



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

35

**Харчова**  
ПРОМИСЛОВІСТЬ

Заснований у 1965 р.

Київ НУХТ 2024

UDC 664(04) (082)

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

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

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

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

- Google Scholar
- Index Copernicus

Publications are represented in authoring edition.

**Editorial office address:**

National University of Food Technologies  
Volodymyrska str., 68, 01601 Kyiv, Ukraine  
(044) 287-92-45, internal 92-45  
**E-mail: foodpromnuft@gmail.com**

Recommended for publication by the Academic Council of the National University of Food Technologies.  
Protocol # 4 from 28th of November, 2024

© NUFT, 2024

УДК 664(04) (082)

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

Розрахований на наукових та інженерно-технічних працівників харчової промисловості.

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

Журнал «Харчова промисловість» індексується такими наукометричними базами:

- Google Scholar
- Index Copernicus

Статті друкуються в авторській редакції.

**Адреса редакції:**

Національний університет харчових технологій  
вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01601  
(044) 287-92-45, внутрішній 92-45  
**E-mail: foodpromnuft@gmail.com**

Рекомендовано вченою радою Національного університету харчових технологій.  
Протокол № 4 від 28 листопада 2024 року

© НУХТ, 2024

## Редакційна колегія

### Склад редакційної колегії журналу «Харчова промисловість»

**Головний редактор**  
Editor-in-Chief

**Олександр ГАВВА**  
Oleksandr GAVVA

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

**Відповідальний секретар**  
Accountable secretary

**Анастасія ДЕРЕНІВСЬКА**  
Anastasia DERENIVSKA

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

### Члени редакційної колегії:

**Андрій МАРІНІН**  
Andrii MARYNIN

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

**Василь КИШЕНЬКО**  
Vasil KYSHENKO

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

**Віктор ЄМЦЕВ**  
Viktor YEMTSEV

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

**Віктор СТАБНИКОВ**  
Viktor STABNIKOV

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

**Віра ЮРЧАК**  
Vira YURCHAK

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

**Віталій ПРИБИЛЬСЬКИЙ**  
Vitaliy PRYBYL'S'KYU

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

**Галина ПОЛІЩУК**  
Galina POLISCHUK

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

**Галина СИМАХІНА**  
Halyna SIMAKHINA

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

**Лариса АРСЕНЬЄВА**  
Larysa ARSEN'YEVA

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

**Микола ЯКИМЧУК**  
Mykola YAKYMCHUK

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

**Наталія ГУСЯТИНСЬКА**  
Nataliia HUSIATYNSKA

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

**Наталія ПУШАНКО**  
Nataliia PUSHANKO

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

**Оксана КОЧУБЕЙ-ЛИТВИНЕНКО**  
Oksana KOCHUBEI-LYTVYVENKO

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

**Оксана СКРОЦЬКА**  
Oksana SKROTSKA

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

**Олександр КУРГАСЬ**  
Oleksandr KURGAEV

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

**Олександр СЕРЬОГІН**  
Oleksandr SER'OHIN

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

- Олександр ШЕВЧЕНКО**  
Olexander SHEVCHENKO  
д-р техн. наук, Україна  
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine
- Олена БІЛИК**  
Olena BILYK  
канд. техн. наук, Україна  
Ph. D., National University of Food Technologies, Ukraine
- Світлана ЛІТВИНЧУК**  
Svitlana LITVYNCHUK  
канд. техн. наук, Україна  
Ph. D., National University of Food Technologies, Ukraine
- Сергій ГРИБКОВ**  
Serhii HRYBKOV  
д-р техн. наук, Україна  
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine
- Сергій ТОКАРЧУК**  
Serhiy TOKARCHUK  
канд. техн. наук, Україна  
Ph. D., National University of Food Technologies, Ukraine
- Станка ДАМЯНОВА**  
Stanka DAMYANOVA  
д-р техн. наук, Болгарія  
DSc, Razgrad Branch of the University of Ruse, Bulgaria
- Стефан СТЕФАНОВ**  
Stefan STEFANOV  
д-р інж., проф., Болгарія  
DSc, University of Food Technologies, Plovdiv, Bulgaria
- Тамара НОСЕНКО**  
Tamara NOSENKO  
д-р техн. наук, Україна  
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine
- Тетяна ЛЕБЕДЕНКО**  
Tetiana LEBEDENKO  
д-р техн. наук, Україна  
Ph. D. Hab., Odessa National Academy of Food Technologies  
Ukraine
- Тетяна ПИРОГ**  
Tetyana PYROH  
д-р біол. наук, Україна  
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine
- Тетяна СИЛЬЧУК**  
Tetiana SYLCHUK  
д-р техн. наук, Україна  
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine
- Юлія КАМБУЛОВА**  
Yuliia KAMBULOVA  
д-р техн. наук, Україна  
Ph. D. Hab., National University of Food Technologies, Ukraine

**РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЇ, СИРОВИНА ТА МАТЕРІАЛИ****SECTION 1. TECHNOLOGIES, RAW MATERIALS AND MATERIALS****Сировина та матеріали****Raw Materials and Materials**

- Осьмак О. О., Башта А. В., Блаженко С. І.* 7 *Osmak O., Bashta A., Blazhenko S.* Influence of physical fields on the strength characteristics of materials of low-resource parts
- Мандюк О. В., Поліщук Г. Є., Кочубей-Литвиненко О. В., Маринін А. І.* 14 *Mandiuk O., Polishchuk G., Kochubei-Lytvynenko O., Marinin A.* Optimization of the modes of homogenization of cream intended for the production of diet sour cream
- Дулька О. С., Прибыльський В. Л., Шидловська О. Б., Іщенко Т. І., Коржос К. С.* 24 *Dulka O., Prybyl'skyi V., Shydlovska O., Ishchenko T., Korzhos K.* Technology of fish dishes using non-traditional vegetable raw materials
- Хохлова Р. А., Марцинкевич Л. В., Степанець В. В., Чепелик О. О., Десик М. Г.* 38 *Khokhlova R., Martynkevych L., Stepanets V., Chepeliuk O., Desyk M.* The impact gravure ink dispersion on color reproduction in the manufacture of packaging for the food industry

**Технології: дослідження, застосування та впровадження****Technologies: Researches, Application and Introduction**

- Кишенько В. Д., Ромащук О. М.* 45 *Kyshenko V., Romashchuk O.* Research on the behavior of the technological complex of a sugar factory using wavelet analysis methods
- Карпенко Р. В.* 57 *Karpenko R.* Intelligent decision support system for optimizing the cleaning of heating surfaces of a solid fuel energy boiler
- Ощипок І. М.* 71 *Oshchypok I.* Methodological approaches to the assessment of wastewater pollution from slaughterhouses
- Зьоменко О. С.* 79 *Zomenko O.* The influence of pressing modes on the indicators of strength and abrasion of tablets
- Вдовенко Д. О., Седих О. Л., Грама М. П.* 89 *Vdovenko D., Sedykh O., Hrama M.* Performance analysis and integration of UIKIT, REALM and ALAMOFIRE in swift mobile applications

## **РОЗДІЛ 2. ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ**

### ***Процеси харчових виробництв***

Скуйбіда Є. Л., Костюк В. С. Рекуперация тепла стічних вод харчових підприємств

Удодов С. О., Савчук Р. О., Чепелюк О. О., Чепелюк О. М. Обґрунтування параметрів процесу фільтрування при освітленні напою типу «КОМБУЧА»

### ***Обладнання та устаткування***

Кривопляс-Володіна Л. О., Костін В. Б., Деренівська А. В. Синтез виконавчого механізму укладальника пляшок

Якимчук В.М., Гавва О.М., Якимчук М.В. Визначення силових та енергетичних показників вакуумних генераторів із функцією енергозощадження

## **SECTION 2. PROCESSES AND EQUIPMENT**

### ***Processes of Food Industries***

98 Skuibida Y., Kostyuk V. Heat recovery of waste water of food enterprises

113 Udodov S., Savchuk R., Chepeliuk O., Chepeliuk O. Substantiation of parameters of the filtering process during clarification of kombucha beverage

### ***Equipment and machinery***

120 Krivoplias-Volodina L., Kostin V., Derenivska A. Synthesis of bottle manipulator for case packing

128 Yakymchuk V., Gavva O., Yakymchuk M. Determination of power and energy indicators of vacuum generators with energy saving function

УДК 621.793.620.172

## INFLUENCE OF PHYSICAL FIELDS ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF MATERIALS OF LOW-RESOURCE PARTS

O. Osmak, A. Bashta, S. Blazhenko  
*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

surface layer of the material,  
physical field,  
residual stress,  
hardened surfacing,  
fatigue limit state

---

**Article history:**

Received 20.03.2024  
Received in revised form  
10.04.2024  
Accepted 12.04.2024

---

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

---

**ABSTRACT**

An important scientific and applied task is to solve the problem of extending the service life of low-resource parts of machines and devices in the production and processing food industry. The paper examines the influence of a number of physical fields on the mechanical characteristics of the surface layers of structural materials. Improving the strength characteristics of working surfaces, especially low-resource parts, by processing them with certain physical fields, namely of laser, radiation and acoustic origin, makes it possible to significantly influence the structure of materials, obtaining their general cross-sectional heterogeneity, to modify and significantly extend the terms of their use in production. The purpose of the work is to determine the influence of the indicated physical fields on such strength characteristics as fatigue, hardness and wear resistance of the studied materials. It was established that the influence of the specified physical fields leads to significant changes in the physical, mechanical and structural characteristics of materials. Laser processing of the near-surface layers of most of the studied materials negatively affects their fatigue characteristics under significant amounts of operating loads. The combined processing of the surface of materials by the physical fields of laser radiation and laser-acoustic irradiation allows, due to the change of structural characteristics, for homogeneous materials in the entire range of repetitively variable stresses, and for "complex" alloys — in the zone of stresses close to the fatigue limit, to significantly increase their endurance, wear resistance and corrosion resistance. Increasing the wear resistance, corrosion resistance and durability of the working surface of the material of problem parts significantly extends their service life. The operation of equipment with reinforced working surfaces of parts shows that their mass use in production will make it possible to significantly reduce the duration and labor intensity of repair work, increase the service life of the equipment itself, and this, in turn, will significantly increase the efficiency and profitability of production.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-3

---

## ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ МАЛОРЕСУРСНИХ ДЕТАЛЕЙ

О. О. Осьмак, <https://orcid.org/0000-0002-6066-6555>

А. В. Башта, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0009-0005-8383-1700>

С. І. Блаженко, канд. техн. наук, <http://orcid.org/0000-0002-9152-4859>

Національний університет харчових технологій

*Важливим науково-прикладним завданням є вирішення проблеми подовження терміну експлуатації малоресурсних деталей машин і апаратів виробничої та переробної харчової промисловості. У статті представлено результати досліджень впливу фізичних полів на механічні характеристики поверхневих шарів конструкційних матеріалів. Підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та витривалості робочої поверхні матеріалу проблемних деталей у подальшому дасть змогу суттєво продовжити їх експлуатаційний ресурс.*

**Ключові слова:** *поверхневий шар матеріалу, фізичне поле, залишкові напруження, зміцнюючі покриття, границя втоми.*

**Вступ.** Значне підвищення вартості легуючих матеріалів і фактична відсутність більшості з них в Україні вимагають шукати шляхи вирішення проблем покращення характеристик міцності металів, які застосовуються в процесі проектування та виготовлення деталей машин та апаратів у сучасних харчових виробництвах. Розробка й створення нових матеріалів потребує значних матеріальних і технологічних затрат, а також довготривалих досліджень з визначення їх фізико-механічних характеристик. Модифікація ж широкоживаних і добре відомих металів, що використовуються при виготовленні тих чи інших конструкційних елементів, під конкретні потреби промисловості є значно перспективнішим вирішенням цих проблем.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Поліпшення характеристик міцності робочих поверхонь, особливо малоресурсних деталей, шляхом обробки їх певними фізичними полями, а саме лазерного, радіаційного та акустичного опромінення, надає можливість суттєво змінювати структуру матеріалів, отримуючи їх загальну неоднорідність по поперечному перерізу, модифікувати і значно продовжити терміни використання їх у виробництві [1—5].

**Мета статті:** визначення впливу вказаних фізичних полів на такі характеристики міцності, як втома, твердість і зносостійкість матеріалів, що досліджувалися.

**Матеріали і методи.** Експериментальні дослідження з визначення характеристик міцності матеріалів проводилися на зразках, виготовлених із пружинної сталі 65Г, титану литого ТЛ5 і тугоплавких вольфрам-титанових сплавів ВТ8 і ВТ10, робочі зони яких піддавались обробці вказаними вище полями.

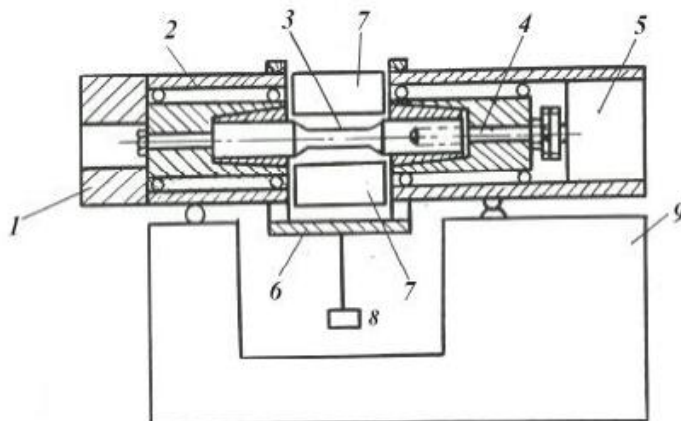
Модернізована випробувальна установка ЧКЗ-1, силовий блок якої приведено на рис. 1 (розроблена Інститутом проблем міцності ім. Г. С. Писаренка, НАНУ), дає змогу експериментально досліджувати зразки на втому під час чистого кругового згину за нормальних температурних режимів.

Особливістю вузла навантаження є не лише широкий діапазон амплітуд повторно-змінних напружень (100 Па—880 МПа), але й висока точність задання та підтримання навантаження в робочій зоні зразка. Відносна похибка визначення амплітуд повторно-змінних навантажень не перевищує 1,5% за частоти коливань в діапазоні 10÷120 Гц.

Випробування здійснювали на подібних до галтелі зразках круглого поперечного

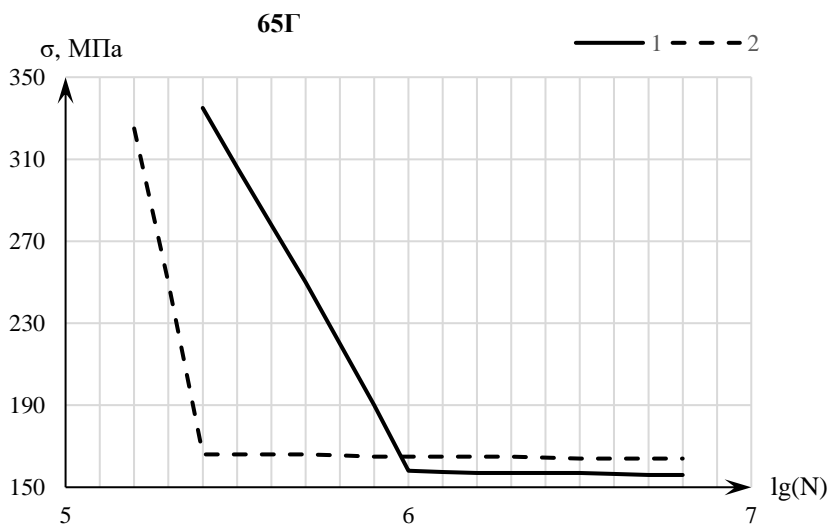


перерізу довжиною робочої зони 140 мм (рис. 2), а також на зразках круглого поперечного перерізу з концентратором конічної форми в його робочій зоні (рис. 3, в).



**Рис. 1.** Схема силового вузла установки ЧКЗ-1: 1—7 — вузол циклічного навантаження і система контролю; 3 — зразок, що досліджується; 8 — набір змінних ваг; 9 — металева рама

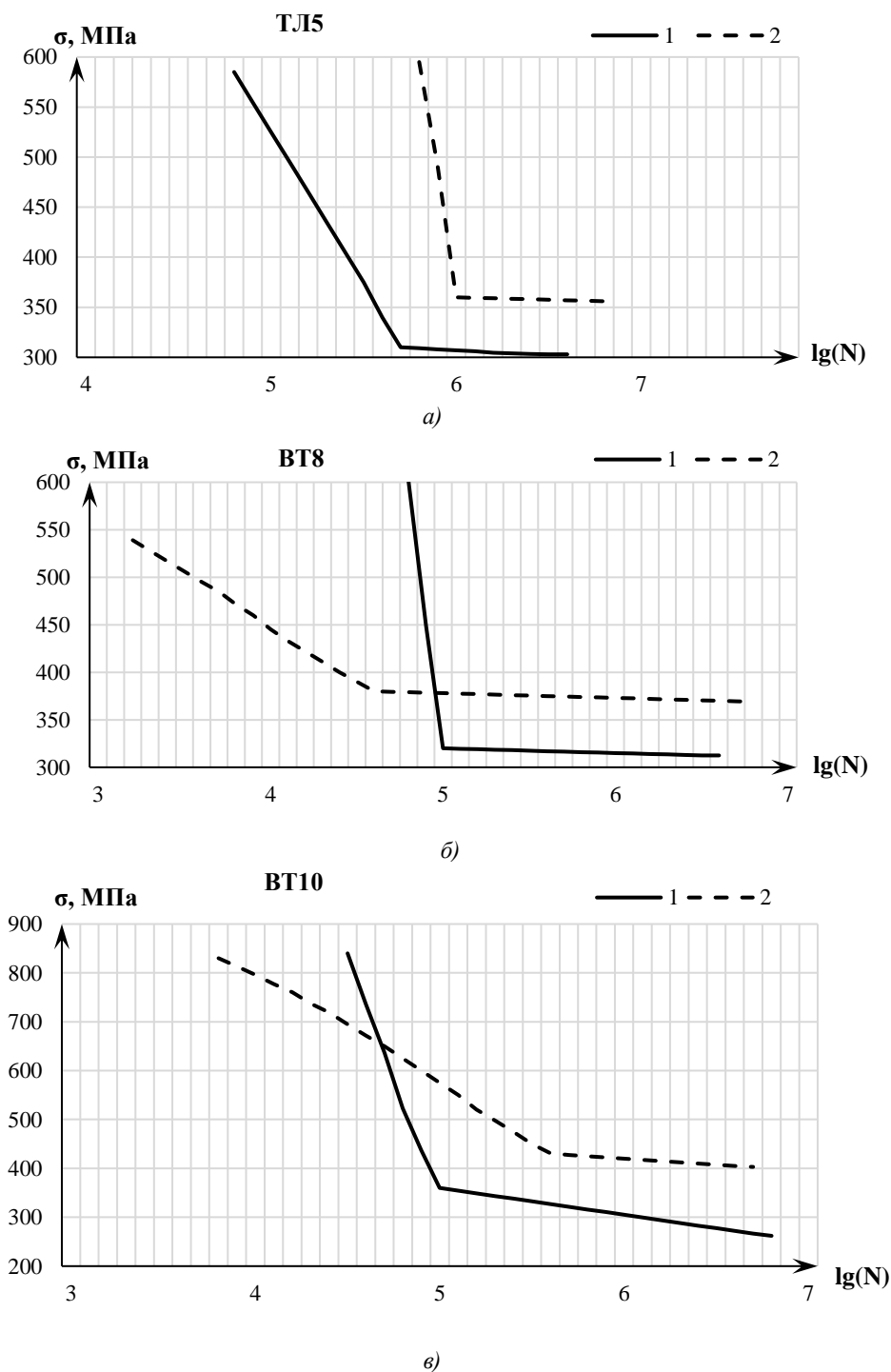
Під час проведення досліджень використовували партію зразків, що ділилася на декілька рівноцінних блоків, які в подальшому підлягали обробленню вказаними фізичними полями.



