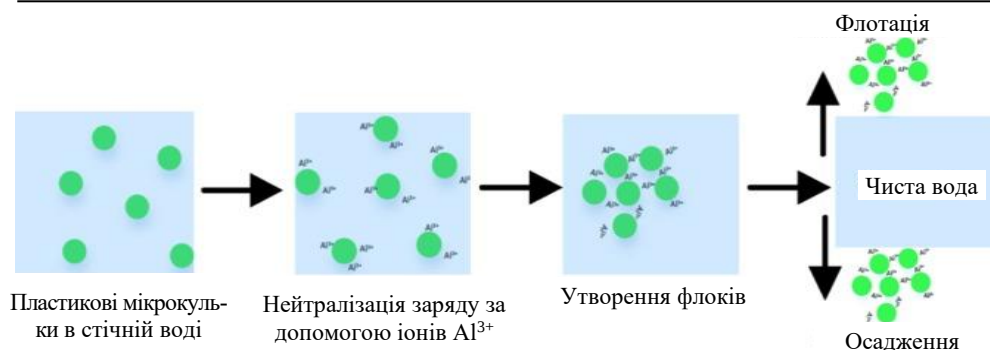


Рис. 4. Видалення мікропластику при використанні солей алюмінію (Perren та ін., 2018)

Була показана можливість підвищення ефективності видалення мікропластику внаслідок інтегрування біовугілля в системи піщаних фільтрів (Wang та ін., 2020a). Частинки мікропластику діаметром до 10 мкм можуть бути виловлені з ефективністю понад 95%. Ефект видалення було досягнуто за допомогою трьох основних механізмів, існування яких було доведено за допомогою екрануючої електронної мікроскопії, а саме: (а) «застрягання» являло собою утримання частинок мікропластику в проміжках між частинками, що фільтрують, через невеликий розмір останніх; (б) «захоплення», яке відбувається, коли матеріал, що фільтрує, має пористу структуру і потік води повільний; (в) «заплутування» відбувається, коли глибокі отвори в фільтрувальному матеріалі перешкоджають потраплянню частинок мікропластику в потік води. При цьому було відзначено, що видалення мікропластику залежать значною мірою від його фізичних властивостей (розміру та форми). При використанні на очисних спорудах гранульованих фільтрів з активованим вугіллям було досягнуто зниження вмісту мікропластику в очищених стічних водах до 56,8—60,9% (Wang та ін., 2020b). Вища ефективність спостерігалася для видалення частинок мікропластику невеликого розміру, оскільки приблизно 73,7—98,5% уловлених частинок знаходилися в діапазоні розмірів 1—5 мкм. Імовірно, що основним механізмом у цьому випадку було синергетичне поєднання фізичної адсорбції та біорозкладання (Zheng та ін., 2018).

Третинна обробка стічної води для видалення мікропластику. Третинна обробка стічної води може забезпечити суттєве додаткове видалення мікропластику до кінцевій концентрації 0,2—2% від початкової кількості. Ефективність видалення мікропластику залежить від застосовуваних процесів очищення, при цьому мембранна технологія показувала найкращі результати. Дослідження застосування різних передових технологій остаточного очищення води після традиційного очищення стічних вод на очисних спорудах у Фінляндії дало такі результати: мембранний біореактор видалив у процесі очищення 99,9% мікропластику (від 6,9 до 0,005 МП/л), швидкий піщаний фільтр — 97% (від 0,7 до 0,02 МП/л), повітряна флотажія — 95% (від 2,0 до 0,1 МП/л), дисковий фільтр — 40 до 98,5% (від 0,5—2,0 до 0,03—0,3 МП/л) (табл. 1) (Talvitie та ін., 2017).

Ефективність видалення мікропластику при застосуванні дискового фільтра варіювала від 40% до 98,5% залежно від діаметра пор від 10 до 20 мкм (Talvitie et al., 2017). У (Schneiderman, 2015) було показано, що очищені води очисних споруд

Нью-Йорка, де схеми очищення включали мембранні фільтри, не містили мікрокульки, тоді як вони були присутні у воді зі споруд зі швидким пісочним фільтром або фільтром безперервного зворотного промивання.

Таблиця 1. Ефективність методів третинного очищення стічних вод від мікропластику (МП) (Raju та ін., 2018)

Метод обробки	% вида- лення МП	Кількість МП на м ³		Країна, місто	Джерело
		початкова	кінцева		
Ультрафільтрація	—	—	289	Австралія, Сідней,	Ziajahromi et al., 2017
Зворотний осмос	—	—	210	Австралія, Сідней,	Ziajahromi et al., 2017
Мембранний біореактор	99,9	6900	5	Фінляндія, Міккелі	Talvitie et al., 2017
Швидка піщана фільтрація	97%	—	20	Фінляндія, Турку	Talvitie et al., 2017
Повітряна флотація	95	700	100	Фінляндія, Хаменлінна	Talvitie et al., 2017
Дисковий фільтр	40—98	500—2000	30—300	Фінляндія, Гельсінкі	Talvitie et al., 2017
Швидка піщана фільтрація	75,5	4400	1080	Іспанія, Мурсія	Bayo та ін., 2020
Мембранна технологія	79	4400	920	Іспанія, Мурсія	Bayo та ін., 2020
Удосконалена система фільтрації	97	—	10	Німеччина, Ольденбург	Mintenig та ін., 2017

Додаткове очищення з використанням фільтраційної системи, яка складалася з 12 рулонних фільтрів із ворсової тканини, дало змогу видалити мікропластик розміром більш ніж 500 мкм повністю (50 в м³ перед фільтрацією), менше ніж 500 мк на 93% (з 0,2 до 0,001 частинки на л), поліестерові синтетичні волокна на 98%, й отримати загальне очищення від мікропластику 97% (Mintenig та ін., 2017).

У праці (Bayo та ін., 2020) для визначення ефективності застосування для очищення води від мікропластику мембранної технології та швидкої піщаної фільтрації протягом 18 місяців здійснювався моніторинг очисних споруд: середня концентрація мікропластику склала $4,40 \pm 1,01$ МП/л для притоку, $0,92 \pm 0,21$ МП/л для мембранного реактора та $1,08 \pm 0,28$ МП/л для швидкої піщаної фільтрації без статистично значущої відмінності у видаленні МП між обома технологіями. Ефективність видалення становила 79,01% і 75,49% для мембранного реактора та швидкого піщаного фільтра відповідно, хоча вище для твердих частинок мікропластику 98,83% та 95,53%, ніж для мікрОВОЛОКОН — 57,65% та 53,83% відповідно.

Третинна обробка стічної води ультрафільтрацією або на установці зворотного осмосу значно знижує концентрацію мікропластику. Так, концентрація мікропластику становила 0,28 частинки на літр після третинної ультрафільтраційної обробки (Ziajahromi et al., 2017). Загалом, при очищенні стоків спостерігалася така послідовність видалення мікропластику: після стадії первинного очищення концентрація мікропластику становила 1,5 частинки в л (виділено $4,6 \times 10^8$ МП/доба);

вторинного очищення — 0,48 частинки в л (видалено $8,1 \times 10^6$ МП/доба); третинного очищення — 0,28 частинки в л (виділено $3,6 \times 10^6$ МП/доба). Додаткове очищення на установці зворотного осмосу дало змогу знизити концентрацію до 0,21 частинки мікропластику в літрі очищених вод.

Нові нетрадиційні методи видалення мікропластику. Видалення мікропластику за допомогою мікроводоростей. Мікроводорості можуть забезпечити можливість видалення мікропластику, оскільки колонізують частинки мікропластику, змінюючи плавучість агрегатів. Це призводить до підвищення швидкості їх седиментації, порівняно з неагрегованими частинками (Lagarde та ін., 2016). Так, присутність високих концентрацій мікропластику розміром >400 мкм в культурі прісноводної мікроводорості *Chlamydomonas reinhardtii* з концентрацією клітин 4×10^6 клітин/мл призводило до утворення через 20 днів гетероагрегатів, що склалися з 50% мікроводоростей та 50% мікропластику, які мали підвищену щільність близько $1,2 \text{ г/см}^3$ і які є важливим шляхом вертикального транспорту мікропластику з поверхні води в осад. Була показана можливість використання морських водоростей *Fucus vesiculosus* для видалення мікропластику шляхом транслокації у тканинах водоростей (Sundbæk та ін., 2018). Через вузькі канали в клітинах водоростей рух мікропластику був обмежений і таким чином частинки пластику були захоплені. Спостерігалася ефективність $\sim 94,5\%$, особливо на розсічених ділянках водоростей, оскільки із розсічених ділянок виділяються аніонні полісахаридні речовини, що посилює прилипання частинок мікропластику (Martins та ін., 2013). Основним механізмом сорбції частинок мікропластику є електростатичний заряд поверхні водоростей. Позитивно заряджені частинки мікропластику мають тенденцію більше сорбуватися на водоростях через наявність аніонних полісахаридів у клітинній стінці водоростей (Nolte та ін., 2017).

Було виявлено, що гетероагрегація слугувала основним механізмом видалення мікропластику (полістирол, поліметилметакрилат і полілактид) мікроводоростями *Scenedesmus abundans*. Ефективність видалення для всіх трьох видів складала більше ніж 84%, але найповніше виділення було визначено для поліметилметакрилату — 98%. Скануюча електронна мікроскопія показала, що при тривалому часі взаємодії мікропластику та мікроводоростей (більше 2 днів) відбувалося утворення позаклітинних полімерних речовин і гетероагрегація, що призводило до набагато більш високої частки видалення мікропластику. Навпаки, якщо час контакту був нетривалий, посилена адсорбція мікропластику на поверхні водоростей відігравала переважну роль для його видалення, особливо у випадку полілактиду (Cheng, & Wang, 2022).

Розробляються нові підходи для вилучення частинок мікропластику із забрудненої води. Наприклад, методи, засновані на зміні поверхневих властивостей МП наночастинками гідрофобними заліза, які зв'язуються з пластиком, забезпечуючи магнітне відновлення. З морської води було вилучено 92% гранул поліетилену та полістиролу розміром від 10 до 20 мкм та 93% МП >1 мм (поліетилен, поліетилентерефталат, полістирол, поліуретан, полівінілхлорид і поліпропілен).

Магнітна екстракція мікропластику, наприклад, методи, засновані на зміні поверхневих властивостей мікропластику гідрофобними наночастинками заліза, які зв'язуються з пластиком, забезпечуючи магнітне відновлення. З морської води було вилучено 92% гранул поліетилену та полістиролу розміром від 10 до 20 мкм

та 93% мікрочастинок >1 мм (поліетилен, поліетилентерефталат, полістирол, поліуретан, полівінілхлорид і поліпропілен) з морської води, а також 84% мікропластику розміром в діапазоні від 200 мкм до 1 мм (поліетилен, полістирол, поліуретан, полівінілхлорид і поліпропілен) з прісної води (Grbic та ін., 2019).

Додавання 1,3 г/л нано- Fe_3O_4 та обробка протягом 150 хв призводили до адсорбції цих частинок на поверхні мікропластиків, викликаючи їх намагнічування. Намагнічені МП (поліетилен, поліпропілен і полістирол розміром приблизно від 200 до 900 мкм) видалялися магнітною силою з водного середовища із середньою швидкістю видалення понад 80% (Shi et al., 2022).

Для видалення полістиролу з водяних розчинів запропонований новий матеріал з металоорганічним каркасом, здатний адсорбувати частинки мікропластику. Ефективність видалення мікрочастинок полістиролу при їх концентрації 5 мг/л складала до 92% при рН 8 і 25 °С за рахунок взаємодій водневих зв'язків, π - π -стекінгу та електростатичних взаємодій між МП і новим адсорбентом (Wan та ін., 2022).

Нещодавно було запропоновано фотокаталітичну обробку для видалення мікропластику зі стічних вод (Wang та ін., 2019) та їх розкладання (Ariza-Tarazona, 2019), хоча ці методи досі досліджувалися лише в лабораторії. Однак застосування цих методів сьогодні може виявитися нездійсненним через пов'язані з цим високі витрати і складності; однак у найближчому майбутньому, враховуючи необхідне розкладання нових забруднюючих речовин, такі методи доведеться використовувати. У цьому контексті доцільною є розробка невеликих фільтрувальних установок як третинне очищення, які будуть видаляти мікропластик та інші забруднюючі речовини (Spacilova та ін., 2023).

Незважаючи на те, що існує багато шляхів для підвищення ефективності видалення мікропластику з очищених стічних вод, їх широкому практичному використанню перешкоджає або висока вартість обладнання, що не дає змоги використовувати метод у широких масштабах, або недостатня вивченість і складність здійснення процесу для практичної реалізації.

З цієї причини метод видалення мікропластику з води з використанням сорбційного процесу, який був б придатний не тільки як третинна стадія на очисних спорудах, але і як вторинна стадія очищення поверхневих і промислових вод, набуває особливого інтересу.

Сорбційна технологія видалення мікропластику зі стічних вод. Запропоновано кілька способів зниження викиду мікропластику з очищеними стічними водами у навколишнє середовище. Методи видалення включають фізичну сорбцію та фільтрацію, біологічне поглинання, а також хімічну обробку (Lastovina, & Budnyk, 2021; Padervand та ін., 2020). За літературними даними, ефективність видалення мікропластику різними методами така: мембранний біореактор (>99%) > процес з активним мулом (~98%) > швидка піщана фільтрація (~97,1%) > флотация розчинним повітрям (~95%) > електрокоагуляція (>90%). Процеси сорбції та фільтрації у поєднанні з мембранними біореакторами призводять до видалення великого відсотка мікропластику зі стічних вод (Padervand та ін., 2020). Але, незважаючи на те, що застосування мембранних технологій як метод доочищення підтвердило

результативність видалення мікропластику, утилізація, особливо при великомасштабній експлуатації, ускладнена, оскільки навіть низькі концентрації мікропластику в стічних водах підвищує ступінь забруднення мембрани (LaRue та ін., 2022). Загалом, усі описані вище дослідження показали, що сучасний процес очищення стічних вод досить ефективний для видалення мікропластику, проте, враховуючи великі обсяги стічних вод, очисні споруди, як і раніше, продовжують залишатися значними джерелами надходження мікропластику в навколишнє середовище. Наприклад, навіть при низькій концентрації мікропластику 50 ± 24 МП/м³, з очисної споруди поступає понад 4 млн мікрочастинок на рік (Mason et al., 2017). Використання методів доочищення да змогу суттєво знизити ефект забруднення, проте для цього потрібне дороге обладнання та високі витрати на експлуатацію й технічне обслуговування з огляду на обсяги води, яку необхідно очистити.

З метою підвищення ефективності видалення перспективним підходом, який може знайти застосування на реальних станціях очищення стічних вод, є використання сорбентів, таких як цеоліти або бентоніти (Spacilova та ін., 2023), а також біосорбентів — біомаси (відходи сільськогосподарської, лісової біомаси). Метод має переваги в економічному плані, оскільки можливе використання недорогих природних матеріалів.

Біосорбенти найчастіше отримують з відходів методом піролізу, який є термічною обробкою біомаси при температурі вище 500 °C за нестачі кисню. Піроліз забезпечує розкладання органічних природних сполук (деревини) та утворення летких компонентів, а після видалення цих компонентів залишається багата на вуглець речовина — біовугілля. Температура, при якій відбувається піроліз, і природа сировини визначають властивості одержуваного біовугілля. Висока температура піролізу забезпечує отримання біовугілля з розвинутою поверхнею, високою пористістю, високим вмістом вуглецю та мінеральних залишків за рахунок підвищеного утворення летких речовин порівняно з продуктом, отриманим піролізом при нижчих температурах (Tomczyk et al., 2020).

Отримання біовугілля з різних органічних матеріалів і розробка методів його модифікації з метою підвищення ефективності використання для видалення різних забруднювачів води та ґрунту становлять один із пріоритетних напрямків сучасних досліджень (Qiu et al., 2022). Можливість використання біовугілля для видалення мікропластику після очищення стічних вод привертає увагу дослідників.

Точний механізм адсорбції мікропластику біовугіллям не встановлено. Вважається, що частинки мікропластику можуть утримуватися серед частинок біовугілля або всередині біосорбенту. Тобто пористість адсорбенту має відігравати ключову роль в утриманні мікро- та нанопластику. Це припущення підтверджується експериментами, які показали, що біовугілля з відносно невеликою площею поверхні та макромасштабною пористістю демонструє високу здатність утримувати частинки мікропластику. Так, грам біовугілля, яке було отримано з кори сосни та ялинки в результаті повільного піролізу при 475 °C та активації парою при 800 °C, мав здатність утримувати 165—293 мг мікропластику (Siipola et al., 2020). Однак видалення дрібних частинок розміром 10 мкм виявилось не таким ефективним, як видалення часток МП великих розмірів.

Показано, що біовугілля, яке було отримано з кукурудзяної соломи та деревини листяних порід, можливо використовувати для видалення мікрокульок для підвищення ефективності традиційної технології пісочних фільтрів (Wang та ін., 2020a). Мікрогранули діаметром 10 мкм, які зазвичай присутні у великих кількостях у стоках різних систем доочищення стічних вод, мають низьку адсорбційну здатність у піщаному фільтрі через гладку поверхню та круглу форму. Біовугілля з кукурудзяної соломи, що було отримане в процесі повільного піролізу при 400 або 500 °C, показало ефективність видалення мікрокульок більше 95%; водночас фільтр, що поєднував нижній і верхній шари кварцового піску та проміжний шар біовугілля з кукурудзяної соломи, показав 100% ефективність видалення мікрокульок (Wang та ін., 2020a).

Для підвищення утримання частинок мікропластику розміром від 0,2 до 2 мкм із ґрунтових вод у пористих середовищах, наприклад, кварцовому піску, рекомендовано додавання біовугілля або магнітного біовугілля (Fe_3O_4 -біовугілля) (Tong та ін., 2020). Показана перспективність використання модифікацій біовугілля для видалення мікропластику. Так, модифікований залізом наноккомпозит на основі біовугілля повністю видаляв наночастинки розміром 1000 нм завдяки поверхневій комплексації та електростатичної взаємодії між нанопластиком і біосорбентом, тоді як ефективність застосування немодифікованого біовугілля становила лише 75% (Singh et al., 2021).

Ефективність використання магнітного біовугілля для видалення мікропластику зі стічних вод була продемонстрована в праці (Zhao та ін., 2022). Модифікація іонами заліза летючої золи, що зазвичай складається з частинок сферичної форми розміром від 10 до 100 мікронів, дала змогу отримати новий магнітний матеріал, який сильно взаємодіє з нанопластиками полістиролу у водних розчинах за рахунок їх прикріплення до поверхні та пор модифікованого біовугілля. Показано, що в процесі адсорбції беруть участь електростатичне тяжіння, комплексоутворення та π - π -взаємодії, а кількості адсорбції полістирольних нанопластиків варіюють від 82,8 до 89,9 мг/г магнітного біовугілля при pH 5–7.

Ефективність видалення мікропластику при використанні магнітного біовугілля, що було виготовлено з рисового лушпиння сільськогосподарських відходів у водній системі складало 99,96% (Wu та ін., 2023). Показано, що адсорбція мікропластику магнітним біовугіллям є спонтанним процесом, і в процесі адсорбції значну роль відіграють електростатичне тяжіння, поверхнєве комплексоутворення, водневі зв'язки та π - π -взаємодії (рис. 5).

Крім того, після адсорбції мікропластику, магнітне біовугілля можна відновити термічною обробкою (500°C), і воно, як і раніше, демонструє адсорбцію до 90% МП (після чотириразового використання). Це підтверджує, що магнітне біовугілля є недорогим, ефективним і багаторазовим нанорозмірним адсорбентом для видалення мікропластику у воді, що може дати нові ідеї для контролю забруднення водного середовища мікропластиком.

Термічна обробка біовугілля при температурі 450°C і вище забезпечує одночасну його регенерацію та деградацію адсорбованого мікропластику, при цьому біовугілля зберігає високу ефективність видалення мікропластику навіть після 4-5 циклів адсорбції-піролізу (Ni та ін., 2020).

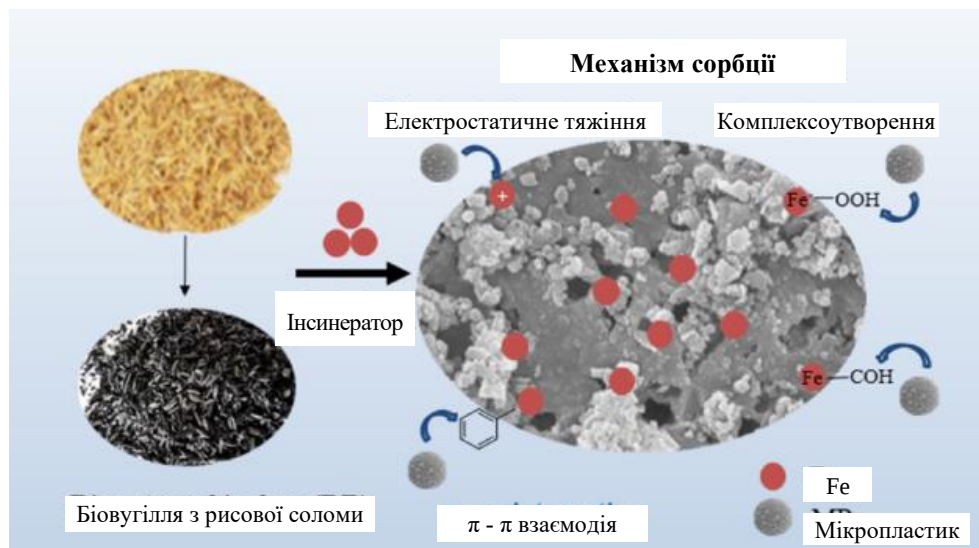


Рис. 5. Схема взаємодії мікропластику та магнітного біовугілля (Wu та ін., 2023).

Висновки

1. Традиційні методи первинної та вторинної очистки стічних вод не забезпечують повне видалення мікропластику, і скидання таких вод у природні водойми або осаду на земельні ділянки призводить до забруднення навколишнього середовища.

2. Використання методів третинної очистки води, таких як мембранна фільтрація, зворотний осмос, флоатація, вдосконалені піщані або дискові фільтри, дають змогу знизити вміст мікропластику в очищеній воді, але дорогі й непридатні для масштабного застосування.

3. Перспективним методом видалення мікропластику зі стічних вод може бути використання біосорбентів, отриманих шляхом піролізу відходів рослинного походження або їх модифікації. Показана можливість повного видалення мікропластику з води, а термічна обробка біосорбенту забезпечує одночасну його регенерацію та деградацію адсорбованого мікропластику.

Література

- Audrézet, F., Zaiko, A., Lear, G., Wood, S. A., Tremblay, L. A., & Pochon, X. (2020). Biosecurity implications of drifting marine plastic debris: Current knowledge and future research. *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111835. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111835>.
- Bayo, J., López-Castellanos, J., & Olmos, S. (2020). Membrane bioreactor and rapid sand filtration for the removal of microplastics in an urban wastewater treatment plant. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111211. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111211>.

- Bellasi, A., Binda, G., Pozzi, A., Galafassi, S., Volta, P., & Bettinetti, R. (2020). Microplastic contamination in freshwater environments: A review, focusing on interactions with sediments and benthic organisms. *Environments*, 7, 30. <https://doi.org/10.3390/environments7040030>.
- Bowley, J., Baker-Austin, C., Porter, A., Hartnell, R., & Lewis, C. (2021). Oceanic hitchhikers — assessing pathogen risks from marine microplastic. *Trends in Microbiology*, 29, 107—116. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.06.011>.
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T. & Thompson, R (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental Science and Technology*, 45(21), 9175—9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>.
- Cai, Z., Li, M., Zhu, Z., Wang, X., Huang, Y., Li, T., Gong, H., & Yan, M. (2023). Biological degradation of plastics and microplastics: A recent perspective on associated mechanisms and influencing factors. *Microorganisms*, 11(7), 1661. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071661>.
- Carr, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91, 174—182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002>.
- Cheng, Y. R., & Wang, H. Y. (2022). Highly effective removal of microplastics by microalgae *Scenedesmus abundans*. *Chemical Engineering Journal*, 435(Part 2), 135079. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135079>.
- Chowdhury, H., Chowdhury, T., & Sait, S. M. (2021). Estimating marine plastic pollution from COVID-19 face masks in coastal regions. *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112419. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112419>.
- Costa, E., Piazza, V., Lavorano, S., Faimali, M., Garaventa, F., & Gambardella, C. (2020). Trophic transfer of microplastics from copepods to jellyfish in the marine environment. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 158. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.571732>.
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., & Tassin B. (2015). Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry*, 12(5), 592—599. <https://doi.org/10.1071/EN14167>.
- Dudek, K. L., Cruz, B. N., Polidoro, B., & Neuer, S. (2020). Microbial colonization of microplastics in the Caribbean Sea. *Limnology and Oceanography Letters*, 5, 5—17. <https://doi.org/10.1002/lol2.10141>.
- Eerkes-Medrano, D., Heather, A. L., & Brian, Q. (2019). Microplastics in drinking water: A review and assessment. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 7, 69—75. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.12.001>.
- Enfrin, M., Dumée, L., & Lee, J. (2019). Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes-Origin, impact, and potential solutions. *Water Research*, 161, 621—638. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.049>.
- Hartmann, N. B., Hüffner, T., Thompson, R. C., Hasselov, M., Verschoor, A., Dagaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt N., Cole M., Herrling M. P., Hess M. C., Ivleva, N. P., Lusher, A. L., & Wagner, M. (2019). Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science and Technology*, 53, 1039—1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>.
- Fan, T., Zhao, J., Chen, Y., Wang, M., Wang, X., Wang, S., Chen, X., Lu, A., & Zha, S. (2021). Coexistence and adsorption properties of heavy metals by polypropylene microplastics. *Adsorption Science and Technology*, 4938749. <https://doi.org/10.1155/2021/4938749>.
- Frias, J., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145—147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>.
- Geyer, R. (2020). Production, use, and fate of synthetic polymers. In: Plastic Waste and Recycling. Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions; Letcher T. M., Ed.; Academic Press: London, 13—32. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5>.
- Ghosh, S., Sinha, J. K., Ghosh, S., Vashisth, K., Han, S., & Bhaskar, R. (2023). Microplastics as an emerging threat to the global environment and human health. *Sustainability*, 15(14), 10821. <https://doi.org/10.3390/su151410821>.
- Gray, J. L., Borch, T., Furlong, E. T., Davis, J. G., Yager, T. J., Yang, Y. Y., & Kolpin, D. W. (2017). Rainfall-runoff of anthropogenic waste indicators from agricultural fields applied with

municipal biosolids. *Science of the Total Environment*, 580, 83—89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.033>.

Grbic, J., Nguyen, B., Guo, E., You, J. B., Sinton, D., & Rochman, C. M. (2019). Magnetic extraction of microplastics from environmental samples. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(2), 68—72. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00671>.

Guo, J. J., Huang, X. P., Xiang, L., Wang, Y. Z., Li, Y. W., Li, H., Cai, Q. Y., Mo, C. H., & Wong, M. H. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 137, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105263>.

Habib, R., Al Kendi, R., & Thiemann, T. (2021). The effect of wastewater treatment plants on retainment of plastic microparticles to enhance water quality — A review. *Journal of Environmental Protection*, 12, 161—195. <https://doi.org/10.4236/jep.2021.123011>.

Herbort, A. F., Sturm, M. T., Fiedler, S., Abkai, G. & Schuhen, K. (2018). Alkoxysilyl induced agglomeration: A new approach for the sustainable removal of microplastic from aquatic systems. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 4258—4270. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1287-3>.

Hoellein, T., Rojas, M., Pink, A., Gasior, J., & Kelly, J. (2014). Anthropogenic litter in urban freshwater ecosystems: distribution and microbial interactions. *PLoS One*, 9, e98485. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098485>.

Karthik, R., Robin, R. S., Purvaja, R., Ganguly, D., Anandavelu, I., Raghuraman, R., Hariharan G., Ramakrishna A., & Ramesh, R. (2018). Microplastics along the beaches of southeast coast of India. *Science of the Total Environment*, 645, 1388—1399. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.2>.

Kelly, J. J., London, M. G., McCormick, A. R., Rojas, M., Scott, J. W., & Hoellein, T. J. (2021). Wastewater treatment alters microbial colonization of microplastics. *PLoS One*, 16, e0244443. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244443>.

Klavins, M., Klavins, L., Stabnikova, O., Stabnikov, V., Marynin, A., Ansone-Bertina, L., Mezulis, M., & Vaseashta, A. (2022). Interaction between microplastics and pharmaceuticals depending on the composition of aquatic environment. *Microplastics*, 1, 520—535. <https://doi.org/10.3390/microplastics1030037>.

Kirstein, I. V., Kirmizi, S., Wichels, A., Garin-Fernandez, A., Erler, R., Löder, M., & Gerdtz, G. (2016). Dangerous hitchhikers? Evidence for potentially pathogenic *Vibrio* spp. on microplastic particles. *Marine Environmental Research*, 120, 1—8. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.07.004>.

Kumar, M., Xiong, X., He, M., Tsang, D. C., Gupta, J., Khan, E., & Bolan, N. S. (2020). Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environmental Pollution*, 265, 114980. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980>.

Lagarde, F., Olivier, O., Zanella, M., Daniel, P., Hiard, S. & Caruso, A. (2016). Microplastic interactions with freshwater microalgae: hetero-aggregation and changes in plastic density appear strongly dependent on polymer type. *Environmental Pollution*, 215, 331—339. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.006>.

LaRue, R. J., Patterson, B., O'Brien, S., & Latulippe, D. R. (2022). Evaluation of membrane fouling by microplastic particles in tertiary wastewater treatment processes. *ACS Environmental Science and Technology Water*, 2(6), 955—966. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00430>.

Lastovina, T. A., & Budnyk, A. P. (2021). A review of methods for extraction, removal, and stimulated degradation of microplastics. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102209. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102209>.

Li, C., Busquets, R., & Campos, L. C. (2020). Assessment of microplastics in freshwater systems: A review. *Science of the Total Environment*, 707, 135578. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135578>.

Li, S., Keenan, J. I., Shaw, I. C., & Frizelle, F. A. (2023). Could microplastics be a driver for early onset colorectal cancer? *Cancers*, 15(13), 3323. <https://doi.org/10.3390/cancers15133323>.

Liu, X., Yuan, W., Di, M., Li, Z., & Wang, J. (2021). Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China. *Chemical Engineering Journal*, 362, 176—182. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.033>.

- Lombardi, L., Nocita, C., Bettazzi, E., Fibbi, D., & Carnevale, E. (2017). Environmental comparison of alternative treatments for sewage sludge: an Italian case study. *Waste Management*, 69, 365—376. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.040>.
- Ma, B., Xue, W., Hu, C., Liu, H., Qu, J., & Li, L. (2019). Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 359, 159—167. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.155>.
- Magnusson, K., & Noren, F. (2014). Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant, Report C55; Swedish Environmental Research Institute: Stockholm. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:773505/FULLTEXT01.pdf>.
- Mahon, A. M., O’Connell, B., Healy, M. G., O’Connor, I., Officer, R., Nash, R., & Morrison, L. (2017). Microplastics in sewage sludge: effects of treatment. *Environmental Science and Technology*, 51(2), 810—818. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04048>.
- Martins, M. J. F., Mota, C. F., & Pearson, G. A. (2013). Sex-biased gene expression in the brown alga *Fucus vesiculosus*. *BMC Genomics*, 14, 294—326. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-14-294>.
- McCormick, A., Hoellein, J., Mason, S. A., Schluep, J., & Kelly, J. J. (2014). Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river. *Environmental Science & Technology*, 48, 11863—11871. <https://doi.org/10.1021/es503610r>.
- Milojevic, N., & Cydzik-Kwiatkowska, A. (2021). Agricultural use of sewage sludge as a threat of microplastic (MP) spread in the environment and the role of governance. *Energies*, 14(19), 6293. <https://doi.org/10.3390/en14196293>.
- Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G. J., Primpke, S., & Gerdt, G. (2017). Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108(1), 365—372. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.015>.
- Michielssen, M. R., Michielssen, E. R., Ni J., & Duhaime, M. B. (2016). Fate of microplastics and other small anthropogenic litter (SAL) in wastewater treatment plants depends on unit processes employed. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2, 1064—1073. <https://doi.org/10.1039/C6EW00207B>.
- Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F. & Quinn, B. (2016). Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science and Technology*, 50, 5800—5808. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05416>.
- News European Parliament. (2018). Microplastics: sources, effects and solutions. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20181116STO19217/microplastics-sources-effects-and-solutions>.
- Ni, B. J., Zhu, Z. R., Li, W. H., Yan, X., Wei, W., Xu, Q., Xia, Z., Dai, X., & Sun, J. (2020). Microplastics mitigation in sewage sludge through pyrolysis: the role of pyrolysis temperature. *Environmental Science and Technology Letters*, 7(12), 961—967. <http://hdl.handle.net/10453/146730>.
- Nolte, T. M., Hartmann, N. B., Kleijn, J. M., Games, J., van de Meent, D., Hendriks, A. J. & Baun, A. (2017). The toxicity of plastic nanoparticles to green algae as influenced by surface modification, medium hardness, and cellular adsorption. *Aquatic Toxicology*, 183, 11—20. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.12.005>.
- O’Brien, S., Rauert, C., Ribeiro, F., Okoffo, E. D., Burrows, S. D., O’Brien, J. W., Wang, X., Wright, S. L., & Thomas, K. V. (2023). There’s something in the air: A review of sources, prevalence and behaviour of microplastics in the atmosphere. *Science of the Total Environment*, 874, 162193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162193>.
- Oberbeckmann, S., & Labrenz, M. (2020). Marine microbial assemblages on microplastics: diversity, adaptation, and role in degradation. *Annual Review of Marine Science*, 12, 209-232. <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-marine-010419-010633>.
- Padervand, M., Lichtfouse, E., Robert, D., & Wang, C. (2020). Removal of microplastics from the environment. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(3), 807—828. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02562545>.

- Peng, X., Chen, M., Chen, S., Dasgupta, S., Xu, H., Ta, K., Du, M., Li, J., Guo, Z., & Bai, S. (2018). Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochemical Perspectives Letters*, 9, 1—5. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>.
- Perren, W., Wojtasik, A., & Cai, Q. (2018). Removal of microbeads from wastewater using electrocoagulation. *ACS Omega*, 3(3), 3357—3364. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b02037>.
- Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T., & Janda, V. (2018). Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of the Total Environment*, 643, 644—651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.102>.
- Poerio, T., Piacentini, E., & Mazzei, R. (2019). Membrane processes for microplastic removal. *Molecules*, 24, 4148. <https://doi.org/10.3390/molecules24224148>.
- Qiu, M., Liu, L., Ling, Q., Cai, Y., Yu, S., Wang, S., Fu, D., & Hu, B. (2022). Biochar for the removal of contaminants from soil and water: A review. *Biochar*, 4, 19. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00146-1>.
- Piehl, S., Leibner, A., Löder, M. G. J., Dris, R., Bogner, C., & Laforsch, C. (2018). Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific Reports*, 8, 17950. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36172-y>.
- Rainieri, S., & Barranco, A. (2020). Microplastics, a food safety issue?. *Trends in Food Science and Technology*, 84, 55—57. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.009>.
- Rajala, K., Grönfors, O., Hesampour, M., & Mikola, A. (2020). Removal of microplastics from secondary wastewater treatment plant effluent by coagulation/flocculation with iron, aluminum and polyamine-based chemicals. *Water Research*, 116045. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116045>.
- Raju, S., Carbery, M., Kuttykatil, A., Senathirajah, K., Subashchandrabose, S. R., Evans, G. M., & Thavamani, P. (2018). Transport and fate of microplastics in wastewater treatment plants: implications to environmental health. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17, 637-653. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9480-3>.
- Rochman, C. M., Tahir, A., Williams, S. L., Baxa, D. V., Lam, R., Miller, J. T., Teh, F. C., Wero-rilangi, S., & Teh, S. J. (2015). Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Scientific Reports*, 5, 14340. <https://doi.org/10.1038/srep14340>.
- Schirinzi, G. F., Pérez-Pomeda, I., Sanchis, J., Rossini, C., Farré, M., & Barceló, D. (2017). Cyto-toxic effects of commonly used nanomaterials and microplastics on cerebral and epithelial human cells. *Environmental Research*, 159, 579—587. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.043>.
- Schneiderman, E. T. (2015). Discharging microbeads to our waters: an examination of wastewater treatment plants in New York, Report. (2015). https://ag.ny.gov/sites/default/files/reports/2015_Microbeads_Report_FINAL. Assessed November 2023.
- Sewwandi, M., Wijesekara, H., Rajapaksha, A. U., Soysa, S., & Vithanage, M. (2022). Microplas-tics and plastics-associated contaminants in food and beverages; Global trends, concentrations, and human exposure. *Environmental Pollution*, 120747. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120747>.
- Shi, X., Zhang, X., Gao, W., Zhang, Y., & He, D. (2022). Removal of microplastics from water by magnetic nano-Fe₃O₄. *Science of the Total Environment*, 802, 149838. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149838>.
- Siipola, V., Pflugmacher, S., Romar, H., Wendling, L., & Koukkari, P. (2020). Low-cost biochar adsorbents for water purification including microplastics removal. *Applied Sciences*, 10(3), 788. <https://doi.org/10.3390/app10030788>.
- Singh, S., Kalyanasundaram, M., & Diwan, V. (2021). Removal of microplastics from wastewater: available techniques and way forward. *Water Science and Technology*, 84(12), 3689—3704. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.472>.
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375—386. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>.
- Spacilova, M., Dytrych, P., Lexa, M., Wimmerova, L., Masin, P., Kvacek, R., & Solcova, O. (2023). An innovative sorption technology for removing microplastics from wastewater. *Water*, 15(5), 892. <https://doi.org/10.3390/w15050892>.

- Sun, T., Zhan, J., Li, F., Ji, C., & Wu, H. (2021). Effect of microplastics on aquatic biota: A hormetic perspective. *Environmental Pollution*, 285, 117206. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117206>.
- Stabnikova, O., Goh, W. K., Ding, H. B., Tay, J. H., & Wang J. Y. (2005). The use of sewage sludge and horticultural waste to develop artificial soil for plant cultivation in Singapore. *Bioresource Technology*, 96(9), 1073—1080. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.024>.
- Stabnikova, O., Stabnikov, V., Marinin, A., Klavins, M., Klavins, L., & Vaseashta, A. (2021). Microbial life on the surface of microplastics in natural waters. *Applied Sciences*, 11(24), 11692. <https://doi.org/10.3390/app112411692>.
- Stabnikova, O., Stabnikov, V., Marinin, A., Klavins, M., & Vaseashta, A. (2022). The role of microplastics biofilm in accumulation of trace metals in aquatic environment. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38, 117. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03293-6>.
- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M. C. M., & Ni, B. J. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Research*, 152, 21—37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.050>.
- Sundbæk, K. B., Koch, I. D. W., Villaro, C. G., Rasmussen, N. S., Holdt, S. L., & Hartmann, N. B. (2018). Sorption of fluorescent polystyrene microplastic particles to edible seaweed *Fucus vesiculosus*. *Journal of Applied Phycology*, 30, 2923—2927. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1472-8>.
- Tagg, A. S., Sapp, M., Harrison, J. P., Sinclair, C. J., Bradley, E., Ju-Nam, Y., & Ojeda, J. J. (2020). Microplastic monitoring at different stages in a wastewater treatment plant using reflectance micro-FTIR imaging. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 145. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00145>.
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., & Setälä, O. (2017). Solutions to microplastic pollution — Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research*, 123, 401—407. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 191—215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>.
- Tong, H., Jiang, Q., Hu, X., & Zhong, X. (2020). Occurrence and identification of microplastics in tap water from China. *Chemosphere*, 252, 126493. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126493>.
- Tong, M., He, L., Rong, H., Li, M., & Kim, H. (2020). Transport behaviors of plastic particles in saturated quartz sand without and with biochar/Fe₃O₄-biochar amendment. *Water Research*, 169, 115284. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115284>.
- Triebkom, R., Braunbeck, T., Grummt, T., Hanslik, L., Huppertsberg, S., Jekel, M., Knepper, T. P., Krais, S., Müller, Y. K., Pittroff, M., Ruhl, A. S., Schmieg, H., Schür, C., Strobel, C., Wagner, M., Zumbülte, N., & Köhler, H. R. (2018). Relevance of nano- and microplastics for freshwater ecosystems: a critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 110, 375—392. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.11.02>.
- Vaseashta, A., Ivanov, V., Stabnikov, V., & Marinin, A. (2021). Environmental safety and security investigations of neustonic microplastic aggregates near water-air interphase. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(4), 3457—3469. <https://doi.org/10.15244/pjoes/131947>.
- Vázquez-Rowe, I., Ita-Nagy, D., & Kahhat, R. (2021). Microplastics in fisheries and aquaculture: implications to food sustainability and safety. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 29, 100464. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100464>.
- Walkinshaw, C., Lindeque, P. K., Thompson, R., Tollhurst, T., & Cole, M. (2020). Microplastics and seafood: lower trophic organisms at highest risk of contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110066. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110066>.
- Wan, H., Wang, J., Sheng, X., Yan, J., Zhang, W., & Xu, Y. (2022). Removal of polystyrene microplastics from aqueous solution using the metal-organic framework material of ZIF-67. *Toxics*, 10(2), 70. <https://doi.org/10.3390/toxics10020070>.
- Wang, L., Käppler, A., Fischer, D., & Simmchen, J. (2019). Photocatalytic TiO₂ micromotors for removal of microplastics and suspended matter. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(36), 32937—32944. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b06128>.

Wang, Z., Sedighi, M., & Lea-Langton, A. (2020a). Filtration of microplastic spheres by biochar: Removal efficiency and immobilisation mechanisms, *Water Research*, 184, 116165. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116165>.

Wang, Z., Lin, T., & Chen, W. (2020b). Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP). *Science of the Total Environment*, 700, 134520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134520>.

Wilkes, R. A., & Aristilde, L. (2017). Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges. *Journal of Applied Microbiology*, 23(3), 582—593. <https://doi.org/10.1111/jam.13472>.

Wu, J., Yang, C., Zhao, H., Shi, J., Liu, Z., Li, C., & Song, F. (2023). Efficient removal of microplastics from aqueous solution by a novel magnetic biochar: performance, mechanism, and reusability. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 26914—26928. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24130-1>.

Yuan, F., Zhao, H., Sun, H., Sun, Y., Zhao, J., & Xia, T. (2022). Investigation of microplastics in sludge from five wastewater treatment plants in Nanjing, China. *Journal of Environmental Management*, 301, 113793. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113793>.

Zhao, H., Huang, X., Wang, L., Zhao, X., Yan, F., Yang, Y., Li, G., Gao, P., & Ji, P. (2022). Removal of polystyrene nanoplastics from aqueous solutions using a novel magnetic material: Adsorbability, mechanism, and reusability. *Chemical Engineering Journal*, 430(Part 4), 133122. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133122>.

Zheng, J., Lin, T., Chen, W., Tao, H., Tan, Y., & Ma, B. (2018). Removal of precursors of typical nitrogenous disinfection byproducts in ozonation integrated with biological activated carbon (O3/BAC). *Chemosphere*, 209, 68—77. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.018>.

Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L., & Leusch, F. D. (2017). Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater based microplastics. *Water Research*, 112, 93—99. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.042>.

RESEARCH OF COMMUNICATIVE DESIGN OF PRODUCTION SYSTEMS

O. Volodin, O. Gavva, S. Tokarchuk, O. Savchuk

National University of Food Technologies

Key words:

*Dosing accuracy
Dose formation
Mechatronic module
Dosing and filling
operation
Feedback*

Article history:

Received 09.11.2023
Received in revised form
23.11.2023
Accepted 08.12.2023

Corresponding author:

O. Volodin
E-mail:
sashavolodin11@gmail.com

Citation: O. С. Володін,
О. М. Гавва, С. В. Токар-
чук, О. С. Савчук (2023).
Дослідження комунікатив-
ного дизайну виробничих
систем. *Наукові праці
НУХТ*, 29(6), 45—52.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2023-29-6-5

ABSTRACT

Today, the method of developing a digital twin as a computer prototype for any real object is widely used. An entire industrial enterprise with its production lines, a specific product or a separate technological process can be objects under study. During the synthesis, visual representation of the prototype object can be gotten, and then proceed to the physical properties. The purpose of the study was to evaluate the communicative design of production systems for the liquid product packaging process using the example of a hybrid mechatronic dosing and packaging module. The research was conducted in two stages. At the first stage, a computer model of the mechatronic module was developed, which described the change in technological parameters of liquid dosing and the initial and boundary conditions of the process. The modes of operation of the hybrid mechatronic dosing and filling module were set by software using a driver. The boundary conditions of the process of forming and squeezing the product dose were taken into account. At the second stage, the computer model was tested using digital control and measuring equipment. During the tests, the accuracy of dose formation repetitions was determined to be within $\pm 0.22\%$ and 0.9% of the set dose weight of 50...200 ml. The results of the research showed that the accuracy of dose formation depends on the set parameters of the dosing process. In particular, the value of compressed air pressure in the batch receiver has the greatest impact on the accuracy. Based on the research results, the laws of the required compressed air pressure distribution were formed to meet the specified performance. The obtained research results will allow to improve the design of liquid product dosing modules and determine the input parameters for further studies.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМУНІКАТИВНОГО ДИЗАЙНУ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

О. С. Володін, О. М. Гавва, С. В. Токарчук, О. С. Савчук

Національний університет харчових технологій

Сьогодні широко використовують методику розроблення цифрового двійника як комп'ютерного прообразу для будь-якого реального об'єкта. За досліджуваній об'єкт можна обрати, наприклад, все промислове підприємство з його виробничими лініями, конкретний екземпляр виробу або окремих технологічний процес. Під час синтезу можна отримати візуальне уявлення об'єкта-прообразу, а потім вже переходити до фізичних властивостей.

Мета дослідження полягала в оцінці комунікативного дизайну виробничих систем процесу фасування рідких продуктів на прикладі гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля. Дослідження проводилися у два етапи. На першому етапі була розроблена комп'ютерна модель мехатронного модуля, яка описувала зміну технологічних параметрів дозування рідини і початкові та граничні умови процесу. Програмно встановлені режими роботи гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля за допомогою драйвера. Враховані граничні умови процесу формування і витиснення дози продукту. На другому етапі було проведено випробування комп'ютерної моделі з використанням цифрового контрольно-вимірювального обладнання. Під час випробувань визначена точність повторювань формування дози у межах $\pm 0,22\%$ та $0,9\%$ від встановленої величини маси дози 50...200 мл. Результати досліджень показали, що точність формування дози залежить від заданих параметрів процесу дозування. Зокрема, найбільший вплив на точність має величина тиску стисненого повітря в порційному ресивері. На основі отриманих результатів досліджень було сформульовано закони необхідного розподілення тиску стисненого повітря для дотримання заданої продуктивності. Отримані результати досліджень дають змогу удосконалити конструкції модулів дозування рідких продуктів і визначити вхідні параметри для проведення натурних досліджень.

Ключові слова: точність дозування, формування дози, мехатронний модуль, дозувально-фасувальна операція, зворотний зв'язок.

Постановка проблеми. Аналіз методів комунікативного дизайну виробничих систем показав, що актуальним завданням є дослідження системи безперервного відстежування основних робочих характеристик промислового об'єкта. Така система дасть змогу не тільки контролювати стан обладнання в режимі реального часу, але й розробляти шляхи підвищення його технологічної ефективності. Розроблений алгоритм побудови системи цифрового моніторингу передбачає використання таких компонентів: графічна цифрова 3D-модель об'єкта, розроблена із застосуванням CAD-систем інженерного проєктування; технологія промислового «Інтернету речей» (IIoT) для отримання реальних даних від прообразу.

Доповненнями методів комунікативного аналізу є інтегровані математичні моделі, які забезпечують «поведінку» цифрового двійника відповідно до поведінки його прообразу й технології візуалізації для відображення даних про стан об'єкта.

На основі розробленого алгоритму було спроектовано експериментальну систему цифрового моніторингу дозувально-фасувального мехатронного модуля. Система включає в себе такі компоненти: електропневмопривід; блок керування, який реалізує повноцінний зворотний зв'язок для приводу; блок віддаленого керування Wi-Fi на основі передачі даних у хмарне сховище.

Існуючі дослідження показали наявність науково-практичної проблеми щодо доповнення виробничих систем блоками цифрового моніторингу з метою підвищення ефективності технологічних процесів. Сучасні автоматизовані дозувально-фасувальні системи є основою багатьох технологічних ліній. Однак у зв'язку з розвитком «Індустрії 4.0» і зростаючими вимогами до точності дозування, існуючі конструкції дозаторів вимагають попереднього моделювання. У дослідженні проведений якісний аналіз мехатронного дозувально-фасувального модуля пакувальної машини для рідких продуктів. На основі аналізу визначено, що актуальним є забезпечення таких параметрів модуля: діапазон доз від 0,01 до 20 л; витратні параметри від 1 до 1000 л/год. Ці параметри відповідають вимогам сучасних технологічних ліній і дають змогу забезпечити високу точність дозування рідких і малов'язких продуктів. Вирішення цього завдання є актуальним для синтезу нових пакувальних машин.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Універсалізація дозувально-фасувальних модулів пакувальних машин є актуальним завданням комунікативного дизайну. Це розширить функціональні можливості дозаторів з одночасним збереженням їх характеристик за точністю, надійністю та діапазонами дозування (Vazquez-Santacruz, 2023). Одним зі шляхів універсалізації є застосування нового способу порційного дозування, заснованого на програмному регулюванні витрати дозованого середовища. Цей спосіб забезпечить високу точність дозування, а також гнучкість у виборі діапазонів дозування. (Isermann, 2023; Badiru, & Omitaomu, 2023). Однак для реалізації цього способу необхідно розробити прості за конструкцією контрольно-вимірювальні елементи в системні цифрові комплекси моніторингу пакувального обладнання. (Kartmann, Koltay, & Zengerle, 2015).

Сучасні пакувальні машини, які оснащені мехатронними модулями, зокрема і дозувально-фасувальними, облаштовані контурами контролю за двома та більше технологічними параметрами. Такі контури контролю розроблені на базі типових схем приводів із перетворювачем витрат. (Kryvoplias-Volodina, 2017). Стандартна методика проектування виробничих систем і реалізації їх системи керування на елементній базі промислової пневмоавтоматики має низку недоліків, зокрема невисокий ступінь уніфікації та введення спеціальних додаткових елементів. (Shurong Ning, 2021). Широке застосування IIOT мереж для модулів пакувальних машин забезпечує пожежо- та вибухобезпечність обладнання, що є однією із важливих вимог більшості виробництв. (Gavva, & Kryvoplias-Volodina, 2021).

У працях (Hocken, & Pereira, 2011; DeMaria, 2020) розглянуто системи об'ємного дозування, які застосовуються пакувальними машинами з відносно стабільними параметрами дозованих продуктів. Такі системи є простими та надійними,

проте мають обмежену точність. Дизайн компонованого рішення системи дозування з ваговимірною апаратурою забезпечують більш високу точність, проте вони є складними, дорогими та мають недостатню швидкодію при дозуванні рідин. (Wright, & Gerhart, 2009). Актуальними є також питання точності дозування. Замкнені системи автоматичного регулювання витратами, з регулювальними клапанами, забезпечують низьку точність при малих величинах продуктивності. (Stanislao Patalano, 2020). Це пояснюється нестабільністю характеристик клапанів під час роботи з малими перепадами тисків. (Ashutosh Singh, 2023).

У статті (Vavřík, 2022) докладно описано методику розроблення компоновання частотно-імпульсних систем керування дозувально-фасувальними модулями. Такі системи мають високу точність і швидкодію, проте вони також є складними та дорогими. На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що чинні системи дозування мають низку недоліків, зокрема обмежену точність, складність і високу вартість.

Для розв'язання цих проблем необхідно розробити нові системи дозування, які будуть мати високу точність, швидкодію та економічність.

Метою статті є дослідження комунікативного дизайну виробничих систем на прикладі цифрового моніторингу пневмоприводу у реальному часі. Для досягнення мети було виконано такі завдання: проведено аналіз комунікативного дизайну виробничих систем; розроблено алгоритм побудови системи цифрового моніторингу; спроектовано експериментальну систему цифрового моніторингу пневмоприводу.

Матеріали і методи. На основі математико-статистичних методів дослідження Simulink здійснено синтез комунікативної виробничої системи для мехатронного модуля дозування на базі газодинаміки. Розроблено експериментальний стенд для верифікації комп'ютерної моделі та виявлення впливу вхідних параметрів на механізм формування й подальшого витиснення дози продукту. Застосовано методику блокової структури Simulink під час синтезу модуля дозування на замкнених системах керування із контрольованим переналаштовуванням тиску, часу, об'єму дози, швидкості подачі продукту в упакування. Комунікативний дизайн дослідного мехатронного дозувально-фасувального модуля сформовано малоінерційною й універсальною структурою відносно операцій порційного і безперервного дозування.

Результати і обговорення. Під час розробки комунікативного дизайну виробничих систем обрано методику блокової структури Simulink. Для перевірки гіпотези про можливість розроблення спрощеної об'єктно-орієнтованої комп'ютерної моделі мехатронного дозувально-фасувального модуля обрано комбіновану електропневматичну систему керування. На рис. 1 представлено алгоритм синтезу системи для цифрового моніторингу пневмоприводу перевантажувального модуля конвеєрної підвідної мережі в реальному часі.

Задача цифровізації дослідного модуля супроводжувалась чисельним моделюванням, для обґрунтованого вибору оптимального варіанта синтезу цифрової моделі. Отримані результати змінних кінематичних і динамічних характеристик роботи дослідного пневмоприводу під час роботи в межах заданого технічного регламенту.

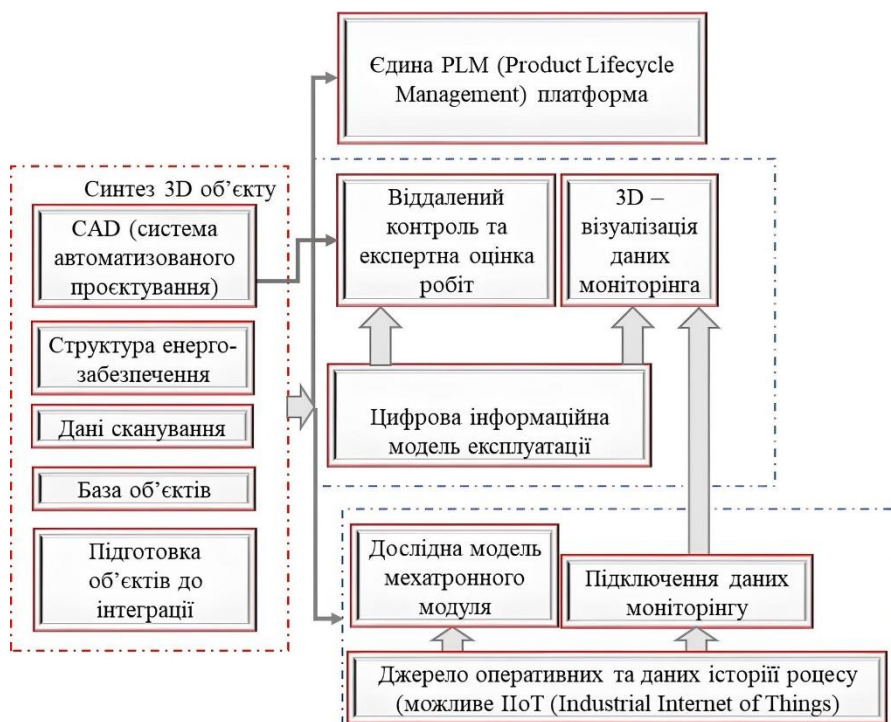


Рис. 1. Структурна схема комунікативного дизайну досліджуваного модуля

Досліджуваний електронний модуль пристрою керування (рис. 2), сформовано програмними блоками Simscape Fluids, що дає змогу керувати заданою дозою за допомогою електромагнітного клапана. Вихідні умови процесу комунікації: вхідний сигнал керування 4—20 мА, максимальний струм — 1 А; трансформування ШІМ сигналу, керування на базі електромагнітних клапанів й подальше формування дози продукту.

Дослідженнями враховані статичні та динамічні параметри системи керування модуля. Здійснено блоковий вибір щодо подальшого моделювання технологічних параметрів процесу дозування. Це забезпечило уточнення метрологічних характеристик досліджуваної мехатронної системи.

Для забезпечення фізичних експериментів сформовані схеми складових комунікативних мехатронних дозувально-фасувальних модулів і розроблені алгоритми керування процесом підвищення точності формування дози. Експериментально досліджена реалізація різних законів зміни тиску за допомогою модуля керування, під час зміни дози продукту (рис. 3).

Авторами проведено дослідження параметрів гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля за допомогою комп'ютерної моделі. Досліджувалися такі параметри: тиск всередині модуля; швидкість руху дозованого продукту в фасувальному патрубку; точність сформованої дози в споживчому упаковуванні. Вимірювання проводилися під час встановлення різних типів сигналу керування:

напівхвиля синусоїдна; хвиля синусоїдна; хвиля східчаста; хвиля трикутна; хвиля пилоподібна.

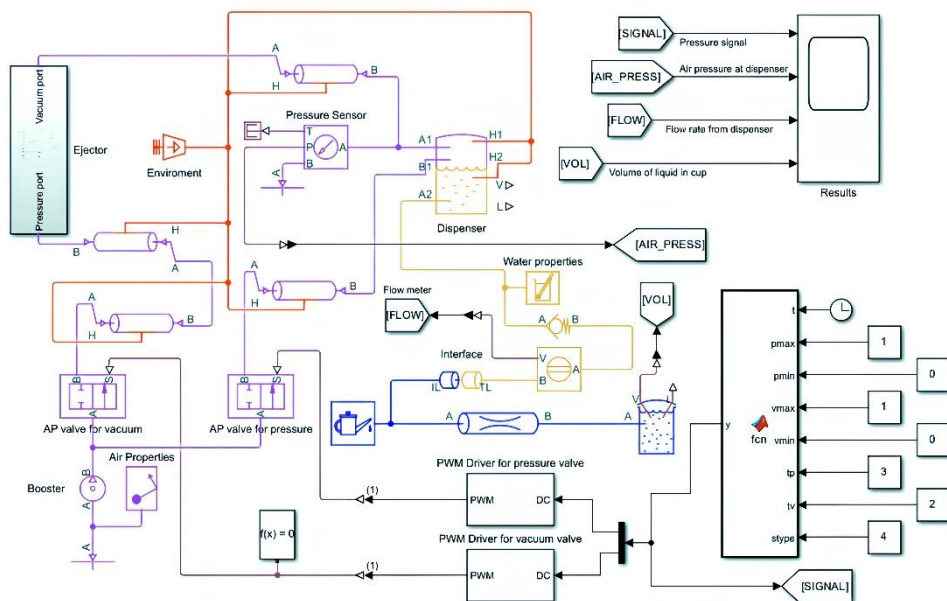


Рис. 2. Комп'ютерна модель мехатронного дозувально-фасувального модуля реалізована Matlab Simulink

Моделювання здійснювалося з дотриманням таких умов: максимальний робочий тиск від 3 до 6 барів; тиск в дозаторі від 1 до 3 барів; швидкість продукту під час фасування в межах $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; фіксований об'єм дозування від 50 до 200 м^3 .

Результати дослідження показали, що швидкість і тиск під час роботи моделі дозування підтримують стабільні показники впродовж всього моделювання під впливом вхідної дії на синусоїдну напівхвилю та пилоподібну хвилю. Точність дозування фіксується у межах 0,92%. Під час випробувань комп'ютерної моделі визначена точність повторювань формування дози у межах $\pm 0,22\%$ та 0,9% від встановленої величини маси дози 50...200 мл.