**Рис. 2.** Криві втоми сталі 65Г: 1 — еталонна; 2 — після лазерного опромінення робочої зони зразка

Експериментальним шляхом визначали час, інтенсивність і рівень впливу фізичного поля та їх комбінацій на кожну окрему партію зразків. Результати досліджень порівнювали з даними еталонної (необробленої) партії. Під час статистичної обробки результатів досліджень здійснювали розрахунки відносної похибки, порівнюючи їх з нормативними значеннями.

Після лазерної, радіаційної або акустичної обробки зразків, виготовлених із вказаних вище матеріалів, проводилося визначення характеристик міцності їх композитної структури.



**Рис. 3. Криві втоми металів, що досліджувалися:** а) TL5: 1 — еталонна; 2 — лазер-акустичне опромінення; б) VT8: 1 — еталонна; 2 — лазер-радіаційне опромінення; в) VT10: 1 — еталонна; 2 — лазер-радіаційне опромінення

Для рівномірного розподілу енергії мілісекундних імпульсів лазерного опромінення по поверхні зразка і для запобігання плавленню металу в локальних місцях використовували епоксидо-полімерне з алюмінієвим порошковим наповнювачем покриття його робочої зони.

**Результати досліджень.** Аналіз експериментальних даних, а також криві втоми зразків 65Г (рис. 2) дають змогу стверджувати, що після лазерної обробки (крива 2) у поверхневих шарах матеріалу відбувалося крихке руйнування, яке призвело до відчутного зменшення його міцності. Визначено, що в результаті обробки зразків лазерними імпульсами, вони нагрівалися набагато інтенсивніше, якщо порівняти з еталонними зразками.

Загальновідомо, що температура нагрівання зразків під час циклічних навантажень залежить від величини діючих напружень [6, 7] і від швидкості руху вільних дислокацій [8—10]. Тому можна стверджувати, що різке зменшення міцності на втому зразків з 65Г, які піддавалися лазерному опроміненню, відбувалося через появу залишкових напружень у приповерхневих шарах матеріалу внаслідок зміни їх структури.

Аналізуючи отримані дані, можемо стверджувати, що для зразків із цього металу, які загартовані й оброблені лазером, характерним є зниження границі витривалості практично на всьому діапазоні високих значень напружень втоми. У той же час за напружень, близьких до границі витривалості, її величина, якщо порівняти зі значеннями еталонної партії зразків, зростає на 10—15% за рахунок меншого впливу залишкових напружень в обробленим таким чином приповерхневих шарах матеріалу. Дослідження зразків після проведення випробувань підтвердило можливість визначити дві характерні зони їх руйнування: крихка — в приповерхневих шарах, в'язка — в основному тілі металу зразка. Відмічене незначне зниження мікротвердості робочої поверхні зразків, зумовлене виникненням у периферійних шарах певних зон залишкових напружень, викликаних опромінюванням лазером.

Експериментально також встановлено, що комбінована обробка поверхні робочої зони зразків зі сплаву ТЛ5 лазер-акустичним опроміненням, дає змогу досягти суттєвого підвищення витривалості протягом усього діапазону навантажень (рис. 3, а). На відміну від чистого титану, витривалість зразків із вольфрам-титанових сплавів ВТ8 і ВТ10, робоча зона яких оброблена лазер-радіаційним опроміненням (рис. 3, б і 3, в), знижується за високих діючих напружень.

Величина ж границі витривалості при цьому зросла на 12—18% порівняно з даними для зразків у вихідному стані (еталонні партії зразків).

Як і для зразків із сталі 65Г, змінюється сам характер руйнування від втоми зразків з литого титану та його сплавів. Якщо у вихідному стані матеріали руйнувалися з ознаками крихкого руйнування, то після лазер-акустичного і лазер-радіаційного опромінення спостерігалися ознаки пластичного руйнування. В епіцентрах виникнення акустичних хвиль великої амплітуди метал зразка не реагує з кислотою травлення шліфів, а гістограми розподілу мікротвердості на поверхні зразка вказують на її неістотне збільшення. Щільність потужності під час лазерного опромінення становила  $P = 1 \cdot 10^9$ , Вт/см<sup>2</sup>.

Результати механічних випробувань на втому показують, що в умовах дії симетричних циклічних навантажень комбіноване лазер-радіаційне опромінення робочої поверхні зразків ВТ8 і ВТ10 призводить до суттєвого (18%) підвищення величини границі їх витривалості.

Таке зміцнення зразків відбулося після комбінованої дії — спочатку лазерного

азотування, а потім радіаційного опромінення поверхні. Лазерне азотування зразків проводилося в середовищі рідкого азоту. Промінь лазера, потрапляючи на поверхню зразка, проходить крізь шар рідкого азоту, спричиняє його вибухове випаровування з утворенням нітридів титану в приповерхневих шарах. Тривалість лазерного імпульсу становила  $t = 50$  нс. Довжина хвилі та щільність потужності випромінювання складає, відповідно,  $\alpha = 1,06$  см і  $P = 1 \cdot 10^9$ , Вт/см<sup>2</sup>.

За такого методу обробки поверхні зразка мікротвердість титанового сплаву  $H_V$  в його приповерхневих шарах зросла від 35 до 38%. Водночас спостерігається падіння міцності зразків за значних величин діючих напружень. Це зумовлене утворенням твердих нітридів титану в приповерхневих шарах, а також утворенням нітридних зерен, що призводить до виникнення далекодійних полів залишкових напружень, які впливають на зниження міцності.

Подальше радіаційне опромінення азотованої поверхні зразків вказаних сплавів дає змогу суттєво змінювати її структуру і впливати на поля залишкових напружень шляхом подрібнення нітридних зерен. Таким чином, радіаційне опромінення забезпечує зниження впливу величини цих напружень. Отже, лазер-радіаційна обробка поверхні зразка надає можливість не тільки поліпшити його зносостійкість за рахунок зростання твердості нітратних приповерхневих шарів металу, але й помітно зменшити вплив залишкових напружень у цих шарах, подрібнюючи величину самих нітратних зерен. Як наслідок, за напружень, що наближаються до межі витривалості, де вплив залишкових напружень суттєво знижується, її величина збільшується.

Отже, можна стверджувати, що комбінована лазерно-акустична та лазерно-радіаційна обробка деталей, виготовлених з литого титану або вольфрам-титанових сплавів, істотно підвищить опір зношуванню робочих поверхонь і рівень їх витривалості в умовах довготривалої експлуатації.

Особливо актуально це для малоресурсних деталей машин і елементів конструкцій переробного виробництва, де під час їх виготовлення основним матеріалом є не леговані сталі через порівняно невисоку собівартість. Тож головною умовою для підвищення ресурсу експлуатації конструкційних матеріалів є наявність характерної для них досить широкої перехідної дифузійної зони твердого розчину. Така зона надає можливість поєднувати отриману зовнішню зносостійку робочу поверхню з основою, забезпечуючи більш плавну і неперервну зміну властивостей матеріалу конструкційного елемента по висоті його поперечного перерізу, оскільки відсутність такої перехідної зони твердого розчину в умовах знакозмінних навантажень, як показують дослідження, може призводити до руйнування від втоми зміцненого периферійного шару робочої поверхні конструкційного елемента. Цілісність же композитної структури поперечного перерізу матеріалу зразка за рахунок наявності зони твердого розчину між поверхневим зміцненим покриттям і основою дає змогу суттєво подовжити термін експлуатації таких деталей в машинах, апаратах чи відповідних конструкціях.

Контроль якості зносостійкого поверхневого покриття, зазвичай, проводиться металографічними та іншими спеціальними методами. Експлуатація обладнання зі зміцненими робочими поверхнями деталей показує, що їх масове застосування у виробництві дасть змогу скоротити тривалість і трудомісткість ремонтних робіт, збільшить термін експлуатації самого обладнання, а це, у свою чергу, значно підвищить ефективність і рентабельність виробництва.

**Висновки.** 1. Встановлено, що вплив зазначених фізичних полів призводить до значних змін у фізико-механічних і структурних характеристиках матеріалів.

2. Лазерна обробка приповерхневих шарів більшості досліджуваних матеріалів (65Г, ТЛ5, ВТ8, ВТ10) шкідливо впливає на характеристики втоми за суттєвих величин діючих навантажень. Це обумовлено зміною структури шарів, а також значними полями залишкових напружень і більш інтенсивнішим окисленням граней мікротріщин пустот, раковин з одночасним існуванням декількох фаз металів, складним розподілом легуючих елементів, що є особливо характерним для «складних» матеріалів.

3. Комбінована обробка поверхні матеріалів фізичними полями лазерно-акустичного та лазерно-радіаційного опромінювання дає змогу за рахунок зміни структурних характеристик для однорідних матеріалів в усьому діапазоні повторно-змінних напружень (ТЛ5), а для сплавів (65Г, ВТ8, ВТ10) — в зоні напружень близьких до границі втоми, суттєво підвищити їх витривалість, зносостійкість і корозійну стійкість.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Sumanth Ratna Kandavalli, Gadudasu Babu Rao, Praveen Kumar Bannaravuri, Manu Mathai Kanakamani Rajam, Sunanda Ratna Kandavalli, S. Rajesh Ruban. (2021). Surface strengthening of aluminium alloys/composites by laser applications: A comprehensive review. *Materials Today Proceedings*, 47(19), 6919—6925.
2. K. Y. Luo, J. Z. Lu, Y. K. Zhang, J. Z. Zhou, L. F. Zhang, F. Z. Dai, L. Zhang, J. W. Zhong, C. Y. Cui. (2011). *Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI 304 austenitic stainless steel*: materials Science and Engineering: A, 528(13—14), 25 May, 4783—4788.
3. Мудрий, С. І., Никируй, Ю. С. (2017). *Вплив лазерного опромінювання на структуру аморфних металевих сплавів*. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.
4. Nikola Kalentics, Eric Boillat, Patrice Peyre, Snežana Ćirić-Kostić, Nebojša Bogojević, Roland E. (2017). Logé Tailoring residual stress profile of Selective Laser Melted parts by Laser Shock Peening. *Additive Manufacturin*, 16, 90—97.
5. Мажейка, О. Й. (2011). *Лазерна, плазмова і детонаційна технології зміцнення поверхонь*: монографія. Кіровоград: видавництво Лисенко В. Ф. ISBN 966-2570-12-0.
6. Pengjie, Wang, Qiang, Cao, Sheng, Liu, Qing, Peng. Surface strengthening of stainless steels by nondestructive laser peening. (2012). *Materials & Design*, 205, 109754.
7. Гончарук, О. О., Головка, Л. Ф., Кагляк, О. Д., Лутай, А. М. (2012). Визначення оптимальних умов лазерного формування інструментального шару абразивних інструментів: *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5(60)), 28—31.
8. Башта, А. В., Леонєць, В. А., Горик, О. В. (1996). Вплив лазерно-радіаційних полів на характеристики міцності сплаву ВТ8: *тези доповідей 48-ї Наукової конференції викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського інженерно-будівельного університету*, частина 3, 86.
9. Башта, А. В., Леонєць, В. А. (1998). Лазерно-акустичне опромінення зразків і його вплив на характеристики міцності металів: *тези доповідей 50-ї наукової конференції викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського державного технічного університету*, частина 3, 179.
10. Lyashenko, B. A., Solovyh, V. G., Kaplun, B. A., i dr. (2009). Tehnologicheskoe obespechenie diskretnoj struktury poverhnosti pri azotirovanii. *Tehnologicheskie sistemy*, 2, 55—59.

УДК 637.146.32

# OPTIMIZATION OF THE MODES OF HOMOGENIZATION OF CREAM INTENDED FOR THE PRODUCTION OF DIET SOUR CREAM

O. Mandiuk, G. Polishchuk, O. Kochubei-Lytvynenko, A. Marinin  
*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

sour cream,  
whey concentrates,  
homogenization,  
effective viscosity,  
syneresis

---

**Article history:**

Received 11.08.2024  
Received in revised form  
06.09.2024  
Accepted 10.09.2024

---

**Corresponding author:**  
milknuft@i.ua

---

**ABSTRACT**

The article presents the results of the optimization of the homogenization regimes of cream mixtures enriched with whey proteins and intended for the production of sour cream with a fat content of 10%. It was established that it is possible to achieve optimal values of the effective viscosity of sour cream not lower than 80 Pa·s with a straight course of the rotary measurement and a shear speed gradient of  $0.1 \text{ s}^{-1}$  in the presence of 1% whey protein concentrate and 30% hydrolyzed whey concentrate in fairly wide ranges values of pressure (5—25 MPa) and temperature (40—80 °C) due to the high structuring ability of whey proteins. For the control sample, the optimal homogenization modes are significantly narrowed down to pressure values of 10—15 MPa and temperature of 60—80 °C. In the case of adding 0.5%  $\beta$ -glucan to protein-containing cream, an abnormal decrease in the viscosity of sour cream was found, in contrast to the synergistic structuring effect in the case of adding 0.5% guar gum to protein-containing cream. Modes of homogenization of cream with  $\beta$ -glucan are narrowed to 10—15 MPa at a temperature of 60—70 °C, but for cream with guar gum, they are more energy-saving and can be implemented at a pressure of 5—25 MPa and a temperature of 40—80 °C. All samples of sour cream obtained under the optimal modes of homogenization of creamy mixtures are characterized by organoleptic indicators and syneretic ability of a high level of quality, which confirms the practical significance of optimized modes of homogenization of creamy mixtures.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-4

---

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ ВЕРШКІВ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ДІЄТИЧНОЇ СМЕТАНИ

О. В. Мандюк, здобувач PhD, <https://orcid.org/0000-0002-3291-139X>

Г. Є. Поліщук, д-р техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-3013-3245>

О. В. Кочубей-Литвиненко, д-р техн. наук,

<https://orcid.org/0000-0003-0712-448X>

А. І. Маринін, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0001-6692-7472>

Національний університет харчових технологій

У статті наведено результати оптимізації режимів гомогенізації вершкових сумішей, збагачених сироватковими білками та призначених для виробництва сметани жирністю 10%. Встановлено, що досягти оптимальних значень ефективної в'язкості сметани не нижче 80 Па·с при прямому ході ротаційного вимірювання і градієнті швидкості зсуву  $0,1 \text{ c}^{-1}$  в присутності 1% концентрату сироваткових білків і 30% концентрату гідролізованої сироватки можна у доволі широких діапазонах значень тиску (5—25 МПа) і температури (40—80 °С) за рахунок високої структуруючої здатності сироваткових білків. Для контрольного зразка оптимальні режими гомогенізації суттєво звужуються до значень тиску 10—15 МПа і температури 60—80 °С. У разі внесення до білоквмісних вершків 0,5%  $\beta$ -глюкану виявлено аномальне зниження в'язкості сметани, на відміну від синергетичного структуруючого ефекту у разі внесення до білоквмісних вершків 0,5% гуарової камеді. Режими гомогенізації вершків з  $\beta$ -глюканом звужуються до 10—15 МПа за температури 60—70 °С, але для вершків з гуаровою камеддю є більш енергоощадливими і можуть бути реалізовані за тиску 5—25 МПа і температур 40—80 °С. Усі зразки сметани, одержані за оптимальних режимів гомогенізації вершкових сумішей, за органолептичними показниками і синергетичною здатністю характеризуються високим рівнем якості, що підтверджує практичну значимість оптимізованих режимів гомогенізації вершкових сумішей.

**Ключові слова:** сметана, сироваткові концентрати, гомогенізація, ефективна в'язкість, синерезис.

**Вступ.** Сметана низької жирності зазвичай відрізняється від повножирних різновидів доволі рідкою консистенцією, вираженою кислотністю, недостатньо повними смаком і запахом, низькою здатністю до зберігання [1]. Для покращання якості сметани необхідно контролювати якість сировини та активність закваски, а також дотримуватися рекомендованих технологічних режимів основних технологічних операцій — гомогенізації, пастеризації, ферментації вершків, визрівання і зберігання сметани [2]. Зважаючи на необхідність покращення споживчих властивостей низькожирної сметани, актуальним є вивчення особливостей впливу однієї з найважливіших технологічних операцій, зокрема гомогенізації вершків, на показники якості готового продукту, у тому числі збагаченого білком.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Наявність молочного жиру надає молочним продуктам приємних смакових відчуттів і забезпечує формування кремоподібної густої консистенції [3]. У той же час, низький вміст жиру в сметані (10...15%) призводить до виникнення численних вад органолептичних показників, що пояснюється підвищенням вмістом вологи з переважанням у структурі продукту молочного білкового кислотного гелю [4]. Для покращення сенсорних властивостей, зниження синерезису і подовження строків зберігання сметани з низьким вмістом жиру до її

складу вносять білки і стабілізатори структури [5]. Для зв'язування води і відповідного структурування низькожирної сметани українські науковці використовують у її складі природні загусники [6]. Споживчі властивості молочних продуктів також покращують застосуванням у технологічних схемах різних способів гомогенізації молочних сумішей [7]. Останнім часом популярною є обробка вершків високим тиском, що інактивує бактеріофаги і сторонні мікроорганізми та, відповідним чином, подовжує строки зберігання сметани, а також підвищує у її складі життєздатність пробіотичних бактерій [8]. У разі застосування загальноприйнятих режимів гомогенізації було встановлено значне покращення консистенції сметани за одночасного зниження синерезису при збільшенні жирності вершків від 20 до 40% та підвищення тиску гомогенізації до 20 МПа на першому ступені [9]. У той же час, є інша інформація щодо рекомендованих режимів гомогенізації вершків для виробництва сметани низької жирності: тиск 8 МПа і температура 65 °С. Нижча температура і вищий тиск збільшують розміри жирових кульок і спричинюють їхню агломерацію в гомогенізованих вершках, що погіршує якість сметани [10]. Обов'язковій гомогенізації піддають не тільки вершкові суміші при виробництві сметани, але й жировмісні суміші для виробництва морозива. Зазвичай, тиск гомогенізації вершкових сумішей приймають у межах 8—12 МПа за температури 60—70 °С. Однак встановлено, що подвійна гомогенізація за тиску 14,1+3,5 МПа при 60 °С значно підвищує опір таненню морозива [11], що можна гіпотетично пояснити підвищенням концентрування подрібнених жирових кульок на поверхні поділу фаз «повітря—плазма» з утворенням механічно стійкої жирової сітки.