Поліноміальні рівняння, побудовані у межах графіків експериментального дослідження, показали високі значення коефіцієнтів апроксимації $R^2=0,98$, що вказує на високий ступінь достовірності апроксимації. Узагальнені результати впливу змін кінематичних параметрів на стабілізацію процесу перевантаження досліджуваного об'єкта. Максимальний тиск досягається в поршневій порожнині за 0,02 с, що підтверджує отримані результати математичної моделі. Синтез системи цифрового моніторингу пневмоприводу в реальному часі забезпечує прийняття оптимальних управлінських рішень.

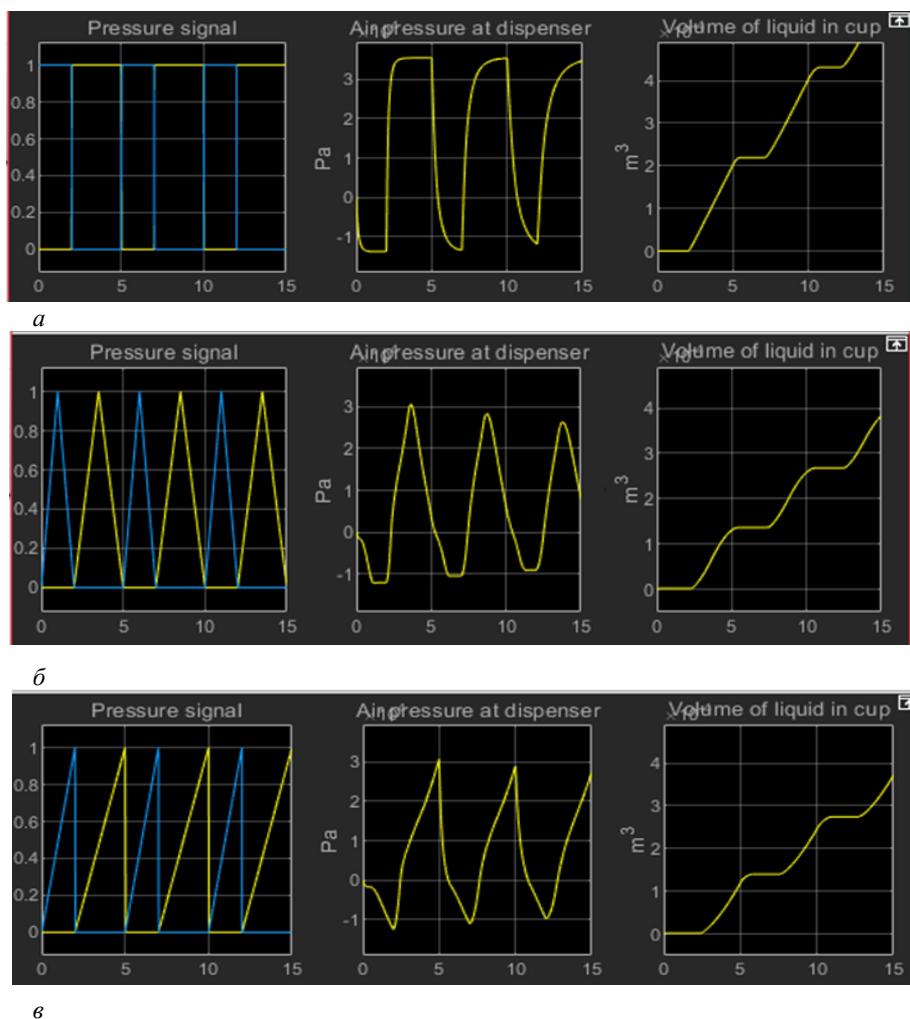


Рис. 3. Результати моделювання реакцій мехатронного дозувально-фасувального модуля на різні вхідні впливи: а — хвиля східчаста; б — хвиля трикутна; в — хвиля пилоподібна

Висновки

Здійснено аналітичні дослідження процесу дозування рідких продуктів, зокрема питної води, за допомогою гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля.

Дослідження здійснені за такими етапами: опис окремих етапів процесу дозування та прийнятих допущень; формування програм Simulink програмного комплексу Matlab; розробка комп'ютерної моделі роботи гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля.

Граничні умови сформовані з урахуванням впливів програмно встановлених режимів під час дозування, із застосуванням драйвера й відтвореної в моделі геометрії продуктопроводу. Значення струму під час моделювання формувалось —

мА (точність 0,001 мА) до стандартної шкали $I_{\min}$, $I_{\max}=4...20$ мА. Комп'ютерна модель сформована за допомогою диференціальних рівнянь змінення кінематичних параметрів рідини під час витиснення дози продукту. Швидкість і тиск під час роботи моделі дозування підтримують стабільні показники впродовж всього моделювання під впливом вхідної дії на пилоподібну хвилю.

Література

Vazquez-Santacruz, J. A. (2023) Towards an integrated design methodology for mechatronic systems Research in Engineering Design. Springer-Verlag London Ltd., doi:<https://doi.org/10.1007/s00163-023-00416-4>.

Rolf, Isermann (2023). Designs and Specification of Mechatronic Systems. Rolf Isermann. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-96729-1_13.

Badiru, A. B., & Omitaomu, O. A. (2023). Systems 4.0: Systems Foundations for Industry 4.0 (1st ed.). CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/9781003312277>.

Kartmann, S., Koltay, P., Zengerle, R. (2015) Pressure transducer for medical applications employing radial expansion of a low-cost polymer tube. *Procedia engineering*, 120, 1213—1216. URL: <http://surl.li/jkyqe>.

Kryvoplias-Volodina, L. (2017). Structuralparametric synthesis of hydro-mechanical drive of hoisting and lowering mechanism of package-forming machines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/7 (89), 39—44. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111552>.

Shurong, Ning (2021) Research on micro-liquid dispensing driven by a syringe pump with the consideration of air volume. *Microsystem Technologies*, 27(8): 1—14. doi:<https://doi.org/10.1007/s00542-020-05133-9>.

Gavva, O., Kryvoplias-Volodina, L., (2021) Synthesis of a precision dosing system for liquid products based on electro-pneumatic complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* *this link is disabled*, 6(2—114), 125—135. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247187>.

Hocken, R. J., & Pereira, P. H. (2011). Coordinate Measuring Machines and Systems (2nd ed.). CRC Press. 592 p. doi: <https://doi.org/10.1201/b11022>.

DeMaria, K. (2020). The Packaging Development Process: A Guide for Engineers and Project Managers. doi: <https://doi.org/10.1201/9781482278897>.

Wright, T., & Gerhart, P. (2009). Fluid Machinery: Application, Selection, and Design, Second Edition (2nd ed.). doi:<https://doi.org/10.1201/b15836>.

Stanislao, Patalano (2020) Concurrent Multi-domain Modelling and Simulation for Energy-Efficient Mechatronic Systems. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-07555-1_8.

Ashutosh, Singh. (2023) Machine Configuration Based on Machine Reliability and Production Rate Criteria Through Line Balancing Algorithm in Reconfigurable Manufacturing System (RMS). *Industrial Engineering Research Group*, 1120—1145. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1308-4_14.

Vavrik, V. (2022) Designing of Machine Backups in Reconfigurable Manufacturing Systems. *Appl. Sci.*, 12, 2338. doi:<https://doi.org/10.3390/app12052338>.

TERMoelectric DEVICES FOR MEASURING TEMPERATURE AND FLOW VELOCITY OF GAS MEDIUM

O. Mazurenko

National University of Food Technologies

L. Vorobiov, L. Dekusha

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Key words:

Measurement

Sensor

Temperature

Heat flow

Flow velocity

Thermo-anemometer

Gaseous medium

Article history:

Received 09.11.2023

Received in revised form
24.11.2023

Accepted 11.12.2023

Corresponding author:

O. Mazurenko

E-mail:

rovgi18-1@ukr.net

Citation: О. Г. Мазуренко, Л. Й. Воробйов, Л. В. Декуша (2023). Термoeлектричні прилади вимірювання температури та швидкості потоку газового середовища. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 53—71. DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-6

ABSTRACT

In the food industry, a significant number of heat treatment processes of products are carried out using gaseous media, the value of the main operating parameters of which, namely temperature, relative humidity and flow velocity, must be controlled. From the results of the analysis it was found that, depending on the industry, type of technological process and product, the ranges of values of these parameters of working gaseous media are: the temperature is from minus 36 °C, when quickly freezing meat, to 200 °C when baking bread; relative humidity is from 30% during drying to 95% in food storage rooms; flow velocity is from 0.1 m/s in food storage rooms to 10 m/s during heat treatment of products. At the same time, each of the technological processes, and therefore the control and maintenance of process parameters, has its own characteristics.

The existing methods and means suitable for measuring temperature and flow velocity of gaseous working media in the current ranges of their values were analyzed in the work.

It is shown that in systems for monitoring parameters of convective processing of products, it is desirable to have stationary measuring instruments associated with automated process control systems, and for operational control it is necessary to have mobile means.

The results of comparative testing of domestic and foreign thermoelectric heat flux density sensors are presented. On this basis, it is shown that domestic heat meters are not inferior to imported ones in most respects. It is noted that the sensitivity of domestic thermoelectric sensors of the developed anemometers can be coordinated with the operational characteristics of the automated process control system of the enterprise.

The results of the development of thermo- and thermometric methods and devices for monitoring the speed of gas flows are presented in the article.

At the next stage of methods and devices for measuring parameters characterizing the humidity condition of gaseous media during the thermal processing of food products will be developed.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-6

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА

О. Г. Мазуренко

Національний університет харчових технологій

Л. Й. Воробйов, Л. В. Декуша

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

У харчовій промисловості значна кількість процесів термічної обробки продуктів здійснюється з використанням газових середовищ, значення основних робочих параметрів яких (температуру, відносну вологість і швидкість руху) необхідно контролювати. Залежно від галузі промисловості, виду технологічного процесу і продукту діапазони значень цих параметрів робочих середовищ становлять: температура — від мінус 36°C при швидкому заморожуванні м'яса, до 200°C під час випікання хліба; відносна вологість — від 30% при сушінні до 95% в камерах зберігання продуктів; швидкість руху — від 0,1 м/с в камерах зберігання продуктів до 10 м/с під час термічної обробки продуктів. Водночас кожен з технологічних процесів, а отже, контроль і підтримання параметрів процесу, мають свої особливості.

У статті проаналізовано існуючі методи та засоби, які придатні для вимірювання температури, швидкості руху потоків газових робочих середовищ в актуальних діапазонах їх значень. Показано, що в системах контролю параметрів середовищ конвективної обробки продуктів бажано мати стаціонарні засоби вимірювання, пов'язані з АСУ ТП, а для оперативного контролю — мобільні засоби.

Наведено результати порівняльних випробовувань вітчизняних і зарубіжних термоелектричних перетворювачів густини теплового потоку, на підставі яких показано, що вітчизняні тепломіри за більшістю показників не поступаються імпортованим. Відзначено, що чутливість термоелектричних перетворювачів розроблених анемометрів може бути узгоджена з експлуатаційними характеристиками АСУ ТП підприємства. Проаналізовано результати розробок термо- і теплометричного способів та приладів контролю швидкості руху потоків газового середовища.

Результати розробок способів і пристроїв вимірювання вологості газових середовищ термічної обробки продуктів будуть наведені в наступному номері журналу.

Ключові слова: *вимірювання, перетворювач, температура, тепловий потік, швидкість руху, термоанемометр, газове середовище.*

Постановка проблеми. За результатами аналізу більшості, на перший погляд, цілком досконалих та добре відомих способів і засобів вимірювання технологічних параметрів обробки харчових продуктів, часто доводиться констатувати наявність у них невикористаних резервів, передусім це стосується точності і мож-

ливості автоматизувати процес вимірювання, що обумовлює необхідність вдосконалення або навіть розробки принципово нових способів і засобів вимірювання (Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 2019).

Так, одним з основним параметрів, який визначає якість та ефективність процесів термічної обробки харчових продуктів у потоці газових середовищ, є температуро-швидкісний стан цих середовищ. Для вимірювання швидкості або витрати повітряного потоку у вентиляційних системах використовують прилади, які називають анемометрами (O'Sullivan та ін., 2014). Існує кілька різновидів анемометрів, що відрізняються принципом дії та вимірюванням різних фізичних величин: перепаду тиску (прилад — дифманометр (Ower, & Pankhurst, 2014), зонд-трубка Піто), електричного опору або сили струму (прилад — термоанемометр (Ikeya, Örlü, Fukagata, & Alfredsson, 2017), зонд, зазвичай нагріта струна, але можуть бути й інші, наприклад, термоплівка (Saremi, Alyari, Feili, & Seidel, 2014), а також частоти обертання, прилад — вимірювач частоти механічного обертання, зонд — крильчатка або чашечки (Burgess, Ellenbecker, & Treitman, 2004).

Кожен з анемометрів має свою сферу застосування залежно від зовнішніх умов, стану повітряного середовища, структури течії та діапазону вимірювання швидкості повітряного потоку. Проте серед різноманіття існуючих видів анемометрів найбільш розповсюдженими в харчовій промисловості є резистивні термоанемометри.

У діапазоні швидкості руху потоку повітря ($0,5 \div 10$) м/с термоанемометри є найбільш точними приладами, тому їх широко використовують у системах автоматизованого керування виробничими процесами. До недоліків резистивних анемометрів слід віднести їхню чутливість до турбулізації потоку повітря (Manshadi, & Esfeh, 2012) і кута натікання потоку на поверхню струни, що вносить похибку в результати вимірювань. Зонди сучасних термоанемометрів виконуються компактними — мінімальний діаметр ($10 \div 15$) мм, що дає змогу проводити точкові вимірювання (Örlü, & Vinuesa, 2017). В основу принципу дії цих пристроїв покладено взаємозв'язок між швидкістю руху потоку робочого середовища та інтенсивністю теплопроводу від нагрітого чутливого елемента пристрою, що омивається цим потоком.

Основним елементом резистивних термоанемометрів є електричний нагрівач — він же чутливий елемент (ЧЕ) пристрою, виконаний у вигляді нитки, циліндра, клину або шару, електричний опір матеріалу якого залежить від температури. З використанням цього нагрівача створюють потрібну для теплообміну різницю температур між потоком робочого середовища та ЧЕ пристрою. За величиною виміряного електричного опору терморезистивного матеріалу визначають температуру нагрівача, інтенсивність теплообміну і отже, руху потоку газового середовища.

Тут же зазначимо, що основним елементом термоелектричного анемометра є термопара, за якою вимірюють температуру тонкої нагрітої нитки (нагрівача), що змінюється залежно від швидкості руху потоку повітря. Таким чином, резистивний термоанемометр фактично являє собою термометр опору (ТО), а термоелектричний анемометр — термопару (ТП). Спрощені електричні та вимірювальні схеми цих пристроїв наведені на рис. 1.

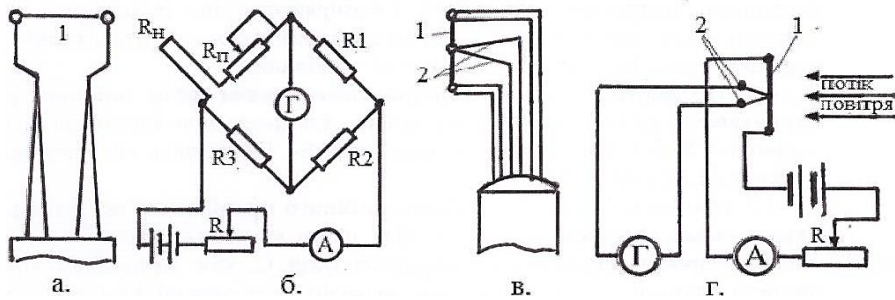


Рис. 1. Спрощені електрична (а) і вимірювальна (б) схеми терморезистивного анемометра та електрична (в) і вимірювальна (г) схеми термоелектричного анемометра: 1 — нагрівач, 2 — термопара

Конструкції ЧЕ обох анемометрів повинні виключати всі види втрат теплоти через нього, крім втрат конвекцією. Для цих пристроїв має бути справедлива залежність:

$$R_n = f(\vartheta_{p.c.}), \quad (1)$$

де R_n — функція активного опору нитки-нагрівача термоанемометра від швидкості руху $\vartheta_{p.c.}$ потоку робочого (газового) середовища (рис. 2).

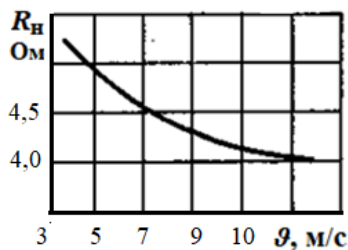


Рис. 2. Залежність опору нитки-нагрівача анемометра від швидкості руху потоку газу

Тепловий баланс нитки-нагрівача анемометра описується рівнянням:

$$I_2 \cdot R_n = \alpha \cdot F \cdot (t_n - t_{p.c.}), \quad (2)$$

де: α — коефіцієнт теплообміну, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; F — поверхня вимірювальної нитки, м^2 ; I — сила електричного струму, А ; t_n — температура потоку робочого середовища, $^{\circ}\text{C}$; $t_{p.c.}$ — температура нитки-нагрівача, $^{\circ}\text{C}$.

Резистивні термоанемометри опору поділяють на ті, що працюють за постійної температури розжарення нитки, та ті, які працюють при постійній силі струму нагрівача. У першому випадку температуру нитки регулюють силою струму, яка залежить від опору реостата R (рис. 1, а), а швидкість руху потоку робочого середовища визначають з рівності:

$$U = I^2 \cdot R_n = A + B \cdot \vartheta_n^p, \quad (3)$$

де U — напруга, В ; A, B, p — дослідні коефіцієнти, величина яких вказується в паспортних даних приладів.

Якщо резистивний анемометр працює за постійної сили струму, то для визначення температури потоку робочого середовища здійснюють підбір активного опору R таким чином, щоб сума $R + R_{\pi} = \text{const}$.

Швидкість потоку робочого газового середовища у разі застосування термоелектричного анемометра розраховують за рівнянням:

$$t_{\pi} - t_{\text{н}} = \frac{I^2 \cdot R_{\text{н}} \cdot \nu_{\text{пов}}^{0,4}}{0,81 \cdot \lambda_{\text{пов}} \cdot \pi \cdot d^{0,4} \cdot l} \cdot \nu_{\text{пов}}^{-0,4}, \quad (4)$$

де $\nu_{\text{пов}}$ — кінематична в'язкість повітря, $\text{м}^2/\text{с}$; $\lambda_{\text{пов}}$ — теплопровідність повітря, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; d та l — діаметр і довжина припаяної терморпори, м .

Для виготовлення резистивних термоанемометрів найбільш придатними вважаються терморезистори з негативним термічним коефіцієнтом опору (ТКО), наприклад, типу М85 (Ковальчук, & Лучко, 2011). Їх опір змінюється від 10 кОм при 20°C до ≈ 1 кОм при 100°C . Якщо робочу температуру датчика прийняти рівною 100°C , то за вольт-амперною характеристикою терморезистора типу М85 (рис. 3) для опору 1 кОм вимірювальний струм виходить рівним ≈ 1 мА. На підставі цього конструюють схеми резистивних термоанемометрів (рис. 4, а).

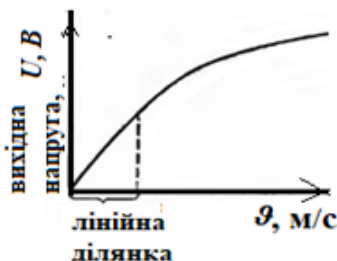


Рис. 3. Характеристика терморезистивного анемометра для умов прямого потоку

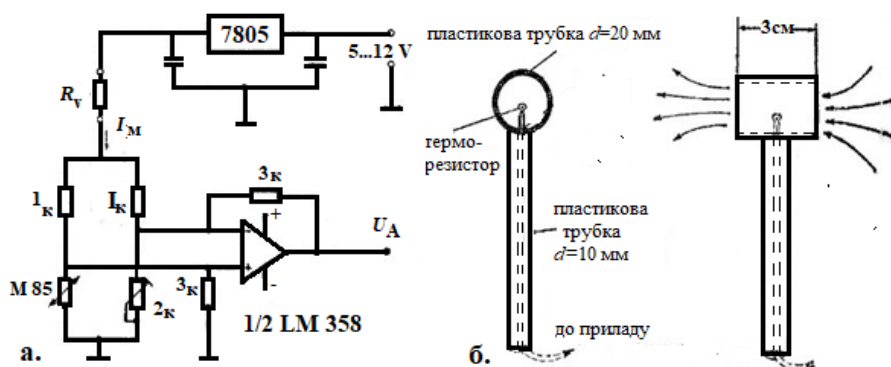


Рис. 4. Електрична вимірювальна схема (а) та механічна будова (б) резистивного анемометра

Опір вимірювального моста становить приблизно 1 кОм. За постійної (регульованої) напруги живлення моста $U_{\text{м}} = 5$ В для струму $I_{\text{м}} = 2$ мА додатковий опір $R_{\text{д}} = 5/2 - 1 = 1,5$ кОм.

Чутливий до потоку газового середовища терморезистор М85 на підставці міститься на осі трубки завдовжки близько 3 см і внутрішнім діаметром близько 2 см (рис. 4, б). Це дає змогу усунути виникнення побічних потоків, здатних спотворити результати вимірювань (Electronoff, 2023).

Недоліками існуючих типів резистивних термоанемометрів є залежність їх показів від температури потоку робочого середовища, а також від фонового теплового випромінювання. Це значно обмежує сферу їх застосування, особливо у харчовій промисловості, де в багатьох технологічних процесах енергетична дія на продукт здійснюється саме при конвективно-радіаційному теплообміні. Крім цього, швидкість руху й температура робочих газових середовищ за час термічної обробки продуктів може коливатися в значних діапазонах, що ускладнює її вимірювання.

Усунути зазначені недоліки можна шляхом використання інших видів перетворювачів температури і швидкості руху потоку газового робочого середовища. На наш погляд, перетворювачів генераторного типу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні анемометри дають змогу проводити одночасне вимірювання температури та швидкості потоку за допомогою додаткового датчика температури (Foss, Peabody, Norconk, & Lawrenz, 2006). Також вони забезпечені низкою допоміжних функцій, що полегшують математичне опрацювання результатів вимірювання, наприклад, усереднення за інтервал часу.

За даними, наведеними в літературі, обсяги вимірювань температури у відсотках до загальної кількості вимірювань, що проводяться, наприклад, у хімічній промисловості, в теплоенергетиці та в ядерній енергетиці, становлять, відповідно, 50%, 33% та 35%. Стосовно теми цієї статті зазначимо, що останнім часом на ринку нашої країни з'явилися нові, у тому числі й імпорتنі засоби вимірювання температури, а також термоелектричні перетворювачі, які в принципі придатні для вимірювання щільності потоку теплоти.

Серед різноманіття існуючих перетворювачів температури значним попитом користуються термометри опору (ТО), зокрема платинові, та термоелектричні термометри — термопари (ТП).

Чутливим елементом (ЧЕ) є резистор, виконаний з металевого дроту або плівки, які мають відому залежність електричного опору від температури, для вимірювання якого потрібно джерело стабілізованого електричного струму.

Найбільш поширеною конструкцією сучасного чутливого елементу ЧЕ дріт'яного платинового ТО (Coastal Wiki, & Souza Dias, 2020) є так звана «вільна від напруги спіраль» (strain-free). Цей ЧЕ (рис. 5, а) являє собою платинову спіраль, чотири відрізки якої укладені в канали трубки з оксиду алюмінію і засипані дрібнодисперсним порошком з оксиду алюмінію високої чистоти. Це забезпечує ізоляцію витків спіралі один від одного, амортизацію спіралі під час термічного розширення і вібраційну міцність приладу. Такі ТО випускаються у багатьох країнах світу і вважаються одним з найнадійніших засобів вимірювання температури.

Плівковий чутливий елемент типу «thin-film» являє собою підкладку товщиною $(0,3 \div 0,6)$ мм, на яку напилена платинова плівка товщиною до декількох сотень нанометрів (рис. 5, б) у вигляді меандру та захисний шар з оксиду алюмінію.

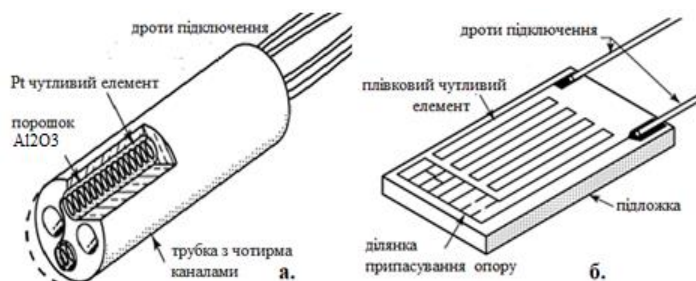


Рис. 5. Конструкція Pt термометра опору: а — дротяного, типу «strain-free»; б — плівкового, типу «thin-film»

Нині плівковий платиновий ЧЕ є найдешевшим сенсором. Його перевагою є малий розмір і маса, що дає змогу встановлювати такі ЧЕ в мініатюрні корпуси й отримувати швидке реагування на зміну температури об'єкта. Завдяки малим розмірам плівковий ЧЕ ТО можуть виготовлятися з підвищеним номінальним опором. Зараз вже виробляються ЧЕ з опором 1000 Ом, що дає змогу значно зменшити вплив опору дротів з'єднання ЧЕ ТО зі вторинним вимірювальним приладом.

Метрологічні характеристики та вартість ТО визначаються класом допуску термометра та його ЧЕ. Найпоширенішим у промисловості є клас В (табл. 1).

Таблиця 1. Клас допуску платинового термометра та його дрового (W) і плівкового (F) чутливих елементів за МЕК 60751(22)

Клас допуску ТО та його ЧЕ	Допуск, °C	Діапазон вимірювань, °C	
		дротовий ТО	плівковий ТО
B, W=F=0,3	$\pm (0,3+0,005 t)$	-196 ÷ 660	-50 ÷ 500

Для вимірювання різниці температур Δt об'єктів зручно використовувати термоелектричні перетворювачі генераторного типу — термопари (Луцик, Буняк, Рудавський, & Стадник, 2003). Термоелементом, термопарою, або термоелектричним термометром називають коло (рис. 6, а), яке складається з двох різних провідників. Згідно з ефектом Зеебека в розімкненому електричному колі (рис. 6, б та в), що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти між якими знаходяться при різних температурах ($t_1 > t_2$ — температура, відповідно, «гарячого» і «холодного» спаїв), виникає термо-ЕРС:

$$E = \alpha_3 \cdot \Delta t = \alpha_3 \cdot (t_1 - t_2), \quad (5)$$

де α_3 — коефіцієнт Зеебека.

З результату аналізу рівняння розрахунку термо-ЕРС випливає, що для визначення температури одного зі спаїв термопари (температури дослідного об'єкта) потрібно знати температуру іншого спаю датчика. Для цього «холодний» (опорний) спай термопари розмішують у спеціальному блоці, де незмінно підтримується обумовлена температура.

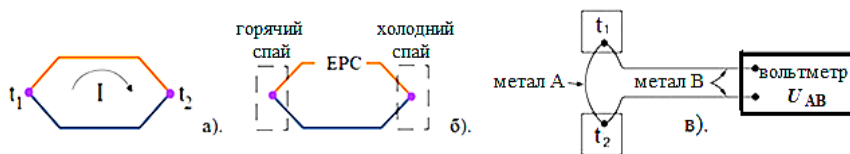


Рис. 6. До ефекту Зесбека

Для вимірювання різниці температур $\Delta t = t_1 - t_2$ зон, в одній з яких знаходиться вторинний перетворювач (прилад вимірювач термо-ЕРС), використовують схему, що представлена на рис. 6, в. Для вимірювання різниці температур $\Delta t = t_1 - t_2$ зон, у жодій з них не знаходиться прилад вимірювач термо-ЕРС, зручно використовувати так звану диференціальну термопару. Це два однакові термоелементи, з'єднані зустрічно за термо-ЕРС ($\Delta E = E_1 - E_2$), яка генерується:

$$\Delta t = (E_1 - E_2) / a_3 = \Delta E / a_3. \quad (6)$$

Для підсилення сигналу, який генерує термопара, можна n таких датчиків з'єднати узгоджено за термо-ЕРС, яку вони генерують ΔE_n , і отримати так звану гіпертермопару. У цьому випадку одержимо:

$$\Delta t = \Delta E / (a_3 \cdot n). \quad (7)$$

В Україні вже майже 60 років розробляються та виготовляються (Федоров, 1987) різні види термоелектричних перетворювачів теплового потоку (ПТП). ПТП, які працюють за принципом «допоміжної стінки», являють собою пластину (диск) за товщині якої розміщена батарея термоелементів (рис. 7) — диференційна плоска спіральна гіпертермопара, виготовлена за гальванічною технологією і залита електроізолюючим компаундом.

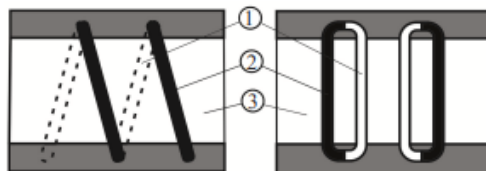


Рис. 7. Спіральний ПТП: 1 — основний термоелектрод; 2 — біметалевий термоелектрод; 3 — електроізолюючий компаунд

Кількість спаїв диференційної термопари на 1 cm^2 поверхні такого ПТП може складати від 500 до 3000 одиниць. При проходженні потоку теплоти через такий перетворювач унаслідок різниці температур між його поверхнями батарея термоелектричних елементів генерує термо-ЕРС e_q , величина якої пропорційна густині теплового потоку q . Тут густину теплового потоку розраховують за формулою:

$$q = K_q \cdot e_q, \quad (8)$$

де K_q — робочий коефіцієнт (величина зворотна чутливості), $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})]$.

Значення коефіцієнта K_q визначають за спеціальними методиками з використанням стендів градування ПТП при радіаційному або кондуктивному підводі теплоти (Грищенко, 2017).

З рівняння (8) випливає, що сила вихідного сигналу e_q ПТП визначається чутливістю $1/K_q$ та густиною теплового потоку q , який проходить через перетворювач. В ІТТФ НАН України розроблені технології виробництва ПТП обумовленої чутливості, тобто перетворювачів, які здатні забезпечити силу робочого сигналу теплометричного пристрою який не потрібно підсилювати при передачі вимірювальними каналами в АСУ ТП. Це спрощує схеми вимірювання сигналу батареї термоелектричних елементів перетворювача і, відповідно, вимірювання потрібної фізичної величини. Поряд з цим в останні роки розповсюдження отримали імпортовані напівпровідникові модулі (рис. 8), що призначені для роботи у якості термоелектричних генераторів струму (Анатичук, Михайловський, Струтинська, & Лудчак, 2009), або холодильних елементів на основі ефекту Пельтьє (Анатичук, 1979).

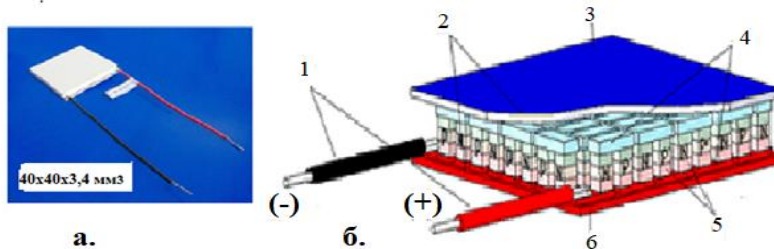


Рис. 8. Зовнішній вигляд (а) та будова (б) термоелектричного модуля

Термоелектричний модуль складається з напівпровідникових елементів р- і n-типу, об'єднаних попарно мідними шинами (комутаційними пластинами) в єдине електричне коло і розташовані між керамічними платами (5 — термоелектричні елементи). Для виготовлення напівпровідникових елементів використовують сплави телуридів і селенідів вісмуту і сурми. Керамічні плати 2 утворюють «гарячу» 6 і «холодну» 3 поверхні термоелектричного модуля. До «гарячої» плити 6 кріпляться вивідні дроти 1 (<https://peltiermodules.com/>).

В Інституті технічної теплофізики НАН України були проведені випробовування трьох типів напівпровідникових модулів щодо можливості їх використання як ПТП (Hotra, Kovtun, & Dekusha, 2021):

- генераторний модуль PG-15-250 розміром $(40 \times 40 \times 3,4) \text{ мм}^3$, який має 200 термоелементів BiTe;

- охолоджувальні модулі Пельтьє TEC1-12703 та TEC1-12706, які мають розмір, відповідно, $(30 \times 30 \times 3,5) \text{ мм}^3$ і $(40 \times 40 \times 3,8) \text{ мм}^3$ та по 127 термоелементів BiSn.

Одночасно визначали метрологічні характеристики серійного біметалевого ПТП, виконаного на замовлення.

Результати визначення деяких метрологічних характеристик пристроїв, при їх випробовуванні як перетворювачів теплового потоку, наведені в табл. 2, де: А — середнє значення коефіцієнта перетворення, K_q , Вт/(м²·мВ); В — найбільша робоча температура, °С; С — стала часу (с) за рівнями 0,63 та 0,95; $\tau_{0,63}/\tau_{0,95}$; D — значення коефіцієнта емісії поверхні пристрою ε .

З результатів аналізу отриманих характеристик перетворювачів випливає, що в принципі кожен з них може бути використаний як перетворювач теплового потоку. Водночас кожен з них має як свої переваги, так і свої недоліки. Наприклад,

перевагою модуля TEC1-12706 можна вважати його низьку вартість та високу чутливість (найменше значення коефіцієнта перетворення $K_q = 5,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$). Але тут потрібно враховувати, що цей біметалевий ПТП був виготовлений на замовлення і за потреби, такий ПТП може бути виготовлений потрібної чутливості, форми та розміру, чого не можна зробити з датчиками, які виготовляються серійно.

Таблиця 2. Результати визначення метрологічних характеристик пристроїв

Пристрій Характеристика	PGM-15-250	TEC1-12703	TEC1-12706	ПТП
A	11	7,5	5,5	32
B	230	138	138	200
C	15/44	16/47	20/57	8/27
D	0,71	0,71	0,71	0,88

До недоліків випробуваних модулів слід віднести їх велику товщину, а отже, великий термічний опір, що відображується на інерційності цих пристроїв. При цьому зазначимо, що стала часу сенсора типу біметалевий ПТП може бути зменшена в разі шляхом підключення коригуючої батареї термоелементів (Декуша, Мазуренко, & Федоров, 1981).

Мета роботи: на основі термоелектричних перетворювачів розробити анемометр для вимірювання розподілення швидкостей потоків газових середовищ, який комплектується портативним вторинним вимірювальним приладом, та анемометр, призначений для використання в системах централізованого контролю параметрів газових середовищ, вихідні сигнали якого не потрібно посилювати для його передачі вимірювальним каналом до АСУ ТП.

Матеріали і методи. Непрямі методи вимірювання неелектричних величин — температури і швидкості руху потоку газового середовища, здійснюються електричними методами, з використанням електричних приладів. Непрямі вимірювання густини теплового потоку здійснюються з використанням методу і приладів теплометрії.

Вимірювання фізичних величин — метод двох вимірювань, або метод надлишкових вимірювань.

Викладення основних результатів дослідження. З метою усунення недоліків, притаманних резистивним термоанемометрам, і використання складних електричних схем для вимірювання неелектричних величин замість терморезисторів — параметричних перетворювачів, як чутливий елемент анемометрів використані термоелектричні, генераторні перетворювачі. Названі вище недоліки резистивних термоанемометрів усунені в конструкціях розробленого диференційного термоелектричного анемометра, чутливим елементом якого є диференційна термопара, а також теплометричного анемометра, чутливим елементом якого є батарея термоелектричних перетворювачів густини теплового потоку.

З метою отримання якомога точніших результатів, вимірювання температури і швидкості руху потоку повітря із застосуванням розроблених анемометрів здійснюються методом надлишкових вимірів (Кондратов, 2012).

Диференційний термоелектричний анемометр (ДТЕА) призначений для «мобільного» контролю розподілення швидкостей потоків газових середовищ. Він комплектується портативним вимірювачем швидкості руху і температури потоків середовищ.

Цей пристрій має два циліндричних чутливих елементи діаметром $d = (0,18 \div 2,0)$ мм і довжиною $l = (10 \div 30)$ мм кожний (рис. 9), які утворені шляхом намотування спіралі нагрівача на диференційну гальванічну термопару.

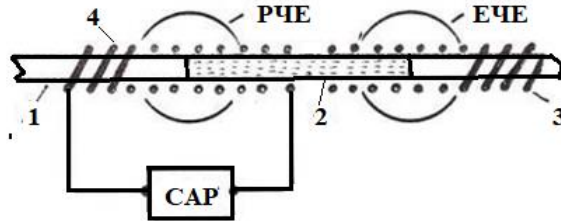


Рис. 9. До будови ДТЕА: 1 — основний термоелектродний дріт; 2 — парний термоелектродний матеріал, нанесений на основний термоелектродний дріт гальванічним способом; 3 та 4 — електричний нагрівач, відповідно РЧЕ та ЕЧ

При вимірах швидкості потоку робочого середовища від системи автоматичного регулювання (САР) на нагрівач одного з чутливих елементів — робочий чутливий елемент (РЧЕ), подається електрична потужність. На нагрівач другого ЧЕ потужність не подається, він служить еталоном (ЕЧЕ).

Оскільки при вимірах швидкості руху середовища РЧЕ та ЕЧЕ приладу повинні знаходитися в однакових гідродинамічних умовах, то для цього їх розташовують на спеціальних каркасах, конструкції яких визначаються завданнями вимірів. Так, при вимірі швидкості в пристінних прошарках потоку доцільно використовувати конструкції, показані на рис. 10, а, б. При вимірі швидкості ядра потоку пропонується використовувати більш міцну конструкцію каркасу, виконаного у вигляді короткого циліндра (рис. 10, в).

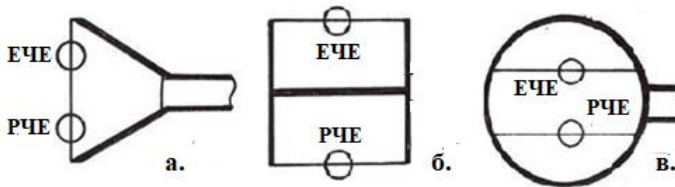


Рис. 10. Розташування чутливих елементів на каркасі приладу

Для системи двох чутливих елементів приладу (двох циліндрів, РЧЕ — 1 та ЕЧЕ — 2) розташованих в однакових гідродинамічних ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ — коефіцієнт теплообміну) і теплорадіаційних ($q_1 = q_2 = q_r$ — густина теплового потоку) умовах, на нагрівач одного з яких подається електрична потужність P , справедливі співвідношення:

$$\begin{cases} \pi \cdot d \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_{г.с.}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d \cdot T_1^4 - q_p \cdot \pi \cdot d \cdot a = P / l \\ \pi \cdot d \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_{г.с.}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d \cdot T_2^4 - q_p \cdot \pi \cdot d \cdot a = 0, \end{cases} \quad (9)$$

де: $T_1, T_2, T_{г.с.}$ — температура, відповідно, РЧЕ, ЕЧЕ, потоку газового середовища; ε та a — випромінювача та поглинальна здатність поверхонь чутливих елементів приладу; σ — постійна Стефана-Больцмана.

Оскільки гальванічні термопари РЧЕ та ЕЧЕ ввімкнуті між собою диференційно, із системи рівнянь (9) отримаємо робочу залежність приладу:

$$P / l = \pi \cdot d \cdot (T_1 - T_2) \cdot [\alpha + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)]. \quad (10)$$

Із результатів аналізу цього рівняння випливає, що величина $[\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)]$ може бути врахована при відомих (вимірних) значеннях T_1 та T_2 . Водночас при малих значеннях діаметра (d) РЧЕ та ЕЧЕ (на практиці до 2,5 мм), коли $\alpha = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)$, значення цього члена в рівнянні (10) стає настільки малим, що впливом радіаційного потоку енергії на покази приладу можна знехтувати.

Згідно з (Кулинченко, 1990) швидкість руху g повітряного середовища та коефіцієнт теплообміну α пов'язані між собою співвідношеннями:

$$Nu = n \cdot (Re)^m \text{ або } \alpha = n \cdot \lambda \cdot (g / \nu)^m / d^{1-m}, \quad (11)$$

де Nu та Re — числа Нусельта та Рейнольдса; n та m — константи; λ та ν — теплопровідність і кінематична в'язкість повітряного середовища.

З урахуванням виразів (11) приведена до довжини чутливого елемента потужність тепловиділення нагрівача РЧЕ може бути розрахована так:

$$P / l = \pi \cdot d \cdot \Delta T = n \cdot \pi \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot g^m (d / \nu)^m. \quad (12)$$

З результатів аналізу виразу (12) випливає, що вимір швидкості руху потоку газу із застосуванням розробленого ДТЕА можна здійснювати за двома способами. За першим способом, вимірювання швидкості руху потоку газу можна здійснювати при постійній різниці між температурами РЧЕ і ЕЧЕ ($T_1 - T_2 = \Delta T = \text{const}$) ДТЕА, підтримання якої забезпечується використанням САР. При цьому швидкість руху потоку газового середовища можна визначити за величиною електричної потужності нагрівача РЧЕ (рис. 11, а).

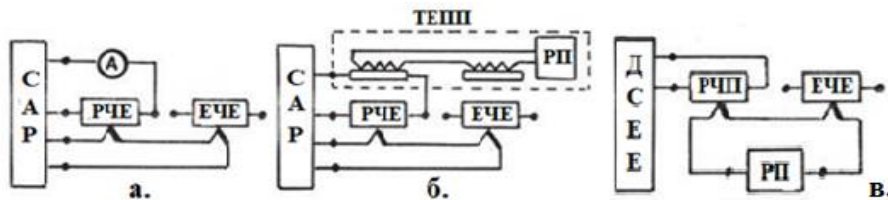


Рис. 11. Електричні схеми ДТЕА

У свою чергу, підведену до нагрівача РЧЕ електричну потужність можна визначати і за допомогою термоелектричного перетворювача потужності ТЕПП (рис. 11, б), який складається з нагрівача, термоелектричного перетворювача густини теплового потоку та регулюючого пристрою (РП).

За другим способом, вимірювання швидкості руху потоку газу пропонується здійснювати при підводі від джерела стабілізованої електричної енергії (ДСЕЕ) до нагрівача РЧЕ ДТЕА постійної електричної потужності. При цьому швидкість руху потоку газового середовища можна оцінити за величиною сигналу диференційної гальванічної термопари пристрою (рис. 11, в).

Результати експериментальних вимірювань швидкості руху газового середовища за першим і другим способами при різних діаметрах чутливих елементів ДТЕА наведені, відповідно, на рис. 12 та 13.

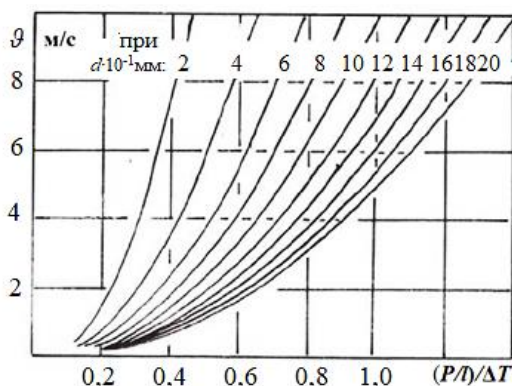


Рис. 12. Залежність виміряної швидкості руху газового середовища від потужності нагрівача РЧЕ ДТЕА при $\Delta T = \text{const}$

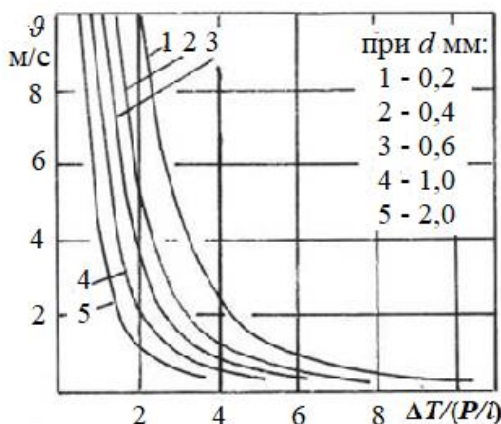


Рис. 13. Залежність виміряної швидкості руху газового середовища від різниці між температурами РЧЕ та ЕЧЕ ДТЕА при $P = \text{const}$ нагрівача РЧЕ

Дані експериментальних досліджень, наведені на рис. 12, свідчать, що розроблений ДТЕА за першим з розглянутих вище способів вимірювання, забезпечує отримання коректних результатів у широкому діапазоні значень швидкості руху газового середовища. Певна річ, зі зменшенням діаметра ДТЕА пристрій буде завдавати менших збурень потоку газового середовища, що рухається. Водночас дані, наведені на рис. 12, вказують, що при нагріванні пристрою, при постійній

різниці між температурами його РЧЕ і ЕЧЕ ($T_1 - T_2 = \Delta T = \text{const}$), зі зменшенням діаметра вимірювального пристрою, збільшується його чутливість.

З результатів аналізу даних, наведених на рис. 13, випливає, що в разі нагрівання РЧЕ пристрою, при постійній потужності нагрівача ($P = \text{const}$), коректні результати можуть бути отримані тільки при вимірюванні малих (до 2 м/с) швидкостей руху газового робочого середовища. При цьому разом зі збільшенням діаметра ДТЕА збільшується чутливість пристрою. Оскільки за цим способом не передбачається використання САР, то виміри малих швидкостей можна проводити і тоді, коли протягом технологічного процесу швидкість руху потоку газу змінюється (коливається) з великою частотою.

Друге актуальне питання, яке вирішується в результаті використання розробленого ДТЕА, — це усунення впливу температури (коливання температури) потоку газового середовища на результати вимірювання швидкості його руху.

Як випливає з даних, наведених на рис. 14 та 15, результати вимірювання швидкості руху газового середовища при $\Delta T = \text{const}$, також як і при $P = \text{const}$, залежать від температури потоку. Це пояснюється впливом залежних від температури λ та ν газових середовищ, які входять у рівняння (12).

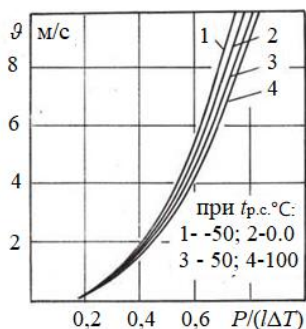


Рис. 14. Залежність вимірюваної швидкості руху потоку газового середовища від температури потоку ($d_{\text{РЧЕ}} = d_{\text{ЕЧЕ}} = 1 \text{ мм}$)

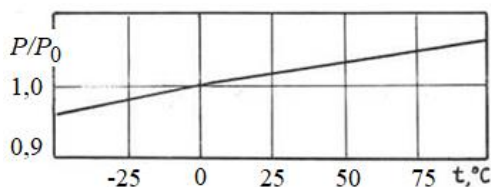


Рис. 15. Залежність приведеної потужності нагрівача РЧЕ приладу від температури газового робочого середовища

Компенсувати вплив температури потоку на результати вимірювання його швидкості руху можна шляхом підтримання під час вимірів постійної різниці потенціалів $\Delta \varphi$, яку генерує диференційна термопара пристрою, що може бути розрахована з рівняння:

$$\Delta \varphi = \rho_1 \cdot \Delta e_{1-2} \cdot \Delta T / (\rho_1 + \rho_2 \cdot s_1 / s_2), \quad (13)$$

де ρ_1 та s_1 , ρ_2 та s_2 — питомий електричний опір і переріз основного (1) та гальванічна нанесеного парного (2) термоелектричних матеріалів (рис. 9); Δe_{1-2} — термо-ЕРС пари термоелектродних матеріалів.

З результатів аналізу рівняння (13) випливає, що при визначенні величини s_2/s_1 (рис. 16) можливо отримати залежність $\Delta\phi$ гальванічної диференційної термопари від температури робочого середовища, яка б компенсувала температурну залежність показів ДТЕА (рис. 15). Так, при використанні термопари копель-мідь градуюють розроблений диференційний термоелектричний анемометр з використанням загальноприйнятої методики і стандартного обладнання.

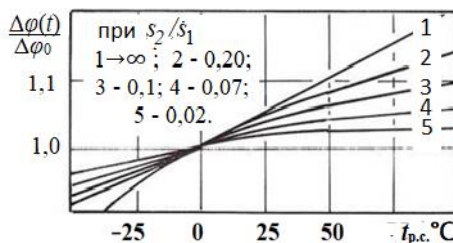


Рис. 16. Залежність приведеної чутливості гальванічної термопари копель-мідь від температури

Теплометричний анемометр призначений для використання в системах централізованого керування швидкістю руху і температурою потоків газових середовищ. Тому параметри пристрою обираються таким чином, щоб його вихідний сигнал не потрібно було б посилювати при передачі вимірювальним каналом в АСУ ТП. В основу роботи теплометричного анемометра покладено закони теплообміну при омивання пластини потоком газового середовища.

У загальному випадку пристрій складається з трьох частин (рис. 17): I — вимірювальний блок; II — блок оперетивної повірки пристрою; III — кінцева частина, які в сукупності мають забезпечити вимірювання швидкості руху потоку газового середовища без збурень потоку.

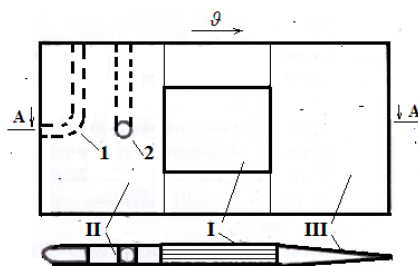


Рис. 17. Зовнішній вигляд теплометричного анемометра

У разі необхідності варто періодично робити калібрування анемометра. У складовій II пристрою можуть бути зроблені отвори — аналоги трубки Прандтля — 1 і трубки Піто — 2 (Яцишин, Попов, & Артемчук, 2014), для вимірювання

з використанням мікроманометра різниці між, відповідно, динамічним P_d і статичним P_c тисками, які створює потік газу, і розрахунку швидкості руху потоку газу за рівнянням:

$$\vartheta = \sqrt{2 \cdot (P_d - P_c) / \rho}, \quad (14)$$

де ρ — щільність газу.

Вимірювальний блок I є основним елементом пристрою. Його ЧЕ має розмір $(0,04 \times 0,04 \times \delta) \text{ м}^3$, де $\delta \leq (1,5 \div 2,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ — товщина одного з 4 елементів блоку. Будова вимірювального блоку та його електрична схема заміщення наведені на рис. 18.

Датчики температури, ТО або ТП (на рис. 18 не показані), монтуються з обох боків вимірювального блоку I в центрі термоелектричних перетворювачів теплового потоку 2 та 5, безпосередньо під тонким низькоемісійним покриттям 1. Теплометричний анемометр поміщають у повітропровід загального призначення або у спеціальний короб.

Теплообмін між потоком газу і вимірювальним блоком відбувається з обох поверхонь пластини анемометра, при цьому електрична потужність P нагрівача блоку вимірювання (скалярна величина) перетворюється у дві векторні величини (густини теплового потоку q_1 та q_2). Електрична схема заміщення (рис. 18, б) пристрою може мати вигляд двох паралельних гілок. Одну з паралельних гілок утворюють три, включені між собою послідовно, термічні опори (додатковий — $R_d = \delta_d / \lambda_d = 1,5 \cdot 10^{-3} / 0,2 = 7,5 \cdot 10^{-3}$, ПТП — $R_{\Pi} = \delta_{\Pi} / \lambda_{\Pi} = 2 \cdot 10^{-3} / 0,2 = 1 \cdot 10^{-3}$, та опір конвективно-радіаційному теплообміну — $R_{кр} = 1/\alpha \text{ [м}^2 \cdot \text{К/Вт)]}$, а другу — два термічних опори (R_{Π} та $R_{кр}$).

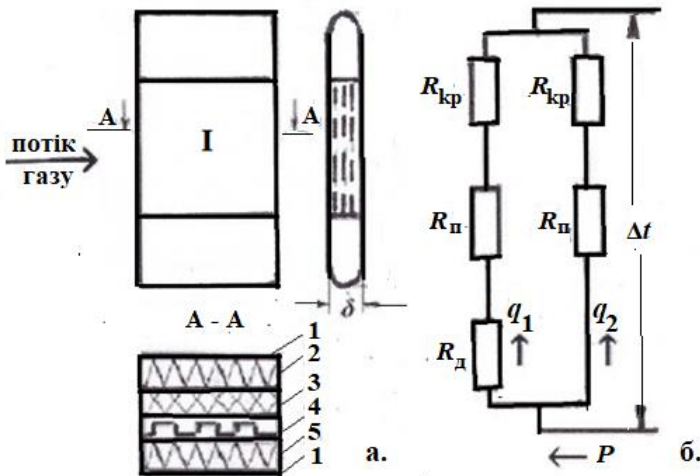


Рис. 18. Вимірювальний блок (а) теплометричного анемометра та електрична схема його заміщення (б): 1 — тонке низькоемісійне покриття (ступінь чорноти $\epsilon < 0,1$); 2, 5 — термоелектричний перетворювач теплового потоку; 3 — додатковий термічний опір; 4 — електричний нагрівач

У результаті розв'язку системи рівнянь, що описують електричну схему заміщення теплометричного анемометра,

$$\begin{cases} (R_d + R_n + R_{kr}) \cdot q_1 = \Delta T \\ (R_n + R_{kr}) \cdot q_2 = \Delta T \end{cases} = \begin{cases} (R_d + R_n + 1/\alpha) \cdot q_1 = \Delta T \\ (R_n + 1/\alpha) \cdot q_2 = \Delta T \end{cases} \quad (15)$$

відносно α при складному конвективно-радіаційному теплообміні одержимо:

$$\alpha = \frac{(q_2 / q_1) - 1}{R_d - [(q_2 / q_1) - 1] \cdot R_n}, \quad (16)$$

де ΔT — різниця між температурами поверхонь пластини приладу і температурою газового середовища $\alpha = \alpha_k + \alpha_r$ — коефіцієнт тепловіддачі, як сума коефіцієнтів тепловіддачі при конвективному $\alpha_k = f(\vartheta)^n$ і радіаційному $\alpha_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^3$ теплообміні (ε та σ — випромінювача поверхонь чутливих елементів приладу та постійна Стефана-Больцмана).

Критеріальне рівняння, яким описують теплообмін при ламінарному перебігу ($Re_{l,r} < 5 \cdot 10^5$) газу, що омиває плоску поверхню, має вигляд (Кулинченко, 1990):

$$Nu = 0,57 \cdot Re^{0,5}, \quad (17)$$

де $Nu = \alpha_k \cdot l / \lambda$ — критерій Нусельта (α_k — коефіцієнт тепловіддачі при конвекційному теплообміні, l — визначальний розмір, λ — коефіцієнт теплопровідності газового середовища; $Re = \vartheta \cdot l / \nu$ — критерій Рейнольдса (ϑ та ν — швидкість руху потоку та кінематична в'язкість газового середовища).

У результаті розрахунку з використанням рівнянь (16) та (17) отримуємо, що при температурі 0°C швидкість руху потоку газового середовища лінійно залежить від результату вимірювання сигналів e_1 та e_2 ПТП анемометра ($q_1 = e_1/K$ та $q_2 = e_2/K$, де $1/K$ — чутливість ПТП, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$ — рис. 19).

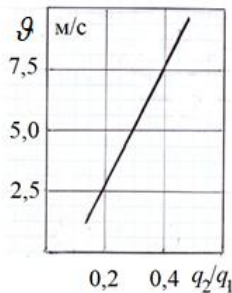


Рис. 19. Результат розрахунку функції $G(q_2/q_1)$

Висновки

1. Розроблений диференційний термоелектричний анемометр, який може працювати з портативним вторинним вимірювальним приладом та призначений для контролю розподілення швидкостей і температури потоків газових середовищ у процесі термічної обробки харчових продуктів.

2. Розроблений теплотричний анемометр, призначений для використання в системах централізованого контролю швидкості руху і температури потоків газових середовищ, вихідний сигнал якого не потрібно посилювати при його передачі вимірювальним каналом в АСУ ТП.

3. Для забезпечення вимірювання всього комплексу параметрів газового середовища в процесах термічної обробки харчових продуктів потрібно проаналізувати існуючі та за потреби розробити нові пропозиції щодо їх вдосконалення або розробки нового типу гігрометра, вихідний сигнал якого не потрібно посилювати при його передачі вимірювальним каналом в АСУ ТП.

Література

Анатичук Л. И. (1979) Термоэлементы и термоэлектрические устройства. (Справочник). Киев: Наукова думка. https://www.studmed.ru/anatychuk-li-termoelementy-i-termoelektricheskie-ustroystva-spravochnik_ea95bb3345d.html.

Анатичук Л. И., Михайловский В. Я., Струтинская Л. Т., Лудчак И. Ю. (2009). Термоэлектрический генератор для питания маломощной электронной аппаратуры газораспределительных станций. *Наука та інновації*, 5 (5), 34—41. <http://scinn.org.ua/sites/default/files/pdf/2009/N5/Anatichuk.pdf>

Грищенко Т. Г. (ред.), Декуша, Л. В., Воробьев Л. Й., Бурова З. А., Ковтун С. И., Декуша О. Л. (2017). Теплометрия: теория, метрология, практика. ISBN 978-966-02-8199-8 Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока. К.: Институт технической теплофизики НАН Украины.

Ковальчук В. В., Лучко Й. Й. (2011). Багатофункціональні тензорезистори (давачі). *Вісник ДНУЗТ*, 39, 72-82.

Кондратов В. Т. (2012). Фундаментальная метрология. Персональный сайт профессора Кондратова В. Т. *Главные научные труды* (2001—2012). <http://kondratov.com.ua/index.php/nauchnye-trudy-111/glavnye-trudy-2001-2012-gg>

Кулинченко В. Р. (1990). Справочник по теплообменным расчетам. К.: Техника. <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/3178?locale=en>.

Луцник Я. Т., Буняк Л. К., Рудавський Ю. К., Стадник Б. І. (2003). Енциклопедія термометрії. Львів: Видавництво Львівської політехніки. <https://vlp.com.ua/node/350>.

Федоров В. Г. (1987). *Основы тепломассометрии*. К.: Вища школа.

Якість і безпека харчових продуктів: Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 20-21 листопада 2019 р. К. : НУХТ. <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/30757/1/Drichiktut.pdf>

Яцишин А. В., Попов О. О., Артемчук В. О. (2014). Методи вимірювання параметрів навколишнього природного середовища. *Вісник НТУ «ХПИ»*, 40 (1083), 130—137. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/05164ae0-4235-495d-9a55-f02362e27d12>.

Burgess, W. A., Ellenbecker, M. J., Treitman, R. D. (2004). Airflow measurement techniques. Ventilation for control of the work Environment. Wiley-Interscience; Hoboken, New Jersey: 440. <https://doi.org/10.1002/0471667056.ch3>.

Coastal Wiki, Souza Dias, (2020). Francisco: Temperature sensors. Available from http://www.coastalwiki.org/wiki/Temperature_sensors.

Electronoff. (2023). Что такое анемометр и что им измеряют? <https://electronoff.ua/academy/post/chto-takoe-anemometr-i-chto-im-izmeryayut.php>

Foss, J. F., Peabody, J. A., Norconk, M. J., Lawrenz, A. R. (2006). Ambient temperature and free stream turbulence effects on the thermal transient anemometer. *Meas. Sci. Technol.*, 17(9), 2519—2526. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/9/020>.

Hotra, O., Kovtun S., Dekusha, O. (2021). Analysis of the Characteristics of Bimetallic and Semiconductor Heat Flux Sensors for In-Situ Measurements of Envelope Element Thermal Resistance. Measurement, 109713. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109713> SCOPUS.

Ikeya Y., Örlü R., Fukagata K., Alfredsson P.H. (2017). Towards a theoretical model of heat transfer for hot-wire anemometry close to solid walls. *Intern. J. Heat and Fluid Flow*, 68, 248—256. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.09.002>.

Manshadi, M. D., Esfeh, M. K. (2012). A new approach about heat transfer of hot-wire anemometer. *Appl. Mech. and Materials*, 232, 747—751. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.232.747>.

Örlü, R., Vinuesa, R. (2017). Thermal anemometry. In book: Discetti S., Ianiro A. (eds.) *Experimental Aerodynamics*. USA, Florida: CRC Press, 257–304. <https://doi.org/10.1201/9781315371733-12>.

O’Sullivan, J., Ferrua, M., Love R., Verboven, P., Nicolai, B., East, A. (2014). Airflow measurement techniques for the improvement of forced-air cooling, refrigeration and drying operations. *J. Food Eng*, 143, 90—101. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.041>.

Ower, E., Pankhurst, R. C. (2014). *The Measurement of Air Flow*. United Kingdom, Oxford: Pergamon.

Saremi, S., Alyari, A., Feili, D., Seidel, H. (2014). A MEMS-based hot-film thermal anemometer with wide dynamic measurement range. *Proc. IEEE Conf. on Sensors (SENSORS’2014)*. Valencia, Spain. 2–5, 420–423. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985024>.

ANALYSIS OF ELECTRIC FIELD AROUND THERMAL COMPENSATORS

V. Romaniuk

National University of Food Technologies

Key words:

*Thermal compensator
Power line
Electric field
Finite element method
Ansys*

Article history:

Received 10.11.2023
Received in revised form
27.11.2023
Accepted 08.12.2023

Corresponding author:

V. Romaniuk

E-mail:

v.t.romaniuk@gmail.com

Citation: В. Т. Романюк
(2023). Дослідження електричного поля навколо термокомпенсаторів.
Наукові праці НУХТ,
29(6), 72—81.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2023-29-6-7

ABSTRACT

An important aspect of an overhead power line's operation is the characteristics of the electric field. Any equipment or elements that are connected to power line wires can affect the electric field with negative consequences for the power line and the power system, in particular through additional zones of corona discharge formation.

Thermal elongation compensators based on shape memory alloys for overhead power line wires (thermal compensators) have the potential to be widely used in power systems. These devices automatically reduce the sag of the power line wire when its temperature increases. This makes it possible to increase the current carrying capacity of existing power lines or, when constructing new power lines, reduce the height of power line towers or increase the distance between them without violating any restrictions. In this way, it is possible to improve the economic performance of power lines. It is also possible to increase the reliability of power supply systems by limiting the excessive sagging of power line wires at high temperatures. Thermal compensators were developed in several countries. The study of the electric field was carried out for only one thermal compensator closest to commercial success.

The electric field around the Ukrainian thermal compensator's design from the SU754541 patent and its variants are analyzed in the article. As a result of the analysis using the finite element method with Ansys Electronics Desktop Student 2022 R2 software (Maxwell2D Electrostatic analysis), it was determined that the factor that affects mostly the corona discharge formation on the elements of the thermal compensators is the diameter of the temperature sensitive elements with a circular cross-section. When their diameter decreases, the value of the maximum electric field intensity increases. The thermal compensators with the most successful designs in relation to the corona discharge among those investigated were the thermal compensator of an alternative design with the temperature sensitive elements of a rectangular cross-section and the thermal compensator of the simplest design with the temperature sensitive element of the same diameter as the diameter of the power line wire.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НАВКОЛО ТЕРМОКОМПЕНСАТОРІВ

В. Т. Романюк

Національний університет харчових технологій

Важливим аспектом роботи повітряних ліній електропередавання (ЛЕП) є характеристики електричного поля. Будь-яке обладнання чи елементи, які підключаються до проводів ЛЕП, можуть впливати на електричне поле з негативними наслідками для ЛЕП та енергосистеми, зокрема через додаткові зони утворення коронного розряду.

Одним із пристроїв, які мають потенціал для поширення в енергосистемах, є компенсатор температурного видовження проводів ЛЕП на основі сплавів з ефектом пам'яті форми — термокомпенсатор (ТК). Використання таких пристроїв автоматично зменшує стрілу провисання проводу ЛЕП при збільшенні його температури. Це дає змогу збільшувати навантаження наявних ЛЕП або при спорудженні нових ЛЕП, не порушуючи обмежень зменшувати висоту опор або збільшувати відстань між ними, що покращує економічні показники ЛЕП. Також через обмеження стріли провисання проводів ЛЕП при підвищених температурах можна досягти підвищення надійності систем електропостачання. Розробкою ТК займалися у декількох країнах світу. Дослідження електричного поля проводилось лише для однієї конструкції, найбільш близької до комерційного успіху.

У статті досліджується електричне поле навколо ТК простішої української конструкції з патенту SU754541 і його варіантів. У результаті аналізу з використанням методу скінченних елементів за допомогою програми *Ansys Electronics Desktop Student 2022 R2* (тип аналізу *Maxwell2D Electrostatic*) було визначено, що фактором, який найбільше впливає на утворення коронного розряду на елементах ТК є діаметр термочутливих елементів круглого перерізу. При зменшенні їх діаметра збільшувалось значення максимальної напруженості електричного поля. ТК з найбільш вдалим дизайном стосовно корони серед досліджених виявились ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами прямокутного перерізу, а також ТК найпростішої конструкції з термочутливим елементом такого ж діаметра, як діаметр проводу.

Ключові слова: термокомпенсатор, лінія електропередавання, електричне поле, метод скінченних елементів, *Ansys*.

Постановка проблеми. Коронний розряд на повітряних лініях електропередавання (ЛЕП) може виникати в різних точках, наприклад, безпосередньо на проводах, у місцях кріплення проводів до ізоляторів тощо. Одним із пристроїв, що встановлюються на проводи повітряних ЛЕП, є компенсатор температурного видовження проводів на основі сплаву з ефектом пам'яті форми (ЕПФ) — термокомпенсатор (ТК). Такі пристрої здатні автоматично зменшувати стрілу провисання проводу ЛЕП шляхом його підтягування при нагріванні до певної температури.

Їх використання дає змогу збільшувати навантаження наявних ЛЕП або при спорудженні нових ЛЕП, не порушуючи обмежень зменшувати висоту опор або збільшувати відстань між ними, що покращує економічні показники ЛЕП. Експерти стверджують, що надмірне провисання проводів повітряних ЛЕП є однією з головних причин виникнення аварійних відключень (Zengin, Erdemir, Akinci, & Seker, 2020; Zuo та ін., 2022; Wald, 2004; ZMS, 2022). Варто зазначити, що наймасштабніші блекаути були викликані саме цією причиною. Наприклад, у 1996 р. найбільший блекаут у західній частині США був спричинений перегрітою ЛЕП, проводи якої увійшли в контакт з деревом (iEngineering, 2022). Також літом 2003 р. проводи декількох ліній поблизу Клівленда замкнулись на дерева, що призвело до масштабного блекауту в північно-східній частині США. За оцінками, тоді це вплинуло на роботу 50 млн споживачів в США та Канаді (Barnett, 2013).

Отже, крім покращення економічних показників ЛЕП, боротьба з надмірним провисанням проводів ЛЕП з використанням ТК може підвищити надійність систем електропостачання.

ТК української конструкції з патенту SU754541 «Повітряна лінія електропередачі» і його варіанти виготовляються з провідних матеріалів та мають електричний контакт з проводом, вони також можуть мати значні розміри (довжина від 1 до 8 метрів). Такі ТК можуть встановлюватися на ЛЕП різних класів напруг (Шестеренко, 2004).

Специфічна геометрія цих пристроїв має потенційні точки виникнення коронного розряду, тому є сенс проаналізувати електричне поле навколо ТК, встановлених на проводах ЛЕП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ТК розроблялись у декількох країнах. Перші згадки про пристрої на основі сплавів з ЕПФ для компенсації температурного видовження проводів повітряних ЛЕП з'явилися в 1970—1980-х роках (Романенко, & Шестеренко, 1982; Вакуленко, Мазуренко, Романенко, Фаткуллина, & Алешина, 1985), також патент SU700888 «Поовітряна лінія електропередачі».

Активна робота над ТК проводилась в 1980—1990-х роках в Україні, Японії (патент JPS592521A «Aerial transmission line extending absorber») та Канаді (Schetky, 1994; Schetky, 1994). Незважаючи на це, ТК української конструкції і його варіанти не мають у літературі згадок про дослідження електричних полів.

Серед закордонних конструкцій найбільш успішною є конструкція з патенту США — US6864421B1 «Sag compensating device for suspended lines». Ця конструкція, ймовірно, є єдиною, для якої проводилось дослідження електричного поля. В технічному звіті (Shirmohamadi, 2002) описується дослідження електричного поля навколо вказаного ТК з використанням програмного засобу для аналізу методом скінченних елементів. Аналізується лише одна конструкція на відповідність вимогам щодо корони. У нашому ж випадку проводитиметься аналіз для різних умов декількох конструкцій ТК з їх порівнянням.

Метою статті є визначення параметрів ТК, які найбільше сприяють виникненню коронного розряду, а також визначення найбільш вдалої конструкції з точки зору коронного розряду.

Матеріали і методи. Метод скінченних елементів з використанням програми Ansys Electronics Desktop Student 2022 R2.

Викладення основних результатів дослідження. Перша модель для аналізу показана на рис. 1, 2.

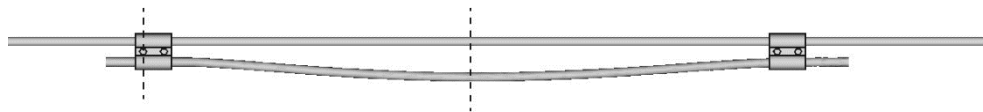


Рис. 1. ТК, встановлений на проводі ЛЕП

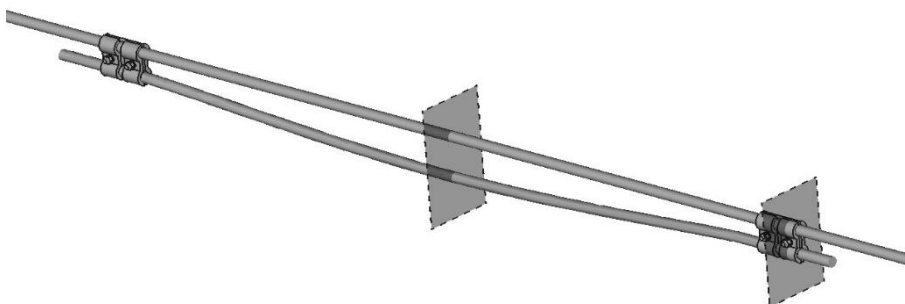


Рис. 2. ТК, встановлений на проводі ЛЕП, аксонометрична проекція

Штриховими лініями на рисунках позначені два обрані для аналізу перерізи, а саме: центральна частина моделі та частина з найбільшою кількістю кутів — вузол кріплення ТК до проводу лінії. Детальніше вузол кріплення зображений на рис. 3.

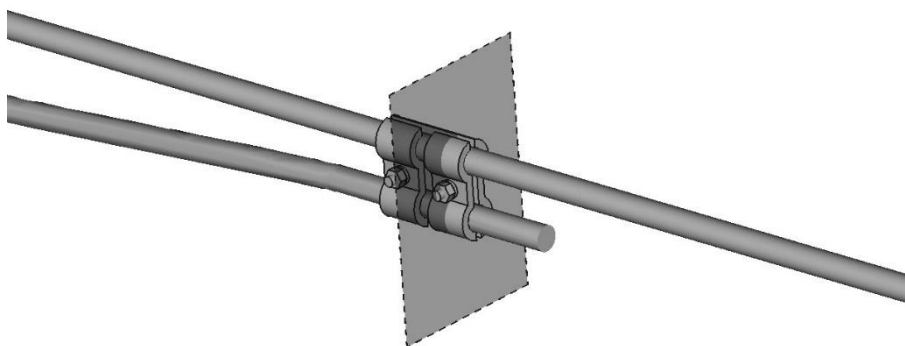


Рис. 3. Вузол кріплення ТК до проводу лінії

Пристрій може бути прикріплений до проводу різними способами. Для аналізу обраний сталевий затискач з болтами. Затискачі з подібним дизайном поширені та легкодоступні. Товщина стінок затискача обрана 5 мм, відстань між центрами осі проводу й термочутливим елементом — 34 мм, болти М6×25 з відповідною гайкою та шайбою.

Вище показаний ТК у найпростішому виконанні. З різних міркувань (доступність елементів зі сплавів з ЕПФ з необхідними розмірами та формою або складність їх виготовлення та обробки; необхідне зусилля, створюване термочутливим елементом або елементами тощо) цей пристрій може мати дещо інший вигляд, як описано в статті (Ukrayinets, Shesterenko, & Romaniuk, 2019). У цьому випадку ТК може мати не один, а два термочутливі елементи круглого або прямокутного перерізу. Оскільки таке виконання має іншу геометрію, її також варто розглянути. Модель показана на рис. 4.

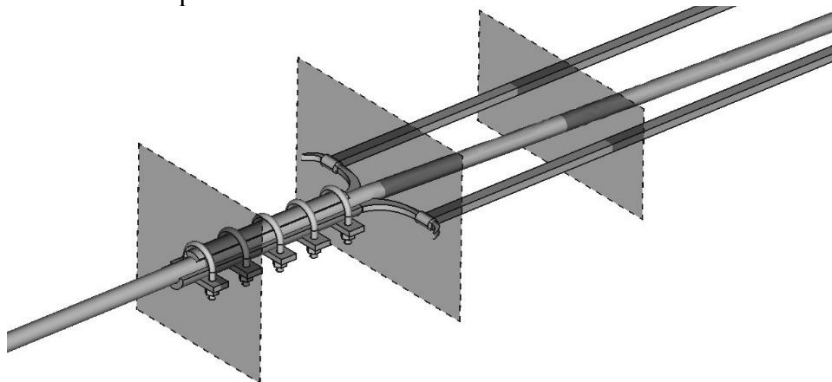


Рис. 4. ТК альтернативної конструкції, встановлений на проводі ЛЕП, аксонометрична проєкція

Аналогічно штриховими лініями на рис. 4 позначені обрані для аналізу перерізи, а саме: два на вузлі кріплення ТК до проводу лінії та один в центральній частині пристрою (для економії місця цей перший з правої сторони рисунка переріз зображений ближче до вузла кріплення).

Для аналізу використовувалась програма Ansys Electronics Desktop Student 2022 R2, тип аналізу Maxwell2D Electrostatic. Досліджувались такі випадки:

1. Провід повітряної ЛЕП без ТК.
2. Провід з ТК найпростішої конструкції такого ж діаметра.
3. Провід з ТК найпростішої конструкції вдвічі меншого діаметра.
4. Вузол кріплення ТК найпростішої конструкції до проводу ЛЕП.
5. Провід з ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами круглого перерізу. При цьому термочутливі елементи мають діаметр, вдвічі менший за діаметр проводу.
6. Провід з ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами круглого перерізу. При цьому термочутливі елементи мають діаметр, вчетверо менший за діаметр проводу.
7. Провід з ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами прямокутного перерізу. При цьому площа перерізу термочутливих елементів відповідає їх перерізу із пункту 5.
8. Провід з ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами прямокутного перерізу. При цьому площа перерізу термочутливих елементів відповідає їх перерізу із пункту 6.

9. Вузол кріплення ТК альтернативної конструкції до проводу ЛЕП (перший варіант).

10. Вузол кріплення ТК альтернативної конструкції до проводу ЛЕП (другий варіант).

Для аналізу обрані ТК до спрацювання, оскільки в такому стані вони знаходяться більшість часу. Напруга ЛЕП — 110 кВ, тому що це мінімальний клас напруги, при якому, як правило, коронний розряд починає бути проблематичним. Відстань між проводом і термочутливим елементом (елементами) — 5 см. Переріз проводу 120 мм² за алюмінієм, провід АС120/19 з діаметром 15,2 мм. Цей переріз обраний як один із рекомендованих Правилами улаштування електроустановок для ЛЕП цього класу напруги. Моделі мають вигляд перерізів, які знаходяться в повітрі окресленому прямокутником, на краї якого накладене обмеження («Boundary») типу «Baloon» за напругою. Елементи моделі знаходились під напругою 110 кВ («Excitations»). Параметри «Solution Setup» та сітка («Mesh») були залишені за замовчуванням.

Результати моделювання показані на рис. 5—14.

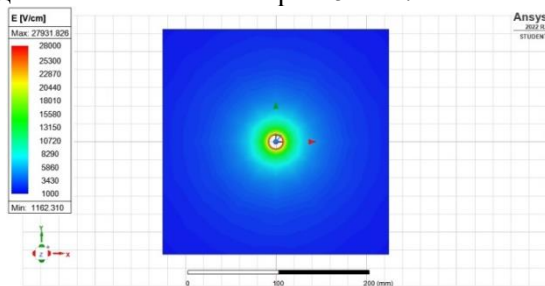


Рис. 5. Результат моделювання 1

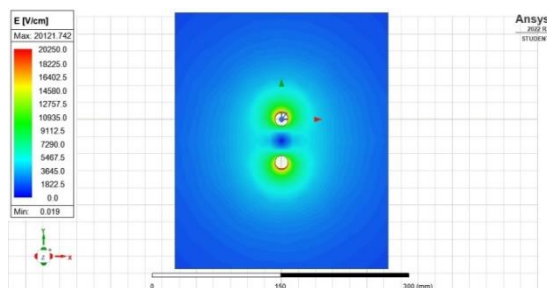


Рис. 6. Результат моделювання 2

При використанні ТК найпростішої конструкції з термочутливим елементом такого ж діаметра, як діаметр проводу, максимальна напруженість електричного поля порівняно з контрольним випадком зменшилась майже на 28%. Однак при використанні термочутливого елемента меншого діаметра максимальна напруженість електричного поля збільшилась майже на 12%. При цьому зона максимальної напруженості електричного поля зосереджена на нижній частині ТК.

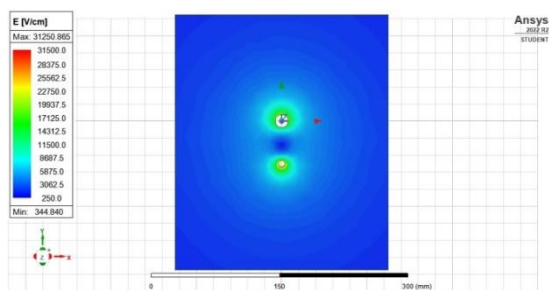


Рис. 7. Результат моделювання 3

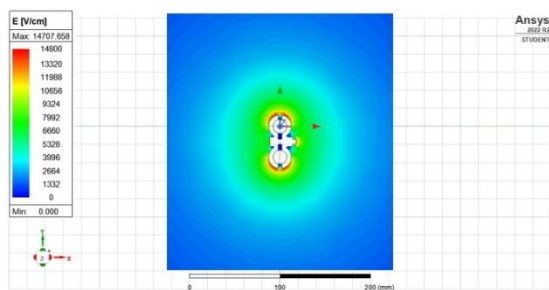


Рис. 8. Результат моделювання 4

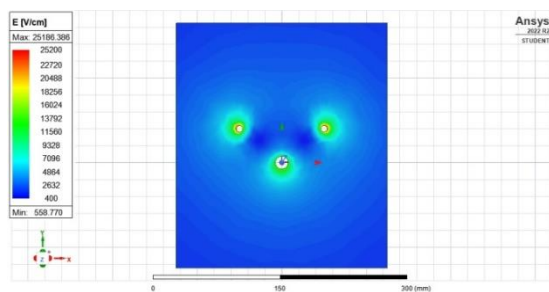


Рис. 9. Результат моделювання 5

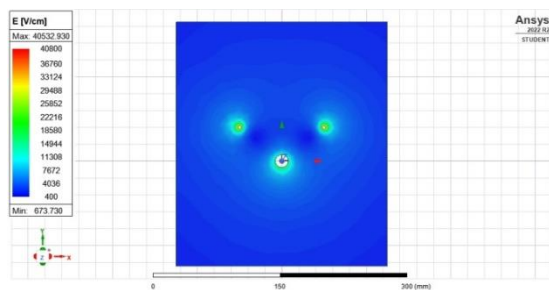


Рис. 10. Результат моделювання 6

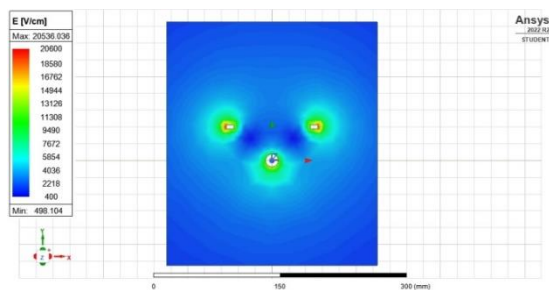


Рис. 11. Результат моделювання 7

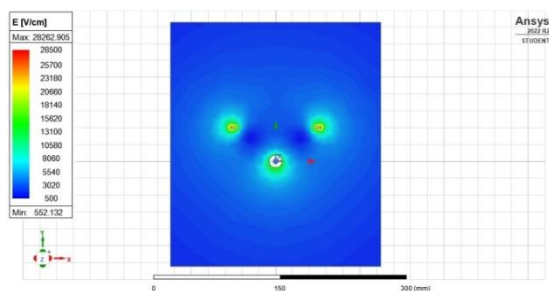


Рис. 12. Результат моделювання 8

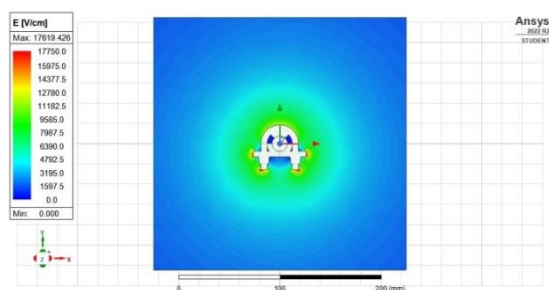


Рис. 13. Результат моделювання 9

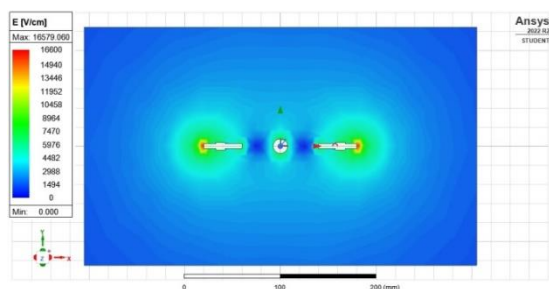


Рис. 14. Результат моделювання 10

Ця зона є найбільш потенційною зоною виникнення коронного розряду. При використанні ТК альтернативної конструкції, в якому термочутливі елементи ма-

ють круглий переріз з діаметром вдвічі меншим за діаметр проводу, спостерігається певне зменшення максимальної напруженості електричного поля порівняно з контрольним випадком — майже на 10%. Однак при зменшенні діаметра термочутливих елементів удвічі максимальна напруженість електричного поля, навпаки, збільшилась приблизно на 45%. Це найгірший випадок серед розглянутих. Зони максимальної напруженості електричного поля в цьому випадку зосереджені на частинах термочутливих елементів, які розташовані в напрямку від проводу (подібно до ситуації використання ТК найпростішої конструкції з термочутливим елементом меншого діаметра за діаметр проводу). У випадку застосування ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами прямокутного перерізу, в обох випадках (більшого та меншого перерізу термочутливих елементів) спостерігається зменшення максимальної напруженості електричного поля порівняно з контрольним випадком на приблизно 26% та 27% відповідно. При розгляданні перерізів вузлів кріплення спостерігається значне зменшення максимальної напруженості електричного поля порівняно з контрольним випадком, зокрема для вузла кріплення ТК найпростішої конструкції максимальна напруженість електричного поля зменшилась приблизно на 47%, а для двох перерізів вузла кріплення ТК альтернативної конструкції — майже на 40% та 41%. Це можна пояснити тим, що хоч ці перерізи мають багато гострих кутів та виступів і, відповідно, потенційних точок виникнення коронного розряду, площа поверхні, на якій зосереджується електричне поле набагато більша, ніж у контрольному випадку. Також такому ефекту може сприяти той факт, що ці перерізи є симетричними.

Висновки

Фактором, який найбільше впливає на утворення коронного розряду на елементах ТК за результатами дослідження виявився діаметр термочутливих елементів круглого перерізу. При зменшенні їх діаметра збільшувалось значення максимальної напруженості електричного поля. ТК з найбільш вдалим дизайном стосовно корони серед досліджених виявились ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами прямокутного перерізу, а також ТК найпростішої конструкції з термочутливим елементом такого ж діаметра, як діаметр проводу.

Подальші дослідження можуть бути присвячені оптимізації дизайнів ТК відносно корони, оскільки це дослідження показало, що навіть незначна зміна геометрії елементів ТК може мати значний вплив на електричне поле. А характеристики цього поля є важливим фактором при використанні ТК на практиці щодо можливого збільшення втрат на корону на проводах лінії з ТК або, наприклад, щодо безпеки (потенційне збільшення можливості виникнення пробоя між проводами ЛЕП в зоні ТК або між проводом та опорою чи іншою конструкцією).

Література

Вакулєнко, С. Е., Мазурєнко, А. Г., Романєнко, М. Т., Фаткулліна, Л. П., & Алєшина, Т. В. (1985). *Перспективи применения материалов с эффектом памяти формы в энергетике*. Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции: Сверхупругость, эффект памяти формы и их применение в новой форме. Взято з <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/14464>.

Романенко, М. Т., Шестеренко, В. Е. (1982). *Компенсаторы температурных удлинений проводов и тросов из материала с эффектом памяти формы*. Тезисы докладов Всесоюзной конференции: Сверхупругость, эффект памяти и их применение в новой технике, 114—115.

Шестеренко, В. Є. (2004). *Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств*. Вінниця: Нова Книга.

Barnett, D. C. (2013, August 13). Walking Back The Largest U.S. Power Blackout, 10 Years Later. *NPR*. Взято з <https://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=211735357>.

iEngineering Group. (2022, May 13). *Sagging in overhead conductor lines*. Взято з <https://www.linkedin.com/pulse/sagging-overhead-conductor-lines-iengineeringgroup>.

Shirmohamadi, M. (2002). *Sagging line mitigator final report* (No. P500-02-074F). California Energy Commision. Взято з http://400.sydneyplus.com/CaliforniaEnergy_SydneyEnterprise/Portal/public.aspx?component=AAAAIY&record=9ae52200-520e-4fc4-81e5-c873b590ca9e.

Schetky, L. McD. (1994). The current status of industrial applications for shape memory alloys. In R. Yamamoto, E. Furubayashi, Y. Doi, R. Fang, B. Liu, K. Otsuka, C. T. Liu, K. Shimizu, Y. Suzuki, J. Van Humbeeck, Y. Fukai, S. Ono, & S. Suda (Eds.), *Proceedings of the Symposium K: Environment Conscious Materials of the 3rd IUMRS International Conference on Advanced Materials* (pp. 1131—1141). Sunshine City, Ikebukuro, Tokyo, Japan. doi: 10.1016/B978-1-4832-8381-4.50265-1.

Schetky, L. McD. (Ed.). (1994). *Shape Memory Alloys for Power Systems: Proceedings*. EPRI, Palo Alto, California.

Ukrayinets, A., Shesterenko, V., & Romaniuk, V. (2019). Performance analysis of means of mitigating overhead power lines wires sag designed in Ukraine and USA. *Ukrainian Journal of Food Science*, 7(1), 130—140. doi: 10.24263/2310-1008-2019-7-1-14.

Wald, M. L. (2004, March 4). WHAT'S NEXT; To Avert Blackouts, a Sag-Free Cable. *The New York Times*. Взято з <https://www.nytimes.com/2004/03/04/technology/what-s-next-to-avert-blackouts-a-sag-free-cable.html>.

Zengin, A. T., Erdemir, G., Akinci, T. C., & Seker, S. (2020). Measurement of power line sagging using sensor data of a power line inspection robot. *IEEE Access*, 8, 99198—99204. doi: 10.1109/access.2020.2998154.

ZMS CABLE IMPORT AND EXPORT Co., LTD. (2022, April 25). *7 Common Faults In 10KV Overhead Cable Transmission Lines, As Well As The Causes Of Faults And Preventive Measures*. Взято з <https://kvccable.com/7-common-faults-in-10kv-overhead-cable-transmission-lines/>.

Zuo, J., Fan, J., Ouyang, Y., Liu, H., Liu, Y., & Hao, C. (2022). Transmission Line SAG measurement and simulation research based on Non-Contact Electric Field Sensing. *Sensors*, 22(21), 8379. doi: 10.3390/s22218379.

AUTOMATION OF DIFFRACTION MEASUREMENTS OF SMALL DISPLACEMENTS BY THE MEANS OF SENSOR APERTURE MODULATION

N. Medvid

National University for Food Technologies

O. Gnatovskyi, I. Levchii, A. Sidorenko

Institute of Physics, NAS Ukraine

Key words:

*Synthesized angular spectrum
Aperture modulation
Secondary diffraction maxima
Increased sensitivity*

Article history:

Received 09.11.2023
Received in revised form 24.11.2023
Accepted 07.11.2023

Corresponding author:

N. Medvid

E-mail:

medvidnv17@gmail.com

Citation: Н. В. Медвідь, О. В. Гнатовський, І. Д. Левчій, А. В. Сидоренко (2023). Автоматизація дифракційних вимірювань малих переміщень при модуляції апертури сенсора. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 82—92.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-8

ABSTRACT

Wide implementation of various measurement processes is impossible without the use of automation processes of such measurements. In this work on the example of small movements using diffraction sensors, a new concept of automation of measurements was considered. In it, the main attention is paid to the purposeful creation of diffraction distributions of the field, from the very beginning oriented to the use of mass automated systems, regardless of the specification of the optical scheme of the sensor.

Cases were considered and studied when the angular spectrum of the diffraction grating — sensor, obtained under conditions of illumination by a conventional interference field, is replaced by illumination by a synthesized periodic field with a more complex amplitude. It is formed with the help of additional amplitude and phase spatial modulators with distinct periods and stroke structures. This leads to the enrichment of the angular spectrum of the sensor.

Possible combinations of additional modulators and their influence both on the general configuration of the formed angular spectrum and on the distribution and dynamics of changes in the intensity of the newly formed diffraction maxima during transverse movements of the sensor array within its period are described in the paper.

The conditions were investigated, when the changes in the integral intensity of the maxima within different sections of the spectrum are well correlated with the changes in the individual usual diffraction maxima of the sensor during its transverse movements.

At the same time, the expansion of the range for measurements makes it possible to apply a new algorithm for processing the received data, as well as to choose areas of the formed spectrum that are convenient for measurements. This allows increasing the sensitivity of measurements several times

АВТОМАТИЗАЦІЯ ДИФРАКЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ МАЛИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ПРИ МОДУЛЯЦІЇ АПЕРТУРИ СЕНСОРА

Н. В. Медвідь

Національний університет харчових технологій

О. В. Гнатовський, І. Д. Левчій, А. В. Сидоренко

Інститут фізики НАНУ

Широке впровадження різноманітних процесів вимірювань неможливе без застосування процесів автоматизації таких вимірювань. У статті на прикладі надмалих переміщень з використанням дифракційних сенсорів розглянуто нову концепцію автоматизації вимірювань. Головна увага приділяється цілеспрямованому створенню дифракційних розподілів поля, із самого початку орієнтованих на використання масових автоматизованих систем безвідносно від конкретизації оптичної схеми сенсора.

Розглядалися і вивчалися випадки, коли кутовий спектр дифракційної решітки — сенсора, отриманого в умовах освітлення звичайним інтерференційним полем, замінюється на освітлення синтезованим періодичним полем із більш складною комплексною амплітудою. Вона утворюється за допомогою додаткових амплітудних і фазових просторових модуляторів з відмінним періодами і структурами штриха. Це призводить до збагачення кутового спектра сенсора.

Вивчалися можливі комбінації додаткових модуляторів і їх вплив як на загальну конфігурацію утвореного кутового спектра, так і на розподіл та динаміку змін інтенсивності новоутворених дифракційних максимумів при поперечних переміщеннях сенсорної решітки в межах її періоду.

Досліджено умови, за яких зміни інтегральної інтенсивності максимумів у межах різних ділянок спектра добре корелюють зі змінами окремих звичних дифракційних максимумів сенсора при його поперечних переміщеннях. Водночас розширення діапазону для вимірювань надає можливість застосувати новий алгоритм обробки одержаних даних, а також вибирати зручні для вимірювань ділянки утвореного спектра. Це дає змогу підвищити чутливість вимірювань у декілька разів.

Ключові слова: синтезований кутовий спектр, аподизація апертури, вторинні дифракційні максимуми, підвищення чутливості.

Постановка проблеми. Широке впровадження різноманітних процесів вимірювань неможливе без застосування процесів автоматизації таких вимірювань.

У пропонованій статті на прикладі використання дифракційних сенсорів для вимірювання надмалих переміщень ми пропонуємо і досліджуємо нову методику для вимірювань малих поперечних переміщень. У ній головна увага звертається на цілеспрямоване утворення складних розподілів дифракційного поля на апертурі сенсора переміщень, сприйнятливих для автоматизованої обробки одержаних даних.

При цьому відбувається певне усереднення спектральної густини дифракційного розподілу і, відповідно, урізноманітнення розподілів точок знімання інформації. Це дасть змогу задіяти нові варіанти знімання й обробки даних, на відміну від дещо прямолінійного способу вимірювання окремих дифракційних розподілів енергії сенсора, характерної для відомих схем. Ми досліджуємо можливий шлях до цього, який полягає в ускладненні комплексної амплітуди поля, що освітлює апертуру сенсора шляхом її штучної амплітудної та фазової модуляції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка ефективних дифракційних модуляторів лазерного випромінювання залишається актуальним і складним технічним завданням, попри всі досягнення дифракційної оптики (Wei, Chenglong, & Maogin, 2013; Gao, Wang, & Zhuang, 2011; Maogin, Wei, & Kai 2017). До цієї проблеми дотична також кореляційна і голографічна методика (Ruane, 2016; Rosen, Bulbu, & Rai, 2019), яка приділяє увагу відносній простоті та доступності відповідних вимірювачів (Bugaychuk, Gnatovskyy, & Phyadko, 2016; Gnatovskyy, Bugauchuk, & Sidorenko, 2013).

Загалом, дифракція оптичних пучків на амплітудо-фазових дифракційних оптичних елементах (в т. ч. голографічних) вже багато часу вивчається в оптиці (Collier, 2013). Отримані результати знайшли впровадження в різноманітних галузях промисловості та науки. Наприклад, застосування ефекту Тальбота (Kim, 2011), інтерферометра Bonse-Hart (Han, Gonella, & Patel, 2013), муарового інтерферометра (Sarenas та ін., 2018) стали передосновю при створенні новітніх нейтронних інтерферометрів у дослідженнях структури і властивостей зразків, для проведення високоточних вимірювань прискорення вільного падіння тощо.

Однак у вищезгаданих та інших дослідженнях (Vijayakumar, & Bhattachar, 2015; Bouzid, Haddadi, & Forbes, 2017) функція дифракційної решітки обмежується роллю транспаранта з періодичним комплексним розподілом амплітуди на апертурі при освітлені її плоскою хвилею.

Мета статті: дослідити оптичну систему з декількох послідовно розміщених дифракційних решіток, в якій одна з них застосовується як сенсор при вимірюванні надмалих поперечних переміщень.

Матеріали і методи. Використовувались теоретичні й експериментальні методи Фур'є-оптики. Проводились математичне та комп'ютерне моделювання дифракційних полів.

Результати дослідження. Методи і схеми. Був досліджений алгоритм ускладнення розподілу комплексної амплітуди входної апертури сенсора за рахунок її попередньої амплітудної та фазової модуляції додатковими решітками.

Така модуляція змінює динамічні характеристики для дифракційних резонансів, які виникають в утворюваній системі при переміщенні сенсорної решітки. Кількісна оцінка зміни дифракційних резонансів системи дає змогу виявити їх вплив на чутливість сенсора до переміщень в умовах спрощення й автоматизації вимірювань.

В основу досліджень покладений принцип ускладнення пропускання апертури сенсора. У найпростішому випадку це може бути ситуація, коли сенсор освітлюється полем іншої решітки або ж інтерференційним полем двох плоских хвиль. В

обох випадках (при взаємному поперечному зсуві двох решіток чи при зсуві інтерференційного поля відносно сенсора) відбувається зміна розподілу поля на апертурі сенсора переміщень.

Згідно з теоремою про зміщення (Goodman, 1996), в кутовому спектрі сенсора проявляться додаткові зміни, які залежать від характеристик новоутвореного поля на апертурі сенсора. Це призводить до відмінностей спектрів сенсорної решітки за відсутності модуляції її апертури та за наявності такої модуляції. Ця відмінність буде залежати від змін поля на апертурі, зокрема при переміщенні сенсора, тобто може використовуватися для вимірювань переміщень.

Теоретичні передумови. Зазвичай, дифракційна решітка застосовується у випадках її освітлення плоскою світловою хвилею, що має рівномірний розподіл C комплексної амплітуди по апертурі решітки. Тому утворений нею набір дифракційних максимумів в Фур'є-площині (кутовий спектр) описується як згортка Фур'є-образу плоскої хвилі δ з Фур'є-образом a комплексної амплітуди A пропускання самої решітки.

$$\{\hat{F}(CA)\} = \delta \otimes a = a \quad (1)$$

Цілеспрямоване ускладнення пропускання апертури решітки за допомогою додаткового просторового модулятора M (додаткових решіток) змінює цей алгоритм. У виразі згортки замість δ -функції виникає спектр модулятора m :

$$\{\hat{F}(MA)\} = m \otimes a \quad (2)$$

Формально це можна трактувати як заміну штриха початкової решітки на керований профіль штриха в новій решітці.

Моделювались різноманітні умови, що забезпечували просторову модуляцію M діючої апертури сенсорної дифракційної решітки.

Використані розрахунки базуються на відомих співвідношеннях хвильової оптики та скалярної теорії дифракції. Розглядались розподіли поля, утворювані фазовими решітками синусоїдального та прямокутного профілю:

$$\begin{aligned} M_{\sin i} &= \exp[i(m/2) \cdot (\sin(2\pi N_i x/A))]; \\ P_{\text{rect } j} &= \exp[i(\pi/2) \text{sgn}(\sin(2\pi N_j x/A))], \end{aligned}$$

де N визначає кількість періодів решітки на апертурі A в стартовій площині P_1 .

Зв'язок між розподілами полів (Goodman, 1996; Конончук, Прокопєць, & Стукаленко, 2010) в площинах P_1 та P_2 для двох послідовно розміщених на відстані z решіток $U(\xi, \eta, 0)$ та $U(x, y, z)$ визначався як

$$U(x, y, z) = \frac{kz}{2\pi i} \iint_{-\infty}^{+\infty} U(\xi, \eta, 0) \frac{\exp[ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}]}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}} d\xi d\eta. \quad (4)$$

Згідно з (4) рахувалося поле в площині P_2 , яка розміщувалась попереду чи позаду відносно початкової площини базової решітки P_1 з розподілами поля (3). Таку операцію можна повторювати декілька разів для послідовно розміщених площин, які включають площину P_n і відстань Z_n до наступної площини P_{n+1} .

Обчислювались розподіли енергії та її зміни для полів з різними комбінаціями площин та їх розміщень, які потім освітлювали апертуру сенсорної решітки.

Розрахункова база. Для чисельних моделювань були створені комп'ютерні програми для розрахунку проходження електромагнітних хвиль крізь амплітудні і фазові періодичні елементи або систему таких елементів (модуляторів) з можливістю зміни їх взаємного розташування, зміщення один відносно іншого, зміни періоду та профілю фазового штриха.

Функціональна оптична схема. Оптична схема дослідів показана на рис. 1, де позначені функціональні блоки-транспаранти *Int*, *Dg₂*, *ФМ*, *АМ*. Це полегшує окремо досліджувати їх внесок у результуючий розподіл кутового спектру вихідного пучка.

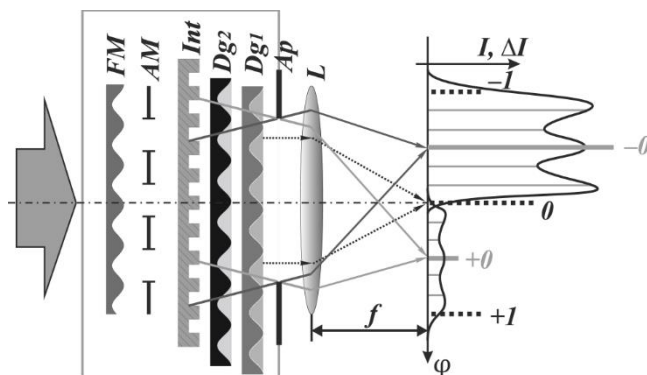


Рис. 1. Функціональна оптична схема дифракційного сенсора *Dg₁* при модуляції його апертури *Ар* додатковими модуляторами *Int*, *Dg₂*, *ФМ*, *АМ*. Лінза *L* виконує Фур'є-перетворення поля на апертурі *Dg₁*

Головним вимірювальним елементом дифракційної системи є сенсор у вигляді фазової решітки *Dg₁*, яка знаходиться в механічному контакті з досліджуванним об'єктом переміщення. Оскільки чутливість до поперечного переміщення визначається величиною періоду сенсорної решітки *Dg₁*, то для підвищення чутливості доцільно використовувати решітки з якнайменшими розмірами окремого штриха.

На новоутворений модуляторами розподіл поля діє Фур'є-перетворення лінзою *L*. Одержаний розподіл енергії *I* в дифракційних порядках та зміни енергії ΔI в них при зміщеннях *Dg₁* спостерігаються та фіксуються в її фокальній площині φ . Далі іде каскад вимірювання та цифрової обробки ПК.

Зміни поля сенсора при його переміщенні відбуваються відносно певних розподілів поля. Ці розподіли в найпростішому випадку створюються періодичними полями решітки *Dg₂*, та/або *Int*. Їх початкові позиції утворюють стартовий розподіл поля в спектрі сенсора *Dg₁*. Подальше ускладнення спектра відбувається за допомогою додаткової амплітудної *АМ* та фазової *ФМ* модуляції апертури *A* сенсора. Фазова модуляція забезпечує розмноження кожного з дифракційних порядків стартового розподілу спектра, а амплітудна — заповнює проміжки між новоутвореними порядками додатковими періодичними максимумами (рис. 2).

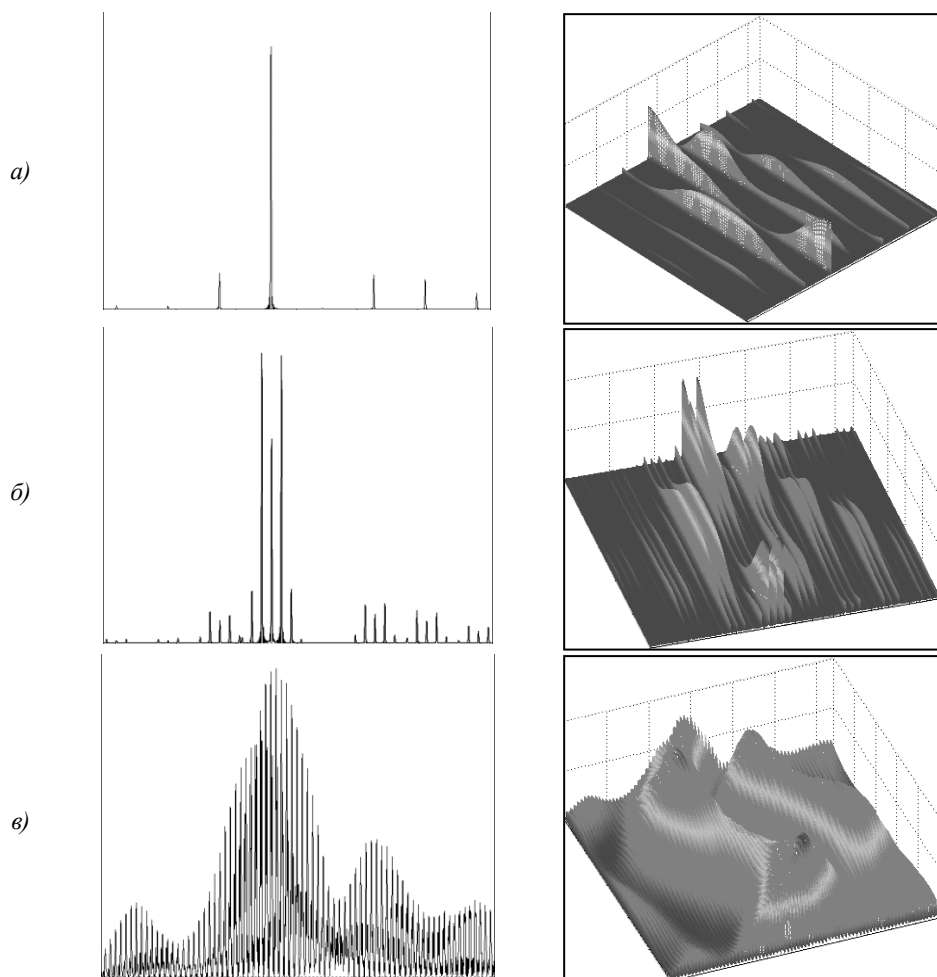


Рис. 2. Кутові спектри полів та їх динаміка при зміщенні сенсора Dg_1 :
а) Dg_1+Int ; б) Dg_1+FM ; в) $Dg_1+FM+AM$

Приклади результатів досліджень Досліджувався процес ускладнення розподілу поля на апертурі сенсора і відповідні зміни в утворюваних кутових спектрах. Початкове налаштування системи (рис. 2, а) відповідає випадку найбільшої концентрації енергії в «-1» дифракційному порядку (при зсуві Dg_1 на 0,35 ширини його штриха в полі Int). Цей варіант є лише одним з інших можливих.

У лівій колонці наведені розподіли енергії для стартових позицій сенсора Dg_1 , коли відсутнє його поперечне переміщення ($\Delta X=0$). Праворуч, динаміка змін при послідовному пересуванні Dg_1 (з шагом дискретності $\Delta X=0,01$ періоду d решітки Dg_1 ($d=0,02Ap$)). Розподіли наведені для повного (± 3200 у.о.) кутового діапазону спектра.

Вплив на чутливість. Значне збільшення кількості новоутворених дифракційних порядків після модуляції апертури сенсора Dg_1 та різноманітні зміни їх інтенсивності при переміщенні сенсора Dg_1 звертають нашу увагу на доцільність

автоматичної обробки одержаних результатів. За відповідних умов це може сприяти підвищенню точності вимірювань.

Дві синусоїдальні фазові решітки Dg_1 та Dg_2 , в плоскій хвилі. Така найпростіша ситуація відповідає розміщенню сенсора Dg_1 в полі, сформованого такою ж решіткою Dg_1 . Обидві решітки мали 20 штрихів/Ар; глибину модуляції 1,56 рад.; віддаль між ними $z=1\text{Ар}$. Вимірювались зміни інтенсивності « ± 1 » та «0» дифракційних порядків спектра при переміщенні Dg_1 відносно синусоїдального поля Dg_2 порівняно з полем, утвореним додатковими ФМ і АМ модуляторами. Інтенсивності « ± 1 » та «0» дифракційних порядків вимірювались в центральному кутовому діапазоні (± 500 у.о.) спектра.

Результати наведені на рис. 3, де по осі ОУ показані зміни інтенсивності цих трьох порядків при переміщенні сенсора на період його решітки. Графіки 1 та 2 відповідають змінам енергії у всіх трьох дифракційних порядках, тобто кожна n -а точка графіків обраховувалась за алгоритмом $I_n = \{\Sigma I(+) + \Sigma I(-)\} / I_0$. Тут (+) та (-), відповідно, позначають інтенсивність порядків, що формуються додатними і від'ємними амплітудами дифракційного поля. Порівняльні графіки 3 та 4 обраховувались за алгоритмом $I_n = \{\Sigma I(+) - \Sigma I(-)\} / I_0$. Він фактично відповідає традиційному алгоритму вимірювань для одного окремого дифракційного порядку — збільшенню чи зменшенню його інтенсивності.

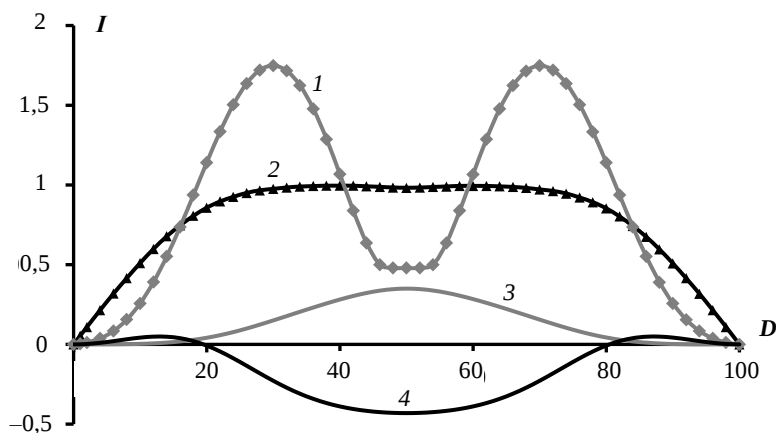


Рис. 3. Динаміка змін енергії $I_n = \{\Sigma I(+) + \Sigma I(-)\} / I_0$ дифракційних порядків при поперечному переміщенні сенсора Dg_1 відносно поля Dg_2 : 1 — без додаткової модуляції апертури Dg_1 ; 2 — після амплітудної АМ та фазової ФМ модуляції апертури Dg_1 ; 3, 4 — при алгоритмі обрахування $I_n = \{\Sigma I(+) - \Sigma I(-)\} / I_0$

Заміна алгоритму обробки результатів дає змогу підвищити чутливість вимірювань до поперечних переміщень сенсора Dg_1 , навіть без модуляції його апертури. Додаткова ж амплітудна та фазова модуляції апертури Dg_1 , призводить до ще більших змін розподілів. На рис. 3 графік 2, пов'язаний з додатковою модуляцією апертури Dg_1 , показує 5—10-кратне підвищення чутливості в діапазоні 0—0,1 його періоду (щодо графіка 3, який відповідає випадку без додаткової ФМ АМ модуляції апертури).

Інваріантність чутливості щодо змін розміщення вимірювальної ділянки спектра сенсора. Додатковий процес модуляції апертури Dg_1 дає змогу створювати нові дифракційні порядки в спектрі. Виникає питання, в якій мірі вони можуть бути «конкурентоспроможними» в процесі вимірювань, тому далі наведені результати зміни інтенсивності для випадку довільної ділянки спектра решітки Dg_1 за умов ускладнення розподілу поля при фазовій та амплітудній модуляції.

Як сенсор розглядається решітка із синусоїдальним фазовим профілем, що розміщена в періодичному полі Int , яке утворюється прямокутною фазовою решіткою з глибиною модуляції штриха в π радіан. Така початкова конфігурація була вибрана з міркувань, що вона забезпечує фактично повну перекачку енергії для « ± 1 » інтенсивних дифракційних порядків для Dg_1 при поперечному зсуві в межах ширини її періоду.

Крім прямокутної фазової решітки, апертура сенсора піддавалась ще додатковій фазовій модуляції системою із синусоїдальної та прямокутної решіток, або ж системою з двох синусоїдальних решіток. Їхні поперечні масштаби мали в 4 рази меншу кількість штрихів на одиницю апертури сенсора Dg_1 . На рис. 4 наведені приклади ускладнення спектра сенсора Dg_1

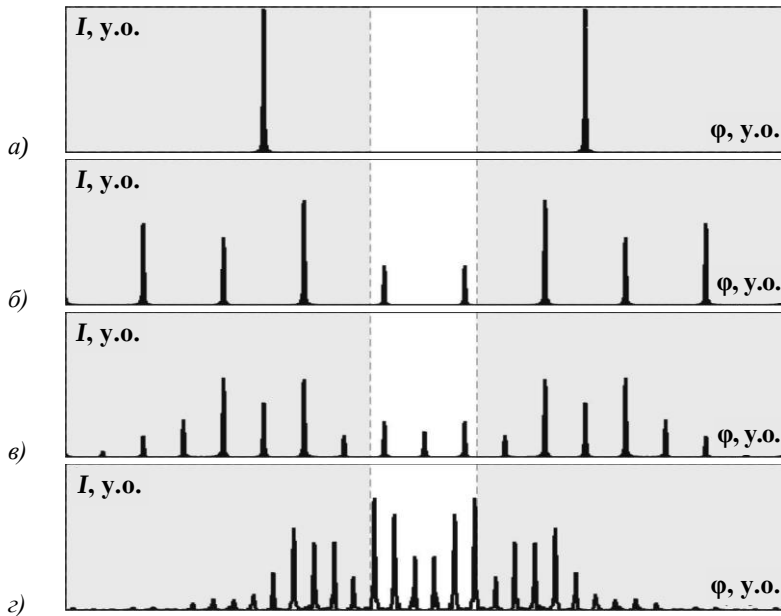


Рис. 4. Спектри сенсорних синусоїдальних решіток в інтерференційному полі при різних варіантах фазової модуляції їх апертури. Поява в діапазоні $(\pm 500 \text{ y.o.})$: б) двох; в) трьох; г) шістьох додаткових дифракційних максимумів при різних варіантах фазової модуляції

Особлива увага зверталась на ділянку спектра $(\pm 500 \text{ y.o.})$, яка була обрана для вимірювань й обробки результатів, оскільки без модуляції в цьому діапазоні взагалі немає дифракційних порядків для Dg_1 .

Дифракційні максимуми на рис. 4, а визначають положення « ± 1 » порядків сенсорної решітки Dg_1 (168 штрихів/мм) в полі прямокутної фазової решітки Int

(84 штрихів/мм глибиною π радіан). Видно, що вони далеко виходять за межі обраного діапазону вимірювань, тому використовувати Dg_1 як сенсор в цьому випадку неможливо.

Спектри на рис. 4 ілюструють ідею дослідження. Це можливість замість прямого вимірювання зміни інтенсивності « ± 1 » порядку Dg_1 в кутових точках (± 1400 у.о.) при його поперечному зсуві (рис. 4, а) робити це в довільних ділянках спектра. В конкретному випадку, в кутовому діапазоні (± 500 у.о.).

Рис. 4, б показує ускладнення спектра сенсора Dg_1 в інтерференційному полі Int при додатковій фазовій модуляції його апертури двома решітками з відмінними синусоїдальним і прямокутним профілями штрихів. Рис. 4, в відповідає випадку модуляції апертури Dg_1 сенсора також двома решітками, але обидві мають синусоїдальний фазовий профіль.

Порівняльний приклад рис. 4, г одержано при масштабуванні розмірів штрихів сенсора Dg_1 які мали в 4 рази більші розміри. Відповідно, в 4 рази більші розміри штрихів для інших фазових модуляторів. Ідея полягала в тому, щоб « ± 1 » порядки сенсора зі збільшеними штрихами (42 штр/мм замість 168 штр/мм) також формувалися у вимірювальному діапазоні кутів (± 500 у.о.).

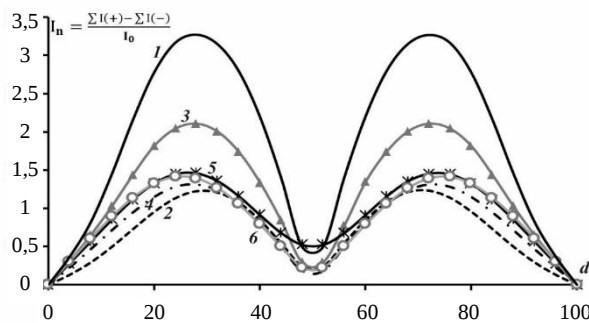


Рис. 5. Зміни інтегральної інтенсивності дифракційних порядків сенсора в діапазоні вимірювань(± 500 у. о.). Розподіли при шести різних варіантах амплітудо-фазової модуляції апертури сенсора

На рис. 5 наведені результати у випадку додаткової амплітудної AM модуляції апертури сенсора Dg_1 в інтерференційному полі Int для шести випадків фазової модуляції. Позначки графіків на рис. 5 відповідають таким параметрам модуляторів Dg_1 :

- 1) (Рект.; 84; 1,56. + Син. 168; 1,2.) + (Рект.; 21; 1,56. + Син.; 42; 1,2.) + AM ;
- 2) (Рект.; 84; 1,56. + Син. 168; 1,2.) + (Син.; 21; 1,56. + Син.; 42; 1,2.) + AM ;
- 3) (Рект.; 42; 1,56. + Син.; 84; 1,2.) + (Рект.; 10,5; 1,56 + Син.; 21; 1,2.) + AM ;
- 4) (Рект.; 42; 1,56. + Син.; 84; 1,2.) + (Син. 10,5; 1,56. + Син.; 21; 1,2.) + AM ;
- 5) (Рект.; 21; 1,56. + Син.; 42; 1,2.) + (Рект. ;5,2; 1,56. + Син.; 10,5; 1,2.) + AM ;
- 6) (Рект.; 21; 1,56. + Син.; 42; 1,2.) + (Син.; 5,2; 1,56. + Син.; 10,5; 1,2.) + AM .

Позначки для використаних решіток відповідають: профілю рельєфу; кількості штрихів на апертурі Ar ; глибині фазової модуляції в радіанах. Амплітудна

модуляція AM в усіх випадках відбувалася шляхом перекриття центральної частини апертури Ar на дві третини від її повної ширини.

У фазових модуляторів з відповідними періодами змінювався прямокутний фазовий розподіл на синусоїдальний (випадки 2, 4, 6), якщо порівняти з випадками (1, 3, 5). В усіх випадках характер змін інтенсивності у діапазоні вимірювань (± 500 у.о.) майже однаковий.

Висновки

У статті наведено результати дослідів щодо змін кутових спектрів дифракційних сенсорів поперечного переміщення за умови ускладнення комплексного пропускання його апертури фазовими та амплітудними модуляторами. При цьому поле кожного модулятора є збуджуючим для інших дифракційних модуляторів і таким чином забезпечує багатопучкову інтерференцію в напрямках наперед вибраних дифракційних порядків.

Досліджувались оптимальні умови розміщення і структури модуляторів, що забезпечують утворення складних конфігурацій розподілів вторинних дифракційних максимумів і відповідні зміни енергії в діапазоні низькочастотних напрямків кутового спектра системи (симетрично відносно її оптичної осі, а також в напрямку самої оптичної осі).

Оптимальний розподіл пропускання апертури сенсорної дифракційної решітки еквівалентний дії нової, «синтезованої» решітки, в якій кожній її поперечній позиції відповідає унікальний (свого роду штрих-код) «синтезований» профіль штриха сенсора решітки і, відповідно, кутовий спектр.

Складний розподіл поля змін інтенсивності кутових порядків залежить від переміщення сенсорної решітки і може становити 10^{-3} — $5 \cdot 10^{-4}$ величини її штриха за умови відповідної обробки результатів вимірювання.

Підхід, пов'язаний з ускладненням пропускання апертури сенсора, відкриває можливості перспективних рішень при створенні нового класу дифракційних сенсорів різноманітних переміщень і їх використання в чутливих приладах, зокрема в області нанодіапазону.