Дискусійним залишається питання щодо доцільності застосування повної або часткової гомогенізації у виробництві сметани. Доведено, що часткова гомогенізація ефективна лише в разі застосування високого тиску, що покращує колоїдну стабільність молока і в'язкість, але не впливає на його активну кислотність [12].

Отже, гомогенізація є одним з вагомих чинників формування сенсорних властивостей сметани з низьким вмістом жиру. Однозначні рекомендації щодо режимів гомогенізації вершків у технології низькожирної сметани відсутні, особливо в разі застосування у складі цього продукту структуруючих і збагачуючих інгредієнтів. Авторами науково обґрунтовано вибір білоковмісних інгредієнтів у складі низькожирної сметани [13], зокрема концентрату сироваткових білків КСБ-УФ і концентрату гідролізованої сироватки КГС. Також триває робота з розроблення оригінальних рецептур сметанних виробів на основі збагаченої білками низькожирної сметани. Тому, зважаючи на нетиповий хімічний склад вершків, які необхідно гомогенізувати перед пастеризацією і ферментацією, виникла потреба оптимізувати технологічні режими процесу механічного оброблення жировмісних сумішей.

**Метою дослідження** є оптимізація режимів гомогенізації вершків для виробництва сметани низької жирності, збагаченої білками.

**Матеріали і методи.** Зразки сметани жирністю 10% одержували з нормалізованих вершків, які гомогенізували за змінних тиску (5—25 МПа) і температури (40—80 °С) за допомогою лабораторного гомогенізатора-диспергатора моделі 15M-8TA «Lab Homogenizer & Sub-Micron Disperser» (GAULIN CORPORATION, Massachusetts, USA). Гомогенізовані вершки пастеризували (85—90 °С, 5 хв), охолоджували (28—32 °С) і ферментували закваскою ТМ «Vivo» (Україна), що містить *Lactococcus lactis*, *Lactococcus cremoris*, *Lactococcus diacetylactis*, *Streptococcus thermophilus*, до досягнення активної кислотності не вище рН 4,6. Зразки сметани охолоджували (4±2 °С) і зберігали в холодильній камері впродовж однієї доби.



Білкові концентрати та інші інгредієнти перед внесенням у вершкові суміші попередньо розчиняли або гідратували у вершках за співвідношення 1:10 при температурі 40 °С і при перемішуванні вносили у решту вершків.

Як молочно-білкові інгредієнти застосовували:

- концентрат сироваткових білків, одержаний методом ультрафільтрації (КСБ-УФ);
- концентрат гідролізованої сироватки (КГС) з масовою часткою сухих речовин 40%, одержаний згідно з розробленою науковцями НУХТ технологією [14].

Масові частки КСБ-УФ і КГС у зразках сметани становили 1,0% і 30,0% відповідно до розроблених рекомендацій [13].

Як загущувачі використовували натуральні полісахариди:  $\beta$ -глюкан з вівса (Shanxi, China) і гуарову камедь (Neelkanth Polymers, Індія) у кількостях по 0,5%, які є загальноприйнятими у складі харчових продуктів [15].

Зважаючи на великий обсяг роботи в цій частині експерименту, а також на те, що зразки з КСБ-УФ і КГС виявляють дуже схожі фізико-хімічні властивості, було прийняте рішення дослідити спільну структуруючу здатність полісахаридів ( $\beta$ -глюкану і гуарової камеді) на прикладі зразків з КСБ-УФ, який промислово виготовляється в Україні і є широкодоступним для застосування.

Позначення зразків сметани жирністю 10%:

контрольний зразок (сметана без інгредієнтів);

зразок 1 (сметана з КСБ);

зразок 2 (сметана з КГС);

зразок 3 (сметана з КСБ+ $\beta$ -глюкан);

зразок 4 (сметана з КСБ+гуарова камедь).

Моделювання оптимального співвідношення між режимами гомогенізації, зокрема температурою ( $x$ ) в діапазоні від 40 °С до 80 °С і тиском ( $y$ ) в діапазоні від 5 МПа до 25 МПа, було виконано за допомогою методології поверхні відгуку. Обрана методологія є сукупністю математичних і статистичних прийомів, спрямованих на моделювання процесів і знаходження комбінацій експериментальних рядів предикторів. Моделювання проводилося в середовищі Mathcad 15 за допомогою двовимірної поліноміальної регресії другого порядку. Для цього було створено відповідні матриці із значеннями ефективної в'язкості за різного співвідношення між змінними параметрами температури й тиску. Критерієм оптимальності при гомогенізації вершків обрано ефективну в'язкість, значення якої має бути не нижче 80 мПа·с, що було доведено в попередній серії експерименту.

У загальному вигляді функція відгуку описується таким поліномом:

$$\hat{y}(x, b) = b_0 + \sum_{l=1}^n b_l x_l + \sum_{k=1}^n b_k x_k^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

де  $x \in R^n$  — вектор змінних;  $b$  — вектор параметрів.

Для оцінки невідомих параметрів  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  застосовано метод найменших квадратів (МНК). Згідно з методом невідомі параметри функції обираються таким чином, щоб сума квадратів відхилень експериментальних (емпіричних) значень  $Y_i$  від їх розрахункових (теоретичних)  $Y_{ip}$  значень була мінімальною, тобто:

$$S = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{ip})^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \varphi(X_i, b_0, b_1, \dots, b_k))^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

В'язкість зразків сметани вимірювали на ротажіному реометрі Kinexus Pro+ (Malvern Instruments Ltd, United Kingdom). Верхня геометрія — C25 DIN L0142 SS

(циліндр), нижня геометрія — PC25 DIN C0350 AL. Перед вимірюванням реологічних характеристик зразки сметани підігрівали до температури 10 °С, перемішували їх впродовж 30 с. Після цього зразки поміщали в циліндр, опускали верхню геометрію та витримували впродовж 5 хв. Ефективну в'язкість практично незруйнованої структури визначали при прямому ході за швидкості зсуву 0,1 с<sup>-1</sup>.

*Органолептичні показники*, зокрема запах, смак, колір, консистенцію та зовнішній вигляд, оцінювали за 5-бальною шкалою. Бали виставляли відповідно до таких критеріїв за кожним показником: 1 — погано, 2 — прийнятно, 3 — добре, 4 — дуже добре, 5 — відмінно. Одержані бали перераховували з урахуванням коефіцієнтів вагомості: консистенція — 0,2, запах — 0,2, смак — 0,3, колір — 0,2, зовнішній вигляд — 0,1. За середніми балами кожного показника розраховували загальну сенсорну якість як середньозважене значення балів. Зразки сметани диференціювали за рівнем якості відповідно до розрахованого загального зваженого бала: відмінний (20,0—25,0 балів); добрий (16,0—19,9 бала); задовільний (11,0—15,9 бала); практично неприйнятний (6,0—10,9 бала); неприйнятний (менше 6 балів).

*Ступінь синерезису* як об'єм відділеної зі зразка сметани сироватки, виражений у відстоках, визначали центрифугуванням заповнених перемішаними зразками граду йованих пробірок об'ємом 10 см<sup>3</sup> при частоті обертання барабана центрифуги Sigma 2-6E (Німеччина) 1000 об/хв впродовж 20 хв при температурі 20±1 °С [16].

Точність отриманих результатів забезпечувалася трикратною повторюваністю експерименту за довірчої ймовірності  $P \geq 0,95$ .

**Результати досліджень.** Для оптимізації режимів гомогенізації вершків різного хімічного складу за змінних тиску і температури були одержані такі рівняння регресії:

$$Y_1 = -26,411 + 4,889x - 0,1790x^2 + 2,396y - 0,018y^2 - 0,003xy; \quad (3)$$

$$Y_2 = -82,243 + 3,076x - 0,135x^2 + 5,222y - 0,039y^2 + 0,02xy; \quad (4)$$

$$Y_3 = -62,02 + 3,931x - 0,158x^2 + 4,534y - 0,036y^2 + 0,003xy; \quad (5)$$

$$Y_4 = -90,818 + 4,466x - 0,167x^2 + 4,583y - 0,035y^2 - 0,012xy; \quad (6)$$

$$Y_5 = -91,865 + 2,885x - 0,137x^2 + 5,768y - 0,043y^2 + 0,022xy; \quad (7)$$

де:  $Y_1$  — ефективна в'язкість контрольного зразку вершків, Па·с;

$Y_2$  — ефективна в'язкість зразка 1, Па·с;

$Y_3$  — ефективна в'язкість зразка 2, Па·с;

$Y_4$  — ефективна в'язкість зразка 3, Па·с;

$Y_5$  — ефективна в'язкість зразка 4, Па·с;

$x$  — температура, °С;

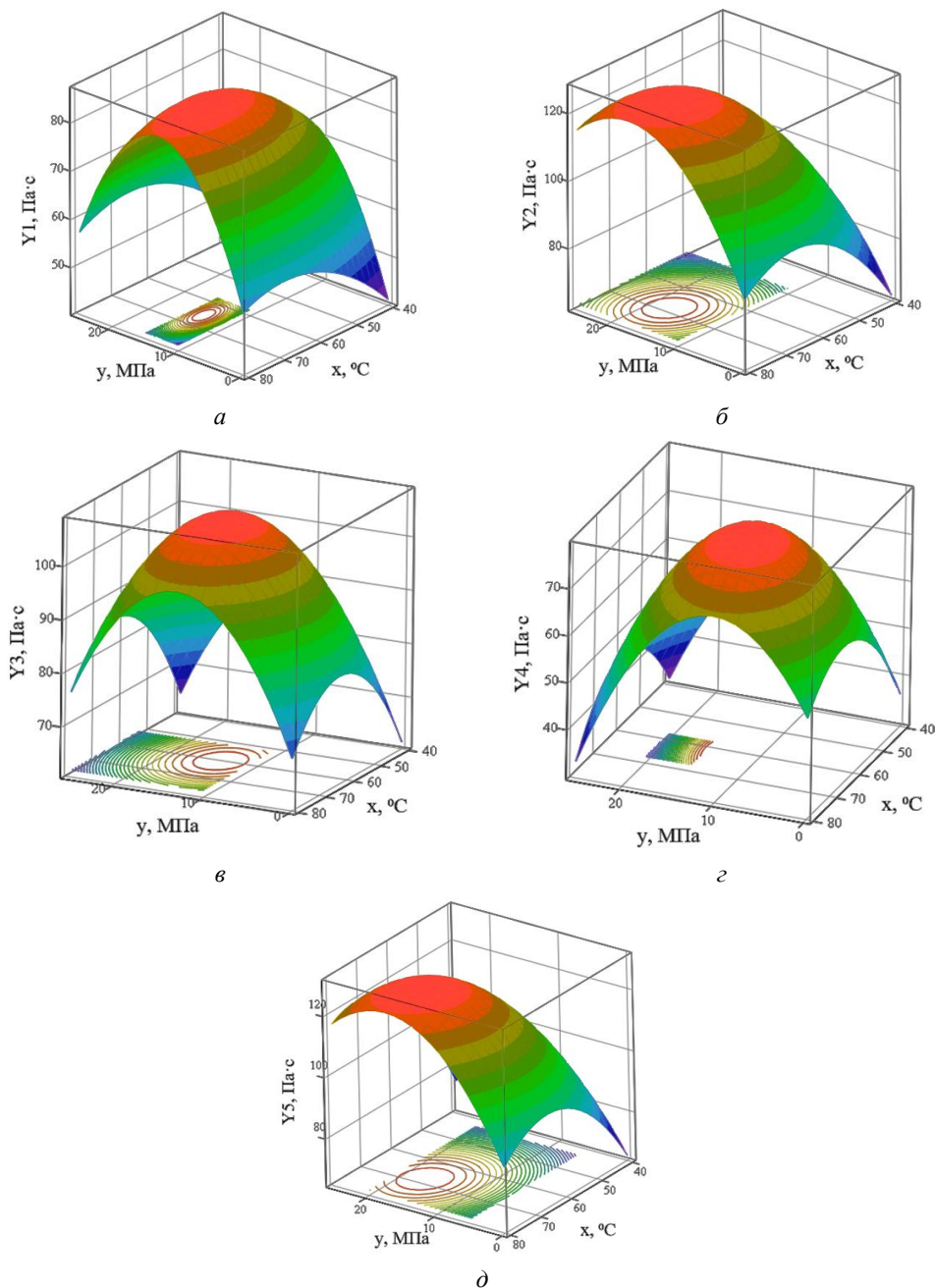
$y$  — тиск, МПа.

Для перевірки адекватності отриманих моделей (3)—(7) було проведено обчислення середньоквадратичного відхилення як квадратного кореня з дисперсії за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}}, \quad (8)$$

де  $\hat{y}_i$  — значення, розраховані за допомогою регресійного рівняння;  $y_i$  — значення експериментальних даних. Відповідно до формули (5) їх значення складає:  $\sigma_{Y_1}=3,74$  см<sup>3</sup>,  $\sigma_{Y_2}=7,39$  см<sup>3</sup>,  $\sigma_{Y_3}=5,46$  см<sup>3</sup>,  $\sigma_{Y_4}=5,87$  см<sup>3</sup> та  $\sigma_{Y_5}=8,55$  см<sup>3</sup>.

На рис. 1 наведені графічні залежності в'язкості вершків, гомогенізованих за варійованих параметрів механічного оброблення — температури і тиску.



**Рис.1.** Графічні залежності в'язкості зразків сметани від температури ( $x$ ) і тиску ( $y$ ) гомогенізації: *a* — контроль; *б* — зразок 1; *в* — зразок 2; *г* — зразок 3; *д* — зразок 4

Відповідно до результатів моделювання (рис. 1) встановлені оптимальні діапазони режимів гомогенізації вершків жирністю 10% різного хімічного складу, які за-

безпечують формування ефективної в'язкості у зразках сметани не нижче 80 Па·с, зокрема:

- контрольний зразок: тиск 10—15 МПа за температури 60—80 °С;
- зразок 1: тиск 10—15 МПа за температури 40—80 °С; тиск 5—25 МПа за температури 50—80 °С;
- зразок 2: тиск 5—20 МПа за температури 50—80 °С; тиск 5—25 МПа за температури 60—80 °С;
- зразок 3: тиск 15—20 МПа за температури 60—70 °С;
- зразок 4: тиск 10—20 МПа за температури 40—80 °С; тиск 5—25 МПа за температури 50—80 °С.

За результатами аналізу результатів оптимізації технологічних режимів гомогенізації вершкових сумішей різного хімічного складу зрозумілим є вагомий вплив на ефективність цього процесу внесених у вершки функціонально-технологічних інгредієнтів. Зокрема, досягти заданих значень ефективної в'язкості сметани можна у надзвичайно широких діапазонах значень тиску і температури в присутності технологічно активних молочно-білкових інгредієнтів — КСБ-УФ і КГС. Доволі неочікуваним є те, що для зразків 1 і 2 з цими молочно-білковими концентратами для одержання технологічного ефекту можна застосовувати дуже низьку енергоощадну температуру гомогенізації в межах від 40 до 50 °С. Це доводить надзвичайно вагомую роль молочно-білкових концентратів у формуванні структури сметани, яка у певній мірі навіть перевершує вплив гомогенізації на цю характеристику продукту. Цей висновок підтверджується і тим, що, на відміну від сметани з молочно-білковими концентратами, для контрольного зразка оптимальні режими гомогенізації суттєво змінюються.

Що стосується зразків 3 і 4, які містять полісахариди, слід відзначити, що присутність полісахариду  $\beta$ -глюкану у зразку 3 аномально знижує в'язкість сметани. Поясненням такого ефекту може бути пригнічення процесу ферментації вершків за занадто сильного зв'язування вільної води  $\beta$ -глюканом у молочних продуктах [17], а також ймовірне руйнування його макромолекул під час гомогенізації вершкових сумішей за низької енергетики молекулярних зв'язків. Подібний ефект також спостерігали і щодо хітоолігосахариду Zagorska J. тощо [18].

Гуарова камедь покращує в'язкісні характеристики сметани за синергістичного сполучення цього полісахариду з білками молока, що дає змогу одержати структурований продукт за найширших діапазонів застосовуваних тиску і температури гомогенізації. Таку ж закономірність було виявлено і за спільної взаємодії між молочними білками і камеддю бобів ріжкового дерева [19]. Також синергізм було виявлено між соєвим білком і гуаровою камеддю, що спричинювало піноутворення і стабілізувало утворену дисперсну систему [20], а синергістична взаємодія між білком гороху та гуаровою камеддю підвищувала вологоутримувальну здатність харчових систем [21]. Тому виявлений ефект можна пояснити саме міжмолекулярною взаємодією між гуаровою камеддю і сироватковими білками, що потребує подальших досліджень.

З метою практичного підтвердження результатів оптимізації процесу механічного оброблення вершкових сумішей з молочно-білковими концентратами проведено порівняльний аналіз зразків сметани, виготовлених за оптимальних режимів гомогенізації. Результати органолептичної оцінки зразків, виготовлених з гомогенізованих вершкових сумішей, та їхню синергетичну здатність після визрівання за температури  $4 \pm 2$  °С наведено у табл. 1 і на рис. 2.

Відповідно до табл. 1, рівень якості зразків сметани з КСБ-УФ та з КСГ, а також зразка з КСБ-УФ у комбінації з гуаровою камеддю за комплексом показників (смак, запах, консистенція, зовнішній вигляд, загальне сприйняття), є відмінним, що на практиці доводить технологічну дієвість оптимізованих режимів гомогенізації для вершків з білоквмісними та вуглеводними інгредієнтами. Контрольний зразок і зразок 3 були оцінені нижче через меншу кремоподібність, менш виражені смак і запах, тому ці зразки віднесені до доброго рівня якості.