Література

- Конончук, Г. Л. Прокопєць, В. М., & Стукаленко, В. В. (2010). *Вступ до Фур'є-оптики* Київ: ВПЦ КДУ.
- Bouzzid, O., Haddadi, S., Fromager, M., Cagniot, E., Ferria, K., Forbes, A. (2017). Focusing anomalies with binary diffractive optical elements. *Appl. Opt.*, 56, 9735—9741.
- Bugaychuk, S. A., Gnatovskyy, V. O., Negriyko, A. M., Phiadko, I. I. (2016). Multiplication and commutation of laser beams under cross-correlation interaction of periodic fields. *Ukr. J. Phys.*, 61, 301—308.
- Collier, R. (2013). *Optical holography*. New-York: Academic Press.
- Gao, X., Wang, Q., Yun, M., & Guo, H., Wang, J., Zhuang, S. (2011). Focal shift of cylindrical vector ax symmetric Bessel-modulated Gaussian beam with radial variance phase wave front. *Optic*, 122, 2124—2128.
- Gnatovskyy, V. O., Bugaychuk, S. A., Negriyko, A. M., Phiadko, I. I., Sidorenko, A. V. (2013). Angular spectra of phase diffraction gratings illuminated by interference field. *IEEE Catalog Number CFP13814-CDR*, ISBN: 978-1-4799-0016-9. 378—380.
- Goodman, J. W. (1996). *Introduction of Fourier Optics*. New-York: McGraw-Hill.

Han, Wen, Gomella, A. A., Patel, A. (2013). Boosting phase contrast with a grating Bonse-Hart interferometer of 200 nanometer grating period. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 372, 2013—2028.

Kim, M. K. (2011). *Digital holographic microscopy, principles, techniques, and applications*. New York: Springer.

Maojin, Yun., Wei, Lv., Weijin, Kong., Chao, Liu., Xingxing, Wu., Kai, Li. (2016). Generation of optical bubbles by vector beams and pure phase filter. *Optic*, 127(4), 1770—1773. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.11.037>.

Rosen, J., Bulbul, A., Hai, N., Rai, M. R. (2019). Coded aperture correlation holography — a research journey from 3d incoherent optical imaging to quantitative phase imaging. *Opt. Photonics.*, 11, 518—537.

Ruane, G. (2016). Optimal phase masks for high contrast imaging applications. *Ph.D. thesis, Rochester Institute of Technology*.

Sarenac, D., Pushin, D. A., Huber, M. G. et. al. (2018). Three phase-grating moiré neutron interferometer for large interferometer area applications. *Phys. Rev. Lett.*, 120, 113—116.

Vijayakumar Anand, Shanti Bhattacharya. (2015). Design of multifunctional diffractive optical elements. *Opt. Eng.* 54(2). 024104. <https://doi.org/10.1117/1.OE.54.2.024104>

Wei, Lv., Chenglong, You., Mei Wang, Maojin Yun. (2013). Optical tweezers formed by pure phase pupil filter. *Proc. SPIE*. (8843 Laser Beam Shaping XIV), <https://doi.org/10.1117/12.2028636>.

THE APPLICATION OF CHIA SEEDS AND CHIA SEEDS GEL TO APPROACH THE NUTRIENT COMPOSITION OF COOKIES TO THE COMPOSITION OF THE "IDEAL" FOOD PRODUCT DUE TO MACRO-NUTRIENT CONTENT

V. Dorohovych, L. Mykhalska

National University of Food Technologies

Key words:

Chia seeds
Chia seed gel
Dough
Butter cookies

Article history:

Received 01.11.2023
Received in revised form
15.11.2023
Accepted 01.12.2023

Corresponding author:

V. Dorohovych
E-mail:
vikador@meta.ua

Citation: В. В. Дорохович,
Л. В. Михальська (2023).
Застосування насіння чіа та
гелю з насіння чіа для на-
ближення нутрієнтного
складу печива до складу
«ідеального» харчового
продукту за макронутрієн-
тами. *Наукові праці*
НУХТ, 29(6), 93—101.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2023-29-6-9

ABSTRACT

The nutrient composition of the "ideal" food product was calculated for women aged 18—29, II labor intensity group, for butter cookies with chia seeds and cookies with chia seed gel in accordance with the 3-level hierarchical tree of nutrient composition. It was established that the total protein content of traditional butter cookies was 2 times less than the amount of protein in the "ideal" food product, and the amount of fat was 2 times higher. Polyunsaturated fatty acids content was 2.8 times lower, fiber content was 4.3 times lower.

In the case of using chia seeds, the total amount of protein increased by 13%. The amount of fat actually did not change. The content of polyunsaturated fatty acids increased 2.2 times and their amount in cookies was 70% of the amount in the "ideal" food product. The fiber content was 4.3 times more than its content in cookies made by traditional recipe and was close to its amount in the "ideal" food product.

With the aim to reduce the amount of fat in the cookies, chia seed gel was applied. Research was conducted using the gel at different ratios of chia seeds and water — 1:10, 1:5, 1:3, 1:1.5. Rational correlation of chia seeds and water was 1:1.5, and the gel was made from the entire prescription amount of chia seeds. In the recipe of the developed cookies, part of the wheat flour was replaced with rice flour. It was found that the density of the control dough sample and the dough with chia seed gel was actually the same. Mass losses during baking-drying and cooling were almost the same. A decrease in the wettability of cookies with chia seed gel was determined.

The calculation established that the fat content was significantly reduced and exceeded the content in the "ideal" product by 19%. As in the case of using chia seeds in dry form, the content of polyunsaturated fatty acids and fiber in cookies with chia seed gel was close to their content in the "ideal" food product.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-9

ЗАСТОСУВАННЯ НАСІННЯ ЧІА ТА ГЕЛЮ З НАСІННЯ ЧІА ДЛЯ НАБЛИЖЕННЯ НУТРІЄНТНОГО СКЛАДУ ПЕЧИВА ДО СКЛАДУ «ІДЕАЛЬНОГО» ХАРЧОВОГО ПРОДУКТУ ЗА МАКРОНУТРІЄНТАМИ

В. В. Дорохович, Л. В. Михальська

Національний університет харчових технологій

Розраховано нутрієнтний склад «ідеального» харчового продукту для жінок 18—29 років (II група інтенсивності праці) здобного печива з насінням чіа та печива з гелем насіння чіа відповідно до трирівневого ієрархічного дерева нутрієнтного складу. Встановлено, що в традиційному здобному печиві загальний вміст білка вдвічі менший за кількість білка в «ідеальному» харчовому продукті, а кількість жирів вдвічі більша. Вміст поліненасичених жирних кислот менший у 2,8 раза, вміст клітковини — в 4,3 раза.

У разі застосування насіння чіа загальна кількість білка збільшується на 13%. Кількість жиру фактично не змінюється. Це обумовлено тим, що насіння чіа вводили до рецептури не на заміну борошну, а до маси борошна. Вміст ПНЖК збільшується у 2,2 раза і їх кількість у печиві складає 70% від кількості в «ідеальному» харчовому продукті. Вміст клітковини у 4,3 раза більший за вміст у традиційному виробі і наближений до її кількості в «ідеальному» харчовому продукті.

З метою зменшення кількості жиру в печиві застосовано гель насіння чіа. Проводили дослідження із застосуванням гелю за різного співвідношення насіння чіа:вода — 1:10, 1:5, 1:3, 1:1,5. Встановлено раціональне співвідношення насіння чіа:вода — 1,1,5, при цьому гель виготовляли з усієї рецептурної кількості насіння чіа. В рецептурі розробленого печива частину пшеничного борошна замінювали на рисове. Встановлено, що густина контрольного зразка тіста й тіста з гелем насіння чіа фактично однакові. Втрати маси під час випікання-сушіння й охолодження майже не відрізняються. Визначено зменшення намокання печива з гелем насіння чіа, що може свідчити про незначне ущільнення структури.

Встановлено, що вміст жиру істотно зменшується, хоча перевищує вміст в «ідеальному» продукті на 19%. Як і в разі застосування насіння чіа в сухому вигляді, в печиві з гелем насіння чіа вміст поліненасичених жирних кислот і клітковини наближається до їх вмісту в «ідеальному» продукті.

Ключові слова: насіння чіа, гель з насіння чіа, тісто, здобне печиво.

Постановка проблеми. Харчування є потужним чинником, що впливає на стан здоров'я людини, тому все більше уваги приділяється здоровому харчуванню, раціоналізації та індивідуалізації раціонів харчування. Для цього потрібно розробляти харчові продукти, у т. ч. борошняні кондитерські вироби, зменшеної калорійності і глікемічності, збагачені фізіологічно-функціональними інгредієнтами.

Здобне печиво має популярність у населення України. Однак до його рецептурного складу входить велика кількість жирової компоненти, печиво містить невелику кількість вітамінів, мінеральних речовин, харчових волокон тощо. Це обумовлює доцільність внесення до рецептурного складу здобного печива сировинних компонентів, добавок, які сприятимуть збільшенню кількості вітамінів, мінеральних речовин, харчових волокон та інших фізіологічно-функціональних інгредієнтів. Потрібно розробляти здобне печиво зі зменшеною кількістю жиру і, відповідно, зниженою калорійністю.

Одним із таких сировинних компонентів є насіння чіа, яке містить значну кількість харчових волокон, ПНЖК, мінеральних речовин, вітамінів тощо (Насіння чіа. ел. ресурс). Насіння чіа містить слизові речовини — розчинні некрохмальні полісахариди, які гідратуються у воді і мають здатність до утворення в'язких гелів (Marcinek, & Krejpcio, 2017; Samateh, Pottacka, Manafrafi, Vidyasagar, Maldarelli, & John, 2018), що може бути використано для зменшення жиру у виробах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосуванню насіння чіа та гелю з насіння чіа присвячено праці багатьох науковців. Так, метою дослідження науковців (Мацук, Колпікова, & Іщенко, 2019) було наукове обґрунтування рецептур і технологій безглютенових кексів на основі гречаного й рисового борошна з використанням насіння чіа. Найвищі дегустаційні оцінки отримав зразок безглютенового кексу з 10% насіння чіа.

У праці (Brandao, Dutra, Gaspard, & Campo, 2019) було визначено фізико-хімічні, мікробіологічні властивості, харчову цінність та сенсорне сприйняття печива, приготованого з борошна насіння чіа. Встановлено, що заміна 30% пшеничного борошна на борошно насіння чіа дає найкращий результат.

У (Brites, Ortolan, & Bueno, 2019) розроблено безглютенове печиво, до рецептурного складу якого входить 52,5% гречаного борошна, 40% пшоняного борошна, 7,5% насіння чіа. Науковці (Svec, Hruskova, & Babiakova, 2017) покращували нутрієнтний склад пшенично-ячмінного печива шляхом додавання насіння чіа та борошна теф.

Вчені (Inglett, Chen, & Liu, 2014) досліджували фізичні властивості печива, що містить насіння чіа та вівсяне борошно. Замінювали 20% пшеничного борошна на суміш концентрату вівсяних висівок або цільного вівсяного борошна з подрібненим насінням чіа для покращення поживних і фізичних властивостей.

Науковцями (Гречко, Страшинський, & Пасічний, 2019) при проведенні порівняльного аналізу ступеня набухання насіння чіа і льону було встановлено, що насіння чіа краще набухає у воді, утворюючи однорідний гель. При 20 °C час досягнення практично повного набухання у воді складає: для насіння чіа — 30 хв, для льону — 15 хв. Процес набухання насіння чіа відбувається більш інтенсивно, що свідчить про більший шар слизової оболонки порівняно з льоном.

У праці (Ditrikh, & Moiseieva, 2017) розроблено печиво зі зменшеною кількістю цукру і жиру. Результати показали, що найкращі показники має проба печива з додаванням гарбузового пюре 50% і гарбузової олії 20% від початкової кількості сировини та насіння чіа у пропорції 1,5% від кількості пшеничного борошна.

Дослідниками (Шидакова-Каменюка, Болховітіна, & Ніколаєнко, 2021) запропоновано спосіб отримання гелю з насіння чіа, який передбачає гідратацію насіння за гідромодуля 1:10 впродовж не менше 60 с. Внесення гелю насіння чіа у кількості 25% від маси жирового компонента сприяє збільшенню пористості кексів, підвищенню їх вологості та зниженню втрат під час випікання.

У праці (Puina, & Dhull, 2019) досліджували термічну, зсувну та динамічну поведінку гелю насіння чіа та його добавок у пропорціях 0, 10, 20, 30 та 40% як заміник жиру при виробленні печива. Дослідники прийшли до висновку, що печиво з 30% гелю має найкращу текстуру, бажаний колір.

Науковці (Fernandes, Filipini, & Salas-Mellado, 2021) займалися розробкою готової суміші для кексів із використанням сухого гелю чіа як заміника жиру. Отримана суміш сприяє зниженню жиру на 60,4%.

Досліджено (Venturini та ін., 2019) часткову заміну маргарину на мікрокапсульовану олію чіа у кількості 15% та 30%. Сенсорний аналіз продемонстрував гарні якісні показники зразка із заміною 15% маргарину.

Отже, для зниження кількості жиру, покращення жирно-кислотного складу, збільшення кількості харчових волокон доцільно застосовувати насіння чіа та гель з насіння чіа. Науковці проводили визначення нутрієнтного складу розроблених виробів з насінням чіа. Однак є питання оцінювання збалансованості складу розроблених виробів, що потребує застосування певних методологічних підходів.

Мета дослідження: розроблення рецептурного складу здобного печива зі зменшеною кількістю жиру, порівняння нутрієнтного складу печива з насінням чіа та гелем з насіння чіа з нутрієнтним складом «ідеального» харчового продукту.

Матеріали і методи. Об'єкт дослідження — технологія здобного печива із застосуванням гелю насіння чіа.

Застосовано експериментальні та розрахункові методи дослідження. Визначення густини тіста проводили за методикою, яка полягає у визначенні маси кульки тіста та об'єму рідини, що вона займає. Намокання та лужність здобного печива визначали за загальноприйнятою методикою (Дорохович, & Ковбаса, 2015). Упікання визначали за різницею мас тістових заготовок і гарячого виробу (печива). Втрату маси під час охолодження визначали за різницею маси гарячого та охолодженого печива.

Склад «ідеального» харчового продукту та відповідність нутрієнтного складу печива до складу «ідеального» харчового продукту розраховували за методикою проф. Дорохович А. М (авт. свід. 66788).

Викладення основних результатів дослідження. Насіння чіа, як вже було зазначено, має цінний нутрієнтний склад і є перспективною сировиною для борошняних кондитерських виробів. У попередніх працях авторів розроблено здобне печиво на цукрі та фруктозі із застосуванням насіння чіа у кількості 20% до маси пшеничного борошна. Доведено вплив насіння чіа на структурні показники тіста, фізико-хімічні та структурні показники готових виробів, розраховано вміст низки вітамінів і мінеральних речовин. Однак залишалось питання, наскільки збалансований нутрієнтний склад цього печива. Це можна визначити, розрахувавши відповідність його складу до нутрієнтного складу «ідеального» харчового продукту для певної групи населення. За методикою проф. Дорохович А. М. (авт. свід. 66788) розраховували нутрієнтний склад «ідеального» харчового продукту для жінок

18—29 років (II група інтенсивності праці) та нутрієнтний склад традиційного здобного печива і здобного печива з насінням чіа (табл. 1).

Таблиця 1. Нутрієнтний склад «ідеального» харчового продукту для жінок 18—29 років (II групи інтенсивності праці) традиційного печива та печива з насінням чіа

Нутрієнт	Нутрієнтний склад «ідеального» харчового продукту для жінок	Нутрієнтний склад традиційного здобного печива	Нутрієнтний склад печива з насінням чіа на цукрі	Нутрієнтний склад печива з гелем насіння чіа
I рівень				
Білки, г	14,29	7,36	8,32	8,88
Жири, г	15,14	29,09	28,74	19,56
Вуглеводи, г	70,57	60,75	56,79	65,77
II рівень				
Вміст незамінних амінокислот, г	5,6	2,25	2,82	3,14
Вміст замінних амінокислот, г	10,0	4,03	4,83	5,16
Вміст насичених жирних кислот, г	5,3	20,91	19,26	11,47
Вміст мононенасичених жирних кислот, г	5,3	9,95	9,26	5,70
Вміст поліненасичених жирних кислот, г	5,3	1,87	4,05	3,96
Вміст моно- і дисахаридів, г	17,0	22,25	20,16	23,04
Вміст полісахаридів, г	51,2	36,80	36,76	43,27
III рівень				
Вміст ізолейцину, г	0,62	0,31	0,36	0,38
Вміст лейцину, г	1,09	0,57	0,65	0,70
Вміст лізину, г	0,85	0,24	0,31	0,35
Вміст метіоніну+цистину, г	0,54	0,27	0,35	0,38
Вміст фенілаланіну+тирозину, г	0,93	0,54	0,64	0,72
Вміст треоніну, г	0,62	0,24	0,29	0,31
Вміст триптофану, г	0,15	0,08	0,12	0,13
Вміст валіну, г	0,78	0,34	0,41	0,45
Вміст поліненасичених жирних кислот W_6	4,8	0,66	1,18	1,20
Вміст поліненасичених жирних кислот W_3	0,48	0,04	1,82	2,07
Полісахариди	42,6	36,80	36,76	43,27
Рослинні волокна клітковини	4,3	0,99	4,33	5,02
Рослинні волокна пектини	4,3	0	0	0

Аналізуючи результати розрахунків можна зробити висновок, що в традиційному здобному печиві загальний вміст білка удвічі менший за кількість білка в «ідеальному» харчовому продукті, кількість жирів удвічі більша. Вміст ПНЖК в 2,8 раза менший, вміст клітковини — в 4,3 раза.

Застосування у визначеній кількості насіння чіа сприяє збільшенню кількості білка на 13%, загальна кількість жиру фактично не змінюється. Насіння чіа має значну кількість жиру. Однак у запропонованій рецептурі воно додається до маси борошна і, відповідно, кількість всіх інших рецептурних компонентів, зокрема жиру, на 100 г готового печива зменшується. Спостерігається незначне покращення амінокислотного складу печива, досить істотно збільшується кількість ПНЖК, харчових волокон. У насінні чіа високий вміст поліненасичених жирних кислот, співвідношення жирних кислот ω -3: ω -6 становить 3:10 (Yurt, & Gezer, 2018). Вміст ПНЖК збільшується у 2,2 раза і їх кількість у печиві складає 70% від кількості в «ідеальному» харчовому продукті. Вміст клітковини у 4,3 раза більший за вміст у традиційному виробі і дорівнює її кількості в «ідеальному» харчовому продукті.

Водночас печиво з насіння чіа має значно більшу кількість жиру за ту, що має бути в «ідеальному» харчовому продукті. Це обумовлює доцільність її зменшення без погіршення органолептичних показників печива.

Особливість складу насіння чіа полягає у високому вмісті слизових речовин (Muñoz, Cobos, Díaz, & Aguilera, 2012), які мають позитивний вплив на організм людини. Під час замочування у воді насіння чіа утворює гелі, що можуть певною мірою замінювати жирову компоненту виробів, тому було проведено дослідження з визначення можливості застосування гелю насіння чіа з метою зменшення жирової складової здобного печива.

Для цього визначали раціональне співвідношення насіння чіа:вода і вплив отриманого гелю на текстуру тіста та якісні показники готових виробів. Гель готували за такого співвідношення насіння чіа:вода — 1:10, 1:5, 1:3. Гель від насіння чіа не відділяли, оскільки в насінні міститься велика кількість цінних нутрієнтів. Проводили заміну 50% жирової компоненти (маргарину) на гель насіння чіа (табл. 2).

Таблиця 2. Кількість основних рецептурних компонентів у досліджуваних зразках печива

Рецептурні компоненти		Контрольний зразок	Досліджувані зразки зі співвідношенням у гелі насіння чіа:вода		
			1:10	1:5	1:3
Борошно пшеничне	базова кількість	100	100	100	100
	додаткова кількість	—	80	50	20
Цукрова пудра		40	40	40	40
Маргарин		60	30	30	30
Гель насіння чіа		—	30	30	30
Меланж		18	18	18	18

За різного співвідношення насіння чіа:вода в гелі міститься різна кількість насіння чіа, води, через що вводилася різна додаткова кількість борошна пшеничного для отримання наближеної до традиційної текстури тіста. За різного співвідношення насіння чіа:вода в рецептурній кількості гелю (30 г) знаходиться різна кількість насіння чіа. За співвідношення насіння чіа:вода 1:10 у 30 г гелю знаходиться 2,73 г насіння чіа, за співвідношення 1:5 — 5,0 г насіння чіа, за співвідношення 1:3 — 7,5 г насіння чіа. В такому разі решту від кількості насіння чіа, що визначено як раціональну, можна додавати під час замішування тіста. У разі більшого гідромодулю для надання тісту необхідної текстури потрібно значно збільшувати кількість пшеничного борошна. Значне збільшення кількості пшеничного борошна спричиняло утворення щільної, «забитої» структури випеченого печива. Найкращі результати було отримано за співвідношення у гелі насіння чіа:вода 1:3.

Наступним етапом роботи була заміна 50% жирової складової на гель чіа, отриманий з усієї кількості насіння чіа, що визначена як раціональна (20% до маси борошна). Це дасть змогу отримати гель меншої вологості, що є позитивним при виготовленні здобного печива, а також використати одразу все насіння чіа без додаткового його додавання в кінці замішування і насіння буде менше тріщати при розжовуванні. Також замінювали частину пшеничного борошна на рисове для отримання більш крихкої розсипчастої структури печива. Гель готували з 40 г насіння чіа та 60 мл води, тобто співвідношення 1:1,5. Набухання проходило протягом 40—60 хвилин. Гель вийшов дуже густий, насіння чіа набухло і зв'язане між собою.

За результатами низки досліджень визначили таке раціональне співвідношення основних рецептурних компонентів (г): борошно пшеничне — 80, борошно рисове — 20, цукрова пудра — 40, маргарин — 30, гель насіння чіа — 50 (в якому 20 г насіння чіа), меланж — 18.

Визначено, що застосування гелю з насіння чіа не має впливу на густину тіста. Різниця густини тіста контрольного зразка та тіста з гелем насіння чіа близько 1%. Це в межах похибки дослідів. Втрати маси під час випікання-сушіння та охолодження майже не відрізняються: 13,5% контрольний зразок, 13,8% дослідний. Відмічено зменшення показника намоочування дослідного зразка (115%), однак це відповідає вимогам ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови».

Було розраховано (табл. 1) вміст нутрієнтів у 100 г печива з гелем насіння чіа (насіння чіа:вода — 1:1,5). Загальна кількість жиру зменшується і стає більшою за вміст жиру в «ідеальному» харчовому продукті лише на 19%. Також покращується жирно-кислотний склад виробів. Вміст ПНЖК майже такий, як для ідеального харчового продукту. Вміст клітковини навіть перевищує її міст в «ідеальному» харчовому продукті. Це є позитивним, тому що у виробках відсутній пектин, що є одним з нутрієнтів «ідеального» харчового продукту.

Висновки

Розраховано нутрієнтний склад «ідеального» харчового продукту для жінок 18—29 років, II групи інтенсивності праці, та відповідно до нього нутрієнтний склад традиційного здобного печива. Встановлено, що традиційне печиво має недостатню кількість білка, ПНЖК, клітковини, надлишкову кількість жиру.

Застосування насіння чіа надає можливість виготовляти здобне печиво з гарними органолептичними показниками, збільшеною кількістю ПНЖК, клітковини. Однак таке печиво, як і традиційне, має надлишкову кількість жиру. Застосування гелю насіння чіа за співвідношення насіння чіа:вода — 1:1,5 дає змогу істотно зменшити рецептурну кількість жиру. Загальна кількість жиру перевищує кількість в «ідеальному» харчовому продукті лише на 19%. Впровадження у виробництво запропонованого печива буде сприяти розширенню асортименту борошняних кондитерських виробів з покращеним нутрієнтним складом.

Література

- Гречко В., Страшинський І., Пасічний В. (2019). Використання гелів з нетрадиційної сировини для виробництва м'ясних напівфабрикатів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 25(5), 108—116.
- Дорохович А. М., Ковбаса В. М. (ред.). (2015). Технологія та лабораторний практикум кондитерських виробів і харчових концентратів: навч. посіб. Київ: Фірма «ІНКОС».
- Мацук Ю., Колпикова Є., Іщенко Н. (2019). Обґрунтування технології безглютенових кексів із додаванням насіння чіа. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*, (91), 8—14. DOI: <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2019-1-1>.
- Насіння чіа. Взято з : <https://healthapple.info/zdorovya-ta-organizm/nasinnya-chia/?amp=1>.
- Шидакова-Каменюка О., Болховітіна О., Ніколаєнко Д. (2021). Використання гелю насіння чіа в технології кексів зі зниженим вмістом жиру. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. ХДУХТ*, 1(33), 223—234. DOI: 10.5281/zenodo.5043590.
- Гречко В., Страшинський І., Пасічний В. (2019). Використання гелів з нетрадиційної сировини для виробництва м'ясних напівфабрикатів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 25(5), 108—116. DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-5-13.
- Шидакова-Каменюка О., Болховітіна О., Ніколаєнко Д. (2021). Використання гелю насіння чіа в технології кексів зі зниженим вмістом жиру. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. ХДУХТ*, 1(33), 223—234. DOI: 10.5281/zenodo.5043590.
- Brandao N. A., Dutra M. B. D., Gaspardi A. L. A., Campos M. R. S. (2019). Chia cookies: physicochemical, microbiological attributes, nutrimental value and sensory analysis. *Journal of food measurement and characterization*, 2, 1100—1110.
- Brites L. T. G. F., Ortolan F., Bueno F. R., Bueno F. R., Rocha T. S., Chanf Y. K., Steel C. J. (2019). Gluten-free cookies elaborated with buckwheat flour, millet flour and chia seeds. *Food Science and technology (Brazil)*, 2, 458—466. <https://doi.org/10.1590/fst.30416>.
- Ditrikh I., Moiseieva V. (2017). Improvement of some functional properties of cookies with added natural components of pumpkin and chia. *Ukrainian Journal of Food Science*, 5(1), 103—110. DOI: 10.24263/2310-1008-2017-5-1-13.
- Fernandes S. A., Filipino N. G., Salas-Mellado M. D. M. (2021). Development of cake mix with reduced fat and high practicality by adding chia mucilage. *Food bioscience*, 42, 1021—1024. DOI: 10.1016/j.fbio.2021.101148.
- Inglett G., Chen D., Liu S. (2014). Physical properties of sugar cookies containing chia-oat composites. *Journal of the science of food and agriculture*, 94(15), 3226—3233. DOI: 10.1002/jsfa.6674.
- Marcinek K., Krejpcio Z. (2017). Chia seeds (Salvia hispanica): health promoting properties and therapeutic applications — a review. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, 68 (2), 123—129. Взято з: http://wydawnictwa.pzh.gov.pl/roczniki_pzh/.
- Muñoz L. A., Cobos A., Diaz O., Aguilera J. M. (2012). Chia seeds: microstructure, mucilage extraction and hydration. *Journal of food Engineering*, 108 (1), 216—224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.06.037>.

Puina S., Dhull S. B. (2019). Chia seed (*Salvia hispanica* L.) mucilage (a heteropolysaccharide): Functional, thermal, rheological behaviour and its utilization. *International journal of biological macromolecules*, 140, 1084—1090. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.08.205.

Samateh M., Pottacka N., Manafrazi S., Vidyasagar A., Maldarelli C., John G. (2018). Unravelling the secret of seedbased gels in water: the nanoscale 3D network formation. *Scientific Reports*, 8(1), 1—8. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25691-3>.

Svec I., Hruskova M., Babiakova B. (2017) Chia and Teff as Improvers of Wheat-Barley Dough and Cookies. *Czech journal of food sciences*, 1, 79—88. DOI: 10.17221/123/2016-CJFS.

Venturini L. H., Moreira T. F. M., da Silva T. B. V., de Almeida M. M. C. (2019). Partial Substitution of Margarine by Microencapsulated Chia Seeds Oil in the Formulation of Cookies. *Food and bioprocess technology*, 12(1), 77—87. DOI: 10.1007/s11947-018-2188-0.

Yurt M., Gezer C. (2018). Chia tohumunun (*Salvia hispanica*) fonksiyonel özellikleri ve sağlık üzerine etkileri. *The journal of food*, 43(3), 446—460. DOI: <https://doi.org/10.153237/gida.GD17093>.

MAILLARD REACTION: USE IN FOOD TECHNOLOGIES AND EXPERTISE OF FOOD PRODUCTS

A. Loginova

National University of Food Technologies

Key words:

Maillard reaction

Sugar

Amino acids

Amadori products

Melanoidins

Aroma

Color

Article history:

Received 08.11.2023

Received in revised form

22.11.2023

Accepted 06.12.2023

Corresponding author:

A. Loginova

E-mail:

anna.ol.logi@gmail.com

Citation: A. O. Логінова (2023). Реакція Майяра: використання в харчових технологіях та експертизі харчових продуктів. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 102—121.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-10

ABSTRACT

The discovery of Louis Maillard in 1912 was of great importance for the development of chemistry and development of food science and nutrition in general.

The Maillard reaction or as it is also called, the reaction of melanoid formation, is a series of complex successive and parallel stages of the reaction, which was described by Hodge in 1953 and has not lost its relevance even today. Significant scientific achievements and key scientists who have made major contributions to the understanding of the Maillard reaction are presented. The food industry is directly concerned about the occurrence of this reaction in processed food products, and its own research has contributed significantly to the understanding of the phenomenon and the optimization of food preparation processes and conditions in order to preserve the nutritional, safe and sensory qualities of food products.

It is known that the products of the Maillard reaction have both positive and negative effects on public health. Various products of the Maillard reaction act as antioxidants, have bactericidal, antiallergenic or carcinogenic properties. Most of these properties depend on the way the food is processed and the duration of processing. Heating at high temperatures makes some foods nutritious, while some foods lose their nutritional value at the same time.

Two sensory indicators, which are important for food products during the course of the melanoid formation reaction, were characterized – formation of brown color (melanoidins) and aroma. Decomposition of sugars leads to the formation of volatile (caramel aroma) and brown compounds (caramel color). Colors and aromas depend on the sugar used (i.e., mono-, oligo-, or polysaccharide). That is why the study of this reaction is so important for understanding these quality indicators like color and aroma.

The Maillard reaction is also of great importance in the examination of food products, since a large part of food products in the production process is affected by this reaction. The reaction of melanoid formation is used in the identification of food products due to the formation of color, which is characteristic for the course of reaction.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-10

РЕАКЦІЯ МАЯРА: ВИКОРИСТАННЯ В ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ТА ЕКСПЕРТИЗІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

А. О. Логінова

Національний університет харчових технологій

Відкриття Луї Маяра у 1912 р. мало велике значення для розвитку хімії, харчової науки та харчування в цілому. Реакція Маяра або, як її ще називають, реакція меланоїдиноутворення — низка складних послідовних і паралельних етапів реакції, описаної Ходжем у 1953 р., не втратила своєї актуальності й нині. У статті представлено значні наукові досягнення та ключових науковців, які зробили великий внесок у розуміння реакції Маяра й оптимізацію процесів і умов приготування їжі з метою збереження поживних, безпечних та органолептичних якостей харчових продуктів.

Відомо, що продукти реакції Маяра мають як позитивний, так і негативний вплив на здоров'я людини. Окремі продукти реакції Маяра діють як антиоксиданти, мають бактерицидні, антиалергенні та канцерогенні властивості. Більшість цих властивостей залежить від способу оброблення їжі й тривалості оброблення. Нагрівання за високих температур робить деякі страви поживними, тоді як деякі продукти у той же час втрачають свою харчову цінність.

Охарактеризовано два органолептичних показники, важливих для харчових продуктів під час перебігу реакції меланоїдиноутворення — утворення коричневого кольору (меланоїдинів) та аромату.

Велике значення реакція Маяра може мати і в експертизі харчових продуктів, зокрема для їх ідентифікації та виявлення фальсифікації, завдяки утворенню кольору, характерного саме для продуктів цієї реакції.

Ключові слова: *реакція Маяра, цукор, амінокислоти, продукти Амадори, меланоїдини, аромат, колір.*

Постановка проблеми. Реакція Маяра або реакція меланоїдиноутворення — одна з основних реакцій, що широко використовується в різних галузях знань. Найбільше значення вона має для харчових технологій, оскільки впливає на такі важливі характеристики харчових продуктів, як колір, смак та аромат.

Незважаючи на те, що вивчення реакції Маяра, особливостей її перебігу чи застосування триває більше ста років, вона все ще залишається до кінця не вивченою.

Метою дослідження є визначення перспектив використання реакції Маяра в експертизі харчових продуктів, а саме — для ідентифікації та виявлення фальсифікації харчових продуктів.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження є наукові публікації зарубіжних і вітчизняних учених щодо реакції Луї Маяра. Пошук публікацій здійснювали з використанням світових наукометричних баз даних PubMed та Google Scholar.

Викладення основних результатів дослідження. Реакція Маяра (Maillard, & Hebd, 1912) є однією з основоположних реакцій у харчовій промисловості. Ця

реакція значною мірою відповідає за колір, смак, аромат і текстуру готових виробів у таких традиційних процесах виробництва, як випікання хліба чи тістечок, смаження кави, какао-бобів, м'яса, вологотермічне оброблення зерна тощо.

Відкриття Луї Маяра стало основою для розуміння неферментативних реакцій потемніння харчових продуктів під час технологічного процесу, обов'язковою умовою яких є наявність вільних амінокислот і редукувальних цукрів, а також високотемпературне оброблення продукту.

З моменту відкриття реакції Маяра минуло більше 100 років, але вона так до кінця і не вивчена, хоча вже є близько 50000 статей, присвячених перебігу реакції, перспективам використання її в різноманітних технологіях, користі чи загрозам продуктів реакції Маяра для організму людини тощо.

Низка вчених всього світу і нині вивчають реакцію Маяра, її хімізм, вплив на якість і безпечність харчових продуктів, здоров'я людини (Hodge, 1953; Nursten, 2005; Melton, & Stanley, 2006).

Хімізм реакції Маяра. У 1953 р. Hodge (Hodge, 1953) запропонував першу послідовну схему перебігу реакції Маяра (рис. 1).

Вважають, що реакцію Маяра важко контролювати. Особливо це стосується харчових технологій, оскільки на перебіг реакції впливають фактори, пов'язані зі способом оброблення сировини і напівфабрикатів. Реакцію поділяють на три основні етапи: ранній, проміжний і пізній.

У праці Ходжа, стверджується, що редукувальний цукор, наприклад, глюкоза конденсується зі сполукою, що містить у своєму складі вільну аміногрупу, з утворенням продукту конденсації N-заміщеного глюкозиламіну, який перегруповується з утворенням продукту перегруповання Амадорі (ARP).

Подальше руйнування продукту Амадорі залежить від активності іонів водню в розчині (рН). Так, наприклад, за рН менше 7 продукти Амадорі, здебільшого, піддаються 1,2-енолізації з утворенням фурфуролу (за участі пентоз) або гідроксиметилфурфуролу, або НМФ (за участі гексоз). Якщо рН середовища вище 7, то відбувається розкладання сполуки Амадорі. Існує думка, що цей процес включає також переважно 2,3-енолізацію, у якій редуктони, такі як 4-гідрокси-5-метил-2,3-дигідрофуран-3-он, і різноманітні продукти, такі як ацетол, пірувальдегід і діацетил, утворюються. Ці сполуки мають високу реакційну здатність і необхідні у подальших реакціях.

Карбонільні групи можуть конденсуватися з вільними аміногрупами, що призводить до включення азоту в продукти реакції, а дикарбонільні сполуки реагують з амінокислотами з утворенням альдегідів і α -амінокетонів. Ця реакція відома як деградація Штрекера. Далі на проміжній стадії відбувається низка реакцій, що включають циклізацію, дегідратацію, ретроальдолізацію, перегруповання, ізомеризацію та подальшу конденсацію, які в підсумку, на пізній стадії, призводять до утворення коричневих азотовмісних полімерів і співполімерів, більш відомих як меланоїдини (Martins, Jongen, & van Boekel, 2000).

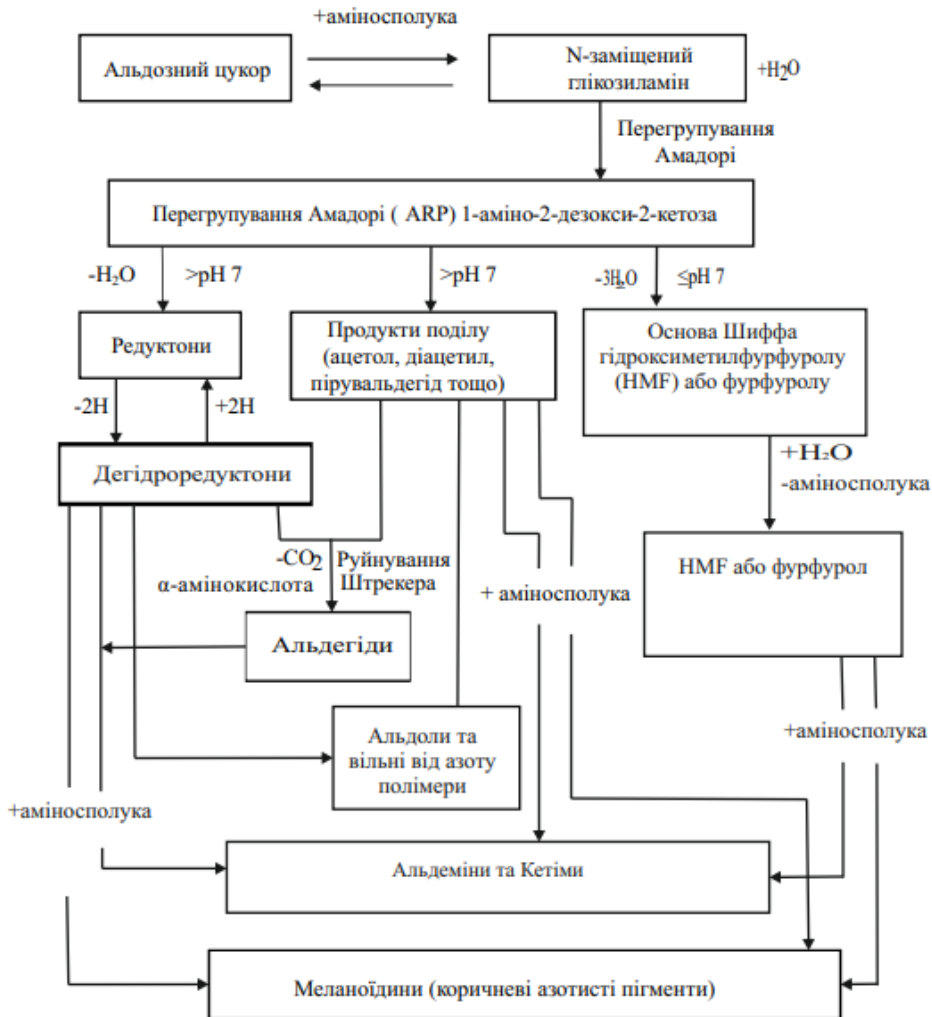


Рис. 1. Схема реакції Маяра, адаптована Ходжем (Hodge, 1953)

Завдяки зацікавленості різних вчених питаннями, що стосуються реакції Маяра, відбулись нові важливі відкриття. До прикладу, МакВіні та ін. (McWeeny, Knowels, & Hearne, 1974) зробили відкриття, що найважливішими проміжними продуктами, що формують колір є 3-дезоксигексосулози та 3,4-дідезоксиулози-3-ени. Трохи згодом Ghiron et al. (Ghiron, Quack, Mahinney, & Feather, 1988) повідомили, що 3-дезоксигексосулози, 1-дезоксигексосулози та ін. α -дикарбонільні проміжні сполуки можуть вступати в реакції нуклеофільного приєднання з амінокислотами, де в подальшому відбувається декарбоксилювання з утворенням альдегіду Штрекера.

А вже в 1990 р. вченими Huber, & Ledl (Huber, & Ledl, 1990) було виділено з нагрітих продуктів Амадорі та описано 1-дезоксигексосулози та 3-дезоксигексосулози. А в

1995 р. Трессл та ін. (Tressl, Nittka, & Kersten, 1995) відкрили новий погляд на схему реакції (рис. 2).

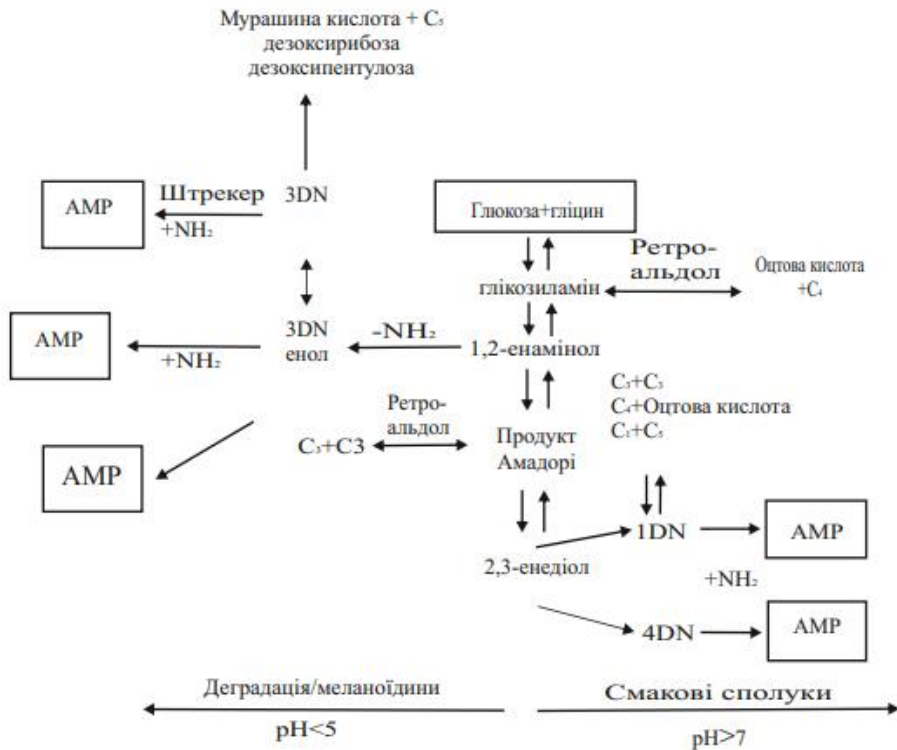


Рис. 2. Схема реакції Майяра глюкоза/гліцин*

Примітка.* Адаптована з (Tressl, Nittka, & Kersten, 1995), де AMP (Advanced Maillard Products) — продукти утворені внаслідок розширеної реакції Майяра; 1-DH (1-дезоксиди-2,3-дикетоза); 3-DH (3-дезоксисалядокетоза); 4-DH (4-дезоксиди-2,3-дикетоза)

Одночасно з реакціями енолізації продукт Амадорі та його дикарбонільні похідні можуть піддаватися ретро-альдольним реакціям, утворюючи більш реакційноздатні цукрові фрагменти C₂, C₃, C₄ і C₅, такі як похідні гідроксиацетону, гліцеральдегід і дикетони. Також слід зазначити, що ретроальдольні реакції стають більш активними при вищих значеннях pH.

Вчені Huyghues-Despointes & Yaylayan (Huyghues-Despointes & Yaylayan, 1996) дійшли висновку, що за основних умов APR може генерувати оцтову кислоту та пірувальдегід, а також інші нижчі цукри. Головним висновком цих вчених є те, що основною умовою формування смакоароматичних сполук є високе значення pH розчину.

Окрім ретро-альдольних реакцій виявлено три окисно-відновні механізми, в яких беруть участь α-гідроксикарбоніли, α-дикарбоніли і мурашина кислота. Berg, & Van Boekel (Berg, Van Boekel, 1994) повідомили про мурашину кислоту як про основний продукт реакції розкладання лактози в реакції Майяра. Van Boekel and Brands (Van Boekel, & Brands, 2005) повідомили, що мурашина кислота та оцтова

кислота є двома основними продуктами розкладання глюкози та фруктози в реакції Маяра.

Грунтуючись на висновках Тресла, Яйлаяном (Yaulyan, 1997) було розроблено концептуальне представлення процесів, що відбуваються під час реакції Маяра. Відповідно до цього представлення, реакція Маяра описується як перебіг шляхом утворення та взаємодії «хімічних пулів». Сукупність продуктів, що утворюються в результаті розкладання чітко визначеного прекурсора, називається пулом фрагментації, а група пов'язаних хімічних реакцій та їхніх продуктів називається пулом взаємодії. Фундаментальні реакції, які лежать в основі взаємодії пулу, класифікують відповідно до типу здійсненого хімічного перетворення. Важливість такої класифікації полягає в її здатності передбачати утворення продуктів реакції Маяра в модельних системах. Також відповідно до теорії Яйлаяна встановлено, що під час реакції Маяра амінокислоти та цукри також зазнають незалежної деградації, на додаток до звичайної деградації, де утворюється продукт Амадори.

Берг (Berg, 1993) у своїй дисертації дійшов висновку, що під час нагрівання молока реакції ізомеризації та деградації цукру, з кількісної точки зору, є більш важливими, ніж реакція Маяра. Також центральне значення продукту Амадори, яке раніше вважали основним проміжним продуктом реакції, ставиться під сумнів як у харчовій галузі (Molero-Vilchez, & Wedzicha, 1997), так і в медичній (Fu, Wells-Knecht, Blackledge, Lyons, Thorpe, & Baynes, 1994).

Отже, хімізм реакції Маяра, її перебіг, особливості та умови проведення все ще залишаються дискусійним питанням для вчених всього світу і вивчення цієї реакції продовжуються і нині.

Реакція Маяра та її вплив на якість і безпечність харчових продуктів.

Особливе місце реакція Маяра займає в харчових технологіях, оскільки її продукти впливають на колір, смак та аромат різноманітних харчових продуктів.

Позитивне значення цієї реакції в харчовій промисловості вперше було визнано 1912 р., коли з'ясувалося, що солодовий аромат в пивоварінні утворюється в результаті взаємодії редукувальних цукрів з лейцином (Lintner, & Brauw, 1912; Helling, & Henle, 2014), що пізніше було підтверджено Рукдешелем (Ruckdeschel, & Brauw, 1914). Але в цьому аспекті вже в 1927 р. Акаборі виявив, що альдегіди утворюються з високим виходом під час декарбоксілювання амінокислот у присутності глюкози (Akabori, 1927). Інші карбонільні сполуки, такі як гліюксаль, метилгліюксаль або діацетил, також призвели до утворення альдегідів (Neuberg, & Kobel, 1927).

Шенберг і Мухабер вперше продемонстрували, що для перебігу «деградації Штрекера» (1948 р.) завжди необхідні *вік*-дикарбонільні сполуки (будь-які діюли, у яких дві гідроксифункціональні групи приєднані до сусідніх атомів вуглецю), які виникають як проміжні продукти під час реакції Маяра (Schönberg, & Moubacher, 1952), що підтверджує постулат Рукдешля про утворення 3-метилбутаналю, важливої ароматичної сполуки в солоді, з лейцину під час деградації Штрекера (Damm, & Kringstad, 1964).

Відомо, що реакція Маяра відбувається в три стадії (Hodge, 1953). На ранньому етапі карбонільна група глюкози або відновлених цукрів реагує з аміногрупою

амінокислоти з утворенням основи Шиффа, подвійний зв'язок якої мігрує з утворенням сполуки Амадорі, стабільної проміжної сполуки. У проміжній фазі зі сполуки Амадорі утворюються різні види карбонільних сполук, особливо дикарбонільні сполуки, такі як 1-дезоксиглюкозон, 3-дезоксиглюкозон і метилглюкозаль. Ці дикарбонільні сполуки більш реакційноздатні, ніж вихідний матеріал або відновлюючий цукор. Реакційноздатні дикарбоніли реагують один з одним й аміногрупами амінокислот і білків, утворюючи колір або аромат.

На пізній стадії реакції Маяра відбуваються різні хімічні реакції, такі як конденсація, полімеризація, деградація, циклізація тощо, з утворенням меланоїдинів, які є гетерогенними полімерами.

Велике значення реакція Маяра має для визначення якості та безпечності харчових продуктів. Як правило, продукти реакції Маяра стимулюють апетит, а деякі генотоксичні сполуки, такі як акриламід і гетероциклічні ароматичні аміни, продукуються в цій реакції (Freedman, 2003; Carthewa, DiNovib, & Setzer, 2010).

У літературі зустрічається небагато даних про можливі ролі реакції Маяра в пригніченні росту мікроорганізмів у харчових продуктах. Так, у праці (Hebashi, Fadel, & Soliman, 1991) виділяли продукти реакції Маяра шляхом дефлегмації розчинів, що містять у своєму складі аспарагін і ксилізу, а потім досліджували їх активність на патогенних мікроорганізмах і мікроорганізмах псування, що найчастіше знаходяться в харчових продуктах. Був помітний незначний інгібуючий ефект відносно *St. aureus*. Але в той же час спостерігався зворотний ефект щодо *Bac. subtilis* та *E. coli*, а *Candida tropicalis* виявилась практично нечутливою до продуктів реакції Маяра.

Цікавим є факт, що продукти реакції Маяра проявляють ефективність у боротьбі з дріжджами, що має позитивний вплив на безпечність харчових продуктів і термін їх зберігання (Tauer, Elss, Frischmann, Tellez, & Pischetsrieder, 2004).

У табл. 1 наведені попередні дані про вплив деяких продуктів реакції Маяра на мікроорганізми.

Вперше негативний вплив продуктів реакції Маяра на життєдіяльність дріжджів у виробництві спирту був підтверджений Саттлером у 1949 р. (Sattler, & Zerbán, 1949; Finot, 2005). А вже за 10 років після цього Круг та ін. визначили ЛД₅₀ для різних продуктів реакції вільних амінокислот з глюкозою і встановили, що суміш лізину з цукром є найбільш токсичною (Krug, Prellwitz, Schäffner, Kieckbusch, & Lang, 1959).

Таблиця 1. Попередні звіти про вплив продуктів реакції Маяра на мікроорганізми *

Тип продуктів реакції Маяра	Мікроорганізми	Результат дослідження	Література
Акриламід	<i>Lactobacillus plantarum</i>	Зниження рівня акриламіду	(Baardseth et al. 2006)
	<i>Lactobacillus sakei</i> , <i>Pediococcus pentosaceus</i> та <i>P. acidilactici</i>	Зниження рівня акриламіду	(Chalova et al. 2012)

Продовження таблиці 1

Меланоїдини	<i>Salmonella Typhimurium</i>	Використання 15% меланоїдинів як джерела вуглецю та енергії	(Chalova et al. 2012)
	<i>E.coli</i>	Пригнічення темпів росту	(Rufian-Henares & Morales. 2008)
Гідроксиметилфурфурол	<i>Salmonella Typhimurium</i>	Мутагенність <i>Salmonella Typhimurium</i>	(Sommer et al. 2003)

Примітка. *Взято зі статті Аляхдалі & Карбонеро (ALjahdali, & Carbonero, 2017).

Фізіологічні ефекти зниження засвоюваності білків і всмоктування амінокислот, гіпертрофії органів, клітинних змін та зниження активності кишкових і підшлункових ферментів, печінкових ферментів, що метаболізують ліки, сироваткові трансамінази та лужної фосфатази, хелатування металів внаслідок вживання підсмажених і термічно оброблених продуктів або реакції між цукрами та вільними амінокислотами чи білками описано у багатьох працях, наприклад, Фіно та ін. (Finot, Deutsch, & Bujard, 1981; Finot, Aeschbacher, Hurell & Liardon, 1990). Усі ці ефекти були пов'язані з премеланоїдинами (Adrian, 1974).

Найбільш очевидним негативним ефектом є все ж токсичний ефект, що є результатом мутагенів і канцерогенів, що утворюються під час термічної обробки м'яса та риби (Sugimura, Takayama, Ohgaki, Finot, Aeschbacher, Hurrell, & Liardon, 1990). Також було ідентифіковано декілька гетероциклічних амінів, отриманих у результаті реакції Маяра в присутності креатиніну. Вони належать до класів імідазохінолінів та імідазохіноксалінів. Інші ж були виявлені в результаті нагрівання триптофану, глутамінової кислоти або фенілаланіну. Внаслідок цієї ідентифікації вдалося розробити чутливі методи виявлення деяких гетероциклічних амінів, що дало змогу уникнути їх утворення в м'ясній промисловості (Gross, & Aeschbacher, 1990).

Також до негативних наслідків реакції Маяра в харчових продуктах можна віднести втрату поживної цінності залучених білків із втратою якості та можливим зниженням безпеки харчових продуктів. Цю втрату пояснювали зниженням засвоюваності, руйнуванням та/або біологічною інактивацією амінокислот, включаючи незамінні амінокислоти, такі як лізін і триптофан, інгібуванням протеолітичних і гліколітичних ферментів і взаємодією з іонами металів (Ericksson, 1981; Namiki, 1988; Friedman, 1996). Окрім того, білкові молекули можуть бути зшиті продуктами реакції Маяра (Chuyen, Utsunomiya, & Kato, 1991; Pellegrino, Van Boekel, Gruppen, Resmini, & Pagani, 1999).

Втрату поживної цінності харчових продуктів пов'язують також з утворенням мутагенних сполук. Нагао та ін. ідентифікували мутагенні сполуки в розчинній каві та каві без кофеїну (Nagao, Takahashi, Yamanaka, & Sugimura, 1979). Вони склалися з дикарбонільних сполук, метилгліоксалу, діацетила та гліоксалу, з яких метилгліоксаль виявляє найвищу мутагенну активність; однак кількісної кореляції з канцерогенними властивостями виявлено не було.

У смаженому, особливо на грилі, м'ясі та рибі було ідентифіковано мутагенні сполуки, які в основному походять від гетероциклічних амінів (Arvidsson, Van Bo-

ekel, Skog, & Jagerstad, 1998). Але також було повідомлено, що флавоноїди інгібують утворення гетероциклічних мутагенів типу амінів (Lee, Jiaap, & Tsai, 1992). Є також відомості про антимутагенний ефект виявляють продукти реакції Маяра (Yen, Tsai, & Li, 1992; Lee, Chuyen, Hayase, & Kato, 1994).

Водночас механізм реакції має великий вплив на мутагенність продуктів реакції. До прикладу, кетозні цукри виявляють вищу мутагенну активність, ніж відповідні альдозні цукри (Brands, Alink, Van Boekel, & Jongen, 2000).

Щодо безпечності харчових продуктів, участь реакції Маяра в утворенні та елімінації мутагенів є питанням, яке ще потребує з'ясування. Донині немає даних про кореляцію цих сполук з раком людини.

Реакція Маяра також продукує антиоксидантні компоненти. Про одне з перших спостережень повідомили Гріффіт і Джонсон, які продемонстрували, що додавання 5% глюкози до цукрового печива спричинило помітне підрум'янювання печива та призвело до більшої стійкості до окиснювального згіркнення (Griffith, & Jonson, 1957). З моменту цього відкриття продукти реакції Маяра вивчалися з огляду на антиоксидантні властивості, здатні захищати їжу від окиснення ліпідів (Chuyen, Ijichi, Umetsu, & Moteki, 1998).

Цікавим є факт, що фізіологічні ефекти продукті реакції Маяра мають не тільки негативний вплив. Так, антимутагенні ефекти були продемонстровані в деяких продуктах Маяра, що певною мірою зрівноважує їх негативні дії.

У табл. 2 наведено характеристики впливу реакції Маяра на якість і безпечність для деяких харчових продуктів.

*Таблиця 2. Вплив реакції Маяра на якість і безпечність деяких харчових продуктів **

Якість і безпечність харчових продуктів	Приклад харчових продуктів або пояснення
Потемніння або пігментація	Колір пива, соєвого соусу, скоринки хліба та смаженої кави
Утворення аромату	Підсмажений хліб, м'ясо на грилі та смажена кава
Утворення підсилювача смаку	Варіння яловичого бульйону і дозрівання соєвого соусу
Властивість, схожа на харчові волокна	Меланоїдини є неперетравлюваними високомолекулярними речовинами
Антиоксидантна та антимутагенна активність	Окремі структури молекул ендіолу та енаміолу в меланоїдинах і різних сполуках, утворених за допомогою реакції Маяра
Втрата лізину	Тривале зберігання сухого молока
Утворення мутагенів	Акриламід і гетероциклічний ароматичний амін

Примітка. *Взято зі статті Мурата (Murata, 2021).

У табл. 3 наведено відомості, що характеризують зв'язок між реакцією Маяра та кольором, ароматом і смаком харчових продуктів. Як відомо, продукти реакції Маяра утворюються при нагріванні цукрів і амінокислот чи білків. Тож з цілковитою впевненістю можна казати, що коричневий колір і аромат карамелізації, який характерний для цієї реакції, свідчать про те, що продукт містить у своєму складі цукор та амінокислоту чи білок, що є важливо для споживачів, особливо

тих, кому споживати цукор протипоказано. Також, окрім підрум'янювання та аромату, останні дослідження показали, що різні продукти реакції Маяра діють як підсилювачі або модифікатори смаку (Shima, Yamada, Suzuki, & Harada, 1998; Ottinger, & Hofmann, 2003; Fetting, & Hofmann, 2010; Kaneko, Kumazawa, & Nishimura, 2011).

Таблиця 3. Зв'язок між реакцією Маяра та кольором, ароматом і смаком харчових продуктів *

Сприймання їжі людиною	Колір → (зовнішній вигляд) →	Аромат →	Смак → Споживання	Поживне або фізіологічне значення	Кількість споживання
Реакція Маяра	Підрум'янювання	Підігрітий або оброблений аромат	Підсилювач смаку	Впливає на колір, смак та запах їжі	Не нормується
Цукри та амінокислоти (при споживанні окремо одне від одного)	Характерний для спожитого продукту	Не утворюють	Солодкість і умами (цукор та амінокислоти відповідно)	Цукри — енергетичне значення; Амінокислоти — впливають на стан нервової системи, необхідні для формування росту м'язової маси	Цукор — у середньому 50 г/добу для дорослої людини. Амінокислоти — залежно від амінокислоти

Примітка. *Взято зі статті Мурата (Murata, 2021) та удосконалено.

Отже, існує багато аспектів якості і безпеки харчових продуктів, що стосуються реакції Маяра. Завдання технолога полягає в тому, щоб оптимізувати баланс між сприятливими та несприятливими ефектами реакції в технологічному процесі. Йдеться про оптимізацію втрат поживних речовин під час вологотермічного оброблення зернових, змін смаку та кольору при сушінні молока; максимізацію вироблення антиоксидантів тощо.

Розуміння реакції Маяра є додатковою умовою не лише для традиційних процесів смаження, випікання та варіння, але й для розроблення нових технологій, таких як мікрохвильова піч і технологія високого тиску (Ames, 1998; Shahidi, Ho, & Van Chuyen, 1998).

Вплив продуктів реакції Маяра на органолептичні характеристики продуктів. Походження летких сполук, що відповідають за формування аромату в тому чи іншому продукті й донині важко визначити через їх різноманітне походження та будову. Дослідники виявляють великий інтерес до вивчення цього питання, у т. ч. з метою контролю утворення характерних ароматів і кольорів харчових продуктів.

Розвиток останніми десятиріччями комбінованої газової хроматографії та мас-спектрометрії значно активізував аналіз сполук зі специфічним запахом, у т. ч. й ароматами, що утворюються під час реакції Маяра (Buckholz, 1988; Ho, 1996; Taylor, & Mottram, 1996; Chuyen, 1998). Так, наприклад, Лейн і Нурстен іденти-

фікували 12 амінокислот, п'ять-сім з яких, на їхню думку, разом із глюкозою беруть участь в утворенні аромату хліба, хрусткого печива, тістечок або тостів при кожній із чотирьох досліджуваних температур (Lane, & Nursten, 1983).

Форс, у свою чергу, опублікував літературний огляд сенсорних властивостей легких продуктів Маяра та споріднених сполук. У літературному огляді мова йде про якісний аромат і описи смаку, кольору та сенсорні порогові значення для різних сполук, класифікованих відповідно до хімічної структури (Fors, 1983).

Що ж стосується кольору, то відомо, що коричневий колір, який є характерним для реакції Маяра, зумовлюється меланоїдинами. Як відомо, на останній стадії реакції Маяра відбувається низка різних хімічних реакцій: конденсація, полімеризація, деградація, циклізація тощо, що супроводжується утворенням меланоїдинів, які є гетерогенними полімерами. Достеменно структура цих полімерів ще не вивчена й існує декілька теорій їх хімічної структури та утворення (Wang, Qjan, & Yao, 2011). Так, за однією з таких теорій основний скелет меланоїдинів складають насичені аліфатичні атоми вуглецю, що утворюється з продуктів розпаду цукру, розгалужених аміносполуками (Murata, 2021). Хаяс та ін. (Hayase, Kim, & Kato, 1986) завдяки спектроскопії ядерного магнітного резонансу запропонували інший полімер (Hayase, 1987; Murata, 2021). Відомо, що в модельній реакційній системі Маяра, яка містить лише моносахарид і амінокислоту, основний скелет, що утворює меланоїдини з високою молекулярною масою, вважається полімерами продуктів розпаду цукру, бо дикарбонільні сполуки, такі як 1-дезоксиглюкозон, 3-дезоксиглюкозон і метилглюксаль, можуть конденсуватися за допомогою альдольної реакції (Cammer, Jalyschko, & Kroh, 2002; Murata, 2021). Але самі по собі ці опорні структури не мають кольору. Тож згідно з цією теорією можна сказати, що меланоїдини повинні мати часткові структури різних хромофорів.

Відповідно до другої теорії утворення полімерів у реакції Маяра, що відповідають за колір, меланоїдини є полімерами низькомолекулярних пігментів, утворених із цукрів і амінокислот (Murata, 2021). Хаяс та ін. (Hayase, Usui, & Watanabe, 2006) продемонстрували, що блакитний пігмент, утворений під час реакції між ксилізою та гліцином, набуває коричневого кольору під час полімеризації. Канцлер і Гаазу (Kanzler, & Naase, 2020) припустили, що меланоїдини утворюються гетероциклічними проміжними продуктами реакції Маяра, через альдольну реакцію та доповнення Міхаеля (це реакція між донором Міхаеля (енолятом або іншим нуклеофілом) і акцептором Міхаеля (звичай α,β -ненасиченим карбонілом) з утворенням аддукту Міхаеля зі зв'язком вуглець-вуглець на β -вуглеці акцептора, тобто утворюються шляхом альдольної конденсації та приєднання за Міхаелем.

Хоффан у 1998 р. зробив припущення, що меланоїдини в їжі утворюються внаслідок зшивання білків (Hofmann, 1998). Також стало відомо, що меланоїдини не характеризуються специфічним максимумом поглинання області видимого світла (380—780 нм), що переконливо свідчить про те, що меланоїдини мають змішані хромофори.

Виділено та ідентифіковано різноманітні низькомолекулярні пігменти, утворені в результаті реакції Маяра. У деяких випадках ці пігменти значно підсилюють інтенсивність забарвлення (Murata, 2021). На завершальній стадії реакції Маяра кольорові проміжні продукти та інші реакційноздатні попередники (про-

дукти енамінолу, низькомолекулярні аналоги цукру, ненасичені карбонільні продукти) конденсуються та полімеризуються за участі амінного каталізатора з утворенням коричневих полімерів, що містять фуранове кільце з різноманітними функціональними групами, зокрема, карбонільні, карбоксильні, аміні, амідні, ефірні метильні та/або гідроксильні групи. (Ledl, & Schleider, 1990; Ames, Apriyanton, & Arnoldi, 1993; Tressl, Wondrack, Garbe, Krüger, & Rewicki, 1998).

Слід взяти до уваги, що виділення та ідентифікація забарвлених продуктів Маяра проводилися лише з використанням модельних систем, здебільшого для продуктів з низькою молекулярною масою (менше 500 Да). Так, Хашіба (Hshiba, 1982) порівнював активність взаємодії різних редукувальних цукрів з однією амінокислотою (гліцином) і зробив висновок, що потемніння прямо пропорційне відношуватися до здатності цукру та кількості гліцину.

Ріцці (Rizzi, 1997) зробив висновок, що багато кольорових продуктів є продуктами (ретро)альдолізації/дегідратації цукрів, які можуть або не можуть бути приєднані до білків або інших джерел амінного азоту.

Хофманн (Hoffman, 1999) за допомогою серії модельних дослідів та хімічних, інструментальних і сенсорних методів аналізу ідентифікував деякі продукти розкладання вуглеводів як попередники потемніння (дезоксизони, гліюксаль, метилгліюксаль, гідрокси-2-пропанон, 3-гідрокси-2-бутанон і гліюкоальдегід), що узгоджується з рис. 2, і продемонстрував, що їх активність у виробленні речовин, що зумовлюють колір продукту, змінюється під час термічного оброблення.

Ступінь потемніння часто визначається аналітично для оцінки інтенсивності реакції Маяра та, як правило, вимірюється за допомогою поглинання при 420 нм (Baisier, & Labuza, 1992).

Реакція Маяра в експертизі харчових продуктів. Перспективним є використання реакції Маяра в експертизі харчових продуктів.

Наприклад, з метою ідентифікації яблучних оцтів запропоновано вимірювати їх хроматичні характеристики, розроблено методику прогнозування термінів зберігання яблучних оцтів на підставі результатів вимірювання інтенсивності забарвлення оцтів, зумовленого продуктами реакції Маяра, та її зміни під час зберігання (Севодіна, 2009).

В органолептичній оцінці якості молочного кондитерського продукту дульсе де лече, популярного в регіоні Ріо-де-ла-Плата, колір є критично важливим параметром, що визначає вибір споживача. Розроблено метод (Rodríguez, Lema, Bessio, Moyna, Panizzolo, & Ferreira, 2019) отримання попередньої структурної характеристики хромофорів, утворених під час реакції Маяра в технології цього продукту. Встановлено, що утворені меланоїдини мають молекулярну масу в діапазоні від 300 до 2000 Да, проте сполуки з більшою молекулярною масою найбільше сприяють забарвленню молочного продукту.

Визначення фуринозу, одного з продуктів реакції Маяра та непрямого показника білково-зв'язаного лактулозил-лізину, широко використовується для оцінки якості макаронних виробів (García-Baños, Corzo, Sanz, & Olano, 2004), сухих молочних продуктів (Rutherford, Darragh, Hendriks et al. 2006).

Повідомлялося (Olano, Calvo, & Corzo, 1989) про відмінності в хімічному складі стерилізованого молока і молока, обробленого надвисокою температурою. При цьому рівень HMF, що утворюється під час нагрівання, може бути маркером

інтенсивності утворення продуктів реакції Маяра у виробництві пряженого чи згущеного молока. Однак кількість НМФ, що накопичується в молоці під час оброблення надвисокою температурою, залежить від таких факторів, як наявність вітаміну А, казеїну чи заліза (Albala-Hurtado, Vecianna-Nogues, Marine-Font, & Vidal-Carou, 1999). Індикатором завершення реакції Маяра може слугувати колір продукту (Park, & Hong, 1991).

Під час зберігання харчових продуктів і біологічних систем разом із коричневими пігментами через реакцію Маяра утворюються також і флуоресцентні продукти (Matiacevich, & Pilar Buera, 2006), які можуть слугувати ранніми індикаторами для цієї реакції. Матячевич і Пілар Буера (Matiacevich, & Pilar Buera, 2006) показали, що за несприятливих умов для реакції (низький рН, прискорювальні солі) флуоресцентні продукти можна вважати її адекватними маркерами, у т. ч. на ранніх етапах реакції.

Метод молекулярної флуоресценції надає можливість виявити фальсифікацію молока (Іщенко, 2018), завдяки визначенню зміни у спектрах поглинання та флуоресценції 330—420 нм. Флюорофорами молока є продукти реакції Маяра, ароматичні аміносполуки, NADH/FADH та рибофлавін.

У дослідженні (Ríos-Ríos, Vázquez-Barríos, Gaytán-Martínez, Olano, Montilla, & Villamiel, 2018) повідомляється про утворення 2-фурометил-амінокислот (2-FM-AA) як індикаторів реакції Маяра у виробництві чорного часнику з подальшим визначенням вмісту фуразину за допомогою іонної пари RP-HPLC-UV. Для цього було проведено аналіз продукції, отриманої традиційним способом — конвекційним сушінням (CDP), та за допомогою омичного нагрівання (OHP). Окрім фуразину (2-FM-лізин) виявлено 2-фуроїлметил-γ-аміномасляну кислоту та 2-FM-аргінін. Рівень фуразину був вищим у зразках, отриманих конвекційним сушінням (46,6—110,1 мг/100 г білка), ніж у зразках омичного нагрівання (13,7—42,0 мг/100 г білка), ймовірно, через суворіші умови оброблення, які використовувалися в першому. Ці результати підкреслюють придатність 2-FM-AA як хімічних індикаторів для моніторингу процесу оброблення часнику з метою отримання продуктів високої якості.

Завдяки дослідженням (del Castillo, Villamiel, Olano, & Corzo, 2000) встановлено утворення 2-фуроїлметильних похідних аміномасляної кислоти (2-FM-GABA) і аргініну (2-FM-Arg) як ранніх індикаторів неферментативного потемніння в різних типах апельсинового соку. Так, у зневодненому апельсиновому соку присутність 2-FM-GABA і 2-FM-Arg було виявлено вже з першого дня зберігання за 30 °C. У цьому типі соку вміст цих двох сполук збільшувався зі зростанням температури (30, 50 °C) і терміну (1—7 днів) зберігання. Встановлено, що утворення 2-FM-GABA та 2-FM-Arg у рідкому апельсиновому соку, нагрітому в умовах, подібних до тих, що використовуються в промисловості, не було виявлено. Згідно з отриманими результатами, вміст 2-FM-GABA і 2-FM-Arg може бути придатним індикатором для оцінки основних модифікацій внаслідок реакції Маяра, що виникає під час виробництва та/або зберігання концентратів апельсинового соку.

Окрім утворення кольору та смаку, реакція Маяра впливає на утворення аромату. Щоправда, отримані ключові ароматичні сполуки часто присутні лише в залишкових концентраціях від 1 мкг/кг до 1 мг/кг. Однак вони сприяють створенню

відповідного смаку через низький поріг сприйняття запаху. Хоча проміжні продукти Маяра, такі як сполуки Амадорі та дезоксиозони, утворюються у відсотках під час модельних реакцій, вихід ароматичних сполук, зокрема азотовмісних і сірковмісних, часто становить лише 0,001—0,01 мол.%, що вказує на їхнє утворення через побічні хімічні реакції. Так, Cerny (Cerny, 2007) стверджує, що леткі речовини реакції Маяра, які визначають смак їжі, як правило, присутні лише в невеликих кількостях. Кисневмісні ароматичні сполуки, такі як: 2,3-бутандіон, 2,3-пентадіон, метилпропаналь, 3-метилбутаналь, фенілацетальдегід, 3-гідрокси-4,5-диметил-2(3H)фуранон (сотолон) і 2,5-диметил-4-гідрокси-3(2H)-фуранон (Furapenol; Firmenich, Швейцарія) зустрічаються в концентраціях від 1 мкг/кг для сотолону до 100 мг/кг для 3-метилбутаналю і фуранолу. Водночас 2-етил-3,5-диметилпіразин, 2,3-діетил-5-метилпіразин і 2-ацетил-1-піролін є прикладами азотовмісних ароматичних сполук. Вони присутні в їжі в концентраціях 0,001—10 мг/кг. Загалом, сірковмісні ароматичні сполуки реакції Маяра є найпотужнішими ароматичними сполуками і часто відіграють, хоча й у невеликих кількостях, але все ж домінуючу роль у смаку вареного м'яса та смаженої кави. До прикладу, це можуть бути 2-фурфурилтіол, 20метил-3-фурантіол, 3-меркапто-2-пентанон та метіонал.

Xu et al. (Xu, Cui, Sun, Jia, Zhang, Hussan, & Hayat, 2019) дійшли висновку, що реакція Маяра у водному середовищі під дією температури в поєднанні з вакуумною дегідратацією є новою перспективною технологією для отримання проміжних продуктів реакції Маяра (MRIs), таких як продукти перегрупування Амадорі чи Гейнса, які вважають важливими нелеткими попередниками аромату зі стабільними фізико-хімічними властивостями порівняно з продуктами реакції Маяра (MRP). MRIs, отримані з глютамінової кислоти та ксилози, є потенційною заміною MRP для приготування харчових ароматизаторів.

Реагентами для отримання м'ясних ароматизаторів є ферментативні гідролізати (Cheserek, Hayat, Savio, Amédée, & Zhang, 2013; Lieske, 1994; Liu, Huang, Song, Hayat, Zhang, Xia, & Jia, 2012; Song, & Xia, 2008). Lieske і Konrad (Lieske, & Konrad, 1994) повідомили, що пептидна фракція 2000—5000 Да в курячому ферментативному гідролізаті відповідає за інтенсивний аромат смаженої курки. Тим часом Лю та ін. (Liu, Liu, He, Song, & Chen, 2015) показали, що MRP курячого ферментативного гідролізату, пептидна фракція яких менше 500 Да, сприяли аромату смаженої курки, пептидна фракція більше 1000 Да, отримана зшиванням пептидної фракції менше 500 Да, надала смаку кокумі, а пептидна фракція більше 3000 Да давала гіркий смак. Дослідження (Kang, Alim, & Song, 2019) продемонструвало можливість використання для приготування ароматизаторів фракцій RP-HPLC (F-3-F-8) як пептидів-попередників смаку. Проте літературних джерел, щодо структурних властивостей і механізму дії пептидів, які беруть участь у виробленні сполук м'яса за допомогою реакції Маяра, ще недостатньо. Подальші дослідження механізмів формування м'ясного аромату та смакоактивних речовин з MRP та MRIs є перспективними для проведення ідентифікації смакових речовин.

У дослідженні (Peresto, Silva, & Câmara, 2019) йдеться про профілювання летких речовин у винах Мадери та їх зв'язок з дескрипторами запахів. Установлено зв'язок між сортовими, ферментативними та старіючими ароматичними сполуками та їхніми дескрипторами запаху з сенсорним аналізом вина Мадера. За

складом аромату можна переконатися, що сорт винограду є важливим параметром, який впливає на сенсорні властивості молодих вин Мадери, тоді як на старі вина сильно впливає процес витримки. Реакція Маяра та дифузія з дуба були найважливішими факторами, пов'язаними з цими дескрипторами. Детальна база даних щодо летких речовин вина Мадера та відповідних дескрипторів аромату може бути майбутнім інструментом, який допоможе виноробам ідентифікувати аромат вина, його вік і сорт винограду, з якого виготовлено вино.

Отже, продукти реакції Маяра можуть бути маркерами для ідентифікації та виявлення фальсифікації широкого спектра харчових продуктів. Проте кількість розроблених методик недостатня, і рівень їх використання у практичній експертизі харчової продукції залишається обмеженим.

Висновок

Реакція Маяра — провідна реакція харчових технологій, в основі якої лежить взаємодія цукрів з амінокислотами. Ця реакція не втратила своєї міждисциплінарної актуальності навіть після понад ста років з моменту відкриття, проте є складною і досі повністю не вивченою.

Продукти реакції Маяра відіграють важливу роль в оцінці якості харчових продуктів, адже вони визначають колір, смак і аромат харчової продукції та можуть слугувати маркерами для ідентифікації, визначення показників якості та виявлення фальсифікації харчового продукту. Проте методик, які б дали змогу використати реакцію Маяра для цілей експертизи харчових продуктів, недостатньо, що робить напрям досліджень перспективним.

Література

- Іщенко, В. М., Кочубей-Литвиненко, О. В., Квітковська, Н. П., Якімінська, А. Г., & Іщенко, М. В. (2018). Застосування молекулярної абсорбційної та емісійної спектроскопії для виявлення фальсифікації пастеризованого молока. *Наукові праці НУХТ*, 24(5), 236—243.
- Севодіна, К. В. (2009). Розроблення методу ідентифікації та оцінки термінів зберігання яблучного соку. (Doctoral dissertation, Кемеровський технологічний інститут харчової промисловості).
- Adrian, J. (1974). Nutritional and physiological consequences of the Maillard reaction. *World review of nutrition and dietetics*, 19, 71—122. DOI:10.1159/000394766.
- Akabori, S. (1927). Oxidation of Amino-acids with Sugars. *Proceedings of the Imperial Academy*, 3(10), 672—674.
- Aljehdali, N., & Carbonero, F. (2019). Impact of Maillard reaction products on nutrition and health: Current knowledge and need to understand their fate in the human digestive system. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(3), 474—487. DOI:10.1080/10408398.2017.1378865.
- Albalá-Hurtado, S., Veciana-Nogués, M. T., Mariné-Font, A., & Vidal-Carou, M. C. (1999). Progress of browning reactions during storage of liquid infant milks. *Journal of agricultural and food chemistry*, 47(10), 4033—4037. DOI: 10.1021/jf9813337.
- Ames, J. M. (1998). Applications of the Maillard reaction in the food industry. *Food Chemistry*, 62(4), 431—439. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00078-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00078-8).
- Ames, J. M., Apriyanton, A., & Arnoldi, A. (1993). 'Low Molecular Weight Colored Compounds Formed from Xylose-lysine Model Systems', *Food Chem.* 46, 121—127.
- Arvidsson, P., Van Boekel, M. A. J. S., Skog, K., & Jägerstad, M. (2005). Formation of mutagenic Maillard reaction products. In *The Maillard reaction in foods and medicine* (pp. 219—224). Woodhead Publishing.
- Baisier, W. M., & Labuza, T. P. (1992). Maillard browning kinetics in a liquid model system.

- Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(5), 707—713. <https://doi.org/10.1021/jf00017a001>.
- Baardseth, P., Blom, H., Skrede, G., Mydland, L. T., Skrede, A., & Slinde, E. (2006). Lactic acid fermentation reduces acrylamide formation and other Maillard reactions in French fries. *Journal of Food science*, 71(1), C28—C33. DOI:10.1111/j.1365-2621.2006.tb12384.x.
- Bartkiene, E., Jakobsone, I., Pugajeva, I., Bartkevics, V., Zadeike, D., and Juodeikiene, G. (2016). Reducing of acrylamide formation in wheat biscuits supplemented with flaxseed and lupine. *Lwt-Food Science and Technology*. 65: 275—282. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.002>.
- Berg, H. E. (1993). *Reactions of lactose during heat treatment of milk: a quantitative study*. PhD thesis, Wageningen University and Research, NL.
- Berg, H. E., & Van Boekel, M. A. J. S. (1994). Degradation of lactose during heating of milk. 1. Reaction pathways. *Netherlands Milk and Dairy Journal*, 48, 157—175.
- Brands, C. M., Alink, G. M., van Boekel, M. A., & Jongen, W. M. (2000). Mutagenicity of heated sugar — casein systems: Effect of the Maillard reaction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(6), 2271—2275. DOI: 10.1021/jf9907586.
- Buckholz, L. L. (1988). THE ROLE OF MAILLARD TECHNOLOGY IN FLAVORING FOOD-PRODUCTS. *Cereal Foods World*, 33(7), 547—551.
- Cämmerer, B., Jalyschko, W., & Kroh, L. W. (2002). Intact carbohydrate structures as part of the melanoidin skeleton. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(7), 2083—2087. DOI: 10.1021/jf011106w.
- Carthewa, P., DiNovib, M., Setzer, R. W. (2010). Application of the margin of exposure (MOE) approach to substances in food that are genotoxic and carcinogenic. Example: CAS No: 105650-23-5 PhIP (2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine). *Food Chem. Toxicol.* 48, 598—510.
- Cerny, C. (2008). The aroma side of the Maillard reaction. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1126(1), 66—71. DOI:10.1196/annals.1433.011.
- Chalova, V. I., Hernandez-Hernandez, O., Muthaiyan, A., Sirsat, S. A., Natesan, S., Luz Sanz, M., Javier Moreno, F., O'Bryan, C. A., Crandall, P. G., and Ricke, S. C. (2012). Growth and transcriptional response of Salmonella Typhimurium LT2 to glucose-lysine-based Maillard reaction products generated under low water activity conditions. *Food Res Int.* 45: 1044—1053.
- Chhuy, L. C., & Day, E. A. (1978). U.S. Patent No. 4,081,565. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Chuyen, N. V. (1998). Maillard reaction and food processing: application aspects. *Process-induced chemical changes in food*, 213—235. DOI:10.1007/978-1-4899-1925-0_18.
- Chuyen, N. V., Ijichi, K., Umetsu, H., & Moteki, K. (1998). Antioxidative properties of products from amino acids or peptides in the reaction with glucose. *Process-induced chemical changes in food*, 201—212. DOI:10.1007/978-1-4899-1925-0_17.
- Chuyen, N. V., Utsunomiya, N., & Kato, H. (1991). Nutritional and Physiological Effects of Casein Modified by Glucose Under Various Conditions on Growing and Adults Rats. *Agric. Biol. Chem.* 55, 657—664.
- Damm, E., & Kringstad, H. (1964). Volatile carbonyl compounds in barley and malts. *Journal of the Institute of Brewing*, 70(1), 35—42.
- Del Castillo, M. D., Villamiel, M., Olano, A., & Corzo, N. (2000). Use of 2-furoylmethyl derivatives of GABA and arginine as indicators of the initial steps of Maillard reaction in orange juice. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(9), 4217—4220. doi: 10.1021/jf991298j.
- Eric, K., Raymond, L. V., Huang, M., Cheserek, M. J., Hayat, K., Savio, N. D., ..., & Zhang, X. (2013). Sensory attributes and antioxidant capacity of Maillard reaction products derived from xylose, cysteine and sunflower protein hydrolysate model system. *Food Research International*, 54(2), 1437—1447. DOI:10.1016/j.foodres.2013.09.034.
- Ericksson, C., Asp, N. G., & Theander, O. (1981) 'Maillard Reaction in Food: Chemical, Physiological and Technological Aspects'. *Progress in Food and Nutrition Science* 5(1—6): 1—3.
- Festring, D., & Hofmann, T. (2010). Discovery of N 2-(1-carboxyethyl) guanosine 5'-monophosphate as an umami-enhancing Maillard-modified nucleotide in yeast extracts. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(19), 10614—10622. DOI: 10.1021/jf102899j.
- Finot, P. A. (2005). Historical perspective of the Maillard reaction in food science. *Annals of the*

New York Academy of Sciences, 1043(1), 1—8. DOI: 10.1196/annals.1333.001.

Finot, P. A. 1990. Metabolism and physiological effects of Maillard reaction products. In *The Maillard Reaction in Food Processing, Human Nutrition, and Physiology*. P. A. Finot, H. U. Aeschbacher, R. F. Hurrell, & R. Liardon, Eds.: 259—272. *Advances in Life Sciences*. Birkhäuser Verlag, Basel, CH.

Finot, P. Aeschbacher, H. U., Hurrell, R. F., & Liardon, R. (Ed.). (1990). *The Maillard reaction in food processing, human nutrition and physiology*. Springer Science & Business Media. Basel, Switzerland.

Finot, P. A. (1981). The extent of the Maillard reaction during the processing of milk. *Prog. Food Nutr. Sci.*, 5, 345—355.

Fors, S. (1983). Sensory properties of volatile Maillard reaction products and related compounds, a literature review. In *The Maillard reaction in foods and nutrition*. ACS Symp. Ser., 1983 (Vol. 215, pp. 185—286). American Chemical Society.

Friedman, M. (2003). Chemistry, biochemistry, and safety of acrylamide. A review. *Journal of agricultural and food chemistry*, 51(16), 4504—4526. DOI: 10.1021/jf030204+.

Friedman, M. (1996). Food browning and its prevention: an overview. *Journal of Agricultural and Food chemistry*, 44(3), 631—653. <https://doi.org/10.1021/jf950394r>.

Fu, M. X., Wells-Knecht, K. J., Blackledge, J. A., Lyons, T. J., Thorpe, S. R., & Baynes, J. W. (1994). Glycation, glycooxidation, and cross-linking of collagen by glucose: kinetics, mechanisms, and inhibition of late stages of the Maillard reaction. *Diabetes*, 43(5), 676—683. DOI: 10.2337/diab.43.5.676.

Garcia-Banos, J. L., Corzo, N., Sanz, M. L., & Olano, A. (2004). Maltulose and furosine as indicators of quality of pasta products. *Food Chemistry*, 88(1), 35—38. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.01.018.

Ghiron, A. F., Quack, B., Mawhinney, T. P., & Feather, M. S. (1988). Studies on the role of 3-deoxy-D-erythro-glucosulose (3-deoxyglucosone) in nonenzymic browning. Evidence for involvement in a Strecker degradation. *Journal of Agricultural and Food chemistry*, 36(4), 677—680. <https://doi.org/10.1021/jf00082a002>.

Griffith, T., & Johnson, J. A. (1957). Relation of the browning reaction to storage of sugar cookies. *Cereal Chem.*, 34, 159—169.

Gross, G. A., & Aeschbacher, H. U. (1990). Micromethods for the determination of heterocyclic amines. *The Maillard Reaction in Food Processing, Human Nutrition, and Physiology*. P. A. Finot, H. U. Aeschbacher, R. F. Hurrell & R. Liardon, Eds, 355—360.

Hashiba, H. (1982). The browning reaction of Amadori compounds derived from various sugars. *Agricultural and Biological Chemistry*, 46(2), 547—548.

Hayase, F., Kim, S. B., & Kato, H. (1986). Analyses of the chemical structures of melanoidins by ¹³C NMR, ¹³C and ¹⁵N CP-MAS NMR spectrometry. *Agricultural and Biological Chemistry*, 50(8), 1951—1957. DOI:10.1271/bbb1961.50.1951.

Hayase, F., Usui, T., & Watanabe, H. (2006). Chemistry and some biological effects of model melanoidins and pigments as Maillard intermediates. *Molecular nutrition & food research*, 50(12), 1171—1179. DOI: 10.1002/mnfr.200600078.

Hayase, F. (1987). Chemistry of melanoidins (in Japanese). *Nippon Nōgeikagaku Kaishi*. 61, 970—973.

Hebash, K. A., Fadel, H. M., & Soliman, M. (1991). Volatile components of grape leaves. *Medical Journal of Islamic World Academy of Sciences*, 4(1), 26—28.

Hellwig, M., & Henle, T. (2014). Baking, ageing, diabetes: a short history of the Maillard reaction. *Angewandte Chemie International Edition*, 53(39), 10316—10329. DOI: 10.1002/anie.201308808.

Ho, C. T. (1996). 'Thermal Generation of Maillard Aromas' in *The Maillard Reaction: Consequences for the Chemical and Life Sciences* (Ikan, R., ed), pp. 27—53, John Wiley and sons Ltd, Chichester, England.

Hodge, J. E. Dehydrated foods: chemistry of browning reactions in model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1953; 1(15): 928—943. DOI: 10.1021/jf60015a004.

Hofmann, T. (1999). Quantitative studies on the role of browning precursors in the Maillard reaction of pentoses and hexoses with L-alanine. *European food research and technology*, 209, 113—

121. <https://doi.org/10.1007/s002170050468>.

Hofmann, T. (1998). Studies on the relationship between molecular weight and the color potency of fractions obtained by thermal treatment of glucose/amino acid and glucose/protein solutions by using ultracentrifugation and color dilution techniques. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(10), 3891—3895.

Huber, B., & Ledl, F. (1990). Formation of 1-amino-1, 4-dideoxy-2, 3-hexodiuloses and 2-amino-acetylfurans in the Maillard reaction. *Carbohydrate research*, 204, 215—220. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(90\)84037-U](https://doi.org/10.1016/0008-6215(90)84037-U).

Huyghues-Despointes, A., & Yaylayan, V. A. (1996). Retro-aldol and redox reactions of Amadori compounds: mechanistic studies with variously labeled D-[13C] glucose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(3), 672—681. DOI:10.1021/jf9502921.

Kaneko, S., Kumazawa, K., & Nishimura, O. (2011). Isolation and identification of the umami enhancing compounds in Japanese soy sauce. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 75(7), 1275—1282. DOI: 10.1271/bbb.110041.

Kang L, Alim A, & Song H. Identification and characterization of flavor precursor peptide from beef enzymatic hydrolysate by Maillard reaction. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*. 2019. Jan 1; 1104: 176—181. DOI: 10.1016/j.jchromb.2018.10.025. Epub 2018 Oct 24. PMID: 30502563.

Kanzler, C., & Haase, P. T. (2020). Melanoidins formed by heterocyclic Maillard reaction intermediates via aldol reaction and Michael addition. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(1), 332—339. DOI: 10.1021/acs.jafc.9b06258.

Krug, E., Prellwitz, W., Schäffner, E., Kiebusch, W., & Lang, K. (1959). Thermische Eiweissveränderungen und biologische Wertigkeit. *Naturwissenschaften*, 46, 534—534.

Lane, M. J., & Nursten, H. E. (1983). The variety of odors produced in Maillard model systems and how they are influenced by reaction conditions. 215, 141—158.

Ledl, F., & Schleicher, E. (1990). New aspects of the Maillard reaction in foods and in the human body. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 29(6), 565—594.

Lee, H., Jiaan, C. Y., & Tsai, S. J. (1992). Flavone inhibits mutagen formation during heating in a glycine/creatinine/glucose model system. *Food chemistry*, 45(4), 235—238. DOI: 10.1016/0308-8146(92)90152-R.

Lee, I. E., Van Chuyen, N., Hayase, F., & Kato, H. (1994). Desmutagenicity of melanoidins against various kinds of mutagens and activated mutagens. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 58(1), 18—23. DOI: 10.1271/bbb.58.18.

Lieske, B., & Konrad, G. (1994). Protein hydrolysis — The key to meat flavoring systems. *Food Reviews International*, 10(3), 287—312. DOI:10.1080/87559129409541004.

Lintner, C. J., & Brauw, Z. ges. (1912), 35, 545—548.

Liu, P., Huang, M., Song, S., Hayat, K., Zhang, X., Xia, S., & Jia, C. (2012). Sensory characteristics and antioxidant activities of Maillard reaction products from soy protein hydrolysates with different molecular weight distribution. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1775—1789. DOI:10.1007/s11947-010-0440-3.

Liu, J., Liu, M., He, C., Song, H., & Chen, F. (2015). Effect of thermal treatment on the flavor generation from Maillard reaction of xylose and chicken peptide. *LWT-Food Science and Technology*, 64(1), 316—325. DOI:10.1016/j.lwt.2015.05.061.

Maillard, L. C., & Hebd, C. R. (1912). b. Réaction générale des acides aminés sur les sucres: Ses conséquences biologiques. *Seances Mem. Soc. Biol*, 72, 599—601.

Martins, S. I., Jongen, W. M., & Van Boekel, M. A. (2000). A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. *Trends in food science & technology*, 11(9—10), 364—373. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00022-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00022-X).

Matiacevich, S. B., & Buera, M. P. (2006). A critical evaluation of fluorescence as a potential marker for the Maillard reaction. *Food Chemistry*, 95(3), 423—430. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.027>.

Mc Weeny, D. J., Knowles, M. E., & Hearne, J. F. (1974). The chemistry of non-enzymic browning in foods and its control by sulphites. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 25(6), 735—746. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740250616>.

- Molero-Vilchez, M. D., & Wedzicha, B. L. (1997). A new approach to study the significance of Amadori compounds in the Maillard reaction. *Food Chemistry*, 58(3), 249—254. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(96\)00227-0](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(96)00227-0).
- Murata, M. (2021). Browning and pigmentation in food through the Maillard reaction. *Glyco-conjugate Journal*, 38, 283—292. <https://doi.org/10.1007/s10719-020-09943-x>.
- Nagao, M., Takahashi, Y., Yamanka, H., & Sugimura, T. (1979). Mutagens in coffee and tea. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 68(2), 101—106. DOI: 10.1016/0165-1218(79)90137-x.
- Namiki, M. (1988). Chemistry of Maillard reactions: recent studies on the browning reaction mechanism and the development of antioxidants and mutagens. *Advances in food research*, 32, 115—184. DOI: 10.1016/s0065-2628(08)60287-6.
- Neuberg, C., M. Kobel, *Biochem. Z.* 1927, 185, 477—479.
- Nursten, H. E. (2005). *The Maillard reaction: chemistry, biochemistry and implications*. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1021/ja059794d>.
- Olano, A., Calvo, M. M., & Corzo, N. (1989). Changes in the carbohydrate fraction of milk during heating processes. *Food Chemistry*, 31(4), 259—265. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(89\)90067-8](https://doi.org/10.1016/0308-8146(89)90067-8).
- Oliver, C. M., Melton, L. D., & Stanley, R. A. (2006). Creating proteins with novel functionality via the Maillard reaction: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 46(4), 337—350. DOI:10.1080/10408690590957250.
- Ottinger, H., & Hofmann, T. (2003). Identification of the taste enhancer alapyridaine in beef broth and evaluation of its sensory impact by taste reconstitution experiments. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(23), 6791—6796. DOI: 10.1021/jf034788r.
- Park, Y. H., & Hong, Y. H. (1991). Comparison of the heat treatment intensity in infant formulae. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 23(5), 627—632.
- Pellegrino, L., Van Boekel, M. A. J. S., Gruppen, H., Resmini, P., & Pagani, M. A. (1999). Heat-induced aggregation and covalent linkages in β -casein model systems. *International Dairy Journal*, 9(3—6), 255—260. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(99\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(99)00071-0).
- Perestrelo, R, Silva, C, Câmara, J. S. Madeira Wine Volatile Profile. A Platform to Establish Madeira Wine Aroma Descriptors. *Molecules*. 2019 Aug 21; 24(17): 3028. PMID: 31438523; PMCID: PMC6749321. DOI: 10.3390/molecules24173028.
- Ríos-Ríos, K. L., Vázquez-Barrios, M. E., Gaytán-Martínez, M., Olano, A., Montilla, A., Villamiel, M. (2018). 2-Furoylmethyl amino acids as indicators of Maillard reaction during the elaboration of black garlic. *Food Chem.* 1; 240: 1106—1112. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.08.016.
- Rizzi, G. P. (1997). Chemical structure of colored Maillard reaction products. *Food Reviews International*, 13(1), 1—28. <https://doi.org/10.1080/87559129709541096>.
- Rodríguez, A., Lema, P., Bessio, M. I., Moyna, G., Panizzolo, L. A., & Ferreira, F. (2019). Isolation and characterization of melanoidins from dulce de leche, a confectionary dairy product. *Molecules*, 24(22), 41—63. doi: 10.3390/molecules24224163.
- Rufián-Henares, J. A., & Morales, F. J. (2008). Microtiter plate-based assay for screening antimicrobial activity of melanoidins against *E. coli* and *S. aureus*. *Food chemistry*, 111(4), 1069—1074. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.05.027.
- Ruckdeschel, W., Z. ges. Brauw. 1914, 37, 430—432.
- Rutherford, S. M., Darragh, A. J., Hendriks, W. H., Prosser, C. G., & Lowry, D. (2006). True ileal amino acid digestibility of goat and cow milk infant formulas. *Journal of dairy science*, 89(7), 2408—2413. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(06)72313-X.
- Sattler, L., & Zerban, F. W. (1949). Unfermentable Reducing Substances in Molasses. Volatile Decomposition Products of Sugars and their Role in Melanoidin Formation. *Industrial & Engineering Chemistry*, 41(7), 1401—1407. DOI:10.1021/ie50475a025.
- Schonberg, A., & Moubacher, R. (1952). The Strecker degradation of α -amino acids. *Chemical Reviews*, 50(2), 261—277. <https://doi.org/10.1021/cr60156a002>.
- Shahidi, F., Ho, C. T., & Van Chuyen, N. (Eds.). (1998). *Process-induced chemical changes in food* (Vol. 434). Springer Science & Business Media. DOI: 10.1007/978-1-4899-1925-0_1.
- Shima, K., Yamada, N., Suzuki, E. I., & Harada, T. (1998). Novel brothy taste modifier isolated from beef broth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(4), 1465—1468. DOI:10.1021/jf9708709.

Song, H., & Xia, L. (2008). Aroma extract dilution analysis of a beef flavouring prepared from flavour precursors and enzymatically hydrolysed beef. *Flavour and fragrance journal*, 23(3), 185—193. DOI:10.1002/ffj.1873.

Sommer, Y., Hollnagel, H., Schneider, H., & Glatt, H. R. (2003, March). Metabolism of 5-hydroxymethyl-2-furfural (HMF) to the mutagen 5-sulfoxymethyl-2-furfural (SMF) by individual sulfo-transferases. In *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology* (Vol. 367, pp. R166—R166). 175 FIFTH AVE, NEW YORK, NY 10010 USA: SPRINGER-VERLAG. DOI:10.1007/s00210-003-0739-y.

Sugimura, T., Takayama, S., Ohgaki, H., Wakabayashi, K., & Nagao, M. (1990). Mutagens and carcinogens formed by cooking meat and fish: heterocyclic amines. *The Maillard reaction in food processing, human nutrition and physiology*, 323—334. DOI: 10.1111/j.1349-7006.2004.tb03205.x.

Tauer, A., Elss, S., Frischmann, M., Tellez, P., & Pischetsrieder, M. (2004). Influence of thermally processed carbohydrate/amino acid mixtures on the fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(7), 2042—2046. DOI:10.1021/jf034995r.

Taylor, A. J. and Mottram, D. S. (1996). 'Flavour in Science. Recent Developments', Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.

Tressl, R., Nittka, C., Kersten, E., & Rewicki, D. (1995). Formation of isoleucine-specific Maillard products from [1-13C]-D-glucose and [1-13C]-D-fructose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(5), 1163—1169. <https://doi.org/10.1021/jf00053a009>.

Tressl, R., Wondrak, G. T., Garbe, L. A., Krüger, R. P., & Rewicki, D. (1998). Pentoses and hexoses as sources of new melanoidin-like Maillard polymers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(5), 1765—1776. DOI: 10.1021/jf970973r.

Van Boekel, M. A. J. S., & Brands, C. M. J. (2005). Heating of sugar-casein solutions: isomerization and Maillard reactions. In *The Maillard reaction in foods and medicine* (pp. 154—159). Woodhead Publishing. DOI:10.1533/9781845698447.4.154.

Wang, H. Y., Qian, H., & Yao, W. R. (2011). Melanoidins produced by the Maillard reaction: Structure and biological activity. *Food chemistry*, 128(3), 573—584. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.03.075.

Xu, M., Cui, H., Sun, F., Jia, C., Zhang, S. L., Hussain, S., ..., & Hayat, K. (2019). Preparation of N-(1-Deoxy-A-D-Xylulos-1-Yl)-Glutamic Acid via Aqueous Maillard Reaction Coupled with Vacuum Dehydration and Its Flavor Formation Through Thermal Treatment of Baking Process. *Journal of food science*, 84(8), 2171—2180.

Yaylayan, V. A. (1997). Classification of the Maillard reaction: A conceptual approach. *Trends in Food Science & Technology*, 8(1), 13—18. DOI:10.1016/S0924-2244(96)20013-5.

Yen, G. C., Tsai, L. C., & Lii, J. D. (1992). Antimutagenic effect of Maillard browning products obtained from amino acids and sugars. *Food and Chemical Toxicology*, 30(2), 127—132. DOI: 10.1016/0278-6915(92)90147-D.

USING THE NEW ENZYME PREPARATIONS IN PROCESSING OF SUNFLOWER OIL WASTE

T. Nosenko, D. Zhupanova

National University of Food Technologies

Key words:

*Oil waste
Phospholipids
Phospholipases
Sunflower oil*

Article history:

Received 10.11.2023
Received in revised form
23.11.2023
Accepted 07.12.2023

Corresponding author:

T. Nosenko

E-mail:

tamara_nosenko@ukr.net

Citation: Т. Т. Носенко, Д. О. Жупанова (2023). Аналіз тенденцій споживання енергетичних ресурсів харчовою промисловістю України. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 122—133.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-11

ABSTRACT

Recently, phospholipase enzyme preparations have been increasingly used in the technology of vegetable oil degumming for phospholipids. It was also proposed to use them for processing of waste products from oil degumming. The purpose of this work was to investigate the possibility of using new phospholipase preparations for oil recovery from sunflower oil waste and their effect on oil quality.

The enzyme preparations of the Novozymes company (Denmark) Lecitase® Ultra, Quara® Low P, and Quara® Boost were used in this work. Pre-treatment of sunflower oil waste with phospholipase enzyme preparations increased the efficiency of oil recovery from waste. The yield of oil was approximately the same when using enzyme preparations with both the activity of phospholipase A (Lecitase® Ultra, Quara® Low P) and phospholipase C (Quara® Boost). It was 78—80% for one of the studied samples, which is about 60% higher than the amount of recovered oil from the control sample. The main change in the composition of phospholipids after treatment with phospholipases was the appearance of phosphatidic and polyphosphatidic acids. Treatment of one of the waste samples with preparations with phospholipase A activity (Lecitase® Ultra, Quara® Low P) led to an increase in the content of free fatty acids in the recovered oil compared to the control, increase in acidity was also observed as a result of treatment with an enzyme preparation with phospholipase C activity (Quara® Boost). At the same time, the oil recovered from another sample had lower acid number values after treatment by every three enzyme preparations. The content of peroxide compounds in the oil recovered from the waste was low and according to the requirements for edible oil. The phosphorus content was also insignificant in the recovered oils. The recovered oil had significant antioxidant activity.

The obtained results indicate the prospects of using new enzyme preparations with phospholipase activity for oil recovery from oil waste.

ВИКОРИСТАННЯ НОВИХ ФЕРМЕНТНИХ ПРЕПАРАТІВ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ФУЗУ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ

Т. Т. Носенко, Д. О. Жупанова

Національний університет харчових технологій

Фосфоліпазні ферментні препарати останнім часом все ширше використовують у технології дегумування рослинних олій з метою вилучення фосфоліпідів і зменшення жирових відходів. Було запропоновано також їх застосування і для переробки відходів гідратації фосфоліпідів рослинних олій — гідратаційних осадів.

У статті досліджено можливості використання нових фосфоліпазних препаратів для вилучення олії з фузів соняшникової олії та їх впливу на показники якості олії.

Використано ферментні препарати компанії Novozymes (Данія) Lecitase® Ultra, Quara® Low P та Quara® Boost. Попередня обробка соняшникового фузу ферментними препаратами призводила до підвищення ефективності вилучення олії. Вихід олії був приблизно однаковий за використання ферментних препаратів з активністю фосфоліпаз А (Lecitase® Ultra, Quara® Low P), так і фосфоліпази С (Quara® Boost) і становив для одного з дослідженого фузу 78—80%, що приблизно на 60% вище за кількість вилученої олії з контролю. Основними змінами в груповому складі фосфоліпідів після обробки фосфоліпазами була поява фракції фосфатидних і поліфосфатидних кислот. Обробка одного зі зразків фузу препаратами з активністю фосфоліпази А (Lecitase® Ultra, Quara® Low P) призводила до підвищення вмісту вільних жирних кислот в олії порівняно з контролем, незначне підвищення кислотності спостерігалось і внаслідок обробки фузу ферментним препаратом з активністю фосфоліпаз С (Quara® Boost). Водночас олія, вилучена з іншого зразка фузу в присутності всіх трьох ферментних препаратів, мала нижчі значення кислотного числа. Вміст пероксидних сполук в олії, вилученій з фузу, був низьким і відповідав вимогам до харчової олії. Масова частка фосфоровмісних речовин у вилучених оліях теж була незначною. Олія, вилучена з фузів, мала суттєву антиоксидантну активність.

Одержані результати свідчать про перспективність використання нових ферментних препаратів з фосфоліпазною активністю для вилучення олії з олійних фузів.

Ключові слова: олійний фуз, фосфоліпіди, фосфоліпази, соняшникова олія.

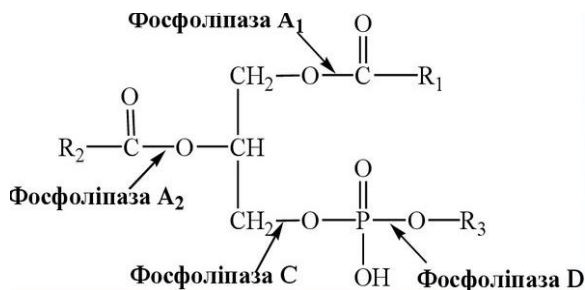
Постановка проблеми Зберігання та переробка рослинних олій супроводжуються утворенням значної кількості жирових відходів. У таких відходах, як правило, міститься частка рослинної олії, супутні рослинним оліям ліпіди та речовини нежирової природи. До жирових відходів олійної галузі відносяться фузи олійні, відходи гідратації олії, соапстоки, відпрацьовані фільтраційні порошки та відбійні глини, відходи дезодорації тощо. Відходи гідратації олії використовуються

для збагачення кормів, сопстоки — для виробництва мила, відпрацьовані фільтраційні порошки — для вилучення восків, деодистилати — для одержання токоферолів і фітостеролів.

Під час зберігання в баках сирої олії утворюється фуз олійний — осад, що складається з фосфатидів (до 15%), вологи, нежирових домішок та олії (до 95%). Масова частка олійного фузу може досягати до 10% від маси нерафінованої олії. Переробка таких фузів на олійних підприємствах, зазвичай, не здійснюється. Під час тривалого зберігання фузів на підприємствах значна частка олії вилучається з осаду. Проте внаслідок тривалого зберігання та високого вмісту вологи така олія має низьку якість і використовується як технічна. Крім того, олійні фузи відповідної якості безпосередньо використовуються для збагачення комбікормів. Зважаючи на значний вміст олії у фузах, вилучення та використання олії з них може зменшити кількість жирових відходів на підприємствах олійної галузі та підвищити рентабельність виробництва рослинних олій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До складу олійних фузів входять фосфоліпіди, які в процесі зберігання олії втрачають розчинність у триацилгліцерилах, внаслідок чого випадають в осад. Основними групами фосфоліпідів у рослинних оліях є фосфатидилхоліні (PC), фосфатидилетаноламіни (PE), фосфатидилсерини (PS) і фосфатидилінозитолі (PI) (Dijkstra, 2017). Співвідношення окремих груп фосфоліпідів у різних олій різне і залежить як від видових, так і сортових особливостей.

Фосфоліпіди рослинних олій мають високі емульгувальні властивості і таким чином перешкоджають розділенню олійного фузу на фракції та вилученню олії. Одним із методів зміни емульгувальних властивостей фосфоліпідів є їх частковий гідроліз. Як правило, внаслідок гідролізу утворюються лізофосфати та вільні жирні кислоти. Каталізаторами реакцій гідролізу фосфоліпідів є кислоти або луги. Крім того, гідроліз фосфоліпідів може відбуватись під дією фосфоліпаз. Набір продуктів, що утворюється внаслідок ферментативного гідролізу, залежить від типу фосфоліпази. Відомі чотири типи фосфоліпаз, які каталізують реакції гідролізу складноефірних зв'язків фосфоліпідів у різних положеннях. Фосфоліпази A (A1 та A2) гідролізують зв'язки з радикалами жирних кислот з утворенням лізофосфоліпідів і вільних жирних кислот (Heinze, & Roos, 2013). Фосфоліпази A1 і A2 від'єднують жирні кислоти в позиції 1 і 2 гліцеролу відповідно (Guiotto, Tomás, & Diehl, 2015). Фосфоліпази типу C гідролізують фосфоліпіди з утворенням диацилгліцеролів та естерів фосфатної кислоти (Sempoli та ін., 2021). Внаслідок гідролізу фосфоліпідів під дією фосфоліпаз типу D утворюються фосфатидні кислоти й аміноспирти, амінокислоти тощо:



Використання фосфоліпаз для дегумування (вилучення фосфоліпідів та інших супутніх речовин) рослинних олій було вперше запропоновано компанією Лургі (European patent 0513709. An enzymatic method for reducing the amount of phosphorus-containing components in vegetable and animal oils). Унаслідок гідролізу фосфоліпідів під дією фосфоліпаз негідровані форми фосфоліпідів перетворюються в гідровані та переходять в гідратаційний осад (Sampaio та ін., 2015). Перевагою ферментативного дегумування рослинних олій є зменшення кількості відходів гідратації та вмісту фосфору в олії, підвищення виходу олії й рентабельності виробництва (Lamas, Constenla, & Raab, 2016). Для ферментативного дегумування рослинних олій використовують фосфоліпази А та С (Dijkstra, 2010). Першими ферментними препаратами, які були використані для гідратації фосфоліпідів, були Lecitase® 10L (панкреатична фосфоліпаза А2) та Lecitase® Novo — фосфоліпаза А1 мікробіологічного походження, продуцентами якої є *Fusarium oxysporum* та *Thermomyces lanuginose*. Розвиток біотехнології сприяв появі на ринку нових ферментних препаратів із фосфоліпазною активністю (Qun An та ін., 2016, Claudia Elena та ін., 2017). Зокрема, доступними стали такі ферментні препарати, як фосфоліпаза С (Purifine®) й ацилтрансфераза LysoMax® з активністю фосфоліпази А2. Особливістю препарату LysoMax® є те, що продуктами реакції є лізофосфатиди та стеролові естери жирних кислот. Компанія Novozymes (Данія) розробила цілу низку ферментних препаратів з фосфоліпазною активністю. Зокрема, препарат Lecitase® Ultra представлений на ринку з 2003 р. і є генетично модифікованою фосфоліпазою з використанням мікроорганізмів *Thermomyces lanuginose* та *Fusarium oxysporum* (Virgen-Ortíz та ін., 2019). У 2016 р. Novozymes був представлений новий термостабільний і кислотостійкий препарат Quara® LowP з активністю фосфоліпази А1, вилученої із *Talaromyces leycettanus*, має часткову активність також щодо естерного зв'язку у положенні sn-2. У 2020 р. на ринку з'явився новий препарат компанії Quara® Boost з активністю фосфоінозитол фосфоліпази С та фосфоліпази С, отриманий ферментацією генетично модифікованого мікроорганізму *Bacillus licheniformis*. Препарат специфічний до трьох із чотирьох основних груп фосфоліпідів, присутніх у рослинних оліях: фосфатидилхолінів, фосфатидилетаноламінів і фосфатидилінозитолів.

Крім ферментативного дегумування рослинних олій, було запропоновано також використання ферментних препаратів для вилучення олії з гідратаційних осадів і переробки інших жирових відходів (Baena, Orjuela, Rakshit, & Clark, 2022). Так, зокрема, компанія DeSmet Ballestra запропонувала використання ферментного препарату Lecitase® Ultra (Novozyme, Данія) для вилучення олії із гідратаційних осадів (Gibon, De Greyt, & Kellens, 2019). Для цієї мети запропоновано використовувати фосфоліпази А1, А2, та С як індивідуально, так і їх суміші. Вилучення олії з гідратаційного осаду соєвої олії за допомогою фосфоліпази А1 або А2 призводило до збільшення виходу олії на 1,1—1,2% від маси сирової олії. У той же час застосування суміші фосфоліпаз А та С надає можливість збільшити вихід олії на 1,4—1,5%.

Мета статті: дослідження можливості використання нових фосфоліпазних препаратів для вилучення олії з фузів соняшникової олії та їх впливу на показники якості олії.

Матеріали і методи. Використано фуз олійний соняшниковий, наданий ПрАТ «Київський маргариновий завод» (Фуз 1), та фуз, придбаний на місцевому ринку (Фуз 2). Ферментні препарати Lecitase® Ultra, Quara® Low P та Quara® Boost одержані від компанії Novozymes (Данія).

Визначення масової частки нежирових домішок у фузі. 8—10 г соняшникового фузу зважували в конічну колбу об'ємом 250 см³ та розчиняли його у 50 см³ пертолейного ефіру. Суспензію фільтрували через висушений до постійної маси і зважений на аналітичних вагах фільтр. Залишок на фільтрі промивали тричі, використовуючи 5—10 см³ петролейного ефіру. Промитий осад разом із фільтром висушували в бюксі за температури 100—105 °С до постійної маси.

Масову частку нежирових домішок (у %) в аналізованій пробі розраховували за формулою:

$$X = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m}, \quad (1)$$

де m_1 — маса фільтра з висушеним осадом, г; m_2 — маса пустого висушеного фільтра, г; m — наважка фузу, г.

Визначення вмісту вологи у фузі проводили стандартним методом.

Ферментативну обробку фузу проводили протягом 1 год за температури 20 °С, додаючи 5% 0,05-відсоткового водного розчину ферментного препарату. Зразки фузу відстоювали за тієї ж температури протягом 30 хв. Частку вилученої з фузу олії визначали після розділення олійної фракції та осаду центрифугуванням протягом 10 хв за 1500—2000 об/хв.

Частку вилученої з фузу олії (у % від маси фузу) розраховували за формулою:

$$B = \frac{(m - m_o) \cdot 100}{m}, \quad (2)$$

де m — маса фузу, г; m_o — маса осаду, г.

Кислотне та пероксидне число олії визначали стандартними методами.

Визначення вмісту фосфоровмісних сполук. Вміст фосфоровмісних сполук визначали після озолення зразків фузу або олії фотометричним методом за вмістом неорганічного фосфору. Для цього до наважки масою 0,7 г у фарфоровому тиглі додавали 0,75 г оксиду магнію. Суміш нагрівали протягом 10 хв у сушильній шафі за температури 110 °С та обвуглювали на електричній плитці. Залишок озолювали в муфельній печі за температури 800 °С. До охолодженої золи додавали 10—12 см³ дистильованої води та 20 см³ розчину сірчаної кислоти концентрацією 2 моль·екв/дм³ і нагрівали до повного розчинення оксиду магнію, розчини переносили у мірні колби об'ємом 100 см³. До розчинів додавали 20 см³ молібденового реагенту і нагрівали протягом 30 хв на киплячій водяній бані. Після охолодження до кімнатної температури об'єм колб доводили дистильованою водою до мітки. Одночасно готували контрольну пробу. Для цього таку ж наважку оксиду магнію розчиняли в 20 см³ розчину сірчаної кислоти концентрацією 2 моль·екв/дм³, розчин переносили в мірну колбу ємністю 100 см³ та проводили аналогічну реакцію із молібденовим реагентом.

Вимірювали оптичну густину аналізованих розчинів відносно контрольного розчину на фотоколориметрі КФК-3. Масову частку фосфору (мкг/см^3) в досліджуваних розчинах визначали за градувальним графіком, побудованим з використанням стандартних розчинів KH_2PO_4 концентрацією від 0,05 до 5,0 мкг/см^3 .

Вміст фосфору ($y\%$) у зразку розраховували за формулою:

$$P = 0.01 \frac{d}{m}, \quad (3)$$

де d — масова частка фосфору в розчині, визначена за градувальним графіком, мкг/см^3 ; m — маса зразка, г.

Масову частку фосфоровмісних речовин ФОЛ (%) в перерахунку на стеароолеолецитин розраховували за формулою:

$$\text{ФОЛ} = 25,44 \cdot P, \quad (4)$$

де 25,44 — коефіцієнт перерахунку масової частки фосфору на стеароолеолецитин.

Визначення антиоксидантної активності олії методом гасіння радикалів 2,2-дифеніл-1-пікрілгідразилу (DPPH). Визначення антиоксидантної активності олії проводили за реакцією гасіння радикалів 2,2-дифеніл-1-пікрілгідразилу (DPPH) (Носенко, Музика, Циганкова, Левчук, & Маринченко, 2019). Для реакції використовували розчин 2,2-дифеніл-1-пікрілгідразилу концентрацією 3 мг/100 мл в етилацетаті, який мав значення оптичної густини на довжині хвилі 520 нм в межах 0,7—0,9.

Для приготування реакційної суміші до 100 мг олії додавали розчин DPPH в етилацетаті, ретельно перемішували та визначали початкове значення оптичної густини реакційної суміші на довжині хвилі 520 нм (D_0). Реакційну суміш витримували без доступу світла протягом 30 хв та визначали оптичну густину на 520 нм (D_1). Антиоксидантну активність (A) розраховували за зміною оптичної густини протягом 30 хв:

$$A = (1 - D_1/D_0) \cdot 100. \quad (5)$$

Визначення групового складу фосфоліпідів методом тонкошарової хроматографії (ТШХ). Наважку осажденного фузу після сепарування олії масою приблизно 1 г розчиняли в 40 см^3 ацетону і фільтрували через паперовий фільтр, який двічі промивали 5 см^3 ацетону.

Закриту колбу струшували на механічному струшувачі протягом 1 год, а потім поміщали в холодильник і витримували за температури 5 °C протягом 72 годин. Світлий осад, що виділився, фільтрували за температури 5 °C, промивали холодним ацетоном до повного знежирення, яке визначали за відсутністю жирної плями на фільтрувальному папері. Пробу концентрували, відганяючи розчинник.

Знежирену суміш фосфоліпідів, що не містить механічних домішок і нейтральних ліпідів, зважували на аналітичних вагах, розчиняли в 5 см^3 хлороформу для отримання 1-відсоткового розчину. Для тонкошарової хроматографії використовували аналітичні пластини марки Sorbfil розміром 10×20 см на полімерній основі з розміром часток сорбенту 5—17 мкм . На пластинку мікрошприцем наносили аліквоту отриманого розчину фосфоліпідів так, щоб у плямі містилося приблизно

100 мкг фосфоліпідів. Пластину поміщали в хроматографічну камеру, насичену парами суміші розчинників хлороформ : метанол : вода у співвідношенні 65 : 25 : 4.

Після міграції розчину до лінії фінішу пластинку виймали з камери, швидко висушували у витяжній шафі і проявляли парами йоду в ексікаторі, насиченому парами йоду, протягом 20—30 с. Груповий склад фосфоліпідів визначали за стандартними значеннями R_f (відношення відстані, що пройшов індивідуальний компонент (a) до відстані, що пройшов розчинник (e)) (AOCS метод Са 12—55 (1997)):

$$R_f = a/e. \quad (6)$$

Статистична обробка результатів. Усі дослідження проводили у трьох повторностях, результати виражали як середнє арифметичне $\pm$ стандартне відхилення, валідність результатів розраховували при рівні достовірності $\alpha = 0,95$.

Викладення основних результатів дослідження. Дослідження складу та властивостей зразків фузу олійного соняшникового засвідчило, що основним компонентом фузів є сира олія, її вміст коливався від 76,4 до 87,7% (табл. 1). У одному зі зразків фузів (Фуз 1) виявлено високий вміст вологи, що, як правило, пов'язано із високим вмістом нежирових домішок і фосфоліпідів, які є гідрофільними сполуками та здатні утримувати надлишок вологи.

Високий вміст вологи у зразку Фуз 1 призводить до високого вмісту вільних жирних кислот в олії, показником чого є кислотне число олії. Вміст пероксидних сполук в олії, вилученій із цього зразка фузу, був невисоким. Олія, вилучена з Фузу 2, мала низьке значення кислотного числа — 1,52 мг КОН/г, та низький вміст пероксидних сполук.

Таблиця 1. Фізико-хімічні показники досліджуваних зразків фузу

Показник	Зразок фузу	
	Фуз 1	Фуз 2
Масова частка нежирових домішок, %	5,2 $\pm$ 0,3	9,9 $\pm$ 0,1
Масова частка вологи, %	17,7 $\pm$ 0,02	3,2 $\pm$ 0,05
Масова частка фосфоровмісних сполук, в перерахунку на стеароолеолецитин, %	1,65 $\pm$ 0,03	1,5 $\pm$ 0,05
Масова частка сирої олії, %	76,4 $\pm$ 0,2	87,7 $\pm$ 0,1
Кислотне число олії, мг КОН/г	5,67 $\pm$ 0,02	1,52 $\pm$ 0,1
Пероксидне число мМоль $\frac{1}{2}$ О/кг	4,2 $\pm$ 0,2	1,04 $\pm$ 0,06

Одержані результати свідчать про доцільність використання таких відходів олійного виробництва для вилучення олії та зменшення кількості жирових відходів. Робочою гіпотезою дослідження була можливість використання ферментативних препаратів із фосфоліпазною активністю для підвищення ефективності вилучення олії з олійних фузів.