Таблиця 1. Органолептична оцінка зразків сметани, виготовленої з гомогенізованих за оптимальних режимів вершків

Зразки сметани	Загальний зважений бал	Рівень якості
Контроль	17,5	добрий
Зразок 1	21,2	відмінний
Зразок 2	22,4	відмінний
Зразок 3	19,6	добрий
Зразок 4	25,0	відмінний

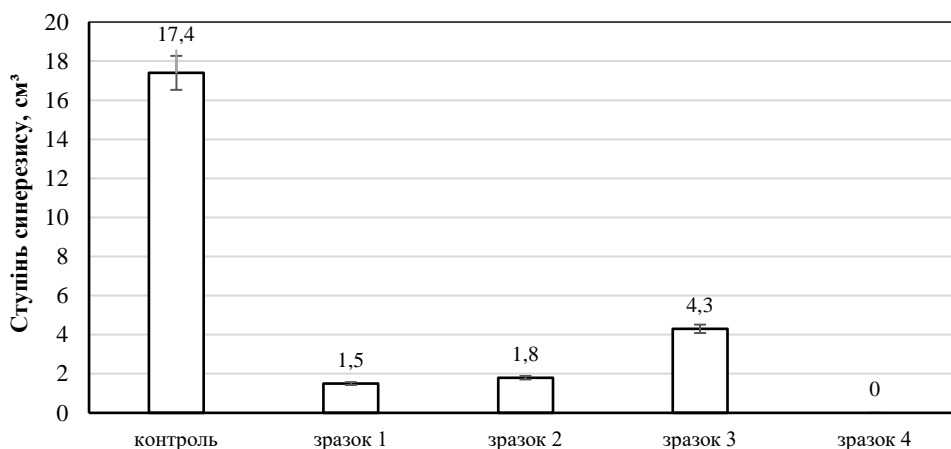


Рис. 2. Ступінь синерезису зразків сметани, виготовленої з гомогенізованих за оптимальних режимів вершків

Рис. 2 доводить можливість суттєвого зниження синерезису (не вище 5 см<sup>3</sup>) для зразків 1, 2 і 3 за оптимальних режимів гомогенізації, порівняно з контрольним зразком. Одержані результати підтверджують технологічну доцільність додаткового введення до складу сметани жирністю 10% білоквмісних інгредієнтів, які не лише зміцнюють білковий згусток і підвищують його ефективну в'язкість, але й додатково зв'язують вологу. Для зразка 4 синерезис взагалі відсутній, що свідчить про утворення композиційного білково-вуглеводного згустка, який добре утримує вологу. Виявлений ефект підтверджується відомою інформацією, що гуарова камедь зміцнює сумарні міжмолекулярні зв'язки у молочно-білкових згустках та формує стабільну в часі структуру [22].

Отже, доведено практичну значимість результатів дослідження, що дає змогу за оптимізованих режимів гомогенізації одержувати дієтичну сметану, збагачену білком, високої якості. Сметана з додатково введеною гуаровою камеддю буде застосо-

вана у подальших дослідженнях як кисловершкова основа для одержання сметанного продукту.

**Висновки.** 1. Режими гомогенізації суттєво залежать від хімічного складу вершків жирністю 10%, збагачених білоквмісними концентратами. Досягти значень ефективної в'язкості сметани не нижче 80 МПа·с при прямому ході ротаційного вимірювання і градієнті швидкості зсуву  $0,1 \text{ c}^{-1}$  в присутності концентрату сироваткових білків і концентрату гідролізованої сироватки можна у широких діапазонах значень тиску (5—25 МПа) і температури (40—80 °С) за рахунок структуруючої здатності білоквмісних інгредієнтів, на відміну від контрольного зразка, оптимальні режими гомогенізації якого суттєво звужуються до значень тиску 10—15 МПа і температури 60—80 °С.

2. За додаткового внесення до білоквмісних вершків  $\beta$ -глюкану в кількості 0,5% виявлено аномальне зниження в'язкості сметани. У разі застосування 0,5% гуарової камеді спостерігається синергістичний структуруючий ефект. Тому режими гомогенізації вершків з  $\beta$ -глюканом значно звужуються до 10—15 МПа за температури 60—70 °С, а для вершків з гуаровою камеддю можуть бути реалізовані за доволі низької температури в діапазоні 40—80 °С.

3. За комплексом органолептичних показників і синеретичною здатністю зразки сметани, одержані за оптимальних режимів гомогенізації вершкових сумішей з білковими концентратами, оцінено за високим рівнем якості, що підтверджує дієвість проведеної оптимізації режимів гомогенізації і дає змогу рекомендувати їх до практичного застосування в технології дієтичної білкової сметани.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Shepard, L., Miracle, P., Leksrisonpong, M. A., Drake (2013). Relating sensory and chemical properties of sour cream to consumer acceptance. *Journal Dairy Science*, 96(9), 5435—54. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6317>.
2. Рижкова, Т., Лисенко, Г., & Гейда, І. (2024). Analysis of ways to stabilize the quality of sour cream. Section 1. *SWorldJournal*, 1(24—01), 30—34. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-24-00-021>.
3. Rybak, O. (2016). Milk fat in structure formation of dairy products: a review. *Ukrainian Food Journal*, 5(3), 499—514.
4. Judith, A., Narvhus, Nina, Østby, Roger, K. Abrahamsen (2019). Science and technology of cultured cream products: A review. *International Dairy Journal*, 93, 57—71. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.01.011>.
5. Hassan, M., Mehriz, A., Salem, A., Abozied, H. (2017). Formulation and Characterization Aspects of Light Sour Cream. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 8, 257—262. <https://doi.org/10.21608/jfds.2017.38690>.
6. Danylenko, S. G., Bodnarchuk, O. V., Ryzhkova, T. M., Diukareva, G. I., Malafaiev, M. T., Verbytsky, S. B. (2020). The effects of thickeners upon the viscous properties of sour cream with a low fat content. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 19(3), 359—368. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.0836>.
7. Shao, Y., Yuan, Y., Xi, Y., Zhao, T., Ai, N. (2023). Effects of Homogenization on Organoleptic Quality and Stability of Pasteurized Milk Samples. *Agriculture*. 13(1): 205. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010205>.
8. Massoud, R., Belgheisi, S., Massoud, A. (2026). Effect of High Pressure Homogenization on Improving the Quality of Milk and Sensory Properties of Yogurt: A Review. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 7(1), 66—70. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2016.V7.544>.
9. Okuyama, S., Uozumi, M., Tomita, M. (1994). Effect of Homogenisation Pressure on Physical Properties of Sour Cream. *Nippon shokuhin kogyo gakkaiishi*, 41(6), 407—412. <https://doi.org/10.3136/nskkk1962.41.407>.

10. El-Nimr, A. A., Szakaly, S., Schaffer, B. (1975). Effect of homogenization on some properties of sour cream. *Egyptian Journal of Dairy Science*, 3(2), 104—112.
11. Ruger, P. R., Baer, R. J., Kasperson, K. M. (2002). Effect of double homogenization and whey protein concentrate on the texture of ice cream. *Journal Dairy Science*, 85(7), 1684—92. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74241-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74241-0).
12. Ambroziak, K., Kielczewska, K., Mickiewicz, D., Dąbrowska, A. (2019). Advantages and Disadvantages of Partial High Pressure Homogenisation of Milk in Relation to Full-Stream Homogenisation. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 69(3), 279—287. <https://doi.org/10.31883/pjfn/109987>.
13. Mykhalevych, A., Kostenko, O., Polishchuk, G., Bandura, U. (2022). Application of milk protein concentrates in preparation of reduced fat sour cream. *Ukrainian Food Journal*, 11(3), 429—447. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2022-11-3-8>.
14. Osmak, T., Mleko, S., Bass, O., Mykhalevych, A., Kuzmyk, U. (2021). Enzymatic hydrolysis of lactose in concentrates of reconstituted demineralized whey, intended for ice cream production. *Ukrainian Food Journal*, 10(2), 277—288. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-2-6>.
15. Seo, C. W. (2022). Effect of galactomannan addition on rheological, physicochemical, and microbial properties of cultured sour cream. *Food Science & Biotechnology*, 31(5), 571. <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01066-3>.
16. Polishchuk, G., Breus, N., Kochubey-Litvinenko, O., Osmak, T., Semko, T., & Borova, M. (2020). Study of the influence of micellar casein and spelt flour on yogurt quality indicator. *EUREKA: Life Sciences*, (4), 44—52. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2020.001378>.
17. Mykhalevych, A., Polishchuk, G., Nassar, K., Osmak, T., Buniowska-Olejnik, M. (2022).  $\beta$ -Glucan as a Techno-Functional Ingredient in Dairy and Milk-Based Products. A Review. *Molecules*, 27(19): 6313. <https://doi.org/10.3390/molecules27196313>.
18. Zagorska, J., Pelnik, A., Kerch, G. (2013). Effect of the Addition of Chitosans with Different Molecular Structure on Fermentation Process and Viscosity Changes During Sour Cream Storage. *Biochemistry and Biophysics (BAB)*, 1(2), 13—21. <https://www.researchgate.net/publication/237339210>.
19. Silva, K., Mauro, M., Gonçalves, M., Rocha, C. (2016). Synergistic interactions of locust bean gum with whey proteins: Effect on physicochemical and microstructural properties of whey protein-based films. *Food Hydrocolloids*, 54, 179—188. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.09.028>.
20. Han, Y., Zhu, L., Hui, Z., Liu, T., Wu, G. (2024). Synergistic effect of gellan gum and guar gum on improving the foaming properties of soy protein isolate-based complexes: Interaction mechanism and interfacial behavior. *Carbohydrate Polymers*, 339, 122202. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122202>.
21. Shen, Y., Li, Y. (2021). Acylation modification and/or guar gum conjugation enhanced functional properties of pea protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106686>.
22. Mudgil, D., Barak, S., Khatkar, B. S. (2024). Guar gum: processing, properties and food applications-A Review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(3): 409—18. doi: 10.1007/s13197-011-0522-x.

УДК 637.56:641.512]:640.43

## TECHNOLOGY OF FISH DISHES USING NON-TRADITIONAL VEGETABLE RAW MATERIALS

**O. Dulka, V. Prybyl'skyi, O. Shydlovska, T. Ishchenko, K. Korzhos***National University of Food Technologies***Key words:**

technology,  
fish schnitzel,  
gluten-free dishes,  
restaurants

**Article history:**

Received 07.02.2024

Received in revised form  
18.09.2024

Accepted 20.06.2024

**Corresponding author:**

olga.ds210791@gmail.com

**ABSTRACT**

In today's world, consumer interest in the benefits of balanced and wholesome nutrition to support and strengthen immunity is significantly increasing, serving as a key driver of the global functional food market. This trend is further influenced by health issues associated with aging. With the growing demand for high-quality, nutritious food, the consumption of various functional food products is on the rise. As a result, functional and other health-oriented foods are becoming increasingly important. The article analyzes the prospects for the production of functional food products, which are promising for the population of Ukraine, conclusions are drawn regarding the possible improvement of the situation due to the creation of products from fish raw materials with the addition of non-traditional plant raw materials, which will contribute to the expansion of the assortment of fish dishes, improved organoleptic indicators and increased biological value, and are also recommended as a functional product in the diet of certain categories of the population. The article presents the results of theoretical and experimental research on improving the technology of semi-finished fish "Natural fish schnitzel with daikon, almonds and oatmeal", which is recommended for functional nutrition. Grounding of fish raw material for preparing a dish — mackerel was carried out, and its advantages in the recipe composition were proven. The possibility of using daikon to expand the assortment and increase the value of the dish is substantiated. Chopped almonds and oatmeal were chosen as breading. The organoleptic indicators of the dish were studied and the optimal ratio of the selected ingredients was determined. The energy value and vitamin-mineral composition of the dish "Natural fish schnitzel with daikon, almonds and oatmeal" was calculated. Results were obtained for the use of mackerel, daikon and for breading crushed almonds and oatmeal. It was established that when using Atlantic mackerel fish fillet, daikon, oatmeal and almonds, the content of fats increased significantly by 2,7 times, unsaturated fatty acids by 6,5 times, and polyunsaturated fatty acids by 4,7 times.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-5



## ТЕХНОЛОГІЯ РИБНИХ СТРАВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕТРАДИЦІЙНОЇ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

О. С. Дулька, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-9878-5998>

В. Л. Прибильський, д-р техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-4126-6721>

О. Б. Шидловська, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0001-5318-1835>

Т. І. Іщенко, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-5241-5342>

К. С. Коржос, здобувач

Національний університет харчових технологій

У статті наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень технологій рибних страв як безглютенових харчових продуктів функціонального призначення. Обґрунтовано використання скумбрії у технологіях безглютенових страв, доведено її переваги в рецептурному складі. Для підвищення біологічної цінності готової продукції та розширення її асортименту обґрунтовано можливість використання дайкону, мигдалю та вієсяних пластівців. Встановлено раціональне співвідношення запропонованих інгредієнтів для отримання рибного шніцеля з високими органолептичними показниками. Розроблено технологію страви «Шніцель рибний з дайконом мигдалем і вієсяними пластівцями».

**Ключові слова:** технологія, рибний шніцель, безглютенові страви, заклади ресторанного господарства.

**Вступ.** Сучасні виклики вносять корективи у різні сфери добробуту населення України. Спостерігаються значні порушення в харчуванні, зокрема дефіцит нутрієнтів. Необхідно запроваджувати профілактичні заходи, спрямовані на забезпечення організму людини повноцінними білками, вітамінами А, Е, D та С, фолієвою кислотою, полінасиченими жирними кислотами, харчовими волокнами, макро- та мікроелементами [1].

В Україні також спостерігається збільшення спадкових захворювань, пов'язаних із шлунково-кишковим трактом. Наприклад, середня поширеність целиакії в Україні становить 1:200 і в останні роки цей показник зростає [2]. Тож для забезпечення комфортного життя людей, які хворіють на целиакію, крім виключення з раціону глютенівмісних білкових і жирних продуктів, необхідним є забезпечення організму комплексом повноцінних біологічно активних речовин.

В умовах сьогодення спостерігається суттєве зростання зацікавленості споживачів до переваг раціонального та адекватного харчування для підтримки і зміцнення імунітету, що є ключовим фактором, який стимулює зростання ринку функціональних продуктів в усьому світі [2]. Це зумовлено також віковими проблемами здоров'я населення. З підвищенням попиту на якісні і корисні харчові продукти збільшується споживання функціональних харчових продуктів різного асортименту, тому функціональні та інші оздоровчі продукти харчування відіграють все більш важливу роль.

Функціональне харчування — це харчування, що сприяє нормальному розвитку людини, підтримці та збереженню здоров'я. Воно поєднує в собі основні напрями дієтології і сприяє збереженню здоров'я людини. Зв'язок між харчуванням і захворюваністю населення визнано як основу профілактики [3]. Наразі у розвинених країнах світу популярним напрямом є додавання до харчових продуктів визначеної кількості вітамінів та інших мікронутрієнтів, що призводить не тільки до покращення якості харчування, але й знижує ризики їх передозування. Саме тому продукти, які,

окрім прямих функцій, повинні передбачати раціональне забезпечення організму людини життєво важливими нутрієнтами, є функціональними харчовими продуктами [4].

Для українського ринку впровадження новітніх технологій функціональних продуктів є особливо актуальним з огляду на події, що пов'язані з військовим станом, зростанням рівня стресу, ослабленням імунітету, тому функціональне харчування може допомогти збагатити організм людини різними нутрієнтами залежно від нагальних фізіологічних потреб.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Структура харчування населення в Україні погіршилася внаслідок нинішньої економічної ситуації, постійним дефіцитом білка, макро- і мікроелементів, вітамінів і харчових волокон, що призводить до зниження показників здоров'я населення країни, особливо в умовах війни.

Риба і рибопродукти є стратегічно важливими у житті людини. Рибні страви мають суттєвий вплив на харчування та становлять значну частину в харчовому раціоні людини [5]. У багатьох країнах світу риба є основною товарною продукцією харчової промисловості. Рибні страви посідають вагоме місце в повноцінному білковому раціоні населення, що сприяє покращенню здоров'я і збільшенню тривалості життя. Риба містить жирні кислоти, жиророзчинні вітаміни, незамінні амінокислоти, мікро- та макроелементи в оптимальних для організму людини співвідношеннях. З точки зору хімічного складу та біологічної цінності рибна сировина має великий потенціал, оскільки є джерелом повноцінного легкозасвоюваного білка, поліненасичених жирних кислот (арахідонова, ейкозопентаєнова, декозогексаєнова), вітамінів (ретинол, ергокальційферол, токоферол), мінеральних речовин та інших біологічно-активних сполук. Хімічний склад риби містить 10...22% білка, 0,2...30% ліпідів, 0,4...1,5% мінеральних сполук на суху речовину [5, 6].

Білки риби відносяться до легкозасвоюваних, оскільки до 92...98% засвоюються організмом людини (молоко — 90...95%, яловичина — 87...90%). За швидкістю перетравлюваності білок риби та рибопродуктів у 2,0...2,5 рази перевершують білок м'яса наземних тварин, що обумовлено низьким вмістом колагену та еластину (2,5...3,0% порівняно з 15...20% у м'ясі яловичини). Крім того, білки риби мають високий коефіцієнт ефективності (1,88...1,90 для м'яса риби порівняно з 1,64 із м'ясом яловичини) [7, 8]. Риба, особливо морська, містить також значну кількість мінеральних речовин. Вона багата на йод, необхідний для нормального функціонування щитовидної залози.

Після анексії Криму та початку повномасштабної війни Україна втратила основну територію вилову морської риби, яка становила значну частку в загальній структурі рибного господарства України, що призвело до збільшення ринкової вартості риби та відповідного зменшення споживання [9].

Наразі знизився імпорт деяких видів риби, зокрема лосося і форелі. Причиною є підвищення цін і нестабільна ситуація в Україні. Водночас зріс імпорт оселедця, скумбрії і мойви. Україна залишається імпортозалежною країною на ринку риби та рибної продукції. Від'ємне сальдо торгівлі рибою у 2023 р. становило 677,8 млн дол. США [10]. У 2022 р. імпорт риби, рибної продукції та інших водних біоресурсів в Україну склав 726,5 млн дол. США. Загальна маса імпортованої продукції становла 313,7 тис. тонн. Близько 80...90% видів риби виловлено у морських економічних зонах інших країн. Україна імпортує переважно заморожену рибу та її філе, на які припадає майже 80% загального обсягу імпорту. На сьогодні основними продук-

тами залишаються оселедець, скумбрія, хек, сардини, путасу та атлантичний лосось [11].

Відомою морською рибою є скумбрія, яка багата на мінерали та вітаміни. Її споживання може забезпечити до 35% добової потреби організму людини у фосфорі. Вітамінний склад скумбрії представлений вітамінами групи B, D і PP, які можуть задовольнити близько 400%, 161 і 58% добової потреби дорослої людини відповідно [8, 12, 13]. Вона містить також поліненасичені жирні кислоти  $\omega$ -3, рівень засвоєння яких в організмі людини становить близько 98% та вітамін E. Завдяки таким властивостям знижується ймовірність розвитку онкологічних новоутворень, нормалізується вміст холестерину в крові, прискорюється обмін речовин [14].

Для розширення асортименту рибної продукції, зокрема скумбрії, та створення функціональних харчових продуктів дослідники різних країн світу визначають можливість їх поєднання з іншими видами сировини. При цьому риба використовується як основна сировина, яка має збалансований вміст амінокислот, поліненасичених жирних кислот, мінеральних речовин і вітамінів [15].

Сучасні заклади ресторанного господарства України постійно вдосконалюють свій асортимент, зокрема рибної продукції. Однак, як правило, вона характеризується недостатнім вмістом повноцінних біологічно активних речовин і низькими органолептичними показниками, тому заклади ресторанного господарства України намагаються вдосконалювати та доповнювати асортимент [16, 17].