Для обробки зразків олійних фузів було використано ферментні препарати компанії Novozymes (Данія) Lecitase® Ultra, Quara® Low P та Quara® Boost. Експозиція зразків олійних фузів у присутності трьох досліджуваних ферментних препаратів призводила до збільшення виходу виділеної із Фузу 1 олії порівняно з контролем (рис. 1). Контролем був зразок олії, отриманий із фузу олійного без ферментативної обробки. При цьому вихід олії був приблизно однаковий за використання ферментних препаратів як з активністю фосфоліпаз А (Lecitase® Ultra,

Quara® Low P), так і фосфоліпази С (Quara® Boost), і становив 78—80%, що приблизно на 60% вище за кількість вилученої олії із контрольного зразка фузу. Кількість олії, вилученої з Фузу 2, була вищою в контролі порівняно з Фузом 1. Проте збільшення виходу олії під впливом ферментативної обробки було суттєво нижчим порівняно з Фузом 1 і становило 18 та 9% для ферментних препаратів Lecitase® Ultra та Quara® Boost, відповідно. Обробка Фузу 2 ферментним препаратом Quara® Low P не призводила до збільшення виходу олії з фузу порівняно з контролем, навпаки, кількість олії, вилученої із фузу, була нижчою і становила лише 22%.

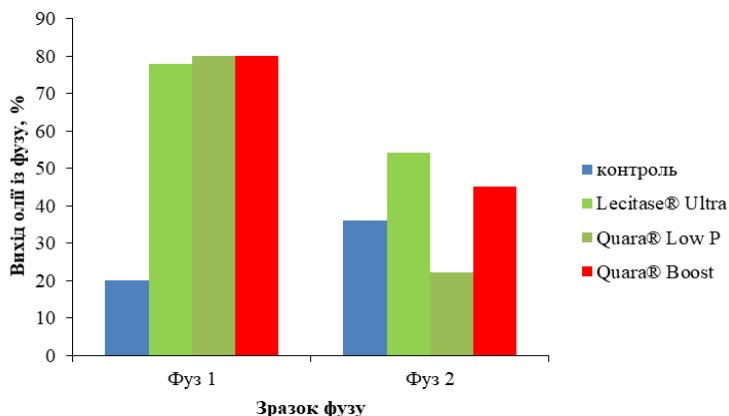


Рис. 1. Вплив ферментативної обробки на вилучення олії з фузу

Якісний аналіз групового складу фосфоліпідів у складі фузів виявив, що основними фракціями фосфоліпідів у зразку Фуз1 були фосфатидилінозитолі, фосфатидилсерини та фосфатидилетаноламіни (табл. 2). У Фузі 2 було виявлено фосфатидилсерини, фосфатидилетаноламіни та фосфатидилгліцерини. Після обробки фосфоліпазними препаратами та вилучення олії майже у всіх зразках осадженого фузу зникала фракція фосфатидилсеринів, за винятком осадженого Фузу 1 після обробки препаратом Lecitase® Ultra. Під дією препаратів з активністю фосфоліпази А1 (Lecitase® Ultra, Quara® Low P) у Фузі 2 зникали також фосфатидилетаноламіни. У зразку Фузу 1 ця фракція зникала під дією препарату Quara® Low P, при цьому з'являлись фосфатидні і поліфосфатидні кислоти. Останні були виявлені також у залишку фузу після обробки фосфоліпазою С (Quara® Boost). Фракцію фосфатидні і поліфосфатидні кислоти виявлено і в залишку Фузу 2 після обробки препаратами Quara® Low P та Quara® Boost. Під дією ферментного препарату Quara® Boost, який містить фосфоінозит фосфоліпазу С, у залишку Фузу 1 зникала фракція фосфатидилінозитолів.

Показники складу і якості вилученої з фузу олії наведені у табл. 3. Одержані дані свідчать, що якість олії у двох досліджених зразках фузу суттєво відрізнялась. Зокрема, значення кислотного числа олії, вилученої з Фузу 1, було високе, проте знаходилося в межах, встановлених ДСТУ 4535:2006 для олійного фузу, призначеного для виробництва комбікормів. Значення пероксидного числа олії в обох зразках фузу було низьким і відповідало вимогам до харчової олії. Масова частка фосфоровмісних речовин в оліях теж була незначною.

Таблиця 2. Груповий склад фосфоліпідів фузу соняшникового до та після ферментативної обробки

Фракція фосфоліпідів	Значення Rf (AOCS метод Са 12—55 (1997))	Зразок фузу до та після обробки ферментним препаратом							
		Фуз 1				Фуз 2			
		До обробки	Lecitase Ultra	Quara Low P	Quara Boost	До обробки	Lecitase Ultra	Quara Low P	Quara Boost
Лізофосфати дилхоліни	0,06—0,07								
Фосфатидилінозитолі	0,15—0,16	+		+				+	
Фосфатидилхоліни	0,20—0,22								
Фосфатидилсерини	0,30—0,33	+	+			+			
Фосфатидилетаноламіни	0,38—0,42	+	+		+	+			+
Фосфатидилгліцерини	0,54—0,57			+		+	+		
Фосфатидні і поліфосфатидні кислоти	0,82—0,84			+	+		+		+
Нейтральні ліпіди	0,94—0,96								

Під дією фосфоліпази А (Lecitase® Ultra, Quara® Low P) олія, вилучена із Фузу 2, мала вищий вміст вільних жирних кислот порівняно з контролем, що є очевидним, оскільки ця фосфоліпаза руйнує естерні зв'язки гліцеролу та жирних кислот. Для цього зразка олії незначне підвищення кислотності спостерігалось і внаслідок обробки фузу ферментним препаратом з активністю фосфоліпаз С (Quara® Boost). У той же час олія, вилучена з Фузу 1, в присутності всіх трьох ферментних препаратів, мала нижчі значення кислотного числа. Такий феномен, очевидно, пояснюється переходом речовин кислотної природи в осад після обробки фузу ферментними препаратами.

Пероксидне число олії, вилученої з фузів, зменшувалось в усіх зразках після обробки ферментними препаратами. Причиною цього явища може бути гідрофільність пероксидних сполук і перехід їх в осад, що утворювались після сепарування олії.

Масова частка фосфоровмісних речовин у контрольних зразках олії була дуже низькою. У той же час вміст фосфоровмісних сполук зменшувався ще понад 30% у зразках олії, вилученої з Фузу 1 після обробки ферментними препаратами. Одночасно, цей показник суттєво не змінювався після обробки ферментами Фузу 2, що, очевидно, пов'язано з груповим складом фосфоліпідів і досить ефективним їх вилученням внаслідок сепарування олії.

Таблиця 3. Фізико-хімічні показники олії, вилученої із фузу до та після обробки ферментним препаратом

Показник	Олія, вилучена із фузу до та після обробки ферментним препаратом							
	Фуз 1				Фуз 2			
	Контроль	Lecitase Ultra	Quara Boost	Quara Low P	Контроль	Lecitase Ultra	Quara Boost	Quara Low P
Кислотне число, мг КОН/г	5,67±0,02	4,74±0,02	3,9±0,03	4,4±0,03	1,52±0,1	3,05±0,2	1,86±0,3	2,44±0,1
Пероксидне число мМоль ^{1/2} O/кг	4,2±0,2	2,7±0,1	2,5±0,3	2,0±0,2	1,04±0,06	0,96±0,03	0,14±0,03	0,54±0,04
Вміст фосфоровмісних речовин (%) в перерахунку на стеароолеоліцидин	0,06±0,004	0,039 ± 0,001	0,04±0,002	0,04±0,004	0,015±0,002	0,022±0,001	0,015±0,003	0,025±0,005

Оцінку антиоксидантної активності досліджуваних зразків олії проводили визначенням швидкості гасіння вільних радикалів DPPH. Антиоксидантна активність зразків олії, вилученої з фузів, була досить високою (рис. 2). Її значення були порівняні з антиоксидантною активністю гарбузової (Вовк, & Носенко, 2023) та конопляної олії (Носенко, Музика, Циганкова, Левчук, & Маринченко, 2019). Олія, що була вилучена з Фузу 1 після обробки фосфоліпазами, мала близькі значення до антиоксидантної активності контролю. Проте антиоксидантна активність зразків олії, вилученої з Фузу 2, після ферментативної обробки суттєво зменшувалась порівняно з контролем. Можливо, виявлена закономірність пояснюється низькою кількістю олії, вилученої з Фузу 2, обробленого ліпазами. Очевидно, що збільшення масової частки вилученої з фузу олії призводить до збільшення кількості вилучених жиророзчинних антиоксидантів, зокрема, токоферолів.

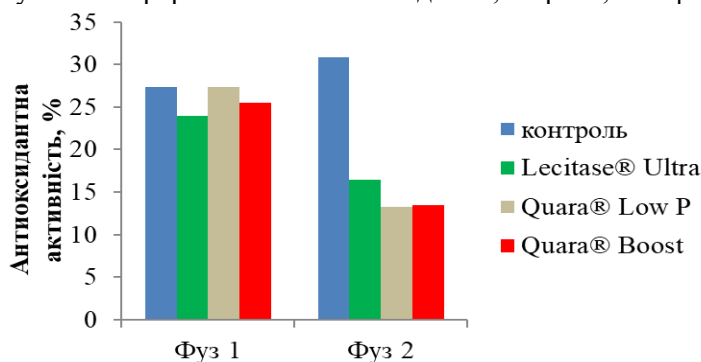


Рис. 2. Антиоксидантна активність зразків олії, вилученої із фузу

Висновки

Результати дослідження доводять ефективність використання нових ферментних препаратів із фосфоліпазною активністю для вилучення олії з олійних фузів. В обох досліджених зразках фузів підвищення виходу олії спостерігалось при обробці ферментними препаратами Lecitase® Ultra та Quara® Boost. У більшості зразків фузів після обробки фосфоліпазами з'являлась фракція фосфатидні і поліфосфатидні кислоти. Якість олії, вилученої з фузів після обробки ліпазами, була високою, її кислотність зростала суттєво тільки в одному зразку фузу після обробки препаратом Lecitase® Ultra, а вміст пероксидних і фосфоровмісних сполук зменшувався в усіх зразках. Олія, вилучена з олійних фузів, мала суттєву антиоксидантну активність. Проте невисокий вихід олії з Фузу 2, очевидно, призводить до нижчої антиоксидантної активності зразків олії, вилученої після ферментативної обробки.

Література

- Вовк, Г. О., Носенко, Т. Т. (2023). Вплив параметрів ферментативної обробки на вихід преової гарбузової олії та її властивості. *Наукові праці НУХТ*, 29(1), 108—118. DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-1-10.
- Носенко, Т. Т., Музика, О. С., Циганкова, Г. А., Левчук, І. В., Маринченко, І. О. (2019). Особливості складу олії із насіння ненаркотичних конопель вітчизняної селекції. *Наукові праці НУХТ*, 25(5), 173—180. DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-5-20.
- Baena, A., Orjuela, A., Rakshit, S. K., Clark, J. H. (2022). Enzymatic hydrolysis of waste fats, oils and greases (FOGs): Status, prospective, and process intensification alternatives. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 175, 108930. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108930>.
- Dijkstra, A. J. (2010). Enzymatic degumming. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(11), pp. 1178—1189, doi.org/10.1002/ejlt.201000320.
- Dijkstra, A. J. (2017). About water degumming and the hydration of non-hydratable phosphatides. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(9), 1600496—1600511. DOI: 10.1002/ejlt.201600496.
- Elena, C., Cerminati, S., Ravasi, P., Rasia, R., Peiru, S., Menzella, H. G., Castelli, M. E. (2017). *Cereus* phospholipase C engineering for efficient degumming of vegetable oil. *Process Biochemistry*, 54, (67—72). 10.1016/j.procbio.2017.01.011.
- Gibon, V., De Greyt, W., Kellens, M. (2019). Enzymes in oil processing: a search for milder, more sustainable, and economical solutions. *INFORM*. June, 30 (6), 12—16. DOI: 10.21748/inform.06.2019.12.
- Guiotto, N. E., Tomás, M. C., Diehl, B. W. K. (2015). Sunflower Lecithin. In: *Polar Lipids*, pp. 57—73, DOI: 10.1016/B978-1-63067-044-3.50007-8.
- Heinze, M., Roos, W. (2013). Assay of phospholipase A activity. *Methods of Molecular Biology*, 1009, 241—219. DOI: 10.1007/978-1-62703-401-2_22.
- Qun An, Fanghua Wang, Dongming Lan, FaezIqbal Khan, Rabia Durrani, Bo Yang, Yonghua Wang. (2016). Improving phospholipase activity of PLA1 by protein engineering and its effects on oil degumming. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(2) 1—18. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201600110>.
- Lamas, D. L., Constenla, D. T., Raab, D. (2016). Effect of degumming process on physicochemical properties of sunflower oil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 16(6) 138—143. DOI: 10.1016/j.bcab.2016.03.007.
- Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society*, AOCS, Champaign (1997), Ca 12—55.

Sampaio, K. A., Zyaykina, N., Wozniak, B., Tsukamoto, J., Greyt, W. D., Stevens, C. V. (2015). Enzymatic degumming: degumming efficiency versus yield increase. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(1), 81—86. DOI: 0.1002/ejlt.201400218.

Semproli, R., Robescu, M. S., Cambò, M., Mema, K., Bavaro, T., Rabuffetti, M., Ubiali, D., Speranza, G. (2021). Chemical and enzymatic approaches to esters of sn -glycero-3-phosphoric acid. *European Journal of Organic Chemistry*, 29, 4027—4037, DOI: 10.1002/ejoc.202100235.

Virgen-Ortíz, Jose J., dos Santos, José C. S., Ortiz, Claudia, Berenguer-Murcia, Ángel, Barbosa Oveimar, Rodrigues Rafael C., Fernandez-Lafuente Roberto. (2019). Lecitase Ultra: A phospholipase with great potential in biocatalysis. *Molecular Catalysis*, 473(1), 10—16. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2019.110405>.

THE PROBLEMATIC ISSUES OF TITANIUM DIOXIDE (E 171) AS A COLORANT FOR FOOD AND MEDICINAL PRODUCTS

O. Makarenko, T. Petrenko

National University of Food Technologies

Key words:

*Food additive
E 171
Titanium dioxide
Toxicological studies
Nanoparticles
Genotoxicity
Medicinal products*

Article history:

Received 10.11.2023
Received in revised form
23.11.2023
Accepted 13.12.2023

Corresponding author:

O. Makarenko

E-mail:

makarenkobig@gmail.com

Citation: О. Г. Макаренко, Т. В. Петренко (2023). Проблемні питання використання діоксиду титану (Е 171) як барвника для харчових продуктів і лікарських засобів. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 134—145.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-12

ABSTRACT

Prohibition of the use of titanium dioxide as a colorant for food and medicinal products in the European Union can provoke significant problems in the industry, especially in the field of medicinal production. The background for this ban was analyzed in article, and the toxicological characteristics of E 171 were examined. It was shown that the main reason is the possible genotoxicity of titanium dioxide nanoparticles. However, this conclusion is based on doubtful results of experimental studies in which, for example, the E 171 of doubtful quality was used. That is why this ban was not supported by the Food and Drug Administration of United States of America. However, the it was shown that under certain conditions, toxic peroxide compounds can form under contact of titanium dioxide with food products. Thus, under the action of near ultraviolet radiation in a thin layer on a mixture of sunflower oil and titanium dioxide, a stable increase in the peroxide number was detected in comparison with the control samples. So, it is necessary to be careful with such technological processes that involve high temperatures, excessive humidity, sunlight, etc. In particular, it is worth to use titanium dioxide with special attentiveness in the technology of medicinal products, where it can directly contact the active pharmaceutical ingredient. However, tens of thousands of medical products contain E 171 in their composition now. The prohibition of its use can raise serious questions about a significant number of medicinal products and increase the price of those that remain on the market. This is due to additional studies on the bioavailability of medicinal products, studying their stability and making changes to the registration documents. Possible ways of solving the crisis situation are considered.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-12

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ВИКОРИТАННЯ ДІОКСИДУ ТИТАНУ (Е 171) ЯК БАРВНИКА ДЛЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ І ЛІКАРСЬКИХ ЗАСОБІВ

О. Г. Макаренко, Т. В. Петренко

Національний університет харчових технологій

Заборона використання діоксиду титану як харчового барвника та барвника для лікарських засобів у Європейському Союзі може спровокувати значні проблеми в індустрії, особливо у сфері виробництва лікарських засобів.

У статті проаналізовано підстави для цієї заборони і токсикологічні характеристики Е 171. Показано, що основною причиною є можлива генотоксичність наночастинок діоксиду титану. Однак цей висновок базується на сумнівних результатах експериментальних досліджень, в яких використовувався, наприклад, невідомий за якістю Е 171. Саме тому ця заборона не була підтримана Управлінням з контролю за продуктами й ліками США. Авторами показано, що при певних умовах при контакті діоксиду титану з харчовими продуктами можуть утворюватися токсичні пероксидні сполуки. Так, при дії ближнього ультрафіолетового випромінювання в тонкому шарі на суміші соняшникової олії і діоксиду титану виявлялося стабільне збільшення пероксидного числа порівняно з контрольними зразками, тому технологічні процеси, в яких задіяні підвищена температура, надлишкова вологість, надлишкове сонячне освітлення тощо, потребують особливої уваги. Зокрема, йдеться про використання діоксиду титану в технології лікарських засобів, де він може безпосередньо контактувати з активним фармацевтичним інгредієнтом. Однак зараз десятки тисяч препаратів містять у своєму складі Е 171. Заборона його використання може поставити гостро питання про доступність значної кількості лікарських препаратів і здоров'я тих, що залишаться на ринку. Це пов'язано з додатковими дослідженнями на біодоступність лікарських засобів, вивченням їх стабільності та внесенням змін у реєстраційні документи. Розглянуто можливі шляхи вирішення кризової ситуації.

Ключові слова: харчова добавка, Е 171, діоксид титану, токсикологічні дослідження, наночастинки, генотоксичність, лікарські препарати.

Постановка проблеми. Титан(IV) оксид (діоксид титану) досить давно використовується як барвник у харчовій, косметичній і фармацевтичній промисловості. У складі харчових продуктів і лікарських засобів TiO_2 відомий під індексом Е 171 (ЄС) або під індексом INS 171 (США).

У 1966 р. діоксид титану був уперше схвалений Управлінням з контролю за продуктами й ліками США (FDA) (Summary, 2022). Згідно з вимогами його вміст не має перевищувати 1% маси продукту. З 1969 р. ця харчова добавка почала використовуватись і в європейських країнах з певними обмеженнями щодо категорій харчових продуктів (Regulation (EC), 2008).

До безумовних переваг діоксиду титану відноситься його відбілюючий ефект, що виникає завдяки розсіюванню світла на його частинках. Цей ефект забезпечується високим значенням коефіцієнта заломлення світла (перевищує показник алмазу) та розміром і формою його частинок, що й спонукає його основне використання як харчового барвника. Також TiO_2 відзначається підвищеною термо- та світлостійкістю.

Оскільки до складу діоксиду титану входять наночастинки, він підпадає під дію застосування настанови Європейського агентства з безпеки харчових продуктів (EFSA) з нанотехнологій як «матеріал, який не розроблений як наноматеріал, але містить частку частинок, менше 50% у розподілі кількості за розміром, з одним або декількома зовнішніми розмірами у діапазоні 1—100 нм» (Hardy та ін., 2018). З 2022 р. Е 171 заборонено в Європейському Союзі через потенційну генотоксичність наночастинок, а Франція ввела цю заборону ще з 2019 року.

З огляду на велику кількість харчових продуктів і лікарських засобів, які використовують діоксид титану як барвник, його заборона може призвести до цілої низки проблем для виробників, особливо у фармацевтичній галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Діоксид титану існує в трьох основних поліморфних модифікаціях: анатаз, рутил і брукіт (Mironyuk, Soltys, Tarchuk, & Savka, 2020). У 2006 р. Європейський Союз для використання в харчових продуктах на додаток до колишньої дозволеної форми анатазу дозволив кристалічну структуру рутилу. Брукіт промислово майже не виробляється і в природі зустрічається рідко. Е 171 як харчова добавка складається приблизно на 40% з нанорозмірних частинок менших 100 нм і на 60% з мікророзмірних частинок більших 100 нм (Blaznik та ін., 2021).

У травні 2021 р. EFSA на запит Європейської комісії оновило оцінку безпеки харчової добавки діоксид титану (Younes та ін., 2021) та прийшло до висновку, що вони більше не вважають діоксид титану безпечним для використання як харчової добавки з пропозицією заборонити його використання в харчових продуктах.

У травні 2021 р. після отриманих висновків Європейська комісія звернулася до Європейського агентства з лікарських засобів (ЕМА) з проханням надати аналіз з метою визначення технічного призначення діоксиду титану в лікарських засобах; доцільність альтернатив для його заміни без негативного впливу на якість, безпеку та ефективність лікарських засобів; за необхідності міркування, які необхідно взяти до уваги для визначення перехідного періоду щодо поступового виведення цієї допоміжної речовини зі складу лікарських засобів (Final feedback, 2021).

Європейський суд загальної юрисдикції (General Court) 23 листопада 2022 р. скасовує Делегований регламент Європейської комісії від 2019 р. в частині, що стосується узгодженої класифікації та маркування діоксиду титану як канцерогенної речовини при вдиханні в певних формах порошку. Судді в Люксембурзі оголосили, що у випадку Е 171 вимога формувати класифікацію канцерогенної речовини на надійних і прийнятних дослідженнях не була дотримана Е 171 (Judgment of the General Court, 2022).

Метою статті є аналіз безпекових проблем, пов'язаних з використанням Е 171 як харчової добавки та допоміжної речовини при виробництві лікарських засобів і можливих шляхів їх вирішення.

Матеріали і методи. Інформаційною основою слугували матеріали фахових та офіційних видань. Для вивчення моделі використовувалась дія ближнього ультрафіолетового випромінювання, яке є частиною сонячного денного випромінювання, що генерувалось флуоресцентною лампою ближнього ультрафіолетового випромінювання зі спектральним діапазоном 320—400 нм і максимальним випромінюванням енергії при 350—370 нм. В експериментах використовувався діоксид титану класифікації як харчова добавка та олія соняшникова рафінована марки «Олейна традиційна» 2023 р. виготовлення. Зразки піддавались дії світла, що забезпечує інтегровану енергію ближнього ультрафіолетового проміння не менше ніж 200 Вт год/м². Визначення пероксидного числа проводили за ДСТУ 4570:2006 Жири рослинні та олії. Метод визначення пероксидного числа.

На прикладі моделі суміш рослинної соняшникової олії і діоксиду титану автори мали також на меті показати потенційну небезпеку утворення пероксидних сполук при дії на модельну суміш екстремальних умов навколишнього середовища.

Викладення основних результатів дослідження. Згідно із Санітарними правилами і нормами застосування харчових добавок діоксид титану може використовуватись за технологічної необхідності в необхідних кількостях (Про затвердження Санітарних правил і норм, 1996). Харчові барвники групи II, включаючи діоксид титану, дозволені для більшості таких харчових категорій, як молочні продукти й аналоги (ароматизовані кисломолочні продукти та деякі вершки), сир і сирні продукти, кондитерські вироби, приправи та прянощі (Commission Regulation (EU), 2011). У продуктах харчування харчова добавка E 171 використовується не тільки як харчовий пігмент, вона може додаватися для відбілювання, посилення кольору й текстури продуктів. Використання TiO₂ до 2014 р. в 62 провідних економіках світу постійно зростало, входячи до складу понад 3500 харчових продуктів. Якщо E 171 міститься лише в 1,3% нових продуктів, однак він входить до складу 51% жувальних гумок, 25% стіків, рідин і спреїв, 21% змішаного асортименту, 10% пастилок, желе і жувальних виробів і 10% льодяників. Жувальні гумки та кондитерські вироби, включаючи пастилки, гумки та желе, є найбільшими категоріями харчових продуктів, як за кількістю продуктів, що містять TiO₂, так і за кількістю нових продуктів, доступних на ринку, і складають першу категорію важливості. Торти й тістечка входять до другої категорії важливості (Ropers, Terrisse, Mercier-Bonin, & Humbert, 2017).

EFSA наводить такі дані споживання E 171 у складі харчових продуктів при використанні як харчової добавки для шести груп населення (табл. 1) (Aguilar та ін., 2016):

Таблиця 1. Сумарне споживання E 171 у складі харчових продуктів з використанням сценарію оцінки максимального рівня впливу та уточнених сценаріїв впливу в шести групах населення (мін.—макс. в опитуваннях в мг/кг маси тіла на день)

	Немовлята	Малюки	Діти	Підлітки	Дорослі	Люди похилого віку
	(12 тижнів—11 місяців)	(12—35 місяців)	(3—9 років)	(10—17 років)	(18—64 років)	(> 65 років)

Продовження таблиці 1

Сценарій оцінки максимального рівня споживання						
Середнє	0,4—1,9	1,2—9,2	1,8—10,4	0,8—6,7	0,6—6,8	0,4—4,5
95-й перцентиль	1,4—9,6	4,0—19,3	4,9—32,4	3,1—23,5	2,2—15,0	1,2—10,7
Уточнений розрахунковий сценарій споживання						
Лояльний до бренду сценарій						
Середнє	0,4—1,8	1,1—7,6	1,5—8,8	0,7—5,9	0,5—5,7	0,4—3,9
95-й перцентиль	1,2—9,2	3,6—14,7	4,1—30,2	2,5—21,2	1,9—13,6	1,1—9,2
Сценарій, не лояльний до бренду						
Середнє	0,2—0,8	0,6—4,6	0,9—5,5	0,4—4,1	0,3—4,0	0,2—2,8
95-й перцентиль	0,7—3,9	2,0—6,8	2,4—14,8	1,3—10,8	1,1—9,7	0,5—7,0

Як видно з наведених даних, високий рівень споживання спостерігається у всіх групах населення від 3-місячних немовлят до людей похилого віку. Кількість TiO_2 , що споживається в США щодня, оцінюється приблизно в 0,2—0,7 мг TiO_2 на кг маси тіла на добу (мг/кг маси тіла/добу), тоді як населення Великої Британії та Німеччини споживає близько 1 мг TiO_2 /кг. м.т./добу. Оцінка середнього тривалого впливу діоксиду титану коливається від 0,5 (верхня межа 1,1 мг/кг маси тіла/добу) для літніх людей до 1,4 мг/кг маси тіла/добу (верхня межа 3,2 мг/добу). На додаток до харчових продуктів, лікарські засоби можуть містити TiO_2 до 3,6 мг/г, що призводить до більш високого загального добового споживання TiO_2 (Ropers, Terrisse, Mercier-Bonin, & Humbert, 2017). З огляду на ці дані та значний асортимент харчових продуктів, які містять в своєму складі Е 171, питання його безпеки є досить важливими.

Відомо, що TiO_2 є малотоксичною речовиною. Згідно з оцінкою Об'єднаного комітету експертів ФАО/ВООЗ з харчових добавок (JECFA), при оральному введенні його щурам LD_{50} складав більше 12000 мг/кг маси тіла. Діоксид титану є дуже важкорозчинною сполукою. Дослідження на кількох видах ссавців, включаючи людину, не показують ані значного поглинання, ані накопичення в тканинах після прийому діоксиду титану. Експерти після проведення досліджень дійшли висновку, що встановлення прийнятної добової норми для людини є зайвим (Toxicological evaluation, 2023). Сучасні дослідження показали, що введення через зонд Е 171 у дозах до 1000 мг/кг маси тіла на добу для щурів протягом 90 днів не спричинили жодних негативних наслідків для клінічного вигляду, виживання, маси тіла, споживання корму, гематології, клінічної хімії, аналізу сечі, ваги органів або грубої і мікроскопічної патології (Younes та ін., 2021). Частинки TiO_2 вважалися нетоксичними мінеральними частинками і вони навіть використовувалися як «пилловий негативний контроль» у багатьох токсикологічних дослідженнях *in vitro* та *in vivo* протягом багатьох років.

Однак натепер цей висновок може бути застарілим, оскільки він не враховував наявність досить значної фракції наночастинок, про що вже було зазначено вище (Blaznik та ін., 2021). Деякі дані сучасних досліджень свідчать про те, що наночастинки TiO_2 можуть бути потенційно токсичними. Так, наприклад, частинки TiO_2 з трьома різними розмірами — 25, 80 і 155 нм відповідно, вводили через зонд з одноразовою дозою 5000 мг TiO_2 на кг маси тіла мишам за допомогою перорального зонду. Через 2 тижні у піддослідних тварин не було виявлено явної гострої токсичності. Однак у самок мишей, які зазнали впливу наночастинок діоксиду титану, виявилась гепатотоксичність. Крім того, у цих групах також спостерігалася нефротоксичність. Ці зміни не спостерігалися у мишей, які отримували частинки TiO_2 розміром 155 нм (Aguilar та ін., 2016).

Було виявлено, що наночастинки TiO_2 в культурі клітин викликають більш високу цитотоксичність, ніж просто дрібні частинки. Завдяки своєму дуже малому розміру наночастинки можуть проникати в основні біологічні структури, що, у свою чергу, може порушити їхню нормальну функцію. У щурів після тривалого впливу високих концентрацій наночастинок TiO_2 були виявлені злоякісні пухлини легенів (Liu, Lin, & Zhao, 2013).

Поглинання частинок TiO_2 різного розміру (148, 36, 28 нм) на клітинах *бuccального епітелію слизової оболонки* свиней показало, що всі досліджувані частинки проникають через шар слизової оболонки та потрапляють в епітелій порожнини рота. Глибина проникнення змінювалася залежно від розміру частинок, менші частинки проникали глибше (Blaznik та ін., 2021).

Дослідження наночастинок E 171 підтвердили, що вони можуть викликати пошкодження ДНК і хромосом (Younes та ін., 2021). Однак неможливо було встановити чітку кореляцію в цих дослідженнях між фізико-хімічними властивостями наночастинок TiO_2 , такими як кристалічна форма, розмір складових частинок, станом агломерації та результатами аналізів генотоксичності *in vitro* або *in vivo*. Однак було висловлено занепокоєння з приводу можливої генотоксичності діоксиду титану. На основі звіту EFSA і були сформовані пропозиції Європейській комісії про заборону використання E 171.

Згідно зі специфікацією на харчову добавку діоксид титану FAO JECFA Monographs 13 (2012) (Combined Compendium, 2012) як шкідливі домішки контролюють вміст Стибію, Арсену, Кадмію, Плюмбуму і Меркурію. Також наведені обмежувальні тести на вміст алюміній оксиду та силіцій(IV) оксиду. Однак відсутня будь-яка інформація про контроль розподілу частинок TiO_2 , зокрема обмежувальні тести на вміст наночастинок. Це вже зараз може складати проблему зважаючи на те, що норми діоксиду титану переглядалися ще в 2012 році.

У США декілька штатів ініціювали заборону використання діоксиду титану (Filing of Color Additive, 2023), однак, як повідомляє сайт Асоціації виробників діоксиду титану (TDMA), FDA продовжує вважати безпечним використання TiO_2 як барвника в харчових продуктах (US FDA, 2023). Повна відповідь FDA така: «FDA переглянув висновки EFSA 2021 року щодо діоксиду титану. FDA зазначає, що висновок EFSA 2021 року продовжує підтверджувати відсутність загальної токсичності й токсичності для органів, а також відсутність впливу на репродуктивну токсичність і токсичність для розвитку. У своєму висновку 2021 року EFSA зазначила, що не може виключити генотоксичність, і включила тести на

генотоксичність наноматеріалів з діоксиду титану. Деякі тести на генотоксичність включали досліджувані матеріали, які не є репрезентативними для барвника, а деякі тести включали шляхи введення, які не стосувалися впливу їжі людини. Наявні дослідження безпеки не демонструють проблем безпеки, пов'язаних з використанням діоксиду титану як барвника. FDA продовжує дозволяти безпечне використання діоксиду титану як барвника в харчових продуктах, як правило, відповідно до специфікацій та умов, у тому числі кількість діоксиду титану не має перевищувати 1% від ваги харчових продуктів, визначених у правилах FDA на 21 CFR 73,575».

Аналогічної думки дотримується Управління охорони здоров'я Канади з питань харчування, у звіті якого було зазначено: «Підсумовуючи, несприятливі ефекти, пов'язані з пероральним впливом TiO_2 , в основному випливають із нестандартних досліджень, у яких вводили стабільні гомогенізовані суспензії диспергованих ультразвуком частинок. Хоча ці етапи інтенсивної підготовки зразків є необхідними та доцільними для характеристики частинок та ідентифікації небезпеки для нанорозмірних матеріалів загалом, на думку Управління охорони здоров'я Канади з питань харчування, вони не повністю відображають вплив TiO_2 як складової харчових продуктів. Загалом, Управління з питань харчових продуктів Міністерства охорони здоров'я Канади не виявило жодних серйозних проблем для здоров'я щодо використання TiO_2 як харчової добавки» (State of the Science of Titanium Dioxide, 2022).

На нашу думку, аналіз результатів дослідження токсичності наночастинок діоксиду титану дійсно може містити певні проблеми, зокрема і при застосування як допоміжної речовини в складі лікарських препаратів. Зазначимо, що:

1) діоксид титану є оксидом перехідного металу і може володіти каталітичними властивостями;

2) титан(IV) здатний утворювати пероксидні сполуки та комплекси з перексидом, що за певних умов може призводити до окиснення органічних сполук, які контактують в реакційній суміші (Takahara та ін., 2005; Rochetto, & Edson, 2015);

3) хоча нанорозмірний TiO_2 не поглинає видиме світло, він сильно поглинає ультрафіолетове випромінювання, що призводить до утворення гідроксильних радикалів (Tony, & Egerton, 2019), а радикали OH реагують з багатьма органічними молекулами. Тому вплив сонячного або штучного світла може призвести до швидкого розкладання адсорбованого лікарського засобу (Templeton та ін., 2006);

4) обробка ультразвуком діоксиду титану у присутності води, на нашу думку, може призводити до утворення активних комплексів, введення яких у живий організм і може провокувати небажані наслідки, наприклад, руйнування ДНК і викликати токсичність.

Для перевірки можливого утворення токсичних перексидних речовин при контакті харчового продукту з діоксидом титану використовувалась суміш E 171 із соняшниковою олією й ближнім ультрафіолетовим опроміненням, яке є складовим компонентом звичайного сонячного випромінювання. Під ультрафіолетову лампу зі спектральним діапазоном випромінювання 320–400 нм у світлозахисному боксі вміщували п'ятнадцять зразків — три серії по п'ять зразків. Перша серія зразків «темний контроль»: у кварцову кювету вміщували рослинну олію

товщиною шару 10 мм та закривали навколо кювети алюмінієвою фольгою. Друга серія зразків: в кварцову кювету вміщували рослинну олію товщиною шару 10 мм. Третя серія зразків: у кварцову кювету вміщували діоксид титану товщиною шару близько 0,2 мм та рослинну олію товщиною шару 10 мм. Загальний час експозиції складав 5 годин. Початкове значення пероксидного числа складало 1,2 ммоль $\frac{1}{2}$ О/кг. Вимірювання в зразках проводили через кожну годину. Зразок із діоксидом титану попередньо фільтрували. Отримані результати надані в табл. 2.

Таблиця 2. Визначення пероксидного числа у рафінованій олії при дії ультрафіолетового випромінювання

Тип зразка соняшникової олії	Пероксидне число, ммоль $\frac{1}{2}$ О/кг				
	1 година	2 години	3 години	4 години	5 годин
«Темний» контроль	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3
Без TiO ₂	1,4	1,6	1,9	2,3	2,4
З TiO ₂	1,7	2,6	3,1	3,8	4,8

Як видно з отриманих результатів, пероксидне число в соняшниковій олії при дії ультрафіолетового випромінювання повільно зростає із тенденцією до стабілізації, що можна пояснити антиоксидантною дією вітаміну Е. У випадку суміші олії із діоксидом титану спостерігається стійка тенденція до зростання пероксидного числа. Ймовірно, ця тенденція буде ще вищою при вичерпанні антиоксидантної дії вітаміну Е. Отже, використання діоксиду титану при виробництві, наприклад, фальсифікованого згущеного молока, може складати небезпеку, особливо з огляду на кінцевих споживачів, які можуть бути дітьми або людьми похилого віку.

Після заборони Е 171 для використання в харчових продуктах ЄС запропонував трирічний період часу, протягом якого ЕМА разом із фармацевтичною промисловістю може оцінити доцільність використання різних альтернатив TiO₂ і те, як потенційна заборона TiO₂ може вплинути на фармацевтичні продукти і на пацієнтів. Тож уже в 2025 р. діоксид титану може бути заборонено в ЄС як допоміжну речовину в складі лікарських препаратів (Schoneker, 2023). Основне використання в технології як барвника — це таблетовані лікарські форми (69,75%) та капсули (24,47%) (Use of Titanium Dioxide, 2021). Фактично на сьогодні не існує реальної альтернативи використанню діоксиду титану, особливо при захисті лікарського препарату від дії світла (Schoneker, 2022). Станом на 2023 р. на ринку ЄС існує понад 91000 схвалених лікарських засобів для лікування людей і приблизно 800 ветеринарних препаратів, що містять TiO₂, склад яких потрібно буде змінити, якщо діоксид титану буде заборонено у складі лікарських засобів (Blundell та ін., 2022). Однак така заміна однозначно може призвести до дефіциту значної кількості ліків. Оскільки будь-яка зміна складу лікарського засобу призведе за собою лавину нових досліджень, які стосуватимуться якості й безпечності лікарських засобів і включатимуть дослідження сумісності компонентів, стабільності та фотостабільності лікарських форм, можливі дослідження біоеквівалентності і добре, якщо лише щодо проведення порівняльних тестів на профіль розчинення. Потрібно провести валідацію технологічного процесу, розглянути пи-

тання доцільності ревалідації аналітичних методик тощо. Заміна E 171 на альтернативну допоміжну речовину може призвести до утворення нових домішок, після цього почнеться процедура виділення таких речовин і вивчення їх безпечності, які включають також і вивчення токсичності. Це ще й здорожчання лікарських засобів. Зазначимо, що за час існування діоксиду титану як фармацевтичного ексципієнту, фактично жодна побічна дія лікарського засобу не була пов'язана безпосередньо з TiO_2 , тому потенційна його заборона може призвести до значних проблем, включаючи питання доступності ліків та вчасно наданої медичної допомоги. Для значної кількості препаратів, які давно присутні на ринку, особливо генериків, просто буде не вигідно проводити нові процедури, а це означає, що вони можуть бути зняті з продажу і вилучені. Певна кількість невеликих фармацевтичних компаній можуть взагалі зникнути, чим порушиться конкурентне середовище. Розробка складу, що не містить TiO_2 , і підготовка наступного подання змін до регуляторних органів потребують значних витрат, оцінка яких становить від 90000 до 500000 євро на продукт. Ці витрати включають дослідження зміни складу, виробничі цикли, дослідження стабільності, оновлення реєстраційного досьє на препарат тощо. Незважаючи на те, що від компанії до компанії існують відмінності, загальна оціночна вартість фармацевтичної промисловості на перегляд всіх цих лікарських засобів становить близько 32 млрд євро (34 млрд дол. США) (Schoneker, 2023). Також логічним є запитання: а хто буде проводити експертизу цих усіх тисяч лікарських засобів після заміни допоміжної речовини? Питань виникає більше, ніж є наявних відповідей. Пораховано, наприклад, що, виходячи із кількісного вмісту діоксиду титану в лікарському засобі, людині потрібно буде приймати 681 таблетку кожні 6 год щодня протягом 8,5 року, перш ніж досягти вказаної EFSA генотоксичної дози, яка викликає занепокоєння (Schoneker, 2022).

Будь-які зміни займуть час, оскільки для розробки нового складу та отримання необхідних нових даних знадобиться приблизно 5 років. У документації на лікарський засіб у розділі «Нова допоміжна речовина» регуляторні органи вимагатимуть повної інформації про виробництво, характеристику та засоби контролю з перехресними посиланнями на підтверджуючі дані щодо безпеки.

Авторами (Radtke, Wiedey, & Kleinebudde, 2021) розглянуті альтернативи E 171. Однак їх висновок звучить невтішно — жоден з альтернативних пігментів не продемонстрував ефективності, порівнянної з TiO_2 . Це досить складне завдання. Непрозорість матеріалу може бути досягнута використанням відповідного барвника зі спектром поглинання, подібним до спектра поглинання препарату або використанням відбиваючого пігменту, такого як діоксид титану (Ahmad, Ahmed, Anwar, Sheraz, & Sikorski, 2016). З нормативної точки зору карбонат кальцію (CaCO_3) можна розглядати як найкращу альтернативу TiO_2 . Цей пігмент є єдиним білим барвником, схваленим як лікарський барвник у ЄС. Інші сполуки також знаходяться на стадії оцінки, наприклад, карбонат магнію. Однак для виробників рецептур, які шукають ефективну стратегію зниження ризику, карбонат кальцію є першим вибором завдяки його поточному статусу схвалення в ЄС. Проте було виявлено низку недоліків цих альтернатив, наприклад, неможливість отримати достатньо тонкі плівки, проблеми з ланцюгом поставок, проблеми з безпечніс-

тю — наявність домішок важких металів тощо. Дані, доступні у відкритому доступі, свідчать про те, що багато виробників допоміжних речовин працюють над розробкою формул без TiO_2 . Може виникнути парадоксальна ситуація, коли E 171 буде заборонена для використання лише в ЄС, тоді як у всьому іншому світі буде використовуватись. TiO_2 можна замінити іншими пігментами, такими як ферум оксиди. Однак це призведе до іншого кольору та потребує розробки рецептури, а також може вплинути на інші фактори, такі як прийнятність препарату пацієнтами. Альтернативні барвники повинні бути або вже включені, або додані до списку дозволених харчових добавок у Регламенті 1333/2008 (Final feedback, 2021).

Висновки

Заборона використання E 171 як барвника харчових продуктів в ЄС наразі є сумнівним рішенням, яке базується на не повністю валідних даних щодо можливої генотоксичності наночастинок TiO_2 . Це рішення не підтримане регуляторними органами США та Канади. Однак авторами показано, що за певних умов комбінація діоксиду титану з харчовим продуктом або лікарським засобом може спровокувати процеси окиснювальної деструкції, що варто врахувати в технологічних процесах. Заміна діоксиду титану на інші барвники у складі лікарських засобів може спричинити значні проблеми у фармацевтичній індустрії, вимагатиме великих фінансових і людських ресурсів та може спровокувати зникнення з продажу доступних генеричних лікарських засобів.

Література

- Ahmad, I., Ahmed, S., Anwar, Z., Sheraz, M. A., & Sikorski, M. (2016). Photostability and Photostabilization of Drugs and Drug Products. *International Journal of Photoenergy*, 2016, Article ID 8135608, 19. doi: <https://doi.org/10.1155/2016/8135608>.
- Aguilar, F., Crebelli, R., Domenico, A. D., Dusemund, B., Frutos, M. J., Galtier, P., ..., Younes, M. (2016). Scientific Opinion on the re-evaluation of titanium dioxide (E 171) as a food additive. EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS). *EFSA Journal*, 14(9), 4545, 83. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4545.
- Blaznik, U., Krušić, S., Hribar, M., Kušar, A., Žmitek, K., & Pravst, I. (2021). Use of Food Additive Titanium Dioxide (E171) before the Introduction of Regulatory Restrictions Due to Concern for Genotoxicity. *Foods*, 10(8), 1910. doi: 10.3390/foods10081910.
- Blundell, R., Butterworth, P., Charlier, A., Daurio, D., Degenhardt, M., Harris D., ..., Wiedey, R. (2022). The Role of Titanium Dioxide (E171) and the Requirements for Replacement Materials in Oral Solid Dosage Forms: An IQ Consortium Working Group Review. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 111(1), 2943—2954. doi:10.1016/j.xphs.2022.08.011.
- Combined Compendium of Food Additive Specifications. Titanium Dioxide. Prepared at the 76th JECFA (2012) and published in FAO JECFA Monographs 13 (2012). *Food and Agriculture Organization (FAO)*. Взято з (листопад 2023): https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/jecfa_additives/docs/monograph13/additive-466-m13.pdf.
- Commission Regulation (EU) No 1129/2011 of 11 November 2011 amending Annex II to Regulation (EC) No 1333/2008 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union list of food additives Text with EEA relevance. *An official website of the European Union*. Взято з (листопад 2023): <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2011/1129/oj>.
- Filing of Color Additive Petition From Environmental Defense Fund, et al.; Request To Revoke Color Additive Listing for Use of Titanium Dioxide in Food. 88(85), 27818—27819. (2023). *Federal Register*. Взято з: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2023-05-03/pdf/2023-09366.pdf>.

Final feedback from European Medicine Agency (EMA) to the EU Commission request to evaluate the impact of the removal of titanium dioxide from the list of authorised food additives on medicinal products. EMA/504010/2021/. (2021). *European Medicine Agency. Science Medicines Health*. Взято з: https://www.ema.europa.eu/en/documents/report/final-feedback-european-medicine-agency-ema-eu-commission-request-evaluate-impact-removal-titanium_en.pdf.

Hardy, A., Benford, D., Halldorsson, T., Jeger, M. J., Knutsen, H. K., More, S., ..., Mortensen A. (2018). Guidance on risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain: Part 1, human and animal health. *EFSA Journal*, 16(7), 5327, 95. doi: 10.2903/j.efsa.2018.5327.

Judgment of the General Court in Joined Cases T-279/20, T-288/20 and T-283/20. Press Release № 190/22. Luxembourg, 23 November 2022. *Court of Justice of the European Union*. Взято з (листопад 2023): <https://curia.europa.eu/jcms/upload/docs/application/pdf/2022-11/cp220190en.pdf>.

Liu, K., Lin, X., & Zhao, J. (2013). Toxic effects of the interaction of titanium dioxide nanoparticles with chemicals or physical factors. *International Journal of Nanomedicine*, 8(1), 2509—2520. doi:10.2147/IJN.S46919.

Mironyuk, I. F., Soltys, L. M., Tatarchuk T. R., & Savka K. O. (2020). Methods of Titanium Dioxide Synthesis (Review). *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(3), 462—477. doi: 10.15330/pccs.21.3.462—477.

Radtke, J., Wiedey, R., & Kleinebudde, P. (2021). Alternatives to titanium dioxide in tablet coating. *Pharmaceutical Development and Technology*, 26(9), 989—999. doi: 10.1080/10837450.2021.1968900.

Regulation (EC) No 1333/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on food additives. *Official Journal*. Взято з (листопад 2023): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008R1333-20231005>.

Rochetto, U. L., & Edson, T. (2015). Degradation of volatile organic compounds in the gas phase by heterogeneous photocatalysis with titanium dioxide/ultraviolet light. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(7), 810—817. Взято з: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/10962247.2015.1020117?needAccess=true>.

Ropers, M.-H., Terrisse, H., Mercier-Bonin, M., & Humbert, B. (2017). Titanium Dioxide as Food Additive. In M. Janus (Ed.), *Titanium Dioxide as Food Additive*. Взято з (листопад 2023): <https://doi.org/10.5772/intechopen.68883>.

Schoneker, D. R. (2023). How Banning TiO₂ Might Impact Pharma. In C. Spivey (Ed.), *Pharmaceutical Technology. Quality and Regulatory Sourcebook March 2023*. Взято з: <file:///C:/Users/Acer/Downloads/pharmaceutical-technology-march-2023.pdf>.

Schoneker, D. R. (2022). Why would the EU want to ban titanium dioxide in pharmaceutical products? What would be the potential impact on patients? *J. Excipients and Food Chem.*, 13(4), 94—98. Взято з: <file:///C:/Users/Acer/Downloads/66279-why-would-the-eu-want-to-ban-titanium-dioxide-in-pharmaceutical-products-what-would-be-the-potential-impact-on-patients.pdf>.

State of the Science of Titanium Dioxide (TiO₂) as a Food Additive. (2022). *Food Directorate. Health Canada*. Взято з: https://publications.gc.ca/collections/collection_2022/sc-hc/H164-341-2022-eng.pdf.

Summary of Color Additives for Use in the United States in Foods, Drugs, Cosmetics, and Medical Devices. (2022). *United States Food and Drug Administration*. Взято з (листопад 2023): <https://www.fda.gov/industry/color-additive-inventories/summary-color-additives-use-united-states-foods-drugs-cosmetics-and-medical-devices>.

Takahara, Y. K., Hanada, Y., Ohno, T., Ushiroda, S., Ikeda, S., & Matsumura, M. (2005). Photo-oxidation of organic compounds in a solution containing hydrogen peroxide and TiO₂ particles under visible light. *Journal of Applied Electrochemistry*, 35, 793—797. Взято з: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10800-005-1395-3>.

Templeton, A. C., Bowen, W. E., Klein, L. J., Harmon, P. A., Lu, Y., & Reed R. A. (2006). Unexpected photochemistry in pharmaceutical products: a review on the role of diluents, excipients, and product components in promoting pharmaceutical photochemistry. In J. T. Piechocki, K. Thoma (Eds.),

Pharmaceutical photostability and stabilization technology (1st Edition). (pp. 247—276). New York London: Informa Healthcare. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420014136>.

Tony, J., & Egerton, T. A. (2019). Titanium Compounds, Inorganic. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. doi: <https://doi.org/10.1002/0471238961.0914151805070518.a01.pub3>.

Toxicological evaluation of some food colours, emulsifiers, stabilizers, anti-caking agents and certain other substances. Titanium Dioxide. FAO Nutrition Meetings Report Series No. 46A WHO/FOOD ADD/70.36. *International programme on chemical safety. World health organization*. Взято з (листопад 2023): <https://www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v46aje19.htm>.

Use of Titanium Dioxide as excipient in human medicines. Feedback submitted to EMA on 2 July 2021. *INDUSTRY FEEDBACK TO QWP EXPERTS/EMA QUESTIONS*. Взято з (листопад 2023): https://www.ema.europa.eu/en/documents/other/annex-i-use-titanium-dioxide-exciipient-human-medicines-industry-feedback-qwp-experts/ema-questions_en.pdf.

US FDA confirms the safety of titanium dioxide as a food additive. (2023). *Titanium Dioxide Manufacturers Association (TDMA)*. Взято з (листопад 2023): <https://www.tdma.info/news/us-fda-confirms-the-safety-of-titanium-dioxide-as-a-food-additive/>.

Younes, M., Aquilina, G., Castle, L., Engel, K-H., Fowler, P., Frutos Fernandez, MJ., ..., Wright, M. (2021). Scientific Opinion on the safety assessment of titanium dioxide (E171) as a food additive. *EFSA Journal*, 19(5), 6585, 130. doi: 10.2903/j.efsa.2021.6585.

STUDY OF THE EFFECT OF DRIED GINGER EXTRACT ON THE QUALITY OF MARGARINE

K. Rubanka, T. Levkivska, O. Dushchak

National University of Food Technologies

Key words:

Margarine
Dried ginger extract
Peroxide
Index
Acid index

Article history:

Received 10.11.2023
Received in revised form
29.11.2023
Accepted 11.12.2023

Corresponding author:

K. Rubanka

E-mail:

rubanka_ekaterina@ukr.net

Citation: K. В. Рубанка, Т. М. Левківська, О. В. Душчак (2023). Дослідження впливу висушеного екстракту імбиру на якість маргарину. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 146—154.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-13

ABSTRACT

The market of margarine is expanding worldwide due to large-scale trade, lower cost compared to butter, growth in the bakery and confectionery markets where margarine is used as a raw ingredient, and seasonal independence. The article reveals the expediency of adding dried ginger extract to the technology of margarine production, which allows to expand the range of the margarine production and extend its shelf life. Thus, the paper presents the results of research on the influence of different dosages of spicy raw materials from 0.5 to 4% on the acid and peroxide index of margarine during 90 days of storage in a refrigerator at a temperature of 4 °C without packaging. Research results confirm that plant extracts are natural inhibitors of oxidative processes, and therefore reduce both the peroxide and acid index of margarine during the recommended storage period of 60 days. Ginger, as a source of phenolic and polyphenolic compounds, which are represented by α - and β -zingiberene, sesquiterpene, camphene, cineole, etc., reduces the peroxide index of fat to 8.8%, and the acid index to 28%, in the case of adding 0.5% of extract. The investigated parameters naturally decreased when the dosage of the extract increased to 1, 2, and 4% compared to the control sample. For example, the peroxide index reduced to 28% and the acid index to 52% when 4% dried ginger extract was added compared to the sample without its addition. The addition of the studied raw material has a positive effect on the sensory parameters of margarine, giving it a spicy taste and aroma. The color of the fat also changes, becoming more yellow with an increase in the dosage of the extract. However, increasing the dosage to 4% leads to negative consequences, namely the appearance of a brown shade and margarine and the formation of a too burning taste, which was negatively perceived by the group of experts.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИСУШЕНОГО ЕКСТРАКТУ ІМБИРУ НА ЯКІСТЬ МАРГАРИНУ

К. В. Рубанка, Т. М. Левківська, О. В. Душак

Національний університет харчових технологій

Ринок маргарину розширюється у всьому світі завдяки широкомасштабній торгівлі, нижчій вартості порівняно з вершковим маслом, зростанню ринків хлібобулочних і кондитерських виробів, де маргарин застосовується як сировинний інгредієнт і сезонній незалежності. В статті розкрито доцільність додавання екстракту імбиру в технології виробництва маргарину столового, що дає змогу розширити асортимент ринку маргарину та подовжити термін його зберігання. Наведено результати досліджень впливу різного дозування пряної сировини від 0,5 до 4% на кислотне та перекисне число маргарину впродовж 90 діб зберігання в холодильнику за температури 4 °C без упаковки. Результати досліджень підтверджують, що рослинні екстракти є природним інгібітором окисних процесів, а тому знижують як перекисне, так і кислотне число маргарину впродовж рекомендованого терміну зберігання 60 діб. Імбир як джерело фенольних і поліфенольних сполук, які представлені α - і β -цингібереном, сесквітерпеном, камфеном, цинеолом тощо, знижує перекисне число жиру до 8,8%, а кислотне — до 28%, у разі внесення 0,5% екстракту. Досліджувані показники закономірно знижувались у разі збільшення дозування екстракту до 1, 2 та 4% порівняно з контрольним зразком. Наприклад, перекисне число знижувалось до 28%, а кислотне число — до 52% у разі внесення 4% сухого екстракту імбиру порівняно зі зразком без внесення добавки. Додавання досліджуваної добавки позитивно впливає на органолептичні показники маргарину, надаючи йому пряного смаку й аромату. Також змінюється колір жиру, який стає жовтішим зі збільшенням дозування екстракту. Проте збільшення дозування добавки до 4% призводить до негативних наслідків, зокрема появи коричневого відтінку та утворення занадто пекучого смаку, що негативно сприймалось групою експертів.

Ключові слова: маргарин, екстракт імбиру, перекисне число, кислотне число.

Problem definition and its relationship with important practical tasks. Margarine is widely used as butter substitute in the food industry to impart a certain flavor and aroma to food products, which is produced in the process of heating margarine (Vidanagamage et al., 2016). For example, during the baking of flour confectionery and bakery products, during the production of second dishes in canning technology, as a component of the first and second lunch dishes of quick preparation, etc. In addition to vegetable fats, margarine contains a small percentage of proteins, carbohydrates and water, which makes it a suitable substrate for microorganisms (Vidanagamage et al., 2016). Although margarine spoilage most often occurs because of chemical rancidity due to fat hydrolysis, microbiological problems also occur, accompanied by the appearance of a cheesy, rotten or fruity aroma and a rancid aftertaste (Rady & Badr, 2003, Goryainova & Trykul, 2019). Preservatives prevent the biological deterioration of the product under the influence of microorganisms and bacteria, and antioxidants prevent their chemical oxidation.

The mechanism of action of antioxidants is also differs from the action of preservatives. They slow down the oxidation process by interacting with air oxygen, interrupting the oxidation reaction or destroying peroxides that have already formed. To reduce oxidative processes and microbiological spoilage of margarine, manufacturers often use synthetic antioxidants (phenol derivatives), for example, butylhydroxyanisole, butylhydroxytoluene, sodium isoscorbate and others. However, synthetic antioxidants can cause allergies. Therefore, scientists pay attention to the use of natural antioxidants, which, in addition to being safe substances, are also useful.

It is known that plants are natural components with a preservative effect due to the presence in their composition of phenolic, polyphenolic compounds, carotenoids, which are able to quickly react with peroxide radicals, destroy hydroperoxides without the formation of free radicals, which leads to chain breakage and slowing down the rate of oxidation. The introduction of antioxidants can also increase the nutritional and biological value of the product, which is confirmed by the studies of Palko (2009) and Horyainov (2019), who added walnut leaf powder and carrot powder, respectively, thereby increasing the nutritional value of margarine. Therefore, their use in the technology of fats of vegetable origin is relevant.

Analysis of recent studies and publications. It was proven that spices have a high potential as natural components with a preservative effect, which is one of the reasons for their wide use in the food industry, namely due to the presence of a wide range of antioxidants. Natural antioxidants are compounds that protect biological systems from the harmful effects of free radicals. Antioxidants can act as scavengers of free radicals and inhibitors of oxidative enzymes (Fanhani, & Ferreira, 2006). These properties are due to many substances, including some vitamins, flavonoids, terpenoids, carotenoids, phytoestrogens, minerals, etc. and render spices and some herbs or their antioxidant components as preservative agents in food (Calucci et al., 2003). Since the antioxidant compounds contained in spices (Рубанка, Терлецька, & Хвостик, 2020) effectively slow down the oxidative degradation of lipids and contribute to the preservation of the quality and nutritional value of the food products to which they are added, spices and their extracts are of increasing interest for food industry, including fat technology (Ozcan, Erel, & Herken, 2009).

Scientists from the Federal University of Lavras (Brazil) investigated the addition of a spice mixture containing green onions, garlic, marjoram, thyme, lemon, oregano and/or basil. According to their research, total phenolic content increased 5 times in chemical composition of margarine and there was significant increase ($p < 0.05$) in the antioxidant activity of the finished product (Oliveira Lopes, Piccolo Barcelos, Araujo Dias, Souza Carneiro, & Abreu, 2014). Adding rosemary extract to margarine increases its antioxidant activity by 200 ppm and, as a result, extends shelf life (Azizkhani, & Zandi, 2010). Panko (2009) proved that the use of walnut leaf powder in the amount of 0.5% with ascorbic acid in the amount of 0.2% allows to slow down the process of oxidative deterioration of margarine by 2.6 times. Ukrainian scientists (Лозова, & Давидович, 2008) claim that the substances of turmeric in combination with synergists have antioxidant properties and can be used to extend the shelf life of fats, since this technological method allowed to slow down the process of oxidative deterioration of fats almost 2 times. In addition, the introduction of natural antioxidants contained in spices makes it

possible to increase the biological value of products. Thus, scientists from different countries prove the expediency of using spices in margarine technology.

Ginger is not an exception. This spice is increasingly used in the confectionery industry, due to its spicy aroma, which is perfectly combined with flour confectionery products. The content of ascorbic acid in ginger is 48...66 mg %. Its content in the dry root of ginger exceeds the similar indicator in lemons, mountain ash, oranges, tangerines (Сімахіна, & Шевченко, 2014b). Sometimes there is used ginger extract. When using aqueous extracts, a significant part of bioflavonoids does not pass into the extractant. Therefore, in water-alcohol solutions of different concentrations, especially with a mass fraction of alcohol of 40%, the concentration of phenolic compounds extracted into the solution is quite significant — more than 3000 mg/dm³ (Сімахіна, & Шевченко, 2014a).

Adding ginger to margarine is one of the ways to increase the use of margarine and extend its shelf life due to the presence of essential compounds in it, such as α - and β -zingiberenes, sesquiterpenes, camphene, cineole, bisabolen, borneol, citral, linalool and at. Since it is known (Silva et al, 2021) that the listed compounds have antioxidant and inhibitory properties, and therefore should inhibit the rancidity of fats.