Додатковим введенням до рецептур іншої сировини можна усунути ці вади. При цьому важливим є підвищення якості готової продукції, уникнення використання компонентів, що містять глютен і передбачають підвищення харчової та біологічної цінності готових страв. Використання нетрадиційної сировини в поєднанні з морською рибою скумбрією є перспективним кроком до вдосконалення рибного меню закладів ресторанного господарства, що привабить нових клієнтів і задовольнить потреби існуючих задля інноваційного розвитку сфери ресторанного господарства України.

Оскільки скумбрія є джерелом білка, жиру, фосфору, магнію та вітаміну D, а також містить невелику кількість цинку, кальцію і вітамінів групи B, доречно збагатити рецептуру страви інгредієнтами, що містять ці поживні речовини [18, 19]. Також доречно виключити глютен з страви, наприклад, виключити панірувальні сухарі як традиційний інгредієнт у таких стравах на етапі панірування. Для покращення технологічних властивостей рибної сировини перспективним є додаткове використання компонентів рослинного походження.

Дайкон є цінною для України культурою, яка відноситься до родини капустяних, характеризується приємним оригінальним смаком, відсутністю характерною для редьки гіркоти. В Україні дайкон вирощують переважно в північних регіонах. Споживають у сирому та вареному вигляді, заморожують, готують фреші, тушкують і маринують, використовують в салатах, супах, гарнірах. Енергетична цінність дайкону у 100 г становить 18 ккал/кДж. Цінність коренеплоду дайкону залежить від хімічного складу, зокрема від вмісту вітаміну C (7,5...52,5 мг/100 г), калію (до 1%), кальцію, магнію, заліза, фосфору та сірки. Дайкон містить значну кількість ізоціонатів (8,4...50 мг/100 г), які надають йому характерний смак. Дайкон також містить важливий фермент холін, який допомагає знизити рівень шкідливого холестерину в крові і тригліцеридів.

Вівсяні пластівці є перспективною безглютеновою сировиною, використовуються, як джерело клітковини, яка допомагає стабілізувати роботу травного тракту та позитивно впливає на перистальтику. Пластівці у своєму складі містять білок, ліно-

леву кислоту, лецитин, вітаміни А, групи В, Е, К, РР, а також мінеральні речовини — натрій, калій, магній, кальцій, залізо, які сприяють енергозабезпеченню, нормальному функціонуванню серцевого м'язу і регуляції кровотворення.

Мигдаль містить велику кількість поживних речовин, які сприяють здоровому функціонуванню організму і відіграють позитивну роль у профілактиці різних захворювань. Він вважається ефективним засобом для поліпшення роботи мозку, нормалізації функцій внутрішніх органів і підтримання загального здоров'я, тому актуальним є розроблення страв із високою біологічною цінністю за використання морської риби, зокрема скумбрії і нетрадиційної безглутенової сировини в технологіях ресторанного господарства [16].

Популярною стравою у закладах ресторанного господарства країн Європи є шніцель. Як правило його готують із м'яса свійської худоби з використанням солі та приправ. Водночас на сьогодні популярності набувають рибні шніцелі. Використовують різні види риби (тріска, хек, шука, осетр) [9], тому актуальним є розроблення технологій і рецептур рибних страв, зокрема шніцелю на основі скумбрії з використанням безглутенової сировини рослинного походження.

**Метою дослідження** є розроблення технології та рецептури безглутенової рибної страви із скумбрії з використанням нетрадиційної рослинної сировини дайкону, мигдалю та вівсяних пластівців для розширення асортименту функціональних продуктів для закладів ресторанного господарства.

**Матеріали і методи.** У дослідженнях використовували методи теоретичного узагальнення і компаративного аналізу, розрахункові та органолептичні методи. Визначення фізико-хімічних показників сировини, напівфабрикатів і готової продукції здійснювали загальноприйнятими в харчовій промисловості методами. У дослідженнях використовували вівсяні пластівці та мигдаль ТМ «Премія».

**Результати дослідження.** Харчова цінність риби визначається її хімічним складом і співвідношенням їстівних і неїстівних частин. До їстівних частин відносяться м'ясо, шкіра, ікра, молоки, печінка, а до неїстівних — кістки, плавники, луска та нутрощі. Порівняно з іншими видами риби скумбрія має переваги за вмістом їстівних частин і передбачає незначні відходи у переробленні.

Хімічний склад риби визначає її поживну цінність і смакові якості та характеризується вмістом біологічно активних речовин. На рис. 1 наведено вміст білків і жиру в трісці, сазані, скумбрії, судаку, щуці, осетрі та окуні.

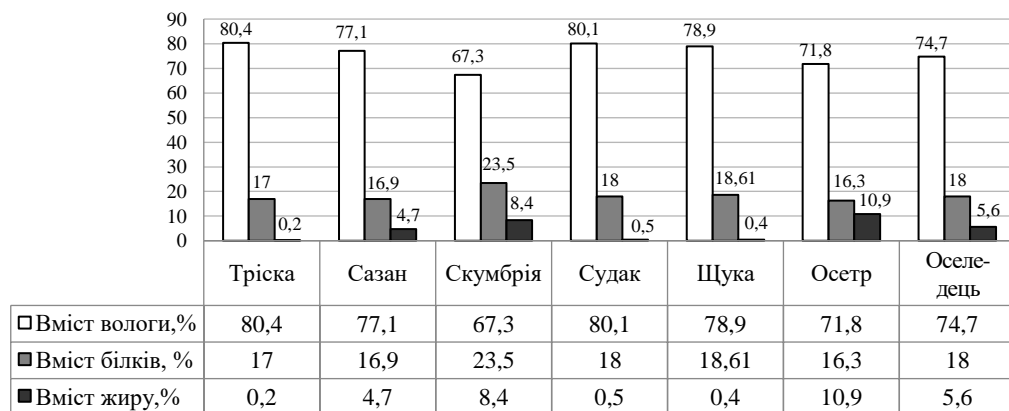


Рис. 1. Вміст білків і жирів у різних видах риби

Встановлено, що скумбрія мала найвищий вміст білків і жирів, що зумовлює доцільність її використання у приготуванні рибних страв. Слід відзначити, що жири, які містяться в рибі, значною мірою впливають на смакові якості страв, оскільки мають ніжний смак, характерний аромат і надають свіжій продукції привабливості, тому, крім високого вмісту білка, скумбрія має переваги порівняно з іншими видами риб.

Відомо, що в рибних стравах містяться поліненасичені жирні кислоти, особливо  $\omega$ -3, зокрема ейкозапентаєнова і докозагексаєнова. Вони мають антиоксидантні властивості та сприяють зниженню ризику серцево-судинних захворювань, нормалізують рівень холестерину, сприяють обміну речовин.

На рис. 2 наведено вміст  $\omega$ -3 кислот в різних видах риби.

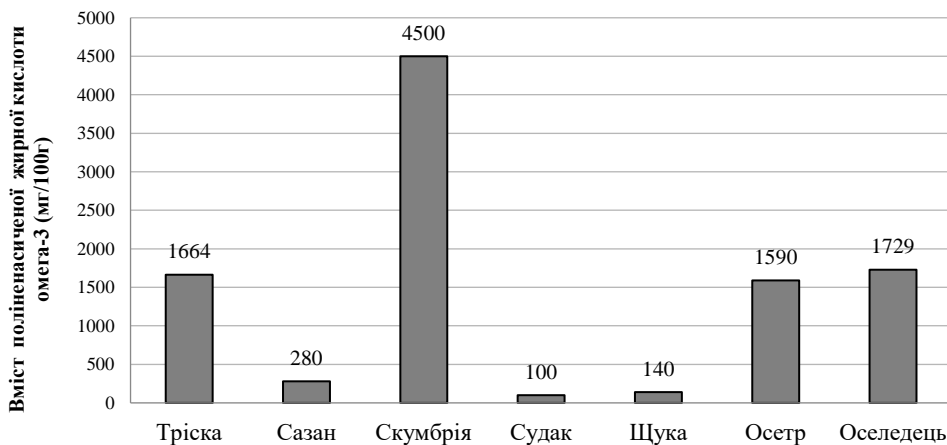


Рис. 2. Вміст поліненасичених жирних кислот  $\omega$ -3 в різних видах риби

Встановлено, що з досліджених видів риб скумбрія мала найвищий вміст поліненасиченої жирної кислоти  $\omega$ -3, що доводить доцільність її використання як основи у приготуванні рибних шніцелів функціонального призначення. З огляду на це, для подальших досліджень для приготування рибного шніцелю було обрано скумбрію, яка за вмістом біологічно активних речовин і співвідношенням їстівних та неїстівних частин має переваги над іншими видами риб.

Співвідношення складових харчової продукції має визначальний вплив на властивості готової продукції, зокрема оздоровчі й функціональні. Як приклад, у табл. 1 наведено відповідність мінерального та вітамінного складу скумбрії атлантичної для жінок II групи працездатності.

Таблиця 1. Відповідність вмісту мінеральних речовин і вітамінів скумбрії потребам жінок II групи працездатності

Найменування нутрієнту	Вміст у 100 г скумбрії	Добова потреба жінок II групи працездатності	Добова потреба жінок II групи працездатності у 100 г скумбрії, %
Мінеральні речовини			
Кальцій	40 мг	1110 мг	3,6
Магній	50 мг	500 мг	10
Фосфор	280 мг	1200 мг	23,3
Йод	45 мкг	150 мкг	30

Продовження таблиці 1

Селен	44,1 мкг	50 мкг	88,2
Вітаміни			
B <sub>2</sub>	0,36 мг	1,6 мг	22,5
B <sub>6</sub>	0,8 мг	1,8 мг	44,4
B <sub>12</sub>	12 мкг	3 мкг	400
D	16 мкг	5 мкг	322
PP	12 мг	20 мг	58

На цьому прикладі визначено, що з точки зору функціонального харчування добові потреби в різних нутрієнтах для цільової аудиторії можна частково задовольнити рибною стравою. Для жінок II групи працездатності скумбрія містить значну кількість магнію, який важливий для функціонування м'язів і нервової системи. Вміст йоду в ній може бути важливим для забезпечення нормальної роботи щитовидної залози. Скумбрія є джерелом вітаміну D, який важливий для здоров'я кісток та імунної системи [20, 21]. Вміст вітаміну B<sub>12</sub> у скумбрії є значно вищим, ніж добова потреба, що може бути корисним для людей з дефіцитом цього вітаміну. Ця риба може бути корисним джерелом магнію, йоду, вітаміну D. Скумбрія також є корисним джерелом магнію, фосфору, йоду, селену та інших вітамінів групи B. Наведений приклад свідчить про значний вплив хімічного складу риби будь-яких видів, у т. ч. скумбрії на різні групи населення. Паніровка є специфічною складовою будь-якої харчової продукції. Від її складу залежить перше сприйняття і подальше споживання страв.

У розроблених технологіях рекомендується замінити панірувальні сухарі на мелені вівсяні пластівці та мигдаль, які не містять глютен. Показники вівсяних пластівців наведено у табл. 2.

Встановлено, що органолептичні та фізикохімічні показники вівсяних пластівців відповідали нормативним вимогам. При цьому встановлено, що вміст крохмалю, в досліджуваних вівсяних пластівцях був дещо меншим, що є важливим при розробленні страв функціонального призначення, оскільки в процесі травлення, крохмаль гідролізується, що підвищує рівень глюкози в крові.

Таблиця 2. Фізико-хімічні та органолептичні показники вівсяних пластівців

Найменування показника	Характеристика дослідного зразка	Вимоги ДСТУ 4634:2006
Органолептичні показники		
Колір	Білий з кремовим відтінком	Білий з відтінками від кремового до жовтуватого
Запах	Характерний вівсяний крупі; сторонній запах, запах плісняви, затхлий відсутні	Властивий вівсяний крупі, без стороннього запаху, без запаху плісняви, затхлого
Смак	Без присмаку гіркоти, кислоти та плісняви	Властивий даному виду виробів. Не повинно бути стороннього присмаку і запаху
Фізико-хімічні показники		
Масова частка вологи, %	11,3	не більше 12,0
Кислотність, град	4,7	не більше 5,0

Продовження таблиці 2

Кількість крохмалю, г	51,0	не нормуються
Кількість декстринів, г	13,5	
Моно- і дисахариди, г	2,1	
Кількість редукуючих цукрів, %	4,0	

Мигдаль було обрано для панірування шніцеля через підвищений вміст цинку, що може забезпечити до 18% добової потреби [22]. Мигдаль також містить вітаміни групи В (В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>5</sub>, В<sub>6</sub>), С, РР, Е, каротин, дубильні речовини, аспарагін, холін, а також олеїнову, лінолеву, пальмітинову кислоти, фітостерин, білки, вуглеводи, фермент ліпазу тощо (табл. 3).

Таблиця 3. Фізико-хімічні та органолептичні показники мигдалю

Найменування показника	Характеристика дослідного зразка	Вимоги ГОСТ 16830-71
Органолептичні показники		
Зовнішній вигляд	Горіхи розвинені гарно, без шкірки, рівномірного світло-коричневого забарвлення, стулки горіха прочинені	Горіхи гарно розвинені, очищені від шкірки, забарвлення шкаралупи рівномірне, світло-коричневого кольору, стулки горіха прочинені
Щільність та поверхня шкаралупи	Горіхи з папероподібною горохуватою, бугристою, шкаралупою, легко розламується рукою	Горіхи мають тонку папероподібну горохувату, бугристу, шкаралупу, яку легко можна розламати рукою
Смак і запах	Приємний, солодкуватий, характерний для мигдального горіха, сторонні запахи та присмаки відсутні, без гіркоти	Приємний, солодкуватий, притаманний мигдальному горіху, без сторонніх запахів та присмаків, не гіркий
Фізико-хімічні показники		
Вологість ядра, %	7,1	не більше 10
Наявність горіхової шкаралупи, %	0,6	не більше 1

Встановлено, що за органолептичними та фізико-хімічними показниками дослідний зразок мигдалю відповідав нормативним вимогам. Вологість ядра була низькою, що зумовлює незначне збільшення ваги готової продукції, зміну її якості та ризик розвитку контамінуючої мікрофлори.

Одним з основних джерел вітамінів, органічних та мінеральних речовин, полісахаридів є овочі, хімічний склад яких змінюється в широких межах під час росту, дозрівання, зберігання, залежить від кліматичних умов вирощування, року врожаю, виду та сортових особливостей.

Коренеплоди дайкону займають друге місце за важливістю в харчуванні людини після зернових культур. Вони містять необхідні організму людини корисні речовини, зокрема целюлозу, геміцелюлозу, лігнін і пектинові речовини, що дає змогу використовувати їх у здоровому харчуванні. Харчові волокна беруть участь в обміні речовин, сприяють нормалізації кишкової мікрофлори і загальному поліпшенню травлення. Крім цього, вони перешкоджають всмоктуванню токсинів, мають адсорбуючі властивості, сприяють виведенню з організму радіонуклідів. Ще одна перева-

га харчових волокон — властивість знижувати рівень ендогенного холестерину. Білків у коренеплодах дайкону мало, але вони повноцінні і представлені головним чином альбумінами і глобулінами [23].

Коренеплод дайкону використовували як структуроутворюючий компонент шніцелю для підвищення біологічної цінності готової страви та покращення її органолептичних показників. Показники досліджуваного зразка коренеплоду дайкону наведені в табл. 4.

Таблиця 4. Показники коренеплоду дайкону

Найменування показника	Вимоги ДСТУ 290-91	Характеристика дослідного зразка
Органолептичні показники		
Зовнішній вигляд	Коренеплоди свіжі, чисті, цілі, здорові, незастволені, непотворні, за формою та забарвленням відповідають ботанічному сорту	Коренеплоди свіжі, чисті, цілі, мають здоровий вигляд, незастволені, непотворні, циліндричної витягнутої форми, світло-кремове забарвлення
Внутрішня будова	М'якуш соковитий, щільний, з неогрубілою серцевиною, без порожнеч	М'якуш соковитий, щільний, серцевина неогрубіла, з неогрубілою серцевиною, без порожнеч
Смак і запах	Не нормується	Приємний гоструватий смак із характерним тонким ароматом
Фізико-хімічні показники		
Вологість, %	Не нормується	82,0
Білки, %		1,5
Клітковина, %		1,2
Вітамін С, мг/100 г		48,0
Вихід продукції при очищенні шкірки, %		91,0

Встановлено, що дослідний зразок дайкону відповідав вимогам ДСТУ 290-91. Визначено вміст у дослідному зразку білка, клітковини та вітаміну С. Отже, дослідні зразки вівсяних пластівців, мигдалю та дайкону відповідали нормативним вимогам. Тож використання скумбрії сумісно з дайконом, мигдалем та вівсяними пластівцями дає змогу виробляти безглютенові рибні страви для широкого кола споживачів, зокрема хворих на целиацію.

Дослідження щодо розроблення рецептури рибного шніцеля на основі скумбрії з використанням дайкону, мигдалю та вівсяних пластівців передбачало приготування модельних композицій. Для визначення раціонального співвідношення рецептурного складу шніцелю розроблено дослідні зразки (табл. 5) та принципову схему їх технології (рис. 3).

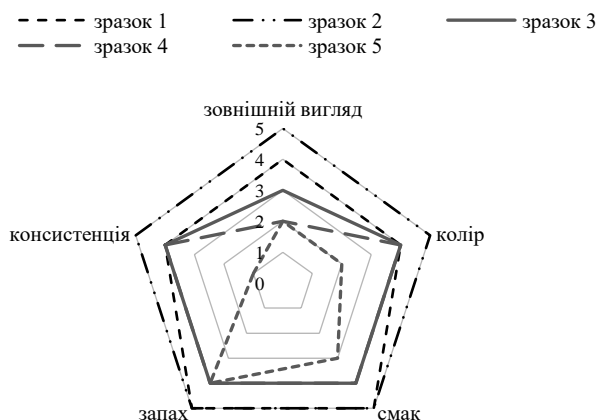
Визначали раціональне співвідношення інгредієнтів для досягнення оптимального смаку й текстури страви, вплив їх співвідношень на біологічну цінність за раціонального вмісту білка та інших поживних речовин. Як контроль використовували шніцель з тріски. Результати досліджень з підбору раціонального співвідношення інгредієнтів наведено у табл. 5.

Наведені дані свідчать, що оптимальною кількістю скумбрії та коренеплоду дайкону є, відповідно, 50,6 та 15%. Для паніровки рекомендується використовувати ме-



лені вівсяні пластівці у кількості 8% та мелений мигдаль — 1,2%. Відповідний напівфабрикат мав найкращу консистенцію для подальшої термічної обробки.