The purpose of this study was to improve the quality of table margarine by adding dried ginger extract, which is also a safe flavor additive.

Research methods. Table margarine with a fat content of 65% of TM "Schedro" produced by "Lviv Zhirkombinat" PrJSC was chosen as the object of research. Dried ginger extract with a mass fraction of moisture of 6.7% was added to the semi-finished margarine product (temperature 20—22 °C) in the amount of 0.5%, 1%, 1.5% and 2%.

Dry ginger extract was produced using double extraction with water with a ratio of raw material:water 1:15 at an elevated temperature of the extraction process of 90 °C for 3 hours. Subsequently, the condensed extract was dried to a dry matter content of 30% at a temperature of 60 °C then using a roller dryer to a moisture content of no more than 5%, followed by grinding to a particle size of 0.05...0.10 mm (Рубанка, Терлецька & Абрамова, 2017).

According to its structure and physical and chemical properties, ginger is a difficult-to-extract vegetable raw material, and therefore, during its extraction, conventional physical methods should be used to intensify internal mass transfer (Шевченко, Деканський, & Запорожець, 2014).

Mixing with simultaneous grinding was carried out in a laboratory disperser until a homogeneous suspension was obtained.

Margarine was stored in a refrigerator at a temperature of 4 °C for 90 days without packaging.

The peroxide index of fat is one of the main indicators of the quality of fat products, which characterizes the safety of the product, and therefore is regulated according to state standard of Ukraine (DSTU 4465:2005). Therefore, in the studied samples, the peroxide index of fat was determined after every 15 days of storage. This indicator was determined by the titrimetric method, which is based on the interaction of the oxidation products of vegetable oils and fats (peroxides and hydroperoxides) with potassium iodide in a solution of acetic acid and chloroform and in the subsequent quantitative determination of the released iodine with a solution of sodium thiosulfate by the titrimetric method (Fruehwirth et al, 2021).

The principle of the acid index determination method is based on the titration (neutralization) of free fatty acids with a solution of potassium or sodium hydroxide in the presence of the phenolphthalein indicator (Fruehwirth et al, 2021).

Statistical processing of experimental data was performed for three measurements of all studied properties, the discrepancy between studies did not exceed 5%.

The sensory assessment of fat quality was determined by a complex indicator (Шевченко, & Фурсік, 2023). 10 people of different age and social class were selected as experts. As a control sample, a sample of margarine was used, which met the norms of regulatory documentation for this type of product (DSTU 4465:2005 Margarine. General technical conditions).

Results and discussion. It is known (Silva at al., 2021) that in case of access of oxygen, light and increased relative humidity in the air to fats, their fatty acids are partially oxidized, which leads to the formation of peroxide, and the longer the oxidation process takes place, the higher the peroxide index of the fat increases. The change in the calorific value of margarine during its storage in the refrigerator with different contents of dried ginger extract was studied. The results of the research are shown in Fig. 1.

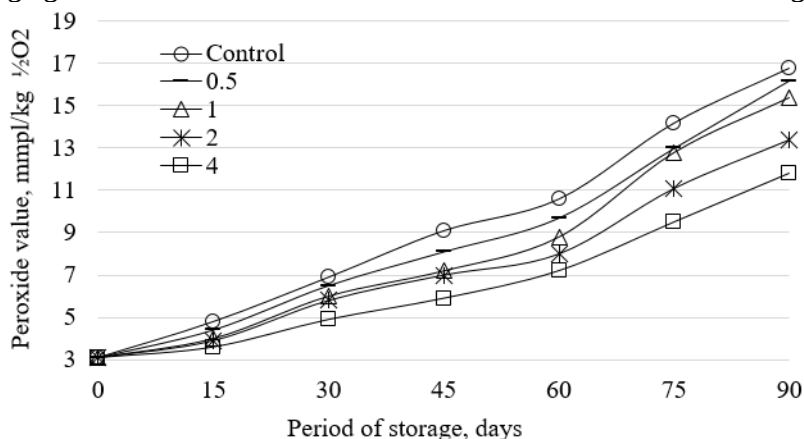


Fig. 1. Changes in the peroxide index of margarine during its storage

It was established that in all studied samples during 90 days of storage, a gradual increase in the peroxide index of fat is observed, but the oxidation process of margarine slows down with an increase in the dosage of dried ginger extract. Oxidation occurs due to free radical chain reactions, which are accompanied at the first stages by the formation of peroxides and hydroperoxides (Fanhani, & Ferreira, 2006). However, the presence of natural antioxidants, such as α - and β -zingiberenes, sesquiterpenes, camphene, cineole, bisabolene, borneol, citral, linalool, etc. (Spence, 2023), which are part of the dried ginger extract, reduce the oxidative transformation of fats, which suppress the activation of free radical reactions lipid peroxidation (Fanhani, & Ferreira, 2006) that is confirmed by our research results. Thus, at the first stages of margarine storage, the peroxide index in all samples is almost the same and is within 3.6...4.5 mmol/kg $\frac{1}{2}$ O₂.

At the end of the recommended storage period 60 days according to DSTU 4465:2005 Margarine. General technical conditions, the peroxide index for the control sample was 10.2 mmol/kg $\frac{1}{2}$ O₂, while with the addition of 4% dried ginger extract, this

indicator decreased by 28%, even in the case of adding a small amount of extract (0.5%), the peroxide index decreased by 8.8% compared to the control sample. A further increase in the storage period led to a sharp rise in the peroxide index of margarine, but even during storage for 90 days, this indicator was lower than the control sample: in the case of adding 0.5% dried ginger extract, the peroxide index of margarine was lower by 4.1%, in the sample with 1% dried ginger extract — by 7.1%, in case of 2% dried ginger extract — by 21.4% and in the sample with 4% dried ginger extract — by 30.3%.

It is known (Silva et al., 2021) that the acid index characterizes the process of enzymatic or non-enzymatic hydrolysis of fat, namely the breakdown of fat with the formation of fatty acids, which can contribute to the acceleration of the oxidation process because of free, unbound in triglycerides acids. Thus, the acid index characterizes the quality of fats, which indicates the total content of free fatty acids.

In order to confirm the obtained results, the patterns of oxidation of margarine samples were determined in the case of adding different amount of dried ginger extract. The results of studying the acid index of margarine during its storage are presented in Fig. 2.

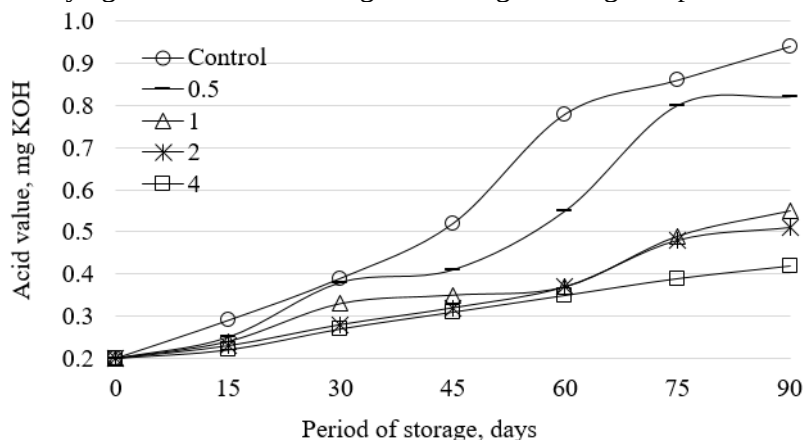


Fig. 2. Changes in the acid index of table margarine during its storage

It was confirmed that in the process of margarine storage, its acid index increased gradually, and with increased dosage of dried ginger extract, this indicator naturally decreased, which indicates the accumulation of free acids, however, dried ginger extract inhibits oxidation processes, selecting free radical chain reactions and at the same time, it reduces the hydrolysis of acylglycerides (Spence, 2023).

The acid index in the control sample increased and reached 0.76 mg of KOH after 60 days of storage. In samples of margarine with the addition of dried ginger extract, the acid index, for the same storage period, was lower than in the control sample by 28%, 51%, 52% and 52% for samples with the addition of 0.5, 1, 2 and 4% of dried ginger extract, in accordance.

An increase of this indicator was observed on the 90th day of storage in all samples. But even 0.5% of dried ginger extract reduced the acid index by 12% compared to the control, while 2% — by 46% and 4% — by 53%. The obtained research results confirm the statement that phenolic compounds of plant raw materials are natural preservatives,

including ginger, the extract of which is a concentrate of water-soluble compounds, not excluding phenolic substances.

Dry ginger extract affects not only the oxidation processes in margarine during storage, but also the sensory indicators, which in turn will also affect the finished product in which margarine is used as a recipe ingredient. Therefore, the taste, smell, consistency and color of margarine were determined. The results of sensory indicators of margarines and their comprehensive quality index (K) are presented in fig. 3.

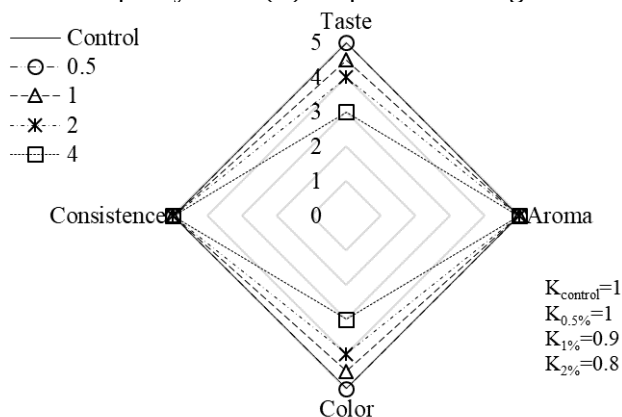


Fig. 3. Effect of dried ginger extract on the sensory parameters of margarine

It was determined that even with a small addition of dried ginger extract (the amount of 0.5%), margarine acquired a spicy taste and aroma. With an increase in the dosage of the extract, the spicy taste and aroma became more saturated, and with the amount of 2% and 4%, this indicator acquired a strong spicy taste, which was accompanied by the appearance of a burning taste. A similar pattern was observed in case of color analysis, which did not change when 0.5% and 1% were added and became one tone yellower when 2% dried ginger extract was added. When adding 4%, the margarine had a brown tint, which was negatively perceived by experts. At the same time, the dried ginger extract did not affect the consistency of margarine, which did not change when the dosage of the extract was increased.

Conclusions

Thus, the presence of phenolic compounds in the composition of dried ginger extract allows to reduce the oxidative reactions that occur with fat during its storage and to partially extend its shelf life, which is confirmed by studies of the chemical transformation of fat during margarine storage. Even a small addition of dried ginger extract reduces the peroxide value of fat to 8.8%, and the acid value to 28%. The addition of dried ginger extract to table margarine has a positive effect on its sensory indicators. Therefore, in order to establish the optimal dosage of dried ginger extract, it is necessary to take into account the influence of dried ginger extract on the physico-chemical and microbiological indicators of the quality of table margarine during its storage, which will allow taking into account the influence of ginger not only on the quality, but also on the safety of the product. These researches are planned to do.

References

- Горайнова, Ю. А., Трикуль, О. О. (2019). Вплив деяких антиоксидантів на термін зберігання харчових жирів. *Обладнання та технології харчових виробництв*, 1(38), 60—66. http://elibrary.donnuet.edu.ua/1568/1/Gorainova_Trykul_artikle_31_03_2019.pdf.
- Лозова, Т. М., Давидович, О. Я. (2008). Використання природних антиоксидантів для стабілізації якості жирів. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького*, Том 10 2(37), 59—62.
- Палько, Н. С. (2009). Вплив нетрадиційної сировини на збереження якості жирів. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького*, Том 11 3(42), 280—283.
- Рубанка, К. В., Терлецька, В. А., Абрамова, А. Г. (2017). Дослідження якості сухого екстракту кореня імбиру. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*, 1(25), 301—310. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2017_2_31.
- Рубанка, К. Терлецька, В., Хвостик, Л. (2020). Дослідження фенольних сполук імбиру / «Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» 86-та Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ: НУХТ, с. 211.
- Сімахіна, Г., Шевченко, А. (2014а). Інактивація окислювальних ферментів рослинної сировини при її екстрагуванні. Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека: міжнародна науково-практична конференція. Київ: НУХТ, 22—23.
- Шевченко А. О., Фурсік О. П. (2023). Вплив концентрату рисового протеїну в поєднанні з фосфоліпідами на якість та харчову цінність пшеничного хліба. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 29(3), 150—158. DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-3-14.
- Сімахіна, Г., Шевченко, А. (2014b). Обґрунтування вибору кореню імбиру для збагачення харчових продуктів. 80-а міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів та студентів «Наукові досягнення молоді — вирішення проблем харчування людства в XXI столітті». Київ: НУХТ, С. 37—38.
- Шевченко, А., Деканський, В., Запорожець, Ю. (2014). Дослідження екстрактивних властивостей імбиру. 80-а міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів та студентів «Наукові досягнення молоді — вирішення проблем харчування людства в XXI столітті». Київ: НУХТ, 277—278.
- Azizkhani, D. C., Zandi, P. (2010). Effects of some natural antioxidant mixtures on margarine stability. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 47, 251—257. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113126336>.
- Spence, Ch. (2023). Ginger: The pungent spice. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 33, 100793. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100793>.
- Calucci, L., Pinzono, C., Zandomenighi, M., Capocchi, A. et al. (2003). Effects of gamma-irradiation on the free radical and antioxidant contents in nine aromatic herbs and spices. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 51, 927—934. <https://doi.org/10.1021/jf020739n>.
- Collins, C. H., Lyne Patricia, H. M., Grange, J. M. (1989). *Collins and Lyne's microbiological methods*, 6th ed. Butter worths, London.
- Fanhani, A. P. G., & Ferreira, M. P. (2006). Antioxidants agents: their role in the nutrition and health of athletes. *Revista de Saúde e Biologia*, 2, 33—41. https://journaldatabase.info/articles/antioxidant_agents_their_role.html.
- Fruehwirth, S., Egger, S., Kurzbach, D., Windisch, J., Jirsa, F., Flecker, T., & Pignitter, M. (2021). Ingredient-dependent extent of lipid oxidation in margarine. *Antioxidants*, 10(1), 1—17.
- Oliveira Lopes C. de M., Piccolo Barcelos de F., Araujo Dias N. A., Souza Cameiro J. de D., Abreu W. C. (2014). Effect of the addition of spices on reducing the sodium content and increasing the antioxidant activity of margarine. *LWT — Food Science and Technology*, 58, 63—70. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.02.029>.
- Ozcan, M. M., Erel, O., Herken, E. E. (2009). Antioxidant activity, phenolic content, and peroxide value of essential oil and extracts of some medicinal and aromatic plants used as condiment sand herbal teas in turkey. *Journal of Medicinal Food*, 12, 198—202. DOI:10.1089/jmf.2008.0062.

Rady, A. H., Badr, H. M. (2003). Keeping the quality of cows' butter by γ -irradiation. *Grasas y Aceites*, 54, 410—418. https://www.researchgate.net/publication/26523902_Keeping_the_quality_of_cows'_butter_by_g-irradiation.

Silva, Th. J., Barrera-Arellano, D., Badan Ribeiro, A. P. (2021). Margarines: Historical approach, technological aspects, nutritional profile, and global trends. *Food Research International*, 147, 110486. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110486>.

Silva, Th. J., Fernandes, G. D., Bernardinelli, O. D., Rosa Silva E. C., D. Barrera-Arellano, A. P. Badan Ribeiro. (2021). Organogels in low-fat and high-fat margarine: A study of physical properties and shelf life. *Food Research International*, 140, 110036. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110036>.

Vidanagamage, S. A., Pathiraje, O. D. A. N. (2016). Perera. Effects of Cinnamon (*Cinnamomum verum*) extract on functional properties of butter. *Procedia Food Science*, 6, 136—142. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2016.02.033>.

THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF CRYOCONCENTRATES OF GRAPE MUST IN THE PRODUCTION OF SEMI-DRY AND SEMI-SWEET NATURAL WINES

V. Kucherenko^{1,2}, O. Uspalenko^{1,2}, M. Bilko¹, V. Burda²

¹National University of Food Technologies

²LLC "RPC "Ukrainian Wine Institute"

Key words:

Freezing
Cryoconcentrate
Sugar
Sucrose
Wine

Article history:

Received 14.11.2023
Received in revised form
29.11.2023
Accepted 12.12.2023

Corresponding author:

V. Kucherenko
E-mail:
ukrvinprom_kyiv@ukr.net

Citation: B. M. Кучеренко, О. В. Успенко, М. В. Білько, В. Є. Бурда (2023). Ефективність використання кріоконцентратів виноградного суслу у виробництві напівсухих і напівсолодких натуральних вин. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 155—167.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-14

ABSTRACT

The study of the effectiveness of using cryoconcentrates obtained from grape must as a substitute for permitted sweeteners in the production of semi-dry, semi-sweet natural wines and non-alcoholic wines is shown in the article. Such concentrates also have the potential to be used in alcohol-free wines to regulate acidity. The main focus was on improving the quality of wine and promoting the health of consumers, enriching drinks with useful substances.

The article convincingly argues the negative impact of sucrose on the human body, pointing the need to research cryoconcentrates as a valuable alternative material. It was found that these concentrates provide a higher level of biologically active compounds in wines, possibly giving them therapeutic and preventive properties.

It is important to emphasize that semi-dry, semi-sweet table wines and still wines made using these concentrates should not be considered alcoholic products, as they do not contain higher purity alcohol or added refined sugar.

Future research should focus on confirming the safety of cryoconcentrates for human consumption, as well as studying the content of beneficial substances and changes in their concentration and quantity during winemaking.

It is also important to note that the method of production of these types of wines with the addition of cryoconcentrate of grape must is reflected as a significant step towards production wines such as Asti Spumante and Ice-wine, where grape sugar is also used. However, in the production of Ice-wine, the concentration of berry juice occurs naturally on grape bushes, in our case, this process takes place in special containers after technological processing of grapes. The potential of these concentrates to improve wine quality remains a promising direction for further research.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-14

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КРІОКОНЦЕНТРАТІВ ВІНОГРАДНОГО СУСЛА У ВИРОБНИЦТВІ НАПІВСУХИХ І НАПІВСОЛОДКИХ НАТУРАЛЬНИХ ВИН

В. М. Кучеренко^{1,2}, О. В. Успенко^{1,2}, М. В. Білько¹, В. Є. Бурда²

¹Національний університет харчових технологій

²ТОВ «НВЦ «Український інститут вина»

У статті досліджено ефективність використання кріоконцентратів, отриманих із виноградного сусла, як заміни дозволених підсолоджувачів у виробництві напівсухих, напівсолодких натуральних вин і, можливо, безалкогольних вин. Подібні концентрати також можуть використовуватися в безалкогольних винах для регулювання кислотності. Основна увага зосереджена на підвищенні якості вина та сприянні здоров'ю споживачів, збагаченні напоїв корисними речовинами.

Доведено негативний вплив сахарози на організм людини, вказано на потребу дослідження кріоконцентратів як цінної альтернативи. Виявлено, що ці концентрати забезпечують вищий рівень біологічно активних сполук у винах, надаючи їм лікувальних і профілактичних властивостей. Важливо підкреслити, що напівсухі, напівсолодкі столові вина та безалкогольні вина, виготовлені з використанням цих концентратів, не повинні розглядатися як алкогольні продукти, оскільки вони не містять спирту вищої чистоти чи добавок рафінованого цукру.

Майбутні дослідження мають фокусуватися на підтвердженні безпечності застосування кріоконцентратів для людського споживання, а також вивченні вмісту корисних речовин та змін їх концентрації і кількості під час виробництва вина.

Також важливо зазначити, що спосіб виробництва цих видів вин за допомогою кріоконцентрату виноградного сусла є значним кроком до вин типу *Asti Spumante* та *Ice-wine*, де також використовується цукор виноградної ягоди. Однак у виробництві *Ice-wine* концентрація соку ягоди відбувається природно на кущах винограду, в нашому ж випадку цей процес відбувається в спеціальних ємностях після технологічної переробки винограду. Потенціал цих концентратів для підвищення якості вина залишається перспективним напрямком для подальших досліджень.

Ключові слов: виморожування, кріоконцентрат, цукор, сахароза, вино.

Постановка проблеми. Головними завданнями сучасного виноробства є висока якість і конкурентоспроможність готової продукції, що потребують перманентної уваги. На ринку збільшується попит на продукти з підвищеним вмістом біологічно активних речовин (БАР) і лікувально-профілактичних властивостей.

У виробництві як столових, так і ігристих напівсухих та напівсолодких вин досягти цього можна шляхом ефективного використання наявних технологій і, зокрема, шляхом вилучення з процесу їхнього виробництва матеріалів не виноградного походження.

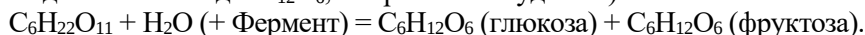
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вода є основним компонентом рідких продуктів харчування. Вивчення поведінки цього компоненту у фізико-хімічних процесах має важливе значення для сприяння достатнього збереження складових сировини, а також правильної обробки продукту (Miyawaki, 2018).

Концентровані продукти займають менше місця і мають меншу легкість. У харчовій промисловості концентрація може сприяти зниженню витрат на обробку, зберігання і транспортування. Основні методології для концентрації рідких продуктів харчування (випарювання, концентрація мембранними технологіями і виморожуванням) описані в літературі (Petzold та ін., 2016).

У виноробстві для підсолоджування рекомендовано використовувати цукровмісні компоненти — сиропи, недоброти, містелі, сульфітоване сусло, десертні виноматеріали. Лікери на основі тростинного і бурякового цукру не завжди забезпечували високу якість вин, а містелі за наявності в їх складі виноградного спирту-ректифікату виводять ігристі вина зі складу натуральних вин у розряд спеціальних (Ayder, & Alle, 2009).

Застосування сиропів і лікерів з використанням сахарози при їх виробництві не призводить до зростання якості у виробництві столових та ігристих напівсухих, напівсолодких і солодких вин. Відомо, що сахароза чинить негативний вплив на організм людини, зокрема на її імунну систему (Bleotu, Mambet, & Dratu, 2020; Hernandez, Raventos, & Ybarz, 2010).

Організм ссавців, в тому числі і людини, не може сприймати сахарозу, тому вона заздалегідь у присутності води розкладає її молекулу ферментами (природними каталізаторами) на природні цукри — глюкозу та фруктозу (ізомери, які мають однаковий склад $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, але різняться будовою):



У момент розкладання сахарози масово утворюються саме такі вільні радикали («молекулярні іони»), які активно блокують дію антитіл, що захищають організм від інфекції. І організм стає практично беззахисним. Процес гідролізу (розкладання) сахарози починається вже в ротовій порожнині під впливом слини (Sánchez та ін., 2010; Vatai, 2013).

Дія речовин депендоад'ювантів, що посилюють алкогольну небезпеку, до яких можна віднести і сахарозу, так само залежить від їхньої природи та якості очищення. За даними п'ятнадцятирічних дослідів недоочищений, так званий жовтий цукор, позбавлений усіх недоліків білого цукру і є корисним продуктом (Murakami та ін., 2013).

Відомо, що недоочищені коноплі можна жувати роками і це не викличе залежність, а кілька ін'єкцій героїну призводить до потужної залежності організму від цієї наркотичної речовини. Очевидно, що небезпека розвитку залежності від депендантів (алкоголю, наркотиків) пов'язана не тільки з кількістю споживаного депенданту, а й головним чином зі ступенем його очищення (дистиляції) (Rehm, 2011).

Сахароза — продукт вищого очищення цукру і в поєднанні з алкоголем, наприклад, у виробництві шампанського/ігристого, у великих кількостях («напівсухе» — «солодке») слугує потужним депендоад'ювантом.

У виробництві вин із залишковими цукрами як ігристих, так і тихих виноградних вин (столових, кріплених і десертних) застосовують такі цукровмісні компоненти:

- сиропи (лікери) на основі бурякового або тростинного цукру;
- бекмес;
- вакуум-сусло;
- спиртоване виноградне сусло (містелі);

- сульфітоване виноградне сусло;
- сусло виноградне свіже;
- сусло виноградне консервоване (способи консервування: консервування, асептичне зберігання і класичне зберігання сусла на холоді);
- кріоконцентрат виноградного сусла.

Дослідження з концентрування виноградного соку виморожуванням проводили також вітчизняні вчені у ВНДІВіВ «Магарач» та зарубіжні вчені (Threlfall, Main, & Morris, 2008; Campos та ін., 2023). Було отримано напій «Нектар» з виноградного сусла, концентрованого виморожуванням у ємностях із «сорочками» з біологічною стабілізацією (консервування сорбіновою кислотою до 400 мг/дм³).

Кріоконцентрація характеризується як нетермічна технологія з низьким екологічним впливом, який відбувається при низьких температурах. При цьому він викликає мінімальні сенсорні зміни в кінцевому продукті, що дає змогу в результаті отримувати високоякісний продукт (концентрат). Через цю особливість технологія є новою в харчовій галузі та відноситься до нутрицевтичної промисловості (Amran та ін., 2016).

Серед фруктів та ягід виноград виділяється як одне з найбільших джерел сполук з антиоксидантною активністю в раціоні, обумовленою наявністю флавоноїдів, антоціанів, ресвератролу та дубильних речовин у його складі (Albergamo та ін., 2020).

Крім антиоксидантного потенціалу, фенольні сполуки, присутні у винограді, також мають нейропротекторну, протимікробну дію, протипухлинну, протизапальну, протигрибкову, антитромботичну, протидіабетичну та протижирову дію (El-Kersh, Hammad, & Farag, 2022; Aidex, & Halleux, 2008).

З цієї причини виноград і його похідні, такі як соки і вина, все частіше вивчаються і вживаються, в зв'язку з їх актуальністю для здоров'я, також кріоконцентрат можна використовувати для підсолодження безалкогольного вина для покращення органолептичних показників.

Мета статті: дослідити методи виробництва кріоконцентратів та їх вплив на технологію виробництва напівсухих і напівсолодких столових та ігристих вин.

Для реалізації мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести порівняльну характеристику цукровмісних компонентів у виробництві напівсухих і напівсолодких вин.
2. Провести аналіз способів виробництва зневоднення концентрату.
3. Дослідити зміну залежності масової концентрації біологічно активних речовин (БАР) від способів виробництва та цукровмісного компонента, що використовується під час вторинного бродіння.

Матеріали і методи. Матеріали для дослідження: пастеризований виноградний сік; ігристе вино, виготовлене за класичною технологією та резервуарним методом.

Дослідження з виморожування проводили на пастеризованому виноградному соку з використанням фризера безперервної дії марки ОФІ, як описано у (Буртов, 1974). Також було проведено порівняльний фізико-хімічний аналіз, для дослідження зміни біологічно активних речовин (БАР).

Викладення основних результатів дослідження. Результати дослідження підтвердили, що цукровмісні компоненти мають як низку переваг, так і недоліків.

На якість їхніх фізико-хімічних компонентів істотно впливають процес виробництва та подальше зберігання (табл. 1).

Таблиця 1. Порівняльна характеристика цукровмісних компонентів у виробництві напівсухих і напівсолодких вин

Найменування	Спосіб виробництва	Недоліки	Переваги
Цукровий сироп	Розчинення цукру у воді (вині)	Негативний вплив властивостей сахарози на організм людини (ослаблює імунну систему організму, також впливає на неї як депендоад'ювант)	Можливість забезпечення достатньо максимальної масової частки сухих речовин до 80% і стабільності продукту під час зберігання
Бекмез	Випарювання	Часткове видалення, руйнування й окислення вітамінів, ферментів, фенольних і фарбувальних речовин, призводить до втрати аромату, з'являються тони увареності, карамелізація цукрів унаслідок реакції Майяра, поява оксиметил-фурфуролу, великі енергетичні витрати	Можливість забезпечення достатньо максимальної масової частки сухих речовин — 70—72% і стабільності концентрату під час зберігання
Вакуум-сусло	Випарювання під вакуумом	Можлива активізація окислювальних ферментів за таких температур і швидке погіршення якості соку під їхньою дією, великі енергетичні витрати	Отримання в меншій кількості продукту оксиметил-фурфуролу, істотне зменшення розщеплення диметилсульфіду та інших небажаних ароматичних речовин завдяки досягненню більшої поверхні суслу (тонкої плівки) в ємностях зі зниженим тиском і забезпечення стабільності під час зберігання

Продовження таблиці 1

Виноградне сусло (містель)	Спиртування	Використання спирту-ректифікату не виноградного походження (виводить вина з класу натуральних у клас спеціальних вин)	Застосування натуральних цукрів виноградної ягоди з повнішим збереженням первинних показників виноградного сусла, простота процесу виконання, що не потребує складного обладнання
Сульфосусло	Сульфитування	Десульфитація за підвищених температур, втрата БАР під час десульфитації та погіршення органолептичних показників	Простота процесу виконання, що не вимагає складного обладнання і застосування натуральних цукрів виноградної ягоди
Сусло виноградне свіже	Переробка винограду	Можливість використання тільки в сезон переробки винограду і можливість появи сусяних тонів за купажної схеми виробництва вин	Застосування натуральних цукрів виноградної ягоди
Сусло виноградне консервоване	Отримане методом консервування	Втрата БАР під час пастеризації сусла та погіршення органолептичних показників унаслідок пастеризації	Застосування натуральних цукрів виноградної ягоди
Кріоконцентрат виноградного сусла	Виморожування	Велика кількість виходу водно-сокової фракції (що вища концентрація, то більші втрати соку). Високий ступінь концентрації обмежений евтектичною точкою розчину, за якої неможливо відокремити воду від льоду. Нестабільність концентрату під час зберігання. Висока вартість обладнання для виморожування	Зберігається висока якість, натурального смаку і біологічна цінність вихідного продукту. Незначна втрата вітамінів. Відбувається значна концентрація ароматичних речовин, а також концентрація кислот. Менша енергетична складова порівняно з процесом випарювання (для заморожування 1 кг води необхідно лише 334 кДж, а для випарювання — 2257 кДж)

З аналізу табл. 1 видно, що найефективнішим цукровмісним компонентом у виробництві вин може слугувати концентрат виноградного сусла, отриманий у результаті його виморожування.

Є декілька способів виробництва обезводненого концентрату, які мають свої переваги та недоліки (табл. 2).

Таблиця 2. Способи виробництва зневодненого концентрату

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спосіб	Концентру- ючий агент	Режими	Недоліки	Переваги
Випаро- вування	Пара	Температура 100 °С. Поперед- нє видалення винного каменю; відгонка летких ароматичних ре- човин і їх концен- трація	Часткове видалення, руйнування та окис- лення вітамінів, фер- ментів, фенольних і барвних речовин при- зводить до втрати аро- мату, з'являються тони увареності, карамелі- зація цукрів унаслідок реакції Маяра, поява оксиметил-фурфуролу	Можливість забезпе- чення достатньо мак- симальної масової ча- стки сухих речовин — 70—72% та стабіль- ності концентрату при зберіганні
Випарову- вання під вакуумом	Пара	Температура 65—50 °С. Попе- реднє видалення винного каменю, відгонка летких ароматичних ре- човин та їх кон- центрація	Можлива активізація окисних ферментів за таких температур і швидке погіршення якості соку під їх дією	Отримання в меншій кількості продукту оксиметил-форфуро- лу суттєве зменшення розщеплення диме- тилсульфіду та інших небажаних ароматич- них речовин за раху- нок досягнення біль- шої поверхні суслу (тонкої плівки) в см- ностях зі зниженим тиском і забезпечення стабільності при збе- ріганні
Осмос і зворотний осмос	Напівпрони- каюча мем- брана ацетат- целюлоза, целофан і поліетилен- гліколь	Селективність мембрани, тов- щина, тиск, температура, в'язкість соку	Отримання продукту низької концентрації (35—40%) при тиску 0,8—1,0 МПа. Вища концентрація вимагає підвищення тиску для подолання осмотично- го тиску, висока витра- та електроенергії, збільшення розмірів установки. Суспензії та колоїдні речовини з високою молекуляр- ною масою (пектинові, білкові та дубильні) утворюють агрегати, що ускладнюють пе- ребіг процесу, значно підвищують в'язкість концентрату	Відсутність тонів ува- реності, практично не відбувається зміна ко- льору, смаку і запаху, можливість отриман- ня стерильного кон- центрату, що дозво- лить досягти стабіль- ності при зберіганні

Продовження таблиці 2

Газогідратний	Гідратоутворювач бромистий метил, фреон тощо	Здатність газів при певній температурі та тиску утворювати при введенні їх у воду тверду фазу у вигляді гідратів або кристалогідратів загального виду	Погіршення якості продукту через безпосередній контакт з газом	Низька собівартість за рахунок зниження енерговитрат при теплообміні та відсутність дорогих металевих конструкцій
Виморожування	Вода у вигляді льоду	Заморожування препарату при негативних температурах холодоагенту — -7°C і нижче, продукту -2°C і нижче	Велика кількість відходу водно-сокової фракції (що вища концентрація, то більше втрат соку). Високий ступінь концентрації обмежений евтетичною точкою розчину, коли неможливо відокремити воду від льоду. Нестабільність концентрату під час зберігання	Висока якість, зберігається натуральний смак і біологічна цінність вихідного продукту. Незначна втрата вітамінів. Відбувається значна концентрація ароматичних речовин
Сублімаційна сушка (сушка заморожуванням)	Водяний пар	Видалення основної маси вологи з об'єктів сушіння відбувається при негативних температурах (-20°C — -30°C , а їх досушування здійснюється так само при щадному (не більше 40°C) температурному режимі)	Вимагає порівняно високих енергетичних витрат створення високих негативних температур. При концентруванні соку не вдається повністю уникнути втрат летких ароматичних речовин, що призводить до погіршення якості продукту	Досягається високий рівень безпеки всіх найбільш біологічно цінних компонентів вихідної сировини. Є одним із найсучасніших способів консервування мікроорганізмів і біопрепаратів, який забезпечує найкращу якість сухопродукту та високу відновлюваність лактобактерій при мінімальній тривалості процесу та, відповідно, мінімальні витрати
Концентрування розпиленням	Гаряче повітря	Витрата основного теплоносія (повітря) $100\text{—}280\text{ м}^3/\text{год}$, витрата додаткового теплоносія (повітря, азот) $50\text{—}120\text{ м}^3/\text{год}$, температура основного теплоносія $120\text{—}430^{\circ}\text{C}$, доповненого $20\text{—}160^{\circ}\text{C}$	Часткове видалення, руйнування та окислення вітамінів, ферментів, фенольних і фарбувальних речовин призводить до втрати аромату, необхідності забезпечення фільтрації повітря. Необхідність у зневодненні перед процесом сушіння і великі енергетичні витрати для отримання високих температур теплоносія	Можливість досягнення максимальної масової частки сухих речовин та стабільності концентрату при зберіганні

Продовження таблиці 2

Концентрування розпиленням в вакуумі	Гаряче повітря	Температура продукту трохи вища 75 °С, а температура повітря 140—150°С	Масоперенесення у дисперсних продуктах, отриманих розпиленням у вакуумі, що ускладнений двома факторами: наявністю градієнта тиску в шарі та великою різноманітністю форми частинок	Порівняно з існуючими сушарками установка з НВЧ-нагріванням та з вакуумованим випаром вологи дає змогу скоротити час процесу сушіння в 20 разів, обслуговуючий персонал на — 20—40%, забезпечує високий ККД процесу (95%) та зменшення теплових втрат у довкілля, незалежність процесу сушіння від зовнішніх умов, автоматизацію процесу та покращення умов праці
--------------------------------------	----------------	--	---	---

Аналізуючи результати, наведені у табл. 1, 2, можна зробити висновок, що використання концентрованого виноградного суслу має численні переваги. Його застосування дає змогу оптимізувати процес зберігання продукції, дотриматися найвищих критеріїв її якості, а також задовольнити вимоги споживачів у зв'язку з тим, що до складу вина вводять продукти, які містяться у винограді.

Дослідження з виморожування проводили на пастеризованому виноградному соку з використанням фризера безперервної дії марки ОФІ. При цьому якість концентрованого виноградного суслу була високою, зберігся смак свіжого винограду та поживна цінність вихідного соку, втрата ароматичних речовин і вітамінів були незначними.

Таблиця 3. Хімічний склад нектару (концентрованого виморожуванням)

№	Складові частини	У вихідному суслі	У нектарі
1.	Цукру, %	17,0	38,0
2.	Титрована кислотність, г/л	5,1	10,2
3.	Ароматичні речовини, у.о.	1,5	2,5
4.	Амінний азот, мг/100мл	23,5	42,5
5.	Вітаміни, мг/л		
5.1.	Тіамін	87	148
5.2.	Біотин	4,4	7,7
5.3.	Пантотенова кислота	669	973
5.4.	Піридоксин	800	498

З табл. 3 видно, що під час концентрування в нектарі показники зросли вдвічі. Це свідчить про те, що продукт є більш корисним, ніж пастеризований виноградний сік. При цьому якість концентрованого виноградного суслу була високою, зберігалися смак свіжого винограду та поживна цінність вихідного соку, втрата ароматичних речовин і вітамінів були незначними.

У результаті цих досліджень планується розроблення технологічної схеми концентрування виноградного суслу в потоці з добором відповідного обладнання (ультраохолоджувачі серії ВУНО-30,60,90) та використання його не лише у виробництві ігристих напівсухих і напівсолодких винах, а й у безалкогольному вині.

У подальшому, на основі отриманих нових знань про закономірності зміни фізико-хімічних показників виноградного суслу в процесі його виморожування було виявлено значне збільшення в кріоконцентрах БАР порівняно з лікерами (рис. 1), і відповідно, в готовій продукції (табл. 3).

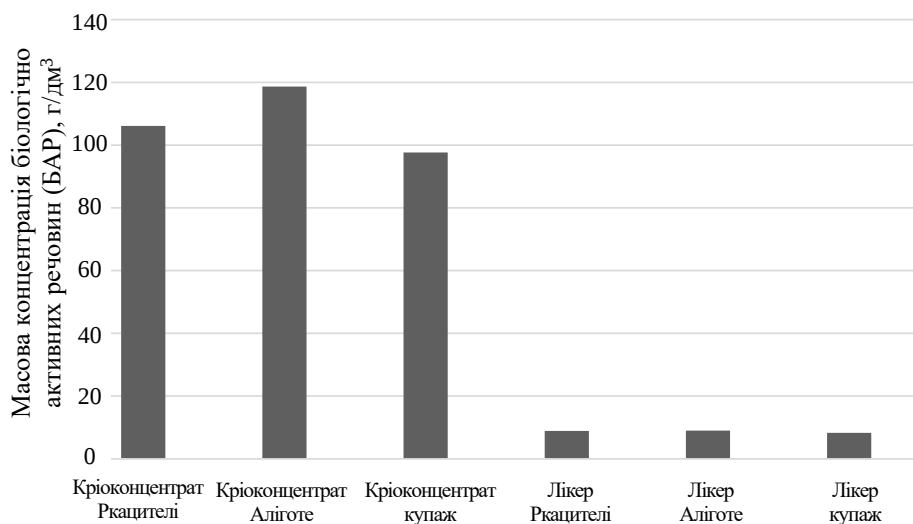


Рис. Порівняльна характеристика кріоконцентратів і лікерів за масовою концентрацією біологічно активних речовин (БАР), г/дм³

Встановлено, що сумарна масова концентрація БАР у кріоконцентрах у середньому в 11 разів більша, ніж у тиражних лікерах (рис.).

Вміст БАР у кріоконцентрах значно вищий, ніж у лікерах: аскорбінової та протокатехової в 5 і 10 разів, ніотинової — в 30 разів, кавової — в 13 разів відповідно. Зазначені кислоти є БАР і, маючи потужні антиоксидантні, антимікробні, бактерицидні та вітамінні властивості, сприяють стійкості ігристих вин до окислення.

Досліджено стійкість кріоконцентратів до заброджування. Встановлено, що протягом 10—12 місяців за температури зберігання не вище 14 °С та масової концентрації діоксиду сірки 300 мг/дм³ кріоконцентрат був стабільний.

Дегустаційна оцінка кріоконцентратів коливалася від 7,6 до 8,0 балів, тоді як у лікерах вона перебувала в межах 7,1—7,6 бала. Таким чином підтверджено високу харчову цінність та органолептичну оцінку кріоконцентратів порівняно з відповідними сортовими лікерами.

Показано, що внесення кріоконцентрату призводить до поліпшення ігристих і пінистих властивостей ігристого вина та підвищення його органолептичних показників.

Таблиця 3. Зміна залежності масової концентрації біологічно активних речовин (БАР) (г/дм³) від способів виробництва та цукровмісного компонента, що використовується під час вторинного бродіння

Найменування з'єднання	Спосіб виробництва ігристого вина		
	Пляшковий (пляшка)		Резервуарний (форфас)
	Дослід № 1	Контроль	Дослід № 2
Аскорбінова кислота	2,04	0,37	0,36
Хлорогенова кислота	4,77	1,17	5,07
Нікотинава кислота	1,31	0,29	0,30
Оротова кислота	4,04	3,72	3,93
Кавова кислота	38,42	14,91	40,77
Галова кислота	5,17	2,42	4,47
Протокатехова кислота	6,12	0,57	1,74
Сума	61,87	23,44	56,62

Важливу роль у корисних властивостях вин відіграють БАР. За результатами проведених досліджень (табл. 3) масова концентрація суми БАР у дослідних варіантах № 1 і № 2 перевищила їхній вміст у контролі №1 на 38,43 мг/дм³ і 33,18 мг/дм³ відповідно. Це свідчить про значно більшу біологічну цінність дослідних зразків ігристих вин (№ 1 і № 2) порівняно з контролем.

Одними з найважливіших БАР є нікотинава кислота (вітамін РР) та аскорбінова кислота. Вони є синергістами, що підсилюють дію одна одної. При цьому в процесі бродіння спостерігається зменшення вмісту нікотинамідом (РР) через адсорбцію його дріжджовими клітинами та окиснення під час технологічних операцій.

Відомо, що вона входить до складу групи ферментів, що переносять водень, і таким чином бере участь у реакції клітинного дихання та реакції обміну речовин. У дослідному зразку № 1 їхній вміст був вищим, ніж у контролі в 4 рази, а вміст аскорбінової кислоти в досліді № 1 більший, ніж у контролі у 5,5 рази.

Оротова кислота (вітамін В₁₃) бере участь у синтезі нуклеїнових кислот. У дослідних зразках ігристих вин № 1 і № 2 її вміст приблизно відповідає контролю.

Галова кислота, як представниця фенольних речовин, має Р-вітамінну активність та антимікробні властивості. У дослідних варіантах № 1 і № 2 вміст цієї кислоти перевищив удвічі її кількість у контролі.

Відомо, що протокатехова кислота має, так само, як і галова, антимікробні властивості. Вміст протокатехової кислоти в дослідному варіанті ігристого вина № 1 у 12 разів, а в досліді № 2 — у 3 рази більший, ніж у контролі.

Вміст біологічно активних речовин у дослідних зразках ігристих вин № 1 і № 2 порівнянний, що можна пояснити рівною кількістю кріоконцентрату, який було використано при приготуванні тиражної (бродильної) сумішей для цих варіантів.

Висновки

Столові сухі вина, а також столові, ігристі вина та безалкогольні вина із застосуванням кріоконцентратів виноградної ягоди не повинні належати до розряду алкогольної продукції за такими критеріями:

1. Не містять у своєму складі спирт-ректифікат (спирт вищого очищення). У складі столових вин міститься спирт, отриманий шляхом природного бродіння виноградної ягоди. Його вміст значною мірою у відсотковому відношенні поступається іншим компонентам вина, тобто не може відноситись до групи депендантів.

2. Не містять у своєму складі сахарозу (рафінований цукор вищого очищення). Ці напівсухи та напівсолодкі вина як тихі, так і ігристі можна сміливо зараховувати до натуральних вин, адже вони містять цукор виноградної ягоди (глюкоза і фруктоза), який не є продуктом рафінованої очистки і не може відноситись до групи депендоад'ювантів. Необхідно також відмітити, що він отриманий шляхом мінімальних змін у плані денатуралізації.

3. Цукровмісний компонент столових «напівсухих»—«напівсолодких» вин (кріоконцентрат) є цінним харчовим продуктом із виноградної ягоди з підвищеним вмістом біологічно активних речовин і з лікувально-профілактичними властивостями.

Спосіб виробництва цього типу вин завдяки застосуванню в їхньому виробництві кріоконцентрату виноградної ягоди значною мірою наближає їх до вин типу Asti Spumante та Ice-wine, у виробництві яких також використовується цукор виноградної ягоди. При виробництві вин типу Ice-wine концентрування соку ягоди відбувається в природних умовах на кущах винограду до його переробки, а в нашому випадку — в спеціальних ємностях після технологічної переробки винограду.

Література

- Aider, M., Halleux, D. (2008). Production of concentrated cherry and apricot juices by cryoconcentration technology. *Food Science and Technology*, 41(10), 1768—1775. doi:10.1016/j.lwt.2008.02.008.
- Albergamo, A., Costa, R., Bartolomeo, G., Rando, R., Vadala, R., Nava, V., Gervasi, T., Toscano, G. (2020). Grape water: reclamation and evaluation-product from Industrial cryoconcentration of grapes (*Vitis vinifera*) is necessary. *Journal of Food Science and Agriculture*, 100(7), 2971—2981. doi:10.1002/jsfa.10326.
- Amran, A., Sansuri, S., Safye, N. Z., Zakaria, Z. Y., Yuso, M. (2016). Parametric study of the performance of a progressive cryoconcentration system. *Chemical engineering communications*, 203(7), 957—975. doi:10.1080/00986445.2015.1075982.
- Ayder, M., Alle, D. (2009). Cryoconcentration technology in the bio-food industry: principles and applications. *LWT — food science and technology*, 42(3), 679—685. doi:10.1016/J.LWT.2008.08.013.
- Bleotu, C., Mambet C., Matei, L., Dragu, L. D. (2020). Improving Wine Quality and Safety Through Nanotechnology Applications. *Nanoengineering in the Beverage Industry*, 20, 437—458. doi:10.1016/B978-0-12-816677-2.00015-6.
- Campos, F. M., Keiber, M., Souto, V. O., Oliveira, J. B., Oliveira, C. G. R., Pereira, G. E., Lazzarotto, M. (2023). Cryoconcentration technology applied in grape-based beverages: A review. *A look at development*. doi:10.56238/alookdevelopv1-032.
- El-Kersh, D., Hammad, G., Donia, M. S., Farag, M. (2022). A Comprehensive Review on Grape Juice Beverage in Context to Its Processing and Composition with Future Perspectives to Maximize Its Value. *Food and Bioprocess Technology*, 16(3):3. doi:10.1007/s11947-022-02858-5.

Hernandez, E., Raventos, M., Auleda, J. M., & Ybarz, A. (2010). Freezing the wort concentration in the pilot plant is falling film cryoconcentrator. *Innovative food science and new technologies*, 11(1), 130—136. doi:10.1016/j.ifset.2009.08.014.

Miyawaki, Fr. (2018). Water and freezing in products. *Scientific and technical research of food products*, 24 1), 1—21. doi:10.3136/FSTR.24.1.

Murakami, A. N. N., Prudencio, E. S., Marashin, M., Murakami, S., Amante, E. R., Amboni, R. D. (2013). Enhancement of bioactive compound content and antioxidant activity of mate (*ilex paraguayensis* a. St. Hil.) aqueous extract by freeze-concentration technology. *Food Research International*, 53(2), 686—692. doi:10.1016/J.FOODRES.2012.07.042.

Petzold, G., Orelyana, P., Moreno, J.; Serda, E., Parra, P. (2016). Vacuum-assisted block freeze concentration applied to wine. *Innovative food science and new technologies*, 36, 330—335. doi:10.1016/J.IFSET.2016.07.019.

Rehm, J. (2011). The Risks Associated With Alcohol Use and Alcoholism. *Alcohol Res Health*, 34(2), 135—143. Взято з <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22330211>.

Sánchez, J., Ruiz, Y., Raventós, M., Auleda, J. M., Hernández, E. (2010). Progressive freeze concentration of orange juice in a pilot plant falling film. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 644—651. doi:10.1016/j.ifset.2010.06.006.

Threlfall, R., Main, G., Morris., J. (2008). Effect of freezing grape berries and heating must samples on extraction of components and composition parameters of red wine grape varieties. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 12(2), 161—169. doi:10.1111/j.1755-0238.2006.tb00056.x.

Vatai, G. (2013). Separation technologies in the processing of fruit juices. *Separation, Extraction and Concentration Processes in the Food, Beverage and Nutraceutical Industries*, 381—395. doi:10.1533/9780857090751.2.381.

CHARACTERISTICS OF POLYMER MATERIALS, THAT ARE USED IN PRODUCTION BOTTLED DRINKING WATER

N. Stadnichuk, T. Kostjuchenko

L. I. Medved's research center of preventive toxicology, food and chemical safety, ministry of health, Ukraine

O. Kronikovskiy

National University of Food Technologies

Key words:

*Polymer materials
Bottled drinking water
Polyethylene
terephthalate
Polycarbonate
Safety*

Article history:

Received 01.11.2023
Received in revised form
15.11.2023
Accepted 30.11.2023

Corresponding author:

O. Kronikovskiy

E-mail:

oleg.kronikovsky@gmail.com

Citation: Н. О. Стаднічук, Т. П. Костюченко, О. І. Кроніковський (2023). Характеристика полімерних матеріалів, що використовуються при виробництві бутильованої питної води. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 168—178.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-15

ABSTRACT

The use of polymeric materials in domestic and drinking water supply is one of the hygienic problems due to the possible adverse effect on the quality of water with contact due to the release of initial monomers, various additives and products of destruction of these materials.

Packaging polymer materials for the production of bottled water must provide proper protection and minimize contamination, prevent damage and have labeling in accordance with current legislation. Packaging materials must be non-toxic and not endanger the safety and suitability of drinking water under certain conditions of storage and use. Reusable containers should be durable, easy to clean and disinfect.

Recently, bottled drinking water has become widespread both in industrialized countries and in developing countries. Consumers buy packaged drinking water because of ease of use and taste. Safety and potential health benefits are also important considerations. Therefore, the safety control of materials used for the production of bottled packaged drinking water is goal of particular importance today.

Bottled water is produced in various containers — from single-serve bottles to large bottles that hold up to 80 liters. Water intended for consumption is packaged in various polymer containers (canisters, big bottles, bottles), but the most common packaging among them are plastic bottles and big bottles made of polyethylene terephthalate and polycarbonate. The expediency and safety of their use is considered in this work.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-15

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ БУТИЛЬОВАНОЇ ПИТНОЇ ВОДИ

Н. О. Стаднічук, Т. П. Костюченко

ДП «Науковий центр превентивної токсикології, харчової та хімічної безпеки імені академіка Л. І. Медведя МОЗ України»

О. І. Кроніковський

Національний університет харчових технологій

Використання полімерних матеріалів у господарсько-питному водопостачанні є однією з гігієнічних проблем через можливий несприятливий вплив на якість води, що контактує з ними, за рахунок виділення вихідних мономерів, різних добавок і продуктів деструкції цих матеріалів.

Пакувальні полімерні матеріали для виробництва бутильованої води повинні забезпечувати адекватний захист і мінімізувати зараження, запобігати пошкодженням та мати відповідне чинному законодавству маркування. Пакувальні матеріали, повинні бути не токсичними і не загрожувати безпеці та придатності питної води за певних умов зберігання та використання. Тара, що багаторазово використовується, повинна бути, відповідно, довговічною, легко піддаватися очищенню і дезінфекції.

Останнім часом саме бутильована питна вода набула широкого розповсюдження як у промислово розвинених країнах, так і в країнах, що розвиваються. Споживачі купують упаковану питну воду з таких причин, як зручність використання, смак. Важливими міркуваннями є також безпека та потенційна користь для здоров'я, тому особливе значення на сьогодні має контроль безпеки матеріалів, що використовуються для виробництва бутильованої (фасованої) упакованої питної води.

Бутильовану воду виробляють у різних ємностях — від пляшок на одну порцію до великих пляшок, що вміщують до 80 літрів. Призначену для споживання воду упаковують у різноманітні полімерні ємності (каністри, бутелі, пляшки), але найпоширенішою упаковкою серед них є пластикові пляшки та бутлі, виготовлені з поліетилентерефталату та полікарбонату. Доцільність і безпека їх використання й розглядається в у пропонованій статті.

Ключові слова: полімерні матеріали, бутильована питна вода, поліетилентерефталат, полікарбонат, безпека.

Постановка проблеми. Бутильована (упакована) питна вода — це вода, розлита в герметично закупорену тару різного хімічного складу, зовнішнього вигляду та об'єму, безпечна та придатна для безпосереднього споживання без будь-якої подальшої обробки. Бутильована питна вода вважається харчовим продуктом.

В останні роки обсяги міжнародної торгівлі бутильованою водою зросли, збільшилася її кількість і різноманітність. Через збільшення вантажопідйомності транспортних засобів тепер можливо транспортувати бутильовану воду не тільки за допомогою морських, залізничних і автодорожніх транспортних шляхів, а й як

авіавантаж, хоча останній спосіб використовується переважно в критичних ситуаціях через його високу вартість. Таким чином з'явилася можливість боротися з нестачею води в тих випадках, коли місцеві системи водопостачання не справляються з поставленим завданням з природних причин (посухи, землетруси та ін.), або з соціальних причин (війни, саботаж тощо), і бутильована питна вода, як і природна мінеральна вода, та різні інші її види, стала ввозитися, щоб ліквідувати подібне критичне становище.

Крім нестачі води, реальна та усвідомлена необхідність покращити здоров'я населення також відіграла свою роль і вплинула на зростання обсягів торгівлі бутильованою водою. Визнано, що звичні постачальники питної води, такі як громадські або приватні водопровідні станції, не завжди можуть гарантувати попередньо визначений рівень безпеки їхнього продукту щодо мікробіологічних, хімічних і фізичних критеріїв. Забруднення води завдає серйозного занепокоєння всім споживачам, особливо з ослабленим імунітетом. Ось чому для споживачів важливе надання інформації щодо заходів контролю, які одержала вода.

Зважаючи на викладене вище, важливе значення має якість і вид тари, що використовується для розливу води. Постійне зростання обсягів виробництва упаковки з полімерних матеріалів привертає особливу увагу науковців, контролюючих організацій, широкого загалу у зв'язку з проблемою міграції шкідливих речовин і необхідністю контролювання впливу кінцевої продукції, води питної бутильованої, на стан здоров'я людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Якість питної бутильованої води залежить від багатьох факторів, серед яких вид тари, що використовується для пакування, умови транспортування та зберігання питної води, а також термін зберігання готової продукції. Особливе значення має якість і вид тари, що використовується для розфасовки води. Найбільш розповсюдженими на сьогодні для виробництва бутильованої питної води є упаковка з поліетилентерефталату та полікарбонату.

Поліетилентерефталат (ПЕТФ, ПЕТ, англ. PET) — це гетероланцюговий поліестер терефталевої кислоти і етиленгліколю. Перші дослідження з отримання поліетилентерефталату були розпочаті в 1935 р. у Великій Британії, а станом на 2007 р. виробництво ПЕТ досягло вже близько 2 млн тонн на рік (Jurewicz, & Hanke, 2011). У 2012 р. світове виробництво поліетилентерефталату (ПЕТФ) сягнуло 10 млн тонн за рік (Суберляк, & Баштаник, 2015).

Поліетилентерефталат — тверда, безбарвна, прозора речовина в аморфному стані і біла, непрозора в кристалічному стані. Міцний, зносостійкий, хороший діелектрик. Нерозчинний у більшості органічних розчинників, але руйнується в лужних, аміачних розчинах, в ацетоні та фенолі (Суберляк, & Баштаник, 2015).

Полікарбонат (ПК) — хімічна сполука групи термопластів, які представляють собою складні поліестери карбонатної кислоти і двоатомних спиртів (інша назва — лінійний поліестер карбонатної кислоти; естер бісфенолу А). Найбільше промислове значення мають ароматичні полікарбонати, передусім полікарбонат на основі бісфенолу А завдяки доступності фенолу і ацетону. У промисловості його отримують методом конденсації фенолу з ацетоном у присутності різних каталізаторів, зокрема, хлоридної кислоти. Марка А призначена для отримання полікарбонатів, полісульфонів і епоксидних смол вищого сорту. Пластифікатор

бісфенол А (бісфенол (2,2-біс(4-гідроксифеніл)пропан, дифенілолпропан, диан, ДФП) додається при виготовленні бутлів з полікарбонату для надання міцності й оптичної прозорості. Отже, у полікарбонаті поєднуються високі міцнісні показники, термостійкість, стабільність розмірів виробів, негорючість, незначне водопоглинання, фізіологічна інертність і стійкість до дії різних хімічних реагентів. З полікарбонатного пластику виробляється цілий спектр продуктів, таких як бутлі для води і напоїв, медичні інструменти, зубні пломби і герметики. Полікарбонат практично не змінюється при нагріванні навіть до 150 °С, що дає змогу використовувати цей матеріал при виробництві багатооборотної тари для води питної бутильованої, яка потребує проведення термічної обробки та дезінфекції.

Порівняльна характеристика полімерних матеріалів — поліетилентерефталату та полікарбонату, наведена в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика полімерних матеріалів

Характеристика матеріалу	Полімерний матеріал	
	поліетилентерефталат	полікарбонат
Фізико-хімічні характеристики	- не б'ється; - високий ступінь міцності на розрив та удароміцність	- легкий, оптично прозорий, пластичний, морозостійкий, є гарним діелектриком; - показник заломлення 1,59, що відповідає звичайному склу; - характеризується довговічністю і має високу міцність - в 200 разів більше, ніж у силікатного скла
Хімічна стійкість	- висока хімічна стійкість; - ацетон і кетони руйнують ПЕТ; - кислоти та луги роблять ПЕТ непрозорим і крихким	- матеріал стійкий до корозії та впливу хімічних речовин; - розчинність у воді низька; - розчинність в етанолі, ацетоні, крижаній оцтовій кислоті, бензолі
Легкість	- щільність матеріалу 1,36 г/см ³ (вага пляшки об'ємом 0,5 л — 28 г, скляної тари 0,5 л — 300 г)	- в 2 рази легший за звичайне скло, на 6% легший за ПЕТ
Термічна стійкість	- матеріал не забезпечує стійкість до високих температур, максимальна температура 71 °С	- має властивість відновлювати свої параметри після кожного розплавлення, незалежно від їх кількості; - температура плавлення матеріалу становить 250 °С
Екологія	- матеріал використовується на 100% як вторинна сировина та відноситься до 5 класу безпеки; - ПЕТФ стійкий проти дії мікроорганізмів, тому його природний розклад надзвичайно повільний	- завдяки можливості багаторазової переробки продукту, він є доцільним з точки зору екологічності

Використання полімерних матеріалів — ПЕТФ та ПК, привертає увагу в зв'язку численними дослідженнями науковців, пов'язаними з проблемою міграції пластифікатору бісфенолу А (BPA) та фталатів (FDA Says, 2012). Вивченням ефектів впливу на живі організми міграції бісфенолу А та фталатів найбільше займаються вчені США (близько 40% усіх досліджень, присвячених бісфенолу А), Японії

(14%), Канади (4,5%), Кореї (4,5%), Китаю (3,7%), Німеччини (3,3%). Багато досліджень присвячені виявленню рівня бісфенолу А у біологічних рідинах організму людини (сеча, слина, сироватка крові). Безпечна доза бісфенолу А — 50 мкг/кг/добу, проте за результатами деяких досліджень було доведено негативні ефекти менших доз. Національним дослідницьким комітетом США (National Research Council) виділено фталатний синдром, який включає такі симптоми: безпліддя, зниження виробництва сперми, крипторхізм, порушення формування сечостатевої системи (Kim, Cho, & Kim, 2009). Чим більший рівень бісфенолу А у сечі, тим більше виражені симптоми дефіциту уваги та явища гіперактивності у дітей (Engel, Miodovnik, & Canfield, 2010). Крім того, результати досліджень показують, що пренатальна дія фталатів негативно позначається на психічному, моторному та поведінковому розвитку дітей у дошкільному віці (Whyatt, Liu, & Rauh, 2012). Встановлено також кореляційну залежність між передчасним статевим дозріванням дівчаток і впливом фталатів (Lomenick, Calafat, & Melguizo Castro, 2009).

Пренатальна дія фталатів корелює з низькою масою тіла дітей при народженні та збільшує ризик формування серцево-судинних і метаболічних захворювань у зрілому віці (Zhang, Lin, & Cao, 2009). За даними дослідників з університету Мічигану, у жінок з передчасними пологами рівень фталатів у сечі в середньому втричі вищий, ніж у жінок, що народили в термін (Meeker, Hu, & Cantonwine, 2009).

Дані щодо міграції бісфенолу А з пластикової пляшки у воду свідчать, що процес відбувається вже за кімнатної температури і збільшується за її підвищення (Cooper, Kendig, & Belcher, 2011). Навіть споживання холодних рідин із пластикових пляшок протягом тижня підвищує рівень бісфенолу А у сечі більше, ніж на 2/3 (Carwile, Luo, & Bassett, 2009).

Роль фталатів і бісфенолу А обумовлена їхньою здатністю зв'язуватися зі специфічними рецепторами. Подібно до стероїдних гормонів фталати і бісфенолу А є за своєю структурою фенолами або містять еквівалент фенолу. За літературними даними, максимальна виявлена концентрація фталатів та бісфенолу А у питній воді, що знаходилась у пластиковій пляшці, була еквівалентна за активністю 75,2 нг/л 17 β -естрадіолу (Wagner, & Oehlmann, 2009). Дослідження, проведені на людській популяції, свідчать про вплив рівня фталатів і бісфенолу А на рівень гормонів щитовидної залози (Meeker, & Ferguson, 2011; Kim, Park, & Long, 2011). Зазначається, чим більша концентрація бісфенолу А, тим менший рівень гормонів щитовидної залози, тому фталати та бісфенол А можна віднести до ендокринних деструкторів.

У 2010 р. Управління з контролю якості харчових продуктів і лікарських препаратів (FDA, Food and Drug Administration, США) офіційно визнало шкоду бісфенолу А для здоров'я людини. Водночас 30 вересня 2010 року EFSA (European Food Safety Authority) повторно визнано, що використання ВРА для покриття ємностей, що контактують з напоями та продуктами харчування, є безпечним для здоров'я людини (<http://www.efsa.europa>, 2012). У 2010 р. Канада стала першою країною у світі, яка, дотримуючись принципу перестороги, офіційно внесла бісфенол А до списку небезпечних хімічних речовин (<http://www.gazette.gc.ca>, 2012). Тож дослідження, присвячені впливу речовин, що мігрують з упаковки в питну

воду, на стан здоров'я людини є актуальним, а спірні питання в цій галузі роблять цю тему досить перспективним науковим напрямом.

У 2016 р. управління FDA пояснило, що доза бісфенолу А в харчових продуктах і напоях, що зберігаються в тарі, вироблених з використанням бісфенолу А, є безпечною. Однак ця теза не стосується продуктів, які були приготовлені або розігріті в тарах з бісфенолом (www.fda.gov, 2017 р.).

Однак на основі точки зору Європейського агентства з безпечності харчових продуктів (EFSA) у 2015 р. було вирішено, що бісфенол А слід додати до цієї Директиви (EU) 2020/2184 Європейського парламенту та Ради від 16 грудня 2020 р. щодо якості води, призначеної для споживання людиною з параметричним значенням на основі здоров'я 2,5 мкг/л. Крім того, нонілфенол та бета-естрадіол повинні бути додані до списку спостереження, який буде встановлений Комісією відповідно до Директиви.

ВООЗ рекомендувала, щоб три репрезентативні сполуки, що руйнують ендокринну систему, могли розглядатися як еталони для оцінки наявності сполук, що порушують роботу ендокринної системи, та ефективності їх обробки, коли це необхідно, зі значеннями 0,1 мкг/л для бісфенолу А, 0,3 мкг/л для нонілфенолу та 1 нг/л для бета-естрадіолу.

Мета статті полягає в аналізі проведених досліджень щодо встановлення безпечності полімерних матеріалів, які контактують з водою питною бутильованою, зокрема з ємностями з поліетилентерефталату та полікарбонату згідно з вимогами вітчизняних законодавчих актів.

Матеріали і методи. При проведенні санітарно-хімічних випробувань були використані такі методики:

МВВ № 125-01 «Методика виконання вимірювань масової концентрації формальдегіду у водних витяжках з виробів, що виготовлені з полімерних та інших синтетичних матеріалів, призначених для контактування з харчовими продуктами методом газорідинної хроматографії»;

МУ № 4149-86 «Методические указания по осуществлению государственного санитарного надзора за производством и применением полимерных материалов класса полиолефинов, предназначенных для контакта с пищевыми продуктами»;

МВВ №140/005-12 «Методика виконання вимірювань масової концентрації диметилтерефталату у водних витяжках методом газової хроматографії»;

МВ 3226-85 «Тимчасові методичні вказівки на газохроматографічне вимірювання концентрації фенолу у повітрі, питній воді водоймищ і модельних середовищах, які могли контактувати з полімерними матеріалами».

Санітарно-хімічні випробовування проводили на газовому хроматографі «ShimadzuGC-2014», діапазон вимірювань 0,001—1 ppm.

Викладення основних результатів дослідження. При проведенні робіт з аналізу полімерних матеріалів, що використовуються при виробництві бутильованої питної води, досліджували дані щодо всього ланцюга виробництва. Насамперед це вимоги до пакувальної тари для бутильованої питної води, вона повинна бути розроблена та сконструйована таким чином, щоб не заражала питну воду; могла б бути ефективно очищена і, де необхідно, продезінфікована; забезпечувала б ефективний захист від зовнішнього забруднення, включаючи пил і випаровування; могла б ефективно витримувати температуру, вологість, атмосферний тиск та інші

необхідні умови для захисту води від шкідливого або небажаного мікробного забруднення.

Багатооборотна тара для бутильованої питної води, а також у разі потреби одноразова тара повинні бути вимиті та продезінфіковані відповідним способом і розміщені на території підприємства, що здійснює обробку води, таким чином, щоб мінімізувати забруднення після проведення санітарної обробки тари, а також перед її наповненням і закупорюванням. Разова тара може бути готова до використання без попереднього миття та дезінфекції. Можливість її використання має бути визначена заздалегідь, інакше цю тару необхідно обробляти так само ретельно, як багатооборотну.

Важливим елементом також є резервуари чистої води, каністри великої місткості та засоби транспортування (якщо вони необхідні), такі як баки, трубопроводи та автоцистерни. Вони повинні бути спроектовані та сконструйовані таким чином, щоб:

- не забруднювати воду, призначену для бутілювання;
- бути ефективно очищеними та продезінфікованими;
- ефективно захищати від забруднень, включаючи пил і дим.

Засоби транспортування води, призначеної для бутілювання, повинні підтримуватись у відповідному стані чистоти та справності. Контейнери та засоби транспортування великої місткості повинні використовуватись лише для транспортування води, призначеної для бутілювання. Засоби транспортування та контейнери повинні піддаватися очищенню й дезінфекції в міру необхідності, щоб запобігати забрудненню. Ці вимоги наведені в «Технічні норми та правила гігієни для масового транспортування харчових продуктів та напіврозфасованих продуктів харчування (CAC/RCP 47-2001)». Вимоги до упаковки продукту наведені у «Рекомендованих міжнародних технічних нормах та правилах. Загальні принципи гігієни харчових продуктів (CAC/RCP 1-1969, Rev. 3-1997)».

Наповнення і закупорювання тари: операції бутілювання (тобто наповнення та закупорювання тари) повинні проводитись таким чином, щоб уникнути забруднення. Заходи контролю включають використання обгородженої площі та ізольованої замкнутої системи, відокремлених від інших процесів, щоб уникнути забруднення на підприємстві, що здійснює обробку. Пил, бруд, мікроорганізми, що містяться в повітрі, повинні контролюватись і відстежуватись.

Крім того, в процесі роботи досліджувались зразки полімерних матеріалів з поліетилентерефталату та полікарбонату. Зразки досліджувались з огляду на їх вплив на якість води, призначеної для споживання людиною, з урахуванням правил контролю якості та безпеки кінцевого продукту, води питної бутілюваної. Основна вимога до зазначених матеріалів, ПЕТФ та ПК, полягає в тому, щоб вони забезпечували збереження якості води питної відповідно до вимог ДСанПіН 2.2.4 171-10 «Державні санітарні норми та правила. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною».

При проведенні гігієнічної оцінки полімерних матеріалів необхідно керуватись такими основними критеріями:

- полімерні матеріали (ПЕТФ та ПК) не повинні погіршувати органолептичні властивості води;
- у процесі експлуатації матеріали не повинні виділяти у воду хімічні речовини; у разі міграції хімічних речовин їх вміст не повинен перевищувати допустимі рівні

або гранично допустимі концентрації, встановлені за санітарно-токсикологічною або органолептичною ознакою, затверджені в установленому порядку;

- досліджувані матеріали не повинні впливати на розвиток мікрофлори у воді.

На першому етапі досліджень проводили органолептичну оцінку матеріалів і виробів з поліетилентерефталату та полікарбонату. В процесі досліджень були отримані позитивні значення за органолептичними показниками, тому проводились подальші санітарно-хімічні дослідження. У разі невідповідності полімерного матеріалу за органолептичними показниками виріб вважається непридатним для використання за призначенням без подальших досліджень. Органолептичні властивості води питної (запах, смак, колір, мутність) мають важливе значення і не повинні змінюватись протягом усього терміну зберігання води питної.

Санітарно-хімічні дослідження здійснювались у встановленому порядку згідно з методами, які передбачають визначення рівня міграції хімічних речовин, що виділяються з матеріалів і виробів при заданих умовах експлуатації. Як модельне середовище використовували дистильовану воду.

У результаті санітарно-хімічних досліджень дуже важливо встановити можливість виділення дослідженим полімером (ПЕТФ та ПК) речовин, які використані для синтезу або утворилися під час переробки й експлуатації виробів, якісну і кількісну характеристики виділених компонентів, характер міграції хімічних речовин з полімеру в контактуюче середовище залежно від тривалості використання та ряду інших факторів.

Перелік результатів дослідження наводимо нижче.

I. Органолептичні дослідження.

1. Зразок 1 — полікарбонат: у вигляді твердих циліндричних прозорих гранул блакитного кольору, без запаху; витяжки з нього безбарвні і прозорі, з інтенсивністю запаху на рівні 0 бала.

2. Зразок 2 — бутель полікарбонатний багаторазового використання для питної води: без запаху; витяжки з нього безбарвні і прозорі, з інтенсивністю запаху і присмаку на рівні 0 балів.

3. Зразок 3 — преформи з поліетилентерефталату (ПЕТФ): без запаху; витяжки з них безбарвні і прозорі, з інтенсивністю запаху і присмаку на рівні 0 балів.

II. Санітарно-хімічні дослідження (табл. 2).

Таблиця 2. Результати санітарно-хімічних випробувань

Назва показника	Одиниця вимірювання	Заявлені вимоги згідно НД	Позначення методу випробування	Результат випробування (модельне середовище — дистильована вода), межа кількісного визначення
1. Полікарбонат (гранули)				
Формальдегід	мг/л	0,1	МВ 125-01	< 0,01
Фенол	мг/л	0,05	МВ 3226-85	< 0,01
Спирт метиловий	мг/л	0,2	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт ізопропіловий	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт пропіловий	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт бутиловий	мг/л	0,5	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт ізобутиловий	мг/л	0,5	МВ 4149-86	< 0,1

Ацетон	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,05
Гептан	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,05
Етилацетат	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,05
2. Бутлі полікарбонатні багаторазового використання для питної води				
Формальдегід	мг/л	0,1	МВ 125-01	< 0,01
Фенол	мг/л	0,05	МВ 3226-85	< 0,01
Спирт метиловий	мг/л	0,2	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт ізопропіловий	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт пропіловий	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт бутиловий	мг/л	0,5	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт ізобутиловий	мг/л	0,5	МВ 4149-86	< 0,1
Ацетон	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,05
Гептан	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,05
Етилацетат	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,05
3. Преформи з поліетилентерефталату (ПЕТФ)				
Формальдегід	мг/л	0,1	МВ 125-01	< 0,01
Ацетальдегід	мг/л	0,2	МВ 125-01	< 0,05
Фенол	мг/л	0,05	МВ 3226-85	< 0,01
Диметилтерефталат	мг/л	1,5	МВВ 140/005-12	< 0,1
Спирт метиловий	мг/л	0,2	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт ізопропіловий	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт пропіловий	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт бутиловий	мг/л	0,5	МВ 4149-86	< 0,1
Спирт ізобутиловий	мг/л	0,5	МВ 4149-86	< 0,1
Ацетон	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,05
Гептан	мг/л	0,1	МВ 4149-86	< 0,05

III. Дослідження готового продукту — води питної бутильованої.

Важливим, на нашу думку, є також врахування умов зберігання води питної бутильованої й термін її зберігання в герметичній тарі. Переважна більшість води питної бутильованої розливається в одноразову полімерну тару з поліетилентерефталату. Термін зберігання такої питної води (газованої та негазованої), зазвичай, становить від 6 до 12 місяців. Тому досліджували зразки води питної, розлитої в пляшки з поліетилентерефталату, за органолептичними, мікробіологічними та санітарно-хімічними показниками згідно з вимогами ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Державні санітарні норми та правила. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» та за найбільш критичними показниками для поліетилентерефталату: за містом диметилтерефталату та формальдегіду. За результатами аналізу наданих зразків продукції не було виявлено перевищення вмісту досліджуваних хімічних речовин.

Отримані дані свідчать про використання якісної сировини для виробництва пакувальних матеріалів, а також ефективність контролю в критичних точках виробництва, зберігання та реалізації пакувальних матеріалів і води питної (Carwile, Liu, & Bassett, 2009). Проте, з огляду на постійне розширення ринку пакувальних матеріалів з різних країн світу та для уникнення можливих ризиків негативного впливу шкідливих хімічних речовин, що можуть надходити при використанні вторинної сировини, необхідно при ввезенні проводити її постійний обов'язковий вхідний контроль.

Висновки

Сучасні технології виробництва та виготовлення пакувальних матеріалів не виключають можливості виділення токсичних елементів їх складу в питну воду, здійснюючи таким чином негативний вплив на організм людини. Ризик негативного впливу токсикантів може значно зменшуватися за умови використання упаковки тільки за призначенням із дотриманням умов її експлуатації та зберігання. Обґрунтування вибору тих чи інших нових технологічних рішень щодо використання полімерних матеріалів для виробництва бутильованої питної води, повинно підтверджуватися відповідними дослідженнями, які направлені на виявлення потенційної небезпеки матеріалу, що використовується.

Остаточні висновки про можливість використання тих чи інших матеріалів і виробів для контакту з питною водою можна робити лише після проведення комплексу досліджень: органолептичних, санітарно-хімічних, мікробіологічних, радіологічних та інших, як самої упаковки, так і питної води, яка в неї розливається.

Література

- Суберляк, О. В., & Баштаник, П. І. (2015). Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів: підруч. для студентів ВНЗ. МНОУ, Львів: Растр — 7. ISBN 978-617-7045-83-9.
- Carwile, J. L., Luu, H. T., Bassett, L. S. (2009). Polycarbonate bottle use and urinary bisphenol A concentrations. *Environ Health Perspect.*, 7(117): 1368—1372.
- Cooper, J. E., Kendig, E. L., & Belcher, S. M. (2011). Assessment of bisphenol A released from reusable plastic, aluminium and stainless steel water bottles. *Chemosphere*, 6(85), 943—947.
- Engel, S. M., Miodovnik, A., & Canfield, R. L. (2010). Prenatal phthalate exposure is associated with childhood behavior and executive functioning *Environ Health. Perspect.*, 4(118), 565—571.
- Jurewicz, J., & Hanke, W. (2011). Exposure to phthalates: reproductive out-come and children health. A review of epidemiological studies. *Occup Med Environ Health*, 2(24), 115—141.
- Kim, B. N., Cho, S. C., & Kim Y. (2009). Phthalates exposure and attention-deficit/hyperactivity disorder in school-age children. *Biol. Psychiatry*, 10(66), 958—963.
- Kim, M. E., Park, H. R., & Long, E. J. (2011). Exposure to Bisphenol A appears to impair hippocampal neurogenesis and spatial learning and memory. *Food Chem Toxicol.*, 12(49), 3383—3389.
- Lomenick, J. P., Calafat, & Melguizo Castro, M. S. (2009). Phthalate exposure and precocious puberty in females. *J Pediatr.*, 2(156), 221—225.
- Meeker, J. D., Ferguson, K. K. (2011). Relationship between urinary phthalate and bisphenol A concentrations and serum thyroid measures in U. S. adults and adolescents from the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2007—2008. *Environ Health Perspect.*, 10(119), 1396—1402.
- Meeker, J. D., Hu, H., & Cantonwine, D. E. (2009). Urinary phthalate metabolites in relation to preterm birth in Mexico City. *Environmental Health Perspect*, 10(117), 1587—1592.
- Wagner, M., & Oehlmann, J. (2009). Endocrine disruptors in bottled mineral water: total estrogenic burden and migration from plastic bottles. *Environ Sci Pollut Res Int.*, 3(16), 278—286.
- Whyatt, R. M., Liu, X., & Rauh, V. A. (2012). Maternal prenatal urinary phthalate metabolite concentrations and child mental, psychomotor and behavioral development at age three years *Environmental Health. Perspect.*, 2(120), 290—295.
- Zhang, Y., Lin, L., & Cao, Y. (2009). Phthalate levels and low birth weight: a nested case-control study of Chinese newborns. *J Pediatr.*, 4(155), 500—504.

Зміст журналу
«Наукові праці Національного університету харчових технологій»
за 2023 рік

Автоматизація та інформаційні технології

Луцька Н.М., Власенко Л.О., Засць Н.А. Прогнозування ресурсоефективності цукрового заводу на основі нейромережевих моделей № 1

Чаплінський Ю. П. Використання онтологій в управлінні безпечністю продуктів харчування № 4

Ромащук О. М. Інтелектуалізація прикладних функцій керування технологічним комплексом цукрового заводу № 4

Дерман В. А., Петрухін С. Ю. Багатовимірна математична модель представлення інформації щодо екологічного стану природно-техногенної геосистеми для автоматизованої системи управління харчовим підприємством в умовах російської агресії № 4

Безпека харчових продуктів і охорона праці

Шульга О. С., Шульга С. І. Зміни законодавства України у сфері безпечності харчових продуктів № 2

Шинкарьов К. В., Пащенко Б. С., Арсеньєва Л. Ю. Розроблення заходів операційного вдосконалення технологічних процесів для операторів ринку харчової продукції № 3

Шульга О. С., Шульга С. І. Досягнення у сфері екологічного одноразового посуду та столових приборів № 6

Біотехнології

Пирог Т. П., Вороненко А. А. Шляхи підвищення ефективності технологій синтезу мікробних екзополісахаридів. Частина 1. Встановлення оптимальних умов біосинтезу № 1

Скроцька О. І., Цветков К. О., Пенчук Ю. М. Біотехнологічні особливості отримання органічних сполук, що використовуються у виробництві пластифікаторів № 1

Пирог Т. П., Вороненко А. А. Шляхи підвищення ефективності технологій синтезу мікробних екзополісахаридів. Частина 2. Вдосконалення штамів-продуцентів методами метаболічної та генетичної інженерії № 2

Стоцька О. В. Очищення стічних вод пивоварної галузі з використанням технології метанового бродіння № 2

Пирог Т. П., Парфенюк М. А. Вплив конкурентних еукаріотичних мікроорганізмів на синтез і властивості вторинних метаболітів. Частина 1. Мікроміцети як регулятори синтезу та біологічної активності вторинних метаболітів № 3

Скроцька О. І., Марченко В. В. Біосинтез наночастинок благородних металів. Частина 1. Використання грибів, дріжджів і бактерій № 3

Пирог Т. П., Парфенюк М. А. Вплив конкурентних еукаріотичних мікроорганізмів на синтез і властивості вторинних метаболітів. Частина 2. Дріжджі як регулятори синтезу та біологічної активності вторинних метаболітів № 4

Скроцька О. І., Марченко В. В., Коваль Р. В. Біосинтез наночастинок благородних металів. Частина 2. Використання ціанобактерій водоростей № 4

П'ятецька Д. В., Пирог Т. П. Вплив екзометаболітів *Nocardia vaccinii* IMB B-7405, *Acinetobacter calcoaceticus* IMB B-7241 і *Rhodococcus erythropolis* IMB Ac-5017 на врожайність томатів, перців та ячменю № 5

Скроцька О. І., Марченко В. В. Біосинтез наночастинок благородних металів. Частина 3. Можливості використання рослин № 5

Стабніков В., Миколаєнко Р., Стабніков Д. Видалення мікропластику зі стічних вод для захисту світового водного басейну № 6

Економіка, менеджмент і маркетинг

Скопенко Н. С., Кириченко О. М., Євсєєва-Северина І. В. Діджиталізація бізнесу як запорука зростання конкурентоспроможності та успішного розвитку компаній у динамічному середовищі господарювання № 1

Капінус Л. В., Бойко І. А., Лелека О. О. Організація маркетингових івентів у мережі Інтернет № 1

Страшинський В. І., Шеремет О. О., Страшинська Л. В. Сучасний стан і перспективні напрями розвитку вітчизняного ринку олії та олійно-жирової продукції: якісний аспект № 1

Страшинська Л. В., Шеремет О. О., Михайлик О. М. Методичні підходи до визначення рівня продовольчої безпеки держави № 2

Сімкін Д. О., Петухова О. М. Використання аутсорсингу на підприємствах харчової промисловості: теорія, практика, особливості № 4

Механічна та електрична інженерія

Романюк В. Т. Пристрої на основі сплавів з ефектом пам'яті форми для підвищення надійності розбірних електричних контактних з'єднань № 1

Балюта С. М., Копилова Л. О., Куєвда Ю. В., Йовбак В. Д., Кондрашевський М. С., Кандибка П. М., Куєвда В. П. Забезпечення енергоефективних режимів роботи в системах електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів шляхом регулювання напруги № 2

Бондар В. І., Білик О. А., Іващенко Н. В. Гідродинамічне дослідження групи струменів рідини в апаратах із циліндричними розподільними пристроями № 2

Движалоук Р. М. Випробування пристрою для збору прополісу в умовах пасічних господарств різних регіонів України № 2

Циганкова Г. А. Електромагнітне поле в електродинамічних пристроях складної конструкції № 4

Мирончук В. Г., Кривопляс-Володіна Л. О., Гера В. М., Володін С. О. Інноваційні запірно-регулювальні пристрої в технологічних потоках виробництва цукру № 4

Зінкевич П. О., Балюта С. М. Системний аналіз і підходи до розробки автоматизованої системи електрозабезпечення цивільних об'єктів з фотоелектричними станціями та накопичувачами електроенергії № 4

Булій Ю. В., Куц А. М., Форсюк А. В., Запорожець Ю. В. Підвищення експлуатаційних характеристик брагоректифікаційних установок шляхом оптимізації роботи теплообмінного обладнання № 5

Володін С. О., Токарчук С. В., Мирончук В. Г., Масло М. А. Дослідження динаміки запірно-регулювальних пристроїв з позиційними електропневматичними системами керування № 5

Гавва О. О., Кривопляс-Володіна Л. О. Обґрунтування режимів роботи адаптронних функціональних модулів дозування рідкої продукції ваговим способом № 5

Володін О. С., Гавва О. М., Токарчук С. В., Савчук О. С. Дослідження комунікативного дизайну виробничих систем № 6

Мазуренко О. Г., Воробійов Л. Й., Декуша Л. В. Термoeлектричні прилади вимірювання температури та швидкості потоку газового середовища № 6

Романюк В. Т. Дослідження електричного поля навколо термокомпенсаторів № 6

Фізико-математичні науки

Медвідь Н. В., Гнатовський О. В., Левчій І. Д., Сидоренко А. В. Автоматизація дифракційних вимірювань малих переміщень при модуляції апертури сенсора № 6

Харчові технології

<i>Цинь С., Самілик М. М., Луо Я.</i> Вплив харчових волокон рисових висівок і знежиреного кунжутного борошна на кисломолочний напій	№ 1
<i>Вовк Г. О., Носенко Т. Т.</i> Вплив параметрів ферментативної обробки на вихід пресової гарбузової олії та її властивості	№ 1
<i>Самохвалова О. В., Касабова К. Р., Шидакова-Каменюка О. Г., Загорулько О. Є., Загорулько А. М.</i> Оцінка якості мармеладу з додаванням багатокомпонентної плодово-ягідної пасти	№ 1
<i>Сімахіна Г. О., Науменко Н. В., Межубовський О. М., Камінська С. В.</i> Формування споживчих властивостей високобілкових напівфабрикатів із культивованих грибів	№ 1
<i>Шевченко А. О.</i> Білкові речовини рисового борошна та його використання в технології пшеничного хліба	№ 1
<i>Погорельська А. С., Павлюченко О. С., Кузьмін О. В., Польовик В. В., Силка І. М.</i> Теоретичні аспекти доцільності створення безглютенових кексів, збагачених сиром кисломолочним, для закладів ресторанного господарства	№ 1
<i>Лудин А. М., Реутський В. В.</i> Вплив іонно-сольового складу води на якість пива	№ 1
<i>Саніга В. Я., Поліщук Г. С.</i> Вплив овочевих пюре різних способів оброблення на органолептичні та фізико-хімічні показники морозива молочного	№ 1
<i>Скнар І. В., Миргородська-Терентьєва В. Д., Должиков С. С., Ніколенко М. В.</i> Клейстеризація картопляного крохмалю способом <i>in vitro</i> за надмірного вмісту води. 1. Кінетика процесу в ізотермічних умовах	№ 1
<i>Бужанська М. В., Пушак А. С.</i> Реологічні властивості та ретроградація взірців нативного та модифікованого крохмалю	№ 2
<i>Михалевич А. П., Бреус Н. М., Поліщук Г. С., Басс О. О.</i> Дослідження впливу концентрацій демінералізованої сироватки на показники якості морозива	№ 2
<i>Дударев І. М., Кузьмін О. В.</i> Вплив рослинних інгредієнтів на органолептичні та фізико-хімічні показники салатних заправок	№ 2
<i>Василишина О. В.</i> Вплив обробки полісахаридними композиціями на вміст біологічно активних речовин плодів вишні	№ 2
<i>Сімахіна Г. О., Науменко Н. В., Камінська С. В., Межубовський О. М.</i> Обґрунтування складу високобілкового концентрату для супів швидкого приготування	№ 2
<i>Шевченко А. О., Літвинчук С. І., Коваль О. В.</i> Вплив гарбузової клітковини на перерозподіл структурних груп у тісті та хлібі з пшеничного борошна	№ 6
<i>Діхтяр О. О., Адамчук Л. О., Антонів А. Д.</i> Дослідження біологічної цінності та нутрієнтного складу медового десерту	№ 6
<i>Махінько В. М., Махінько Л. В., Козир О. М.</i> перспективи використання елементів штучного інтелекту в хлібопеченні	№ 2
<i>Скнар І. В., Миргородська-Терентьєва В. Д., Приловський О. В., Осокін Є. С., Ніколенко М. В.</i> Клейстеризація картопляного крохмалю способом <i>in vitro</i> за надмірного вмісту води. Частина 2. Вплив кислотності розчину на процес вилучення амілози з крохмальних гранул	№ 3
<i>Чернюшок О. А., Дубівко А. С., Бірюк Ю. В.</i> Фортифікація посічених напівфабрикатів з використанням вівсяного борошна та сухої демінералізованої молочної сироватки	№ 3
<i>Селезньова Д. В., Неміріч О. В., Кузьмін О. В., Гавриш А. В., Мамченко Л. Є.</i> Моніторинг безпечності чизкейків на основі принципів НАССР	№ 3
<i>Радзівська І. Г., Мельник О. П., Маринін А. І.</i> Удосконалення технології одержання жирних кислот з відходів олійно-рафінаційного виробництва	№ 3

<i>Білик О. А., Грищенко А. М., Халікова Е. Ф., Ковбаса В. М., Міцейкене І. Т.</i> Вплив поліпшувача «Свіжість» на реологічні властивості пшеничного тіста з висівками	№ 3
<i>Гусятинська Н. А., Каленик О. С., Григоренко Н. О.</i> Виробництво харчових сиропів із сорго цукрового	№ 3
<i>Сильчук Т. А., Різник А. О.</i> Удосконалення технології та аналіз харчової цінності хлібних виробів з вівсяного толокна	№ 3
<i>Шевченко А. О., Фурсік О. П.</i> Вплив концентрату рисового протеїну в поєднанні з фосфоліпідами на якість і харчову цінність пшеничного хліба	№ 3
<i>Кочубей-Литвиненко О. В., Пухляк А. Г., Щербатюк О. Г.</i> Вплив електроіскрового оброблення сироватки молочної на інтенсивність її ферментації	№ 3
<i>Двінських Н. В., Азаренко Ю. М., Хохленкова Н. В., Калюжная О. С.</i> Розробка складу та дослідження властивостей желєйних цукерок з додаванням яблучного оцту	№ 3
<i>Сімахіна Г. О., Камінська С. В.</i> Контроль мікробіологічної безпеки продукції ресурсоефективних низькотемпературних технологій	№ 4
<i>Демидова А. О., Носенко Т. Т., Шеманська Є. І.</i> Дослідження ефективності ферментативного екстрагування рослинних антиоксидантів	№ 4
<i>Башиа А. О., Стеценко Н. О., Бажай-Жежерун С. А.</i> Дослідження особливостей харчування студентської молоді і рівня її усвідомлення факторів ризику хронічних неінфекційних захворювань	№ 4
<i>Іващенко О. М., Поліщук Г. Є.</i> Дослідження показників якості йогуртів з мальтодекстрином і сухим глюкозним сиропом	№ 4
<i>Шевченко А. О., Литвинчук С. І., Галенко О. О.</i> Структурно-механічні та конформаційні зміни в процесі виготовлення пшеничного хліба з концентратом рисового протеїну	№ 4
<i>Михонік Л. А., Кирічок Т. О., Гетьман І. А., Науменко О. В.</i> Покращення якості пшенично-житнього хліба з використанням продуктів переробки круп'яних культур	№ 5
<i>Дацишин К. Є., Юкало В. Г., Семенишин Г. М.</i> Розроблення технології ферментованого сироваткового напою	№ 5
<i>Євлаш В. В., Газзаві-Рогозіна Л. В., Пілюгіна І. С., Фалько О. В., Чижевський В. В.</i> Вплив флавоноїду кверцетину на мікроорганізми свіжовиволовленої риби та вміст аміноаміачного азоту при гіпотермічному зберіганні	№ 5
<i>Загорулько О. Є., Загорулько А. М., Михайлов В. М., Касабова К. Р.</i> Удосконалення способу виготовлення функціонального напівфабрикату і кексів на його основі	№ 5
<i>Махінко Л. В., Ковбаса В. М.</i> Дослідження використання пряно-ароматичної сировини у виробництві продуктів високотемпературної коєкструзії та її впливу на процес зберігання	№ 5
<i>Носенко Т. Т., Жупанова Д. О.</i> Інтенсифікація ферментативного дегумінгу соняшникової олії ультразвуковою обробкою	№ 5
<i>Сімахіна Г. О., Кочубей-Литвиненко О. В.</i> Комбінована ресурсоефективна технологія заморожених плодово-ягідних напівфабрикатів	№ 5
<i>Шевченко А. О.</i> Вплив концентрату гарбузового протеїну в поєднанні з фосфоліпідами на якість і харчову цінність пшеничного хліба	№
<i>Капрельянци Л. В., Пожіткова Л. Г., Велічко Т. О., Охотська М. І., Білик О. А.</i> Сучасні тренди в омїкс-біотехнологіях — від геноміки до персоналізованих дієт. Частина 1	№ 5
<i>Дорохович В. В., Михальська Л. В.</i> Застосування насіння чіа та гелю з насіння чіа для наближення нутрієнтного складу печива до складу «ідеального» харчового продукту за макронутрієнтами	№ 6

<i>Логінова А. О.</i> Реакція маяра: використання в харчових технологіях та експертизі харчових продуктів	№ 6
<i>Носенко Т. Т., Жупанова Д. О.</i> Аналіз тенденцій споживання енергетичних ресурсів харчовою промисловістю України	№ 6
<i>Макаренко О. Г., Петренко Т. В.</i> Проблемні питання використання діоксиду титану (Е 171) як барвника для харчових продуктів і лікарських засобів	№ 6
<i>Рубанка К. В., Левківська Т. М., Дуцак О. В.</i> Дослідження впливу висушеного екстракту імбіру на якість маргарину	№ 6
<i>Кучеренко В. М., Успенко О. В., Білько М. В., Бурда В. Є.</i> Ефективність використання кріоконцентратів виноградного суслу у виробництві напівсухих і напівсолодких натуральних вин	№ 6
Хімічні науки	
<i>Кроніковський О. І., Сокол Є. В., Кроніковська О. П., Стаднічук Н. О.</i> Екстракційно-аналітичні характеристики комплексів карбоксилатів металів з краун-стерами	№ 4
<i>Стаднічук Н. О., Костюченко Т. П., Кроніковський О. І.</i> Характеристика полімерних матеріалів, що використовуються при виробництві бутильованої питної води	№ 6
Новини освіти і науки	
Доробок українських науковців від видавництва CRC Press	№ 4

Contents of the journal
"Scientific Works of the National University of Food Technologies"
for 2023

Automation and information technologies

- Lutska N., Vlasenko L., Zaiets N.* Prognostication resource efficiency of the sugar factory based on neuron network models № 3
- Chaplinsky Y.* Ontology for management of food safety № 4
- Romashchuk O.* Intellectualization of the applied functions of management of the technological complex of the sugar enterprise № 4
- Derman V., Petrukhin S.* A multidimensional mathematical model of the presentation of information regarding the environmental state of the natural and technological geosystem for the automated system of management of a food enterprise in the conditions of Russian aggression № 4

Food Products Safety and Occupational Health

- Shulga O., Shulga S.* Changes in Ukrainian legislation in the field of food safety № 2
- Shynkariuk K., Pashchenko B., Arsenieva L.* Development of measures for operational improvement of technological processes for foodstuff production enterprises № 3
- Shulga O., Shulga S.* The achievements in the field of environmentally disposable tableware and cutlery № 6

Biotechnologies

- Pirog T., Voronenko A.* Ways for increasing the efficiency of technologies for the synthesis of microbial exopolysaccharides. Part 1. Establishing optimal conditions for biosynthesis № 1
- Skrotska O., Tsvietkov K., Penchuk Yu.* Biotechnological features of receiving organic compounds for production of plasticizers № 1
- Pirog T., Voronenko A.* Ways for increasing the ways of increasing the efficiency of technologies for the synthesis of microbial exopolysaccharides. Part 2. Improvement of producer strains by methods of metabolic and genetic engineering № 2
- Stotska O.* Purification of wastewater from the brewing industry using methane fermentation technology № 2
- Pirog T., Parfeniuk M.* Influence of competitive eukaryotic microorganisms on the synthesis and properties of secondary metabolites. Part 1. Micromycetes as regulators of the synthesis and biological activity of secondary metabolites № 3
- Skrotska O., Marchenko V.* Biosynthesis of noble metal nanoparticles. Part 1. Use of fungi, yeast and bacteria № 3
- Pirog T., Parfeniuk M.* Influence of competitive eukaryotic microorganisms on the synthesis and properties of secondary metabolites. Part 2. Yeast as regulators of synthesis and biological activity of secondary metabolites № 4
- Skrotska O., Marchenko V., Koval R.* Biosynthesis of noble metal nanoparticles. Part 2. Use of cyanobacteria and algae № 4
- Piatetska D., Pirog T.* Influence of *Nocardia vaccinii* IMV B-7405, *Acinetobacter Calcoaceticus* IMV B-7241 and *Rhodococcus erythropolis* IMV As-5017 exometabolites on the harvest of tomato, pepper and barley. Influence of *Nocardia vaccinii* IMV B-7405, *Acinetobacter calcoaceticus* IMV B-7241 and *Rhodococcus erythropolis* IMV As-5017 exometabolites on the harvest of tomato, pepper and barley № 5
- Skrotska O., Marchenko V.* Biosynthesis of noble metal nanoparticles. Part 3. Possibilities of using plants № 5
- Shulga O., Shulga S.* The achievements in the field of environmentally disposable tableware and cutlery № 6

Economy, Management and Marketing

- Skopenko N., O. Kyrychenko, Yevsieieva-Severyna I.* Digitalization of business as a key to the growth of competitiveness and companies successful development in a dynamic business medium № 1
- Kapinus L., Boiko I., Leleka O.* Organization of marketing Internet events № 1
- Strashynskiy V., Sheremet O., Strashynska L.* Current state and prospective development directions of the domestic market of oil and oil fat products: a qualitative aspect № 1
- Strashynska L., Sheremet O., Mykhailyk O.* Methodical approaches to determining the level of food security of the state № 2
- Simkin, D. Pietukhova O.* The usage of outsourcing at food industry enterprises: theory, practice, features № 4

Mechanical and Electrical Engineering

- Romaniuk V.* Devices based on shape memory alloys for increasing reliability of bolted electrical contact connections № 1
- Baliuta S., Kopilova L., Kuievdva Iu., Jovbak V., Kondrashevsky M., Kandybka P., Kuievdva V.* Ensuring energy-efficient work modes in electrical supply systems of industrial and civil facilities by voltage regulation № 2
- Bondar V., Bilyk O., Ivashchenko N.* Hydrodynamic study of a liquid jet group in appliances with cylindrical distribution devices № 2
- Dvykaliuk R.* Testing of the collecting propolis device on the bee farms in different regions of Ukraine № 2
- Tsygankova G.* Electromagnetic field in electrodynamic devices of complex design № 4
- Myronchuk V., Kryvoplias-Volodina L., Hera V., Volodin S.* Innovative shut-off and control devices in sugar production process flows № 4
- Zinkevych P., Baluta S.* System analysis and approaches to the development of an automated power supply system for civil objects with photoelectric plants and electricity storage № 4
- Bulii Y., Kuts A., Forsiuk A., Zaporozhets Y.* Improving the performance characteristics of distillation equipment by optimizing the operation of heat-exchange equipment № 5
- Volodin S., Tokarchuk S., Myronchuk V., Maslo M.* Study of the dynamics of shut-off and control devices with positional electropneumatic control systems № 5
- Gavva O., Kryvoplias-Volodina L.* Substantiation of operating modes of adaptronic functional modules for dosing liquid products by weight № 5
- Volodin O., Gavva O., Tokarchuk S., Savchuk O.* Research of communicative design of production systems № 6
- Mazurenko O., Vorobiov L., Dekusha L.* Thermoelectric devices for measuring temperature and flow velocity of gas medium № 6
- Romaniuk V.* Analysis of electric field around thermal compensators № 6
- ## **Physical and Mathematical Sciences**
- Medvid N., Gnatovskiy O., Sidorenko A., Levchii I.* Automation of diffraction measurements of small displacements by the means of sensor aperture modulation № 6

Food Technologies

- Qin X., Samilyk M., Luo Ya.* The influence of dietary fiber from rice bran and defatted sesame flour on fermented milk drink № 1

Vovk H., Nosenko T. Influence of enzymatic treatment parameters on the press pumpkin oil yeild and its properties	№ 1
Samokhvalova O., Kasabova K., Shydakova-Kameniuka O., Zagorulko A., Zahorulko A. Assessment of the quality of marmalade with the addition of multicomponent fruit and berry paste	№ 1
Simakhina G., Naumenko N., Mezhubovsky O., Kaminska S. Formation of consumer properties of high-protein semi-finished products from cultivated mushrooms	№ 1
Shevchenko A. Protein substances of rice flour and its use in wheat bread technology	№ 1
Pohorelska A., Pavliuchenko O., Kuzmin O., Polevik V., Sylka I. Theoretical aspects of appropriateness gluten-free cupcakes enriched with cottage cheese for restaurants	№ 1
Ludyn A., Reutsky V. Influence of ions-salt composition of water on the quality of beer	№ 1
Sapiga V., Polischuk G. Influence of vegetable purees processed by different methods on the sensory and physicochemical indicators of milk ice cream	№ 1
Sknar I., Myrhorodska-Terentieva V., Dolzhykov S., Nikolenko M. <i>In vitro</i> gelatinization of potato starch with excessive water content. 1. Kinetics of the process in isothermal conditions	№ 5
Buzhanska M., Pushak A. Rheological properties and retrogradation of native and modified starch samples	№ 2
Mykhalevych A., Breus N., Polishchuk G., Bass O. Study of the influence of demineralized whey concentrates on ice cream quality indicators	№ 2
Dudarev I., Kuzmin O. Influence of plant-based ingredients on the sensory and physicochemical indicators of salad dressings	№ 2
Vasylyshyna O. The influence of processing cherry fruits with polysaccharide composition on the content of biologically active substances	№ 2
Simakhina G., Naumenko N., Kaminska S., Mezhubovsky O. Justification of the composition of high protein concentrate for instant soups	№ 2
Shevchenko A., Litvynchuk S., Koval O. The effect of pumpkin cellulose on the redistribution of structural groups in wheat flour dough and brea	№ 2
Dikhtiar O., Adamchuk L., Antoniv A. Research of biological value and nutrient composition of honey dessert	№ 2
Makhynko V., Makhynko L., Kozyr O. Perspectives of using artificial intelligence elements in bread baking	№ 2
Sknar I., Myrhorodska-Terentieva V., Prylovskiy O., Osokin Ye., Nikolenko M. <i>In vitro</i> gelatinization of potato starch with excessive water content. Part 2. The effect of solution acidity on the process of amylose extraction from starch granules	№ 3
Chernyushok O., Dubivko A., Biryuk Yu. Fortification of chopped semi-finished products using oat flour and dry demineralized milk whey	№ 3
Seleznova D., Niemirich O., Kuzmin O., Havrysh A., Mamchenko L. Monitoring the safety of cheesecakes based on HACCP principles	№ 3
Radzievska I., Melnyk O., Marynin A. Improving the technology for producing fatty acids from oil refinery waste	№ 3
Bilyk O., Khalikova E., Hryshchenko A., Kovbasa V., Miceikiene I. The influence of the “Svizhist” improver on the rheology properties of wheat dough with bran	№ 3
Husiatynska N., Kalenyk O., Hryhorenko N. Production of food syrups from sugar sorghum	№ 3
Silchuk T., Riznyk A. Improvement of technology of bread with oat fiber and analysis of its nutritional value	№ 3

<i>Shevchenko A., Fursik O.</i> The effect of rice protein concentrate in combination with phospholipids on the quality and nutritional value of wheat bread	№ 3
<i>Kochubei-Lytvynenko O., Pukhliak A., Shcherbatiuk O.</i> Influence of electro-spark treatment of milk whey on its fermentation intensity	№ 3
<i>Dvinskykh N., Azarenko Yu., Khokhlenkova N., Kaliuzhnaia O.</i> Development of the composition and study of the properties of jelly candies with the addition of apple vinegar	№ 3
<i>Simakhina G., Kaminska S.</i> The control of microbiological safety of foodstuffs made with resource-effective technologies	№ 4
<i>Demydova A., Nosenko T., Shemanska Y.</i> Study on the enzymatic extraction of plant antioxidants	№ 4
<i>Bashta A., Stetsenko N., Bazhay-Zhezherun S.</i> Study of nutritional characteristics of university students and their level of understanding of risk factors for chronic non-communicable diseases	№ 4
<i>Ivashchenko O., Polishchuk G.</i> Research of quality indicators of yogurts with maltodextrin and dry glucose syrup	№ 4
<i>Shevchenko A., Litvynchuk S., Galenko O.</i> Structural and mechanical and conformational changes in the process of making wheat bread with rice protein concentrate	№ 4
<i>Mykhonik L., Kyrichok T., Hetman I., Naumenko O.</i> Improvement of wheat and rye products quality with the use of cereal crops processing products	№ 5
<i>Datsyshyn K., Yukalo V., Semenyshyn G.</i> Development of the fermented whey beverage technology	№ 5
<i>Yevlash V., Gazzavi-Rogozina L., Piliugina I., Falko O., Chizhevskiy V.</i> Influence of the flavonoid quercetin on the microorganisms of freshly fish and the content of amino-ammonium nitrogen during hypothermal storage	№ 5
<i>Zagorulko O., Zahorulko A., Mykhaylov V., Kasabova K.</i> Improvement of the manufacturing method of functional semi-finished product and cupcakes based on it	№ 5
<i>Makhynko L., Kovbasa V.</i> Study of the using of spicy-aromatic raw materials in production of high-temperature coextrusion products and their influence on the process of storage	№ 5
<i>Nosenko T., Zhupanova D.</i> Intensification of sunflower oil enzymatic degumming by ultrasound treatment	№ 5
<i>Simakhina G., Kochubei-Lytvynenko O.</i> The combined resource-effective technology of frozen berry half products	№ 5
<i>Shevchenko A.</i> The effect of pumpkin protein concentrate in combination with phospholipids on the quality and nutritional value of wheat bread	№ 5
<i>Kaprelyants L., Pozhitkova L., Velichko O., Ochotska M., Bilyk O.</i> Modern trends in omics-biotechnologies — from nutrigenomics to personalized diets. Part 1	№ 5
<i>Dorohovych V., Mykhalska L.</i> The application of chia seeds and chia seeds gel to approach the nutrient composition of cookies to the "ideal" food product due to macro-nutrient content	№ 6
<i>Loginova A.</i> Maillard reaction: use in food technology and expertises of food products	№ 6
<i>Nosenko T., Zhupanova D.</i> Using of the new enzyme preparations in processing of sunflower oil waste	№ 6
<i>Makarenko O., Petrenko T.</i> The problematic issues of titanium dioxide (E 171) as a colorant for food and medicinal products	№ 6
<i>Rubanka K., Levkivska T., Dushchak O.</i> Study of the effect of driedginger extract on the quality of margarine	№ 6
<i>Kucherenko V., Uspalenko O., Bilko M., Burda V.</i> The effectiveness of the use of cryoconcentrates of grape must in the production of semi-dry and semi-sweet natural wines	№ 6

Chemical sciences

Kronikovskiy O., Sokol E., Kronikovska O., Stadnichuk N. Extraction and analytical characteristics of complexes of metal carboxylates with crown ethers № 4

Stadnichuk N., Kostjuchenko T., Kronikovskiy O. Characteristics of polymer materials, that are used in production bottled drinking water № 6

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Шановні колеги!

Редакційна колегія журналу «Наукові праці Національного університету харчових технологій» запрошує вас до публікації наукових праць (<http://sw.nuft.edu.ua>).

До друку приймаються рукописи, які раніше не були опубліковані в друкованих та електронних виданнях. Автор, який подає матеріали до друку, зберігає за собою всі авторські права та надає відповідному виданню право першої публікації, дозволяючи розповсюджувати матеріал із зазначенням авторства й джерела первинної публікації, а також погоджується на розміщення її електронної версії на сайті Національної бібліотеки ім. В. І. Вернадського та у відкритому доступі в електронній мережі університету. Автор надає право редакційній колегії на рецензування та відхилення поданих для опублікування матеріалів. В одному номері може бути видана лише одна стаття автора (як власна, так і в спів-авторстві).

На електронну адресу журналу (npuht@ukr.net) необхідно надіслати такі документи:

- файл статті;
- рецензію доктора наук певної галузі (за тематичною спрямованістю статті). Якщо один із авторів статті є доктором наук, то рецензія не обов'язкова;
- заяву з підписами автора(-ів) про те, що надіслана стаття раніше не друкувалася і не подана до будь-яких інших видань.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Статті подаються у вигляді вчитаних роздруків на папері формату А4 (поля з усіх сторін по 2 см, Time New Roman, кегль 14, інтервал 1,5) та електронної версії (редактор Microsoft Word). У тексті статті не повинно бути порожніх рядків. Між словами допускається лише один пробіл. Усі сторінки тексту мають бути пронумеровані.

Обсяг дослідницької статті має бути не менше 10 сторінок (без урахування анотацій та списку використаних джерел). У дослідницькій статті має бути проаналізовано не менше 15 джерел. Обсяг оглядової статті має бути не менше 25 сторінок (без урахування анотацій та списку використаних джерел). В оглядовій статті повинно бути проаналізовано не менше 40 джерел.

ПОСЛІДОВНІСТЬ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТАТТІ

1. Індекс УДК.
2. Назва статті (англійською та українською мовами).
3. Ініціали та прізвища авторів англійською та українською мовами.
4. Анотація англійською та українською мовами (не менше 1800 символів з пробілами). Анотація має бути максимально інформативною, це окремий текстовий документ, у якому лаконічно викладені результати дослідження. У тексті анотації не варто використовувати загальні фрази, вказувати несуттєві деталі й загальновідомі положення. Також слід уникати прямих повторів будь-яких фрагментів статті.
5. Ключові слова (5—6 слів/ключових словосполучень англійською та українською мовами).
6. Структура текстової частини:
 - постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями;
 - аналіз останніх досліджень і публікацій, на які спирається автор;
 - формулювання мети статті;
 - викладення основних результатів дослідження;
 - висновки і перспективи подальших наукових досліджень.
7. Після тексту статті в алфавітному порядку наводиться список літературних. **Бібліографічні описи оформляються згідно з міжнародним стилем APA.** Бібліографічний опис подається мовою видання. Не допускається посилання на неопубліковані матеріали. У переліку джерел мають переважати посилання на наукові праці останніх років. Наприкінці кожної публікації наводиться ідентифікатор DOI у форматі <https://doi.org/...>, якщо він є, або посилання на публікацію. Також слід обмежити посилання на власні публікації, оскільки це знижує наукову цінність статті та індекс цитування автора. Не можна посилається на національні стандарти, технічні умови, підручники, конспекти лекцій, лабораторні практикуми та іншу ненаукову літературу. Посилання на патенти слід робити в тексті статті, вказавши лише номер та назву патенту.

У статті мають бути проаналізовані напрацювання вчених з усього світу. На основі аналізу сучасних статей з англomовних журналів має бути доведена актуальність теми у світі, визначені питання, які потребують вирішення, сформульована мета дослідження.

8. Таблиці (у Word або Excel) можна подавати як у тексті, такі в окремих файлах (на окремих сторінках). Кожна таблиця повинна мати тематичний заголовок, набраний напівжирним шрифтом, і порядковий номер (без знака №), якщо таблиць кілька. Слово «Таблиця» і номер друкуються курсивом, заголовок — напівжирним шрифтом. Таблиці повинні мати книжковий формат і вільно вміщатися у висоту і ширину журнальної сторінки.

9. Ілюстрації (креслення, рисунки, схеми, діаграми) мають бути розміщені в тексті. **Обов'язковою вимогою** є надсилання оригінальних файлів рисунків, створених у програмах-редакторах Corel Draw X6, Origin. Всі елементи рисунка (типи, товщина і колір ліній, шрифт текстів тощо) мають вільно редагуватися у наявному програмному забезпеченні). Рисунки в растрових форматах (bmp, gif, jpeg, tif) або у форматі pdf не приймаються до розгляду, оскільки не можуть вільно редагуватися. **Вимоги до оформлення рисунків:** вісь координат — 0,2 мм, без сітки, сам рисунок (наприклад, крива) — 0,35 мм, текст в рисунку — Times New Roman 9,5, ширина рисунка — до 13 см. Всі рисунки мають бути чорно-білими. Підписи до рисунків набираються безпосередньо під рисунками прямим напівжирним шрифтом.

Фотографії мають бути чіткими та контрастними (формати TIF, JPG з роздільною здатністю 300 dpi), розмірами 6×9. Фотографії друкуються в разі крайньої потреби, якщо наведена на них інформація має значну наукову цінність. Авторам краще завантажити фотографії у хмарний сервіс і в списку літератури дати на них посилання.

10. Математичні формули повинні бути роздруковані з правильним виділенням верхніх і нижніх індексів. Нумерація формул здійснюється арабськими цифрами у круглих дужках біля правого поля сторінки. Індеси від скорочених українських слів друкуються прямим шрифтом малими літерами. В індексах, що складаються з двох скорочених слів, після першого скороченого слова ставиться крапка, після другого — крапка не ставиться. Цифри в індексах також друкуються прямим шрифтом. Індеси, позначені латинськими літерами, друкуються курсивом. У формулах літери латинського алфавіту набираються курсивом, грецького й українського — прямим шрифтом.

Хімічні формули набираються прямим шрифтом. Математичні символи, що входять до складу хімічних формул, — курсивом.

Формули вставляються безпосередньо в текст. Прості формули набираються з клавіатури, аскладні — за допомогою редактора формул Microsoft Equation 3.0 object або Math Type 5.6. Інші версії редакторів формул є неприйнятними. Символи вставляються тільки через таблицю символів. Скорочення позначень одиниць фізичних величин мають відповідати Міжнародній системі одиниць (SI).

11. Відомості про авторів статті повинні бути наведені за єдиним зразком у вказаному порядку: прізвище (прописними літерами), ім'я та ім'я по батькові (повністю); наукове звання; посада чи професія, місце роботи; телефон, E-mail.

12. Дата надходження статті до редакції (після тексту надрукованого матеріалу).

Використання автоматичного перекладу наукового тексту (статті, анотації, ключових слів) **не допускається**. Переклад має бути належної якості.

Відсутність будь-якого з пунктів переліку, зазначеного вище, рецензії, невідповідність ви-могам до оформлення, наявність орфографічних, граматичних, стилістичних помилок, автоматичний переклад елементів матеріалу є підставою **для відмови** в прийнятті статті до друку.

Автор несе відповідальність за додержання вимог чинного законодавства при підготовці матеріалів, у тому числі норм авторського права і достовірність наведених фактичних даних (цитат, посилань, імен, назв тощо).

Адреса редакції:

Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01601
корпус Б, 412.

Контактні телефони: міський — (044) 287-92-95, внутрішній — 92-95.

E-mail: npnuht@ukr.net

SUBMISSION GUIDELINES

Dear colleagues,

The editorial board of the Journal "Scientific works of the National University of Food Technologies" invites you to the publication of your manuscripts (<http://sw.nuft.edu.ua>).

Only the manuscripts that have not previously been published in print and electronic media are accepted. The author who submits materials for publication reserves the copyright and provides the right of first publication to the Journal, allows to distribute the manuscript indicating the authorship and the primary source of publication and agrees to placing the electronic version of the manuscript on the website of the V. I. Vernadsky National Library of Ukraine, publicly available electronic network of the University. The author gives the right to the editorial board to review and reject the material submitted for publication. The author can publish one manuscript (of his/her single authorship or co-authored) per every issue of the Journal.

The following documents are necessary to be sent to the e-mail address of the journal (npuht@ukr.net):

- Electronic version of the manuscript;
- A review of the manuscript by a doctorate of the corresponding branch of science. If one of the authors is a doctorate him/herself, then a review is not necessary;
- A statement signed by the author(s) that the manuscript has not been published and is not submitted for publication.

REQUIREMENTS FOR MANUSCRIPTS

The electronic version should be submitted in a Microsoft Word document (margins of 2 cm, Time New Roman, type size 14, spacing 1.5). There should be no blank lines in the manuscript. No extra spaces are allowed between the words. All pages of the manuscript should be numbered.

The number of pages of the research article should be at least 10 (excluding abstracts and references). At least 15 references should be analyzed in the research paper. The length of the review article should be at least 25 pages (excluding abstracts and references). At least 40 references should be analyzed in the review article.

The use of automatic translation for any part of your text (manuscript, abstract, keywords) is not allowed. Translation must be of good quality.

The editors reserve the right to edit the manuscript scientifically and literary.

SEQUENCE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF THE MANUSCRIPT

1. UDC index.
2. The title of the manuscript (in English, Ukrainian).
3. Full names of the authors in English, Ukrainian (not more than four authors).
4. An abstract in English, Ukrainian (not less than 1800 characters with spaces). The abstract should be highly informative, it is a separate text document in which the results of the research must be summarized. General phrases, insignificant details and well-known provisions shouldn't be written in the abstract. Direct repetitions of any parts of the article should be also avoided.
5. A list of keywords (5—6 words or key phrases in English, Ukrainian).
6. The structure of the text:
 - Problem definition and its relationship with important practical tasks;
 - Analysis of recent studies and publications related to subject matter of the manuscript;
 - Problem statement (statement of purpose of the manuscript);
 - Presentation of the main material;
 - Conclusions and recommendations for further research.
7. A list of references of their quotation should be presented after the text of the manuscript.

Bibliographic descriptions should be made according to international style APA. Bibliographic descriptions should be submitted in the language of their edition. Links to unpublished materials are not allowed. The list of references should contain links only to recent and relevant studies. At the end of each reference, the DOI identifier is provided in the format <https://doi.org/...>, if it is, or a link to the publication. National standards, specifications, textbooks, lecture notes, laboratory workshops and other non-scientific literature must not be referenced. References to patents should be made in the

text of the article, indicating only the number and title of the patent. In the list of references, the sources should be presented in alphabetical order.

The investigations of scientists from all over the world should be analyzed in the article. Based on the analysis of modern articles from English-language journals, the relevance of the topic in the world should be proved, the issues which need to be solved should be identified, and the purpose of the research should be formulated.

8. Tables (in Word and Excel) can be submitted both in the text of the manuscript and in separate files (on separate pages). Each table should have a title, typed in bold, and its serial number if there are several tables. The word "Table" and number are printed in italics; the title is printed in bold. Tables should be in book format and fit freely in the height and width of the journal page.

9. Figures, images and tables should be performed in Corel Draw, Origin on white paper and placed both in the text and in separate files. Captions should be typed in bold directly under the figures. Images must be clear and contrasting (TIF, JPG with a resolution of 300 dpi); the size 6×9. Photos are printed in case of extreme necessity, if they provide information of the significant scientific value.

10. Mathematical formulas should be typed with the correct placing of upper and lower indices. The formulas should be numbered by Arabic numerals in parentheses at the right margin of the page. The indices of Ukrainian abbreviated words should be typed in bold and in lower case. The first word of an index, consisting of two abbreviated words, should be followed by a dot, and the second word has no dot. The numbers in the indexes are typed in upright font. Indexes should be typed in Latin letters and in italics. In formulas, the letters of Latin alphabet are typed in italics; Greek and Ukrainian letters are in upright font.

Chemical formulas should be typed in upright font. Mathematical symbols that make up the chemical formulas should be typed in italics.

Formulas should be put directly into the text. Simple formulas are typed from the keyboard, and complex — using the Microsoft Equation 3.0 object or MathType 5.6. Other equation editors are unacceptable. The characters are inserted only through the symbol table. The contraction of physical units must comply with the rules of the International System of Units (SI).

11. Information about the authors should be given as follows: second name (in uppercase letters), first name and patronymic (in full); academic title; position or profession, place of work; phone number, E-mail.

12. The date when the manuscript was received by the editorial board.

The use of **automatic translation** for any part of your text (manuscript, abstract, keywords) **is not allowed**. Translation must be of good quality.

The absence of any item listed above; absence of abstracts; non-compliance to the design requirements; spelling, grammatical, stylistic errors; automatic translation of any part of the manuscript are the grounds **for refusal** to accept the manuscript for publication.

The author is fully responsible for compliance with current legislation, including the rules of copyright and the consistency of data (quotations, references, names, etc.).

Editorial office address:

National University of Food Technologies
Volodymyrska str., 68,
building B,
room 412
01601 Kyiv,
Ukraine
E-mail: npnuht@ukr.net