### Профілограма органолептичної оцінки



**Рис. 3.** Органолептичний профіль дослідних зразків шніцелю з використанням скумбрії, дайкону, вівсяних пластівців і мигдалю

**Таблиця 5.** Характеристика модельних композицій дослідних зразків шніцелю з використанням скумбрії, дайкону, вівсяних пластівців і мигдалю

Рецептурні компоненти	Вміст, %					
	Контроль	Зразок				
		1	2	3	4	5
Тріска	65,6	—	—	—	—	—
Скумбрія (філе)	—	55,6	50,6	45,6	40,6	35,6
Коренеплод дайкону	—	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
Цибуля ріпчаста	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
Зелень петрушки	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Молоко	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
Яйця курячі	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Мелені вівсяні пластівці	—	8,6	8,0	7,4	6,8	6,2
Мелений мигдаль	—	0,6	1,2	1,8	2,4	3
Сухарі панірувальні	9,2	—	—	—	—	—
Сіль	1	1	1	1	1	1
Всього:	100	100	100	100	100	100

Доцільним складом шніцелю з використанням скумбрії, дайкону, вівсяних пластівців і мигдалю можна вважати другий зразок, який передбачає також використання цибулі ріпчастої, зелені петрушки, молока, яєць курячих і солі.

Дегустаційну оцінку досліджуваних зразків визначали за п'ятьма дескрипторами. Профілограму страви наведено на рис. 3.

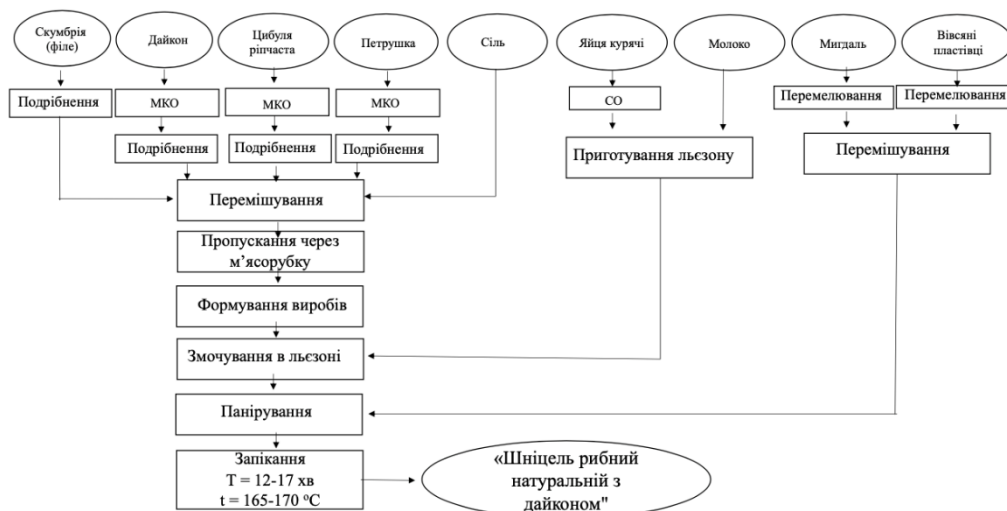
Зовнішній вигляд готової і оформленої страви наведено на рис. 4.

Згідно з отриманими результатами встановлено, що оптимальне композиційне співвідношення спорстерігалось у зразка 2, який мав привабливий зовнішній вигляд, соковиту консистенцію та приємний, гармонійний аромат і смак.



**Рис. 4. Зовнішній вигляд страви «Шніцель рибний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями»**

На другий зразок розроблено рецептуру й технологічну схему приготування. Принципову технологічну схему приготування страви «Шніцель рибний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями» наведено на рис. 5.



**Рис. 5. Принципова технологічна схема приготування харчової страви «Шніцель рибний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями»**

У табл. 6. наведено вміст біологічно активних речовин та енергетична цінність страви «Шніцель рибний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями».

Визначено, що використання скумбрії, дайкону, вівсяних пластівців і мигдалю сприяло підвищенню вмісту жирів у 2,7 раза, ненасичених жирних кислот — у 6,5 ра-

за, поліненасичених жирних кислот — у 4,7 рази. Вміст білків і вуглеводів у дослідному зразку зменшилися на 1,2 та 1,1 раза відповідно. Енергетична цінність розробленої страви підвищилась майже в 1,5 раза.

Зважаючи на те, що розроблена страва має низьку енергетичну цінність, її можна рекомендувати багатьом споживачам, які дотримуються здорового харчування.

**Таблиця 6. Харчова та енергетична цінність харчової страви «Шніцель рибний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями»**

Показник	Контроль*	Дослідний зразок	Різниця, %
Білки, %	13,9	11,3	-18,7
Жири, %	3,2	8,5	+165,6
Вуглеводи, %	7,7	7,0	-9,09
Харчові волокна, %	0,9	1,2	+33,3
Енергетична цінність, ккал на 100 г страви	98,6	149,7	+51,8

*Примітка:* контроль\* — шніцель з тріски.

У табл. 7 представлено порівняльну характеристику забезпеченості добової потреби стравою «Шніцель рибний натуральний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями» для жінок II групи працездатності.

**Таблиця 7. Порівняльна характеристика забезпечення добової потреби в поживних речовинах стравою «Шніцель рибний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями»**

Показник	Добова потреба жінок II групи працездатності	Контроль*	Забезпечення добової потреби контролю, %	«Шніцель рибний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями»	Забезпечення добової потреби дослідного зразка, %
Білки, г	66	13,9	21	11,3	17,1
Жири, г	70	3,2	4,5	8,5	12,1
Вуглеводи, г	326	7,7	2,3	7	2,1
Харчові волокна, г	20	0,9	4,5	1,2	6
Поліненасичені жирні кислоти, г	10	0,502	5,02	1,745	17,5
Кальцій, мг	1100	38,464	3,49	59,62	5,42
Калій, мг	2500	191,62	7,66	294,14	11,76
Магній, мг	500	24,02	4,8	55,07	11,01
Фосфор, мг	1200	197,4	16,45	218,1	18,17
Вітамін В <sub>2</sub> , мг	1,6	0,093	5,8	0,246	18,9
Вітамін В <sub>4</sub> , мг	500	51,18	10,2	50,43	10
Вітамін РР, мг	20	1,5	7,5	6,87	34,35
Вітамін К, мкг	110	50,75	46,13	53,05	48,22
Енергетична цінність, ккал	2200	98,6	4,4	149,7	6,8

*Примітка:* контроль\* — шніцель з тріски.

Отже, страва «Шніцель рибний натуральний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями» підвищує рівень забезпеченості добової потреби визначеної групи працездатності в основних харчових речовинах порівняно з використанням тріски, %: харчові волокна на — 6%; поліненасичені жирні кислоти на — 17,5%; мінеральні речовини — кальцій на 5,42%, магній на — 11,01%. Також слід зазначити, що оптимальне співвідношення магнію і кальцію, якого потрібно підтримуватись у харчовому раціоні [15], становить 1:2. Розроблена харчова страва забезпечує оптимальне засвоєння кальцію завдяки оптимальному співвідношенню із магнієм.

**Висновки.** 1. Визначено, що скумбрія порівняно з іншими видами риб має раціональне співвідношенням їстівних і неїстівних частин, високий вміст біологічно активних речовин, зокрема білків, жирів а також поліненасиченої жирної кислоти  $\omega$ -3. Доведено доцільність використання скумбрії як основи у приготуванні рибних страв, зокрема шніцелів функціонального призначення.

2. На прикладі потреб жінок II групи працездатності визначено, що з точки зору функціонального харчування страви на основі скумбрії здатні задовольнити потреби організму у вітамінах D, групи B, зокрема B<sub>12</sub>, та мінеральних речовинах, зокрема магнію, кальцію та йоду. Хімічний склад скумбрії може мати значний вплив на здоров'я різних груп населення.

3. Визначено показники вівсяних пластівців, мигдалю та дайкону, їх перспективи використання в технологіях рибних шніцелів.

4. Встановлено раціональні співвідношення скумбрії, вівсяних пластівців, мигдалю та дайкону для досягнення оптимального смаку й текстури рибного шніцелю.

5. Розроблено рецептуру й технологічну схему страви «Шніцель рибний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями». Крім функціонального призначення, готовий продукт має високі органолептичні властивості, зокрема гармонійний смак, приємний та оригінальний зовнішній вигляд.

6. Наведено порівняльну характеристику забезпеченості добової потреби стравою «Шніцель рибний натуральний з дайконом, мигдалем і вівсяними пластівцями» з подібною стравою з використанням тріски для жінок II групи працездатності. Розроблена страва підвищує рівень забезпеченості добової потреби у харчових волокнах на 6%, поліненасичених жирних кислотах — на 17,5%, кальцію та магнію — на 5,42 та 11,01% відповідно.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Шемета, О. О., Дожук, К. М. (2015). Функціональне харчування — новий підхід до здорового способу життя. *Ліки України*, 1(186), 24—27.
2. Dulka, O., Prybylskiy, V. K. uts A., Oliinyk, S., Vitriak, O., Dong, N. P. (2020). The use of rice in the technology of gluten-free fermented non-alcoholic beverages. *Food science and technology*, 14(4): 4—12. DOI: <https://doi.org/10.15673/fst.v14i4.1892>.
3. Dulka, O. S., Prybylskiy, V. L., Fedosov, O. L., Kyrpichenkova, O. M., Kuts, A. M., Shydlovska, O. B., Ishchenko, T. I., Tsyrunnikova, V. V., Bondar, N. P. (2024). Use of chia seeds in non-alcoholic beverage technology. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(1), 163—170. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i1>.
4. Мазаракі, А. А. та ін. (2012). *Технологія харчових продуктів функціонального призначення*. Київ: Київський національний торгово-економічний університет.
5. Мазаракі, А. А. та ін. (2014). *Інноваційні технології переробки риби: навч. посіб.* Київ: Київський національний торгово-економічний університет.
6. Mohanty, B., Mahanty, A., Ganguly, S., Mitra, T., Karunakaran, D., & Anandan, R. (2017). Nutritional Composition of Food Fishes and Their Importance in Providing Food and Nutritional Security. *Food Chemistry*.

7. Svidlo, K. V., Evlash, V. V. (2018). *New Technologies of Food Production: Raw Materials, Additives, Quality*: Monograph. Lambert Academic Publishing.
8. Корисні властивості риби, склад річкової і морської риби. HealthUkrPro: веб-сайт. URL: <https://healthukrpro.ru/zdorov-ja/518-korisni-vlastivosti-ribi-sklad-richkovoi-i-morskoj.html> (дата звернення: 10.11.2023 р.)
9. Дітріх, І. В., Ільчук, Н. В., Єфимович, П. Є. (2018). Рибо-овочеві шніцелі функціонального призначення. Наукові праці Національного університету харчових технологій, 24(6), 202—211.
10. Огляд рибного ринку України за 2022 та 2023 роки. веб-сайт. URL: <https://uifsa.ua/news/news-of-ukraine/overview-of-the-fish-market-of-ukraine-for-2022-and-2023> (дата звернення: 20.01.2024 р.)
11. Тищенко, В. І., Божко, Н. В., Пасічний, В. М. (2016). Рибний фарш як сировина для виробництва полікомпонентних продуктів харчування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, 179, 100—107.
12. Після анексії Криму Україна скоротила вилов риби та інших біоресурсів на 63%. LB.UA. веб-сайт. URL: [https://lb.ua/economics/2016/02/10/327621\\_posle\\_aneksii\\_krima\\_ukraina.html](https://lb.ua/economics/2016/02/10/327621_posle_aneksii_krima_ukraina.html) (дата звернення: 20.11.2023 р.)
13. Публічний звіт т. в. о. голови Державного агентства меліорації та рибного господарства України Ігоря Клименка. kmu.gov.ua. веб-сайт. URL: [https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik\\_2018/zvit2022/Zvit\\_fish\\_2022.pdf](https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik_2018/zvit2022/Zvit_fish_2022.pdf) (дата звернення: 29.11.2023 р.)
14. Тунгусов, І. Скумбрія — калорійність, склад і користь для організму. URL: <https://cross.expert/zdorovoe-pitanie/produkty-pitaniya/skumbriya.html> (дата звернення: 09.10.2023 р.)
15. Про затвердження Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії: Наказ від 03.09.2017 р. № 1073. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17> (дата звернення: 09.10.2023 р.)
16. Шумал, М., Дулька, О. (2024). Вплив споживачів на забезпечення якості інноваційної продукції в закладах індустрії гостинності. *Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*: матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 11—12 квітня, Київ: НУХТ. Ч. 3, 278.
17. Михієнко, Я. А., Дулька, О. С. (2022). Тренди ресторанного бізнесу в умовах сьогодення. Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції, присвяченої до 70-річчя з дня народження професора В. Ф. Доценка «Інноваційні технології в готельно-ресторанному бізнесі», 17 травня, Київ: НУХТ. 139.
18. Пасічний, В. М. та ін. (2015). Удосконалення технологій м'ясо-рибних напівфабрикатів. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. Гжицького*, 17, 1(4), 76—79.
19. Brandstetter, S., Rueter, J., Curbach, J., Loss, J. (2005). A systematic review on empowerment for healthy nutrition in health promotion. *Public Health Nutrition*, 1(17). <https://doi.org/10.1017/S1368980015000270>.
20. Шидловська, О. Б., Іщенко, Т. І., Дулька, О. С. (2023). Новітня ресторанна справа в індустрії гостинності. *Географія та туризм*, 71, 3—8.
21. Панікарова, Б. О. (2014). Удосконалення технології рибних січених виробів шляхом використання білкової добавки з колагеновмісної сировини: дис. ... к. т. н., спец. 05.18.16 — Технологія продуктів харчування, захищена 30.10.2014. Харківський державний університет харчування та торгівлі.
22. Хімічний склад горіхів. Dovidka.biz.ua. URL: <https://dovidka.biz.ua/himichniy-sklad-gorihiv/> (дата звернення: 23.11.2023 р.)
23. Голінська, Я. А. (2019). *Розробка технології овочевих десертів на основі білих коренів*: дис. ... к. т. н. спец. 05.18.16 — Технологія продуктів харчування, Одеса.

УДК 655.35:655.224.3

# THE IMPACT OF GRAVURE INK DISPERSION ON COLOR REPRODUCTION IN THE MANUFACTURE OF PACKAGING FOR THE FOOD INDUSTRY

R. Khokhlova, L. Martsynkevych, V. Stepanets, O. Chepeliuk, M. Desyk  
*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

Gravure inks,  
Food packaging,  
Packaging materials,  
Dispersed microhetero-  
geneous systems,  
Color reproduction quality  
on prints

---

**Article history:**

Received 22.02.2024  
Received in revised form  
03.09.2024  
Accepted 06.09.2024

---

**Corresponding author:**

lv.martsinkevich@gmail.com

---

**ABSTRACT**

Gravure printing is the best at reproducing the tonal values of colour images due to the ability of printing plates to reproduce different ink layer thicknesses in highlights, midtones and shadows and to use percentage values of colour saturation in their production.

The setting time for triad gravure inks is determined by the evaporation rate of the solvent, its amount in each specific colour gradation and the properties of the printed surfaces.

This article examines the impact of the formulation composition, concentration and dispersion of pigments for triadic inks in the dispersion medium of water-soluble resins on the time and quality of ink fixation on prints, rheological and optical parameters of aqueous ink systems.

The ultrasonic dispersion of pigments in aqueous solutions of water-soluble polymers, performed with Hielscher's UP50H and UP100H, contributes to high-quality colour reproduction on prints. The speed and quality of this dispersion method is influenced by the formulation of the inks. A pigment concentration of 8—12% and a medium molecular weight water-soluble resin of 10—15% results in a minimum dispersion time — 99% of the dispersed phase crystals reach a size of 200 nm in 5 minutes. Highly dispersed microheterogeneous ink systems obtained by ultrasonic dispersion of pigments are able to stably retain cavitation nanocavities, which impair ink flow into the printing elements on gravure printing plates, but contribute to an increase in the ink transfer coefficient to polymeric PPS. The uniform size of the gravure ink system, which has the lowest percentage of pigments of any existing printing ink, creates equivalent or even higher optical density on the prints in the appropriate gradations due to the tight packing of highly dispersed crystals in the ink layers fixed to the prints, while synthesising high-quality and design-appropriate colour tones.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-6

---

## ВПЛИВ ДИСПЕРСНОСТІ ФАРБ ГЛИБОКОГО ДРУКУ НА КОЛЬОРОВІДТВОРЮВАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ПАКОВАНЬ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Р. А. Хохлова, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-1545-9696>

Л. В. Марцинкевич, <https://orcid.org/0000-0003-2215-9912>

В. В. Степанець, канд. техн. наук,

О. О. Чепелюк, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-5417-9398>

М. Г. Десик, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0001-8016-466X>

Національний університет харчових технологій

*Дисперсність фарб глибокого друку впливає на кольоровідтворення при виготовленні гнучких пакувань для харчової промисловості. Ультразвукове диспергування пігментів у водних розчинах водорозчинних полімерів виконане з використанням пристроїв марок UP50H та UP100H фірми Hielscher. Однорідна за розмірами високодисперсна фарбова система з кристаликами дисперсної фази 200 нм у 99%, маючи найменший відсотковий вміст пігментів, створює на відбитках у відповідних градаціях рівноцінну і навіть вищу оптичну щільність завдяки щільному укладанню вискодисперсних кристаликів у закріплених на відбитках фарбових шарах, синтезуючи при цьому високоякісні і відповідні дизайну кольорові тони.*

**Ключові слова:** фарби глибокого друку, харчове пакування, пакувальні матеріали, дисперсні мікрогетерогенні системи, якість кольоровідтворення на відбитках.

**Вступ.** Друкарські фарби належать до колоїдно-дисперсних мікрогетерогенних систем, а друк на різних пакувальних матеріалах і закріплення фарби на відбитках характеризується складними фізико-хімічними процесами як в самих тріадних фарбах, так і при їхній взаємодії з різними за хімічним складом поверхнями паперу, картону, полімерних пакувальних плівок та інших пакувальних матеріалів. Окрім цього, в процесі друку виникає не менш складний комплекс молекулярно-поверхневих явищ, пов'язаних як зі способом друку і формними матеріалами, так і з фізико-хімічними властивостями використаних фарб при задруковуванні поверхонь пакувальних матеріалів (ЗППМ). Причому молекулярній природі при ЗППМ варто надати більше значення, тому що визначаються умови й характер взаємодії їх з друкарськими фарбами на водорозчинних плівкоутворювачах і вплив на якість кольоровідтворення художнього дизайну харчового пакування екологічно чистого та відповідального виробництва [1]. Чим кращими будуть показники мікрогеометрії і структури ЗППМ та енергій їхніх поверхневих натягів, тим вищими мають бути вимоги до складу і до якості реологічних та фізико-хімічних властивостей фарб для усіх різновидів і способів глибокого друку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз ринків поліграфічної продукції в Україні показав тенденції до зменшення і так невеликих накладів газетної і книжково-журнальної продукції, проте спостерігається стрімкий ріст назв і тиражів виготовлення різноманітних пакувань, у тому числі і гнучких, як полімерних, так і паперових та картонних, у яких ключове значення відіграє як оригінальний дизайн та конструкція пакування, так і можливість стабільного тривалого зберігання продукту. Нормою стало поштучне пакування продуктів разової дози вживання, що вимагає ще більшої кількості пакувальних матеріалів [2].

Серед сучасних способів друку найкращими в передачі тональностей кольорових зображень на ЗППМ є різновиди глибокого друку завдяки здатності друкарсь-

ких форм передавати різну товщину фарбового шару в світлинах, півтінях і тінях та використовувати при цьому відсоткові значення насиченості кольорових тонів при їх виготовленні. Завдячуючи такому тандему, якість кольоровідтворення на відбитках ЗППМ глибоким друком вважається експертами найвищою серед усіх способів друку [3, 4].

Проте різна товщина шарів тріадних фарб на ЗППМ вимагає як швидкого закріплення кожної із тріадних фарб на відбитку, так і міцності закріплення кожної із кольорових плівок на поверхнях з високою гладкістю та мінімальною пористістю і між собою [5]. Закріплення фарб глибокого друку відбувається за рахунок випаровування швидколеткого розчинника із фарбових плівок кожної з тріадних фарб та міцного зчеплення в'язучих речовин як кожного шару між собою, так і з ЗППМ. Час на закріплення тріадних фарб глибокого друку на ЗППМ зумовлюється як швидкістю випаровування розчинника, так і його кількістю в кожній конкретній градації кольорового тону, тобто в тінях відтінки більш насичені за рахунок товщини фарбового шару і кількість розчинника буде більшою, ніж у світлинах, де фарбові шари набагато тонші, ніж у глибоких тінях, і час закріплення фарбових шарів у тінях і у світлинах буде різним. Різний час закріплення і при друкуванні на пористих паперових та гладеньких полімерних ЗППМ. Цей фізико-хімічний процес залежить як від кількості та якості компонентів, що входять до складу фарб для глибокого способу друку, так і показників умов забезпечення якісного здійснення процесу закріплення фарби на відбитку.

Аналіз сучасних рецептур фарб для глибокого друку виявив їх типовий склад: пігменти — 8—12%, плівкоутворювальні смоли — 12—20%, розчинники — 60—80% і різні домішки для модифікації фарб під умови друку — до 4%.

Умови якісного закріплення фарб на ЗППМ забезпечуються розчинниками, які мають низьку приховану теплоту утворення парів, тобто швидко випаровуються, і при цьому якомога більше дифундують через фарбові плівки як при випаровуванні, так і при всотуванні у ЗППМ. У свою чергу, плівкоутворювальні смоли мають якомога менше понижувати тиск парів розчинників з метою максимального виходу їх з фарбових плівок. Тобто тиск парів розчинників має бути якомога вищим. Фарби глибокого друку для ЗППМ — рідка полідисперсна система високої рухливості, яка підпорядковується закономірностям молекулярно-кінетичної теорії [5].

Умови якісного відтворення кольорів на відбитках різних ЗППМ забезпечуються пігментною складовою полідисперсної системи фарби глибокого друку. Пігменти, що використовуються в тріадних фарбах, повинні характеризуватися максимальною чистотою кольорових тонів субтрактивного синтезу С, М, У. Крім цього, пігменти не повинні погіршувати адгезійно-когезійні властивості системи, тобто мати високу адгезію до усіх ЗППМ, не залишати слідів фарби (відмарювання) на звороті полотна при рулонному друкуванні специфічними фарбами глибокого друку; не проникати у запаковані харчові продукти [6, 7].

**Актуальність дослідження.** Процес диспергування кристаликів пігментів (дисперсна фаза) у розчинах плівкоутворювальних смол і відповідних цим смолам розчинниках (дисперсійне середовище) вважається найважливішим фізико-хімічним процесом у виготовленні друкарських фарб. Зважаючи на те, що пігменти залежно від своєї природи і як часточки порохів твердої речовини можуть перебувати в аморфному і в кристалізованому стані, процес диспергування їх може відбуватися по-різному і суттєво впливати на прозорість тріадних фарб. Якщо кожен із шарів тріадних фарб С, М, У на відбитках ЗППМ слугує двозонним фільтром білого світла, то залежно від площі елементарного друкувального елемента та від товщини кож-



ного з фарбових шарів тріади синтезуватимуться конкретні кольорові тони, якість і точність яких залежать від прозорості фарб та фізичних і колірних характеристик конкретної ЗППМ.

**Мета дослідження:** вивчення впливу концентрації та дисперсності пігментів для тріадних фарб у дисперсійному середовищі водорозчинних смол на практичні (час і якість закріплення фарб на відбитках), реологічні (в'язкість) і оптичні (оптична щільність) показники водних фарбових систем при ЗППМ різного типу (папір для глибокого друку, двошаровий картон, алюмінієва фольга, поліпропіленові плівки з метализацією і без неї та після вторинної переробки) глибоким способом друку.

**Матеріали і методи.** Виходячи з емпіричного рівняння Стокса:

$$V = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot g}{\eta} \cdot (\rho_n - \rho_{dc}),$$

де  $V$  — швидкість утворення осаду часточками пігменту;  $r$  — радіус часточок пігменту;  $g$  — прискорення сили тяжіння;  $\eta$  — в'язкість дисперсійного середовища;  $\rho_n$  — щільність пігменту;  $\rho_{dc}$  — щільність дисперсійного середовища, визначається з основними факторами, що впливатимуть на колористичні, оптичні, реологічні та механічні властивості фарбових систем при друкуванні на різних пакувальних матеріалах. Крім розмірів часточок пігментів, звертаємо увагу на форму, розподіл за розмірами, щільність укладання кристаликів пігментів, ступінь їх агрегації. Рівняння Стокса показує вплив різниці між щільністю пігменту і щільністю дисперсійного середовища на прозорість фарб та швидкість утворення пігментного осаду.

Дослідження відбитків фарб глибокого друку на різних ЗППМ характеризується неоднозначністю спектрофотометричних відгуків на зсув кольорових тонів С, М, У та їхніх подвійних накладань, тому що ЗППМ мають різні характеристики своїх поверхонь, а модельна друкарська форма глибокого друку включає для порівняння лише світлини з відносною площею друкувальних елементів 8% і відповідною цим відсоткам глибину лазерного гравірування комірок із півсферичною формою та співвідношенням ширини комірки до ширини перетинки 6:1; аналогічно півтіні — 40% і 60% градацію; тіні — 85% градацію. Тому контроль градаційної передачі здійснювали шляхом вимірювання оптичних густин на контрольному полі з растровими елементами різних відносних площ [8].

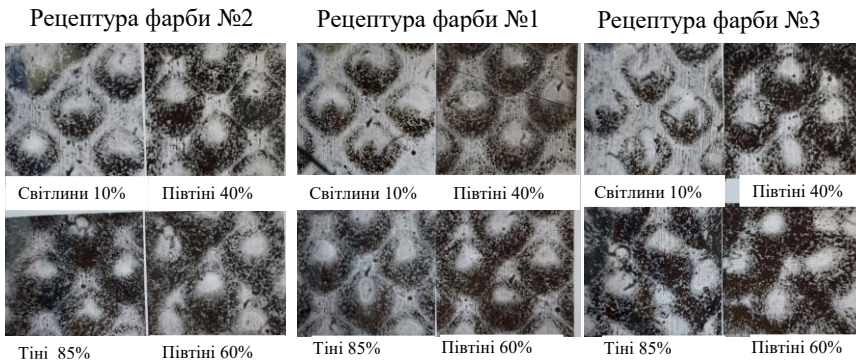
Для проведення дослідів з диспергування водних пігментних паст С, М, У, К використовували ультразвукові пристрої з потужністю 50 і 100 Вт марок UP50Н та UP100Н фірми Hielscher, доза диспергування 100 мл. Зважаючи на аналіз типової рецептури фарби для глибокого друку: пігменти С, М, У, К по 8—12%, плівкоутворювальні смоли — 12—20%, домішки модифікації фарб під умови друку — до 4%, розчинники — 60—80%, було запропоновано для досліджень по кожному кольору пігментів відповідні рецептури (табл. 1).

Таблиця 1. Рецептурні композиції модельних водорозчинних фарб

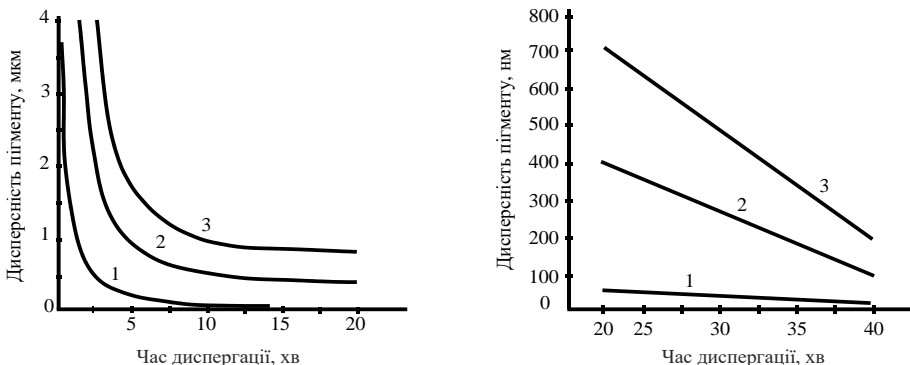
Компоненти	Номер композиції						
	№ 1, min		№ 2, midi		№ 3, max		Різниця у вмісті: max – min, %
Пігмент, %	8	100	10	125	12	150	
Плівкоутворювачі, %	12	100	16	133	20	167	67
Розчинники, %	78	100	71	110	64	120	20
Домішки, %	2	100	3	150	4	200	100
	100%		100%		100%		

**Результати і обговорення.** Процес диспергування пігментів у розчині плівкоутворювальних смол відбувається поетапно. Спочатку відбувається змочування розчином поверхонь агрегатів, конгломератів і окремих частинок пігментів. При цьому з твердих поверхонь пігментів виштовхуються адсорбовані на них волога і гази. Потім настає пептизація агрегатів і флокул завдяки адсорбційному блокуванню компонентами плівкоутворювальних смол активних центрів, здатних до коагуляції. На заключній стадії здійснюють стабілізацію дисперсної системи під назвою «друкарська фарба» за участі домішок різного призначення.

Усі перераховані вище вимоги до пігментів і їх властивостей в основному залежатимуть від використаної у системі водної фарби фракції дисперсності, яка вважається спеціалістами найважливішою характеристикою мікрогетерогенних систем із розвинутою поверхнею поділу фаз [9]. Це означає, що чим менший розмір кристаліка пігменту, тим вищими будуть його дисперсність і вільна енергія поверхні. Диспергування варто розглядати як механіко-хімічний процес, при якому в момент утворення нової поверхні відбувається розрив хімічних зв'язків між сусідніми атомами і йонами. На нових поверхнях зруйнованого кристаліка деякий час існують вільні радикали, які зумовлюють високу активність поверхонь. Отже, чим менший розмір часточок пігменту, тим буде вищою стабільність системи і, відповідно, якість друкарської фарби. Результати досліджень представлено на рис. 1 та рис. 2.



**Рис. 1.** Вигляд (1:300) комірок і перетинок друкарської форми глибокого друку з фарбами трьох рецептур, які мають різний вміст сажі, різну в'язкість, різний час ультразвукового диспергування, але однаковий розмір кристаліків у 200 нм 99% дисперсної фази



**Рис. 2.** Вплив в'язкості фарби на час диспергування пігментів до розміру 200 нм: 1 — рецептура № 1, в'язкість 18 с; 2 — рецептура № 2, в'язкість 21 с; 3 — рецептура № 3, в'язкість 25 с

Як бачимо, рівномірність змочування друкарських елементів у світлинах, півтінях і тінях найкраща модельними фарбами С, М, У, К рецептури № 1 з в'язкістю 18 с; гірше проявляють себе фарби рецептури № 2 з в'язкістю 21 с; найгірше проявляють себе фарби рецептури № 3 з в'язкістю 25 с.

Вплив в'язкості фарби різних модельних рецептур на процес змочування пояснюють залежності розмірів дисперсної фази від часу диспергування пігментів у дисперсному середовищі до розмірів у 200 нм (рис. 2).

Одержані залежності стосуються типових рецептур водних фарб для глибокого друку з 8% вмістом тріадних пігментів (крива 1) і робочою умовною в'язкістю 18 с по лійці ВЗ-4, у яких переважні розміри кристаліків дисперсної фази менші 200 нм досягаються через 6 хв на лабораторному ультразвуковому змішувачі UP100H фірми Hielscher. Збільшення маси пігментної дисперсної фази на 25% (з 8 г пігменту до 10 г у масі 100 г рецептура фарби № 2, крива 2) збільшує час диспергування до 35 хв.

На рис. 1 (рецептура фарби № 2) спостерігаємо погіршення змочування комірок в усіх градаціях, тому що текучість фарби погіршилася через вміст у композиції кавітаційних пустот нанорозмірів. Їх кількість збільшується з подовженням часу диспергування (рецептура фарби № 3). Процес диспергування пігментів у рецептурі фарби № 3, пігментна дисперсна фаза якої була збільшена на 50% щодо рецептури фарби № 1, потребував ще на 25 хв довшого часу диспергування пігментів у таких композиціях з утворенням стійких кавітаційних нанопустот.

Вплив дисперсності пігментів нижче 200 нм (рецептура фарби № 1) модельних водних фарб стандартних кольорових тонів С, М, У, К для глибокого друку на кольоровідтворення при ЗППМ вивчався шляхом порівняння оптичної щільності градацій 8%, 40%, 60%, 85% на відбитках при ЗППМ алюмінієвої фольги і поліпропіленової плівки з вторинної переробки (рис. 3).

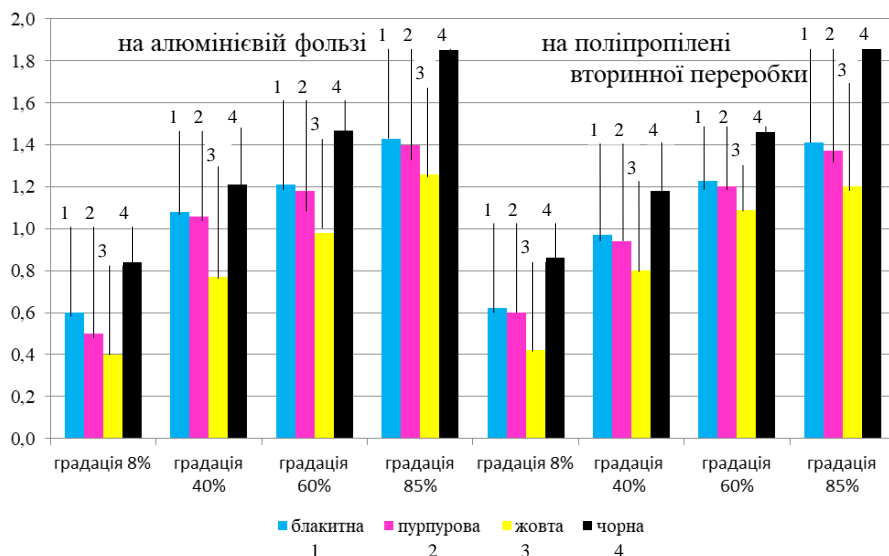


Рис. 3. Оптична щільність відбитків фарб С, М, У, К рецептури № 1

У процесі глибокого друку в зоні друкарського контакту внаслідок високого тиску (близько 1 тони) створюється явище кавітаційного характеру. Створені ультразвуком при виготовленні фарби кавітаційні нанобульбашки (пустоти) погіршують затікання фарби у друкувальні елементи на формах глибокого друку. Проте, на на-

шу думку, наявність ультразвукових кавітаційних нанопустот може сприяти підвищенню коефіцієнта фарбопередачі на полімерні ЗППМ. Доказом цього є одержані результати дослідження оптичних щільностей у світлинах, півтінях і тінях відбитків С, М, У, К водними фарбами ультразвукового диспергування на алюмінієвій фользі і поліпропіленовій плівці з вторинної переробки. Кавітаційні нанобульбашки витискуються з об'єму фарби в кожній із градаційних комірок від центру до стінок перетинок, ударяються об стінки і лопаються, виконуючи при цьому роботу по максимальному відокремленню фарби від стінок перетинок і закріпленні її на відбитку. Отже, маємо майже 100% коефіцієнт фарбоперенесення з друкарської форми на відбиток і відповідну оптичну щільність фарбових шарів (рис. 3).

**Висновки.** Ультразвукове диспергування пігментів у водних розчинах водорозчинних полімерів є ефективним і в подальшому сприяє якісному кольоровідтворенню на відбитках. На пришивидження і якість цього способу диспергування суттєво впливає рецептурний склад фарб. Концентрація пігментів 8—12% у воді сприяє мінімальному часу диспергування. За 5 хв досягаємо розмірів кристаліків дисперсної фази 200 нм у 99%. Такій якості диспергування сприяє концентрація середньомолекулярної водорозчинної смоли 10—15%. Високі концентрації пігментів і плівкоутворювачів при диспергуванні у воді суттєво сповільнюють час одержання високодисперсних мікрогетерогенних фарбових систем. Такі системи здатні стабільно утримувати кавітаційні нанопустоти, які погіршують затікання фарби у друкувальні елементи на формах глибокого друку, проте можуть сприяти підвищенню коефіцієнта фарбопередачі на полімерні ЗППМ. Крім цього, однорідна за розмірами високодисперсна фарбова система для глибокого друку, маючи найменший відсотковий вміст пігментів з усіх існуючих поліграфічних фарб, створює на відбитках у відповідних градаціях рівноцінну і навіть вищу оптичну щільність завдяки щільному укладанню високодисперсних кристаліків у закріплених на відбитках фарбових шарах, синтезуючи при цьому високоякісні і відповідні дизайну кольорові тони.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Стефанишена, О. Б., Зоренко, О. В. (2020). Сучасні тенденції розвитку глибокого друку. *Технологія і техніка друкарства*, 3(69), 34—42. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(69\).2020.224199](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(69).2020.224199).
2. Хохлова, Р. А. (2021). Відповідь поліграфії трендам розвитку упаковки. *Упаковка*, 2, 37—40.
3. The future of package printing to 2025 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.smithers.com/services/market-reports/printing/the-future-of-packageprinting-to-2025>.
4. Flexible packaging: resiliently bending to challenges. *Packaging Europe*. URL: <https://packagingeurope.com/flexible-packaging-resiliently-bending-to-challenges/3950.article> (date of access: 09.01.2024).
5. Szentgyörgyvölgyi R. 12 — Gravure Printing // *Printing on Polymers* / Editor(s): Joanna Izdebska, Sabu Thomas. William Andrew Publishing, 2016, 199—215.
6. Санітарні норми. Допустима кількість міграції (ДКМ) хімічних речовин, які виділяються з полімерних та інших матеріалів, що контактують з харчовими продуктами. [Чинний від 1986-12-31]. СРСР, 1986. 15 с.
7. ДСТУ EN 13427:2008. Пакування. Вимоги щодо застосування європейських стандартів у сфері пакування та відходів пакування (EN 13427:2004, IDT). [Чинний від 2010-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2010. 12 с.
8. Зоренко, О. В., Стефанишева, О. Б., Хохлова, Р. А., Штефан, Є. В. (2021). Трибологічний аналіз системи «друкарська форма глибокого методу друку—відбиток». *Технологія і техніка друкарства*, 1(71), 34—42. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(71\).2021.224199](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(71).2021.224199).
9. Badgujar, N. P., Bhoge, Y. E., Deshpande, T. D., Bhanvase, B. A., Gogate, P. R., Sonawane, S. H., Kulkarni, R. D. (2015). Ultrasound assisted organic pigment dispersion: advantages of ultrasound method over conventional method. *Pigment & Resin Technology*, 44(4), 214—223.

УДК 664.1:519.71

## RESEARCH ON THE BEHAVIOR OF THE TECHNOLOGICAL COMPLEX OF A SUGAR FACTORY USING WAVELET ANALYSIS METHODS

V. Kyshenko, O. Romashchuk

National University of Food Technologies

---

### Key words:

control,  
wavelet analysis,  
sugar factory,  
system,  
time series

---

### Article history:

Received 13.09.2023

Received in revised form  
09.04.2024

Accepted 12.04.2024

---

### Corresponding author:

alexandr290994@gmail.com

---

### ABSTRACT

The purpose of this article is to justify the use of wavelet analysis methods for modeling the dynamics of time series of technological variables that characterize the multifaceted behavior of the technological complex of a sugar factory as a complex control object.

The wavelet transform generates a type of set of properties that characterize the current state of the control object. The time series of the main technological variables of the technological complex of the sugar factory were analyzed: steam consumption, juice consumption, chip consumption, temperature, juice pH. In the analysis of time series characterizing the behavior of sugar production processes, different types of wavelets were used: Gau (Gauss), Morl (Morle), Mhat (Mexican hat). The wavelet transformation of the signal was provided using the Matlab mathematical package. During the analysis of the time series of consumption of limestone milk, the area of sharp emissions (surges) is highlighted, which provides diagnostics of anomalies in the analysis of situations. In the time series of diffusion juice consumption, the non-stationarity of the control object is established, which occurs at certain time intervals, which allows for the possibility of establishing specific estimates of non-stationarity in both qualitative and quantitative aspects. In the time series of the temperature of the diffusion juice, periodicities in the behavior are determined, and the wavelet spectrogram of the signal indicates the presence of existing high-frequency noises, as well as their frequency spectrum is determined.

The use of wavelet analysis provides effective processing and forecasting of non-stationary time series of technological control objects of various types. The results of wavelet analysis with the establishment of their features allow specialists to conduct a more complete and correct interpretation of the behavior of complex control objects and to develop effective management solutions based on them.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-7

---

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ МЕТОДАМИ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

В. Д. Кишенько, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-2805-5065>

О. М. Ромащук, здобувач PhD, <https://orcid.org/0009-0007-4298-5193>

Національний університет харчових технологій

*Досліджується технологічний комплекс цукрового заводу як об'єкт автоматичного керування. Розглядається математичне та чисельне моделювання часових рядів за допомогою вейвлет-аналізу. Наведений алгоритм у визначенні показників стохастичності, хаотичності та аналізі особливих станів системи за допомогою вейвлет-перетворення.*

*Метою статті є обґрунтування використання методів вейвлет-аналізу для моделювання динаміки часових рядів технологічних змінних, що характеризують різнопланову поведінку технологічного комплексу цукрового заводу як складного об'єкта керування.*

**Ключові слова:** керування, вейвлет-аналіз, цукровий завод, система, часовий ряд.

**Вступ.** Технологічні комплекси цукрових виробництв через їх визначальні ознаки відносяться до складних організаційно-технічних систем [1]. Організаційно-технічні системи є складними системами, мають унікальні властивості емерджентного характеру, які не дозволяють адекватно відтворити на основі застосування консервативних парадигм, тому для аналізу таких складних динамічних систем все частіше використовуються передові моделі і методи базових наук, які спільно із сучасними здобутками в галузі комп'ютерних систем дали змогу досягти кардинального рівня в дослідженні природи цих систем, прогнозуванні виникнення та виявлення критичних і нештатних ситуацій.

Завдання управління складними технологічними системами ускладнене внаслідок нелінійності характеристик об'єкта, його багатовимірності, наявності численних заплутаних зв'язків, перебігу складних перехідних процесів, виникнення критичних і хаотичних режимів, і полягає в оперативному своєчасному розпізнаванні критичних станів у поведінці об'єкта та створення превентивних дій, спрямованих на усунення причин появи цих змін [2].

Класичні моделі управління технологічними процесами та традиційні аналітичні методи дослідження й аналізу ефективності цих технологій зіштовхуються з проблемами так званого *intermittency*, що полягає в чергуванні детермінованих режимів із стохастичними і хаотичними, тому досить складно організувати ефективні стратегії управління, адекватні такій складній поведінці об'єкта.

Прогрес у різних галузях виробництва потребує створення і впровадження нових технологій, методів отримання і переробки інформації й ефективного своєчасного прийняття управляючих рішень.

Цукрова промисловість не стала винятком. З часом стало зрозуміло, що проводити технологічний процес, який базується на досвіді операторів, неефективно, потрібно створювати нові підходи. Раніше дослідити та спрогнозувати результати дії випадкових і хаотичних режимів на хід керування технологічними процесами було неможливо, але завдяки розвитку науки й техніки були отримані методи, що дали змогу розпочати дослідження таких впливів. Окрім недостатньо адаптованого мате-

матичного апарата до моделювання організаційно-технічних систем, важливою перешкодою використання методів теорії детермінованого хаосу до моделювання технологічних систем є великий рівень шумів часових рядів. Відомі способи видалення шуму не забезпечують необхідного результату, тому запропоновано застосувати методи теорії вейвлетів для розв'язання такої проблеми.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Найбільш перспективним додатком теорії нелінійних систем з хаотичною поведінкою є прогнозування динаміки породжених цими системами часових рядів [3]. Часовим рядом, зазвичай, називається послідовність подій, спостережуваних через деякі, як правило, рівні інтервали часу. Часові ряди технологічних змінних — це свого роду модель поведінки об'єкта управління: у своєму складі визначає всілякі його особливості; представляє структурні зв'язки об'єкта, його причинно-наслідкові відносини, характеризує нестаціонарність об'єкта, зумовлює вплив зовнішніх впливів тощо. Причому результати обробки часових рядів повинні максимально забезпечувати оптимальну реалізацію прикладних функцій прогнозування та прийняття рішень з управління. Серед таких методів виділяють статистичні, імовірнісні, логічні, нечіткі та нейромережні, евристичні, методи нелінійної динаміки [4]. Нелінійна динаміка є науковою методологічною платформою, що дає змогу аналізувати рух різноманітних складних динамічних систем на основі об'єктивних законів їх розвитку.

Здійснення аналізу часових рядів методами нелінійної динаміки передбачає застосування комп'ютерної техніки, крім того, для збільшення ефективності проведеного аналізу та переконливості його результатів важливо застосовувати комплексну методика аналізу часових рядів. Така методика складається з трьох етапів, по-перше, візуалізація та попередня обробка, по-друге, обчислення метричних характеристик для діагностики типу динаміки і, по-третє, побудова прогнозу [5].

Як правило, при аналізі часових рядів використовуються методи, що дають кількісний прогноз. Для часових рядів, у яких гіпотеза про існування тренду не підтверджується, такі методи непродуктивні [6].

У праці [7] обґрунтовуються такі причини малої інформативності статистичних показників, як ефект присутності фрактальних особливостей у часових рядах, реальна функція розподілу яких не погоджується з нормальним розподілом. Тому для виявлення спільної тенденції поведінки часових рядів пропонується на етапі передпрогнозного аналізу використовувати методи теорії хаосу, які дають змогу провести якісний аналіз досліджуваного часових рядів. Стосовно динаміки технологічних процесів і природних систем теорія хаосу не тільки пояснює біфуркаційні явища (великі падіння чи великі викиди), але й стверджує, що їх неможливо передбачити, оскільки природа не є рядом повторюваних закономірностей, і характеризується локальною випадковістю та глобальним порядком. З цієї причини багато аналітиків обґрунтовано припустили, що розпізнати в хаотичному русі нові закономірності їм допоможе фрактальність природи часових рядів [8].

Розвитку методів нелінійної динаміки передувало також прогрес, що намітився в комп'ютерних технологіях, коли стало можливим візуалізувати на екрані дисплея результати моделювання досить складних процесів і систем у вигляді графіків і діаграм.

Класичні, на основі концепції лінійності, підходи були розроблені для опису стійких і не радикально мінливих процесів, що змінюються в окіллі стану рівноваги. Традиційні моделі управління технологічними процесами і традиційні аналітичні

методи аналізу індикаторів функціонування і прогнозування дуже часто наражаються на проблеми досягнення необхідного результату в обсязі знайомих рішень. У зв'язку з цим останнім часом інтенсивно розвивається альтернативний підхід до аналізу нелінійностей, що базується на теорії детермінованого хаосу, який пропонує пояснення іррегулярному поведінню й аномаліям у системах, які не є стохастичними за своєю природою [6].

Існує кілька конкуруючих підходів, що використовують ідею нелінійності [9]. Традиційні моделі є стохастичними. Однак ті спрощення, які встановлюються при ідентифікації моделі для придатності до практичної реалізації насправді нівелюють внутрішню «складність», властиву динамічному процесу [10]. В основу сучасних методів аналізу покладений пошук моделей нелінійного поведіння часових рядів. Це пояснюється тим, що нелінійні моделі можуть уловлювати дуже складні патерни в часових рядах.

На сьогодні найпопулярнішими є два підходи: стохастичний (традиційний) та на основі детермінованого хаосу. Другий підхід пояснює нерегулярну поведінку нестохастичних систем як результат складних нелінійних внутрішніх зв'язків [11].

**Мета досліджень:** обґрунтування використання методів вейвлет-аналізу для моделювання динаміки часових рядів технологічних змінних, що характеризують різнопланову поведінку технологічного комплексу цукрового заводу як складної організаційно-технічної системи.

**Матеріали і методи.** Вейвлетний аналіз, який виник порівняно недавно, є потужним засобом аналізу динаміки систем, що привертає все більшу увагу дослідників. Традиційно для аналізу часових рядів застосовується перетворення Фур'є, на якому заснований спектральний аналіз, що має визначну здатність фокусувати в точці інформацію про періодичність функцій при переході з часової області в частотну. Це досягається за рахунок того, що використовується система функцій (синуси, косинуси або комплексні експоненти), визначені на нескінченному інтервалі, що робить перетворення Фур'є непоганим інструментом для вивчення процесів, властивості яких не змінюються з часом. Однак ця обставина робить перетворення Фур'є неефективним методом дослідження нерегулярних функцій, характеристики яких еволюціонують у часі. У багатьох випадках цікавим є локальний зміст часового ряду, тобто інформація про те, як проявляються його особливості поведінки в конкретні відрізки часу. Таку задачу, на відміну від перетворення Фур'є і Лапласа, добре вирішує вейвлет-перетворення, що дає змогу розкласти частотний спектр за часом і визначити моменти, коли виникають або зникають різні цикли в динаміці, виявити особливості ряду на кожному рівні декомпозиції, а також виявити частотні особливості ряду, які передбачають у часі різкі та поодинокі змінювання. Ідея полягає в поетапному змінюванні масштабу розглядання, що можна реалізувати різними способами, але всі вони зводяться до послідовного закруглення початкової інформації або, навпаки, після сильного закруглення уточнюють особливості, які ще збереглися, а також їх місце [8, 12].

Вейвлети — сімейство функцій визначеної форми, локалізованих по осі аргументів, інваріантних до зсуву і лінійних операцій масштабування (стискання або розтягування), що мають вигляд коротких хвильових пакетів з нульовим інтегральним значенням. Вони створюються за допомогою спеціальних базових функцій, які визначають їх вид і властивості.



На відміну від перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення рядів забезпечує двомірну розгортку, при якій частота і координата розглядаються як незалежні змінні, що робить можливим аналіз відразу в двох вимірах (частотному і часовому). В алгоритмі вейвлет-аналізу частотно-часовий простір замінюють на масштабно-часовий, відповідно, чим більший масштаб, тим менші різні деталі сигналу [13].

У пропонованій статті розглядається математичне та чисельне моделювання часових рядів за допомогою вейвлет-аналізу. Основний алгоритм обробки будується за умови існування часового ряду і полягає у визначенні показників стохастичності, хаотичності та аналізі особливих станів системи за допомогою вейвлет-перетворення. Таке комплексне застосування дає більш повну інформацію про досліджуваний процес, описаний часовими рядами.

Вейвлет-перетворення — це математичний інструмент для ієрархічної декомпозиції функцій. За допомогою вейвлетів функції представляються як композиція грубої низькочастотної апроксимації й уточнюючих компонентів (деталей), що представляють відсутні в апроксимації елементи графіка-функції. Незалежно від виду функції (зображення, крива), вейвлет представляє функцію як ієрархію рівнів відображення з різною точністю деталізації [14].

У процедурах попередньої обробки зображень вейвлет-перетворення використовується для зменшення рівня шумів, аналізу текстур, виділення контурів об'єктів і стиснення зображень.

Вейвлет-перетворення добре локалізовано в часі, що дає змогу виявляти структуру досліджуваного сигналу на окремих часових інтервалах. Крім того, використання багатомасштабного розкладання надає можливість аналізувати процес на різних масштабах часу, а також виявляти ряд важливих особливостей сигналів, пов'язаних зі зміною його структури при переході від одного масштабу до іншого, з розподілом енергії між масштабами тощо [15].

Особливість вейвлет-перетворень полягає в тому, що вони поряд з глобальними характеристиками процесів дають змогу розкрити особливості їх локальної структури. Вейвлет-аналіз надає можливість отримати локальну високочастотну і глобальну великомасштабну інформацію про об'єкт і визначити, в який момент часу з'явилися ті чи інші компоненти сигналу. Важливою характеристикою методів, заснованих на фрактальних уявленнях і вейвлет-перетвореннях, є їх універсальність, тому актуальність застосування вейвлет-аналізу часових рядів для задач автоматизації технологічних процесів цукрового виробництва не викликає сумніву.

Характерною особливістю вейвлетів є частотно-часова локалізація. Базисом вейвлет-розкладання є миттєво спадаюча вейвлет-функція:

$$\psi_{a,b} = \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

де  $t$  — час;  $a$  — масштабний коефіцієнт, що зумовлює формат розтягування вейвлета,  $b$  — зсуву вейвлет-функції. Існує певний набір подібних функцій [4, 10].

Обрахунок вейвлет-перетворення здійснюється визначенням згортки необхідної часової послідовності  $f(t)$  з вейвлет-функцією [4, 8]:

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}(t). \quad (2)$$

Вейвлет-перетворення генерує тип набору властивостей, що характеризують поточний стан об'єкта керування.

Розпізнають безперервне і дискретне вейвлет-перетворення. Безперервне вейвлет-перетворення зводиться за сприянням безперервних масштабних перетворень і переносів вейвлета з довільними значеннями масштабного коефіцієнта  $a$  і параметра зсуву  $b$  [4, 10]:

$$W(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (3)$$

де символ  $*$  показує дію комплексного з'єднання.

Двопараметрична функція  $W(a, b)$  передає інформацію про зміну порівняного внеску складових частин різноманітного масштабу в часі і іменується спектром коефіцієнтів вейвлет-перетворення [4].

На основі вейвлет-спектр обраховують повну енергію сигналу:

$$E_f = \int f^2(t) dt = \iint W^2(a, b) \frac{dadb}{a^2} \quad (4)$$

і розподіл повної енергії за масштабами (скейлограму вейвлет-перетворення) [4]:

$$E_w = (a) = \int W^2(a, b) db. \quad (5)$$

На практиці часові ряди задають не аналітичними функціями, а дискретним набором даних, визначених на кінцевому часовому інтервалі. У цьому випадку при  $t_k < t < t_{k+1}$ ,  $f(t) = s_k$ ,  $k=1, 2, \dots, n$  формула (3) для коефіцієнтів вейвлет-перетворення модифікується таким чином [4]:

$$W(a, b) = \frac{1}{a^{1/2}} \sum_k S_k (\Phi_{k+1} - \Phi_k), \quad (6)$$

де

$$\Phi_k = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{t_k} \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (7)$$

Вибір необхідного класу вейвлет-функцій має творчий характер і реалізується з урахуванням специфіки завдань дослідження та властивими відзнаками сигналу, що допомагає повніше розкрити й акцентувати ті чи інші прикмети аналізованого часового ряду.

Для зображення значень скалограми  $S(a_i, b_j)$  можуть бути використані такі способи [10]:

- а) представлення поверхні в тримірному просторі координат  $(a, b, S)$ ;
- б) плоске зображення поверхні  $S(a, b)$  в координатах  $(a, b)$  у вигляді топографічної карти. Спектр вейвлет-перетворення одномірного сигналу репрезентує поверхню в тривимірному просторі. Візуалізація спектра виконується шляхом проєкції на площину з ізолініями, що допускає прослідкувати зміни коефіцієнтів на різних масштабах в часі. Час наводиться на осі абсцис, частота — на осі ординат.

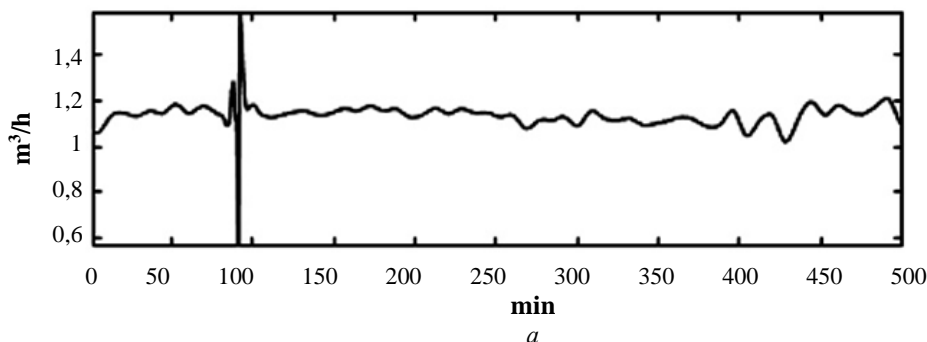
У деяких випадках широкі контури ліній близьких за частотою гармонік не дають можливості прослідкувати за еволюцією їх частоти в часі. Тоді можна відсікти вплив контурів, виділивши ті точки скалограми, в яких вона має максимум по змінним  $a$  і  $b$ , тобто побудувавши так званий скелетон. Для синусоїдального сигналу точки скелета розташовуються вздовж лінії паралельно до осі часу. Якщо ж дані мають гармонійні компоненти, топографічна карта скелетона буде складатися з лінії, орієнтованої вздовж осі  $b$ . Для випадку шумової компоненти лінії скелетона витягуються в перпендикулярному напрямку, тобто паралельно осі  $a$ . Таким чином, коли дані

містять і гармонічні компоненти, і шум, карта скелетона надає можливість побачити їх роздільно.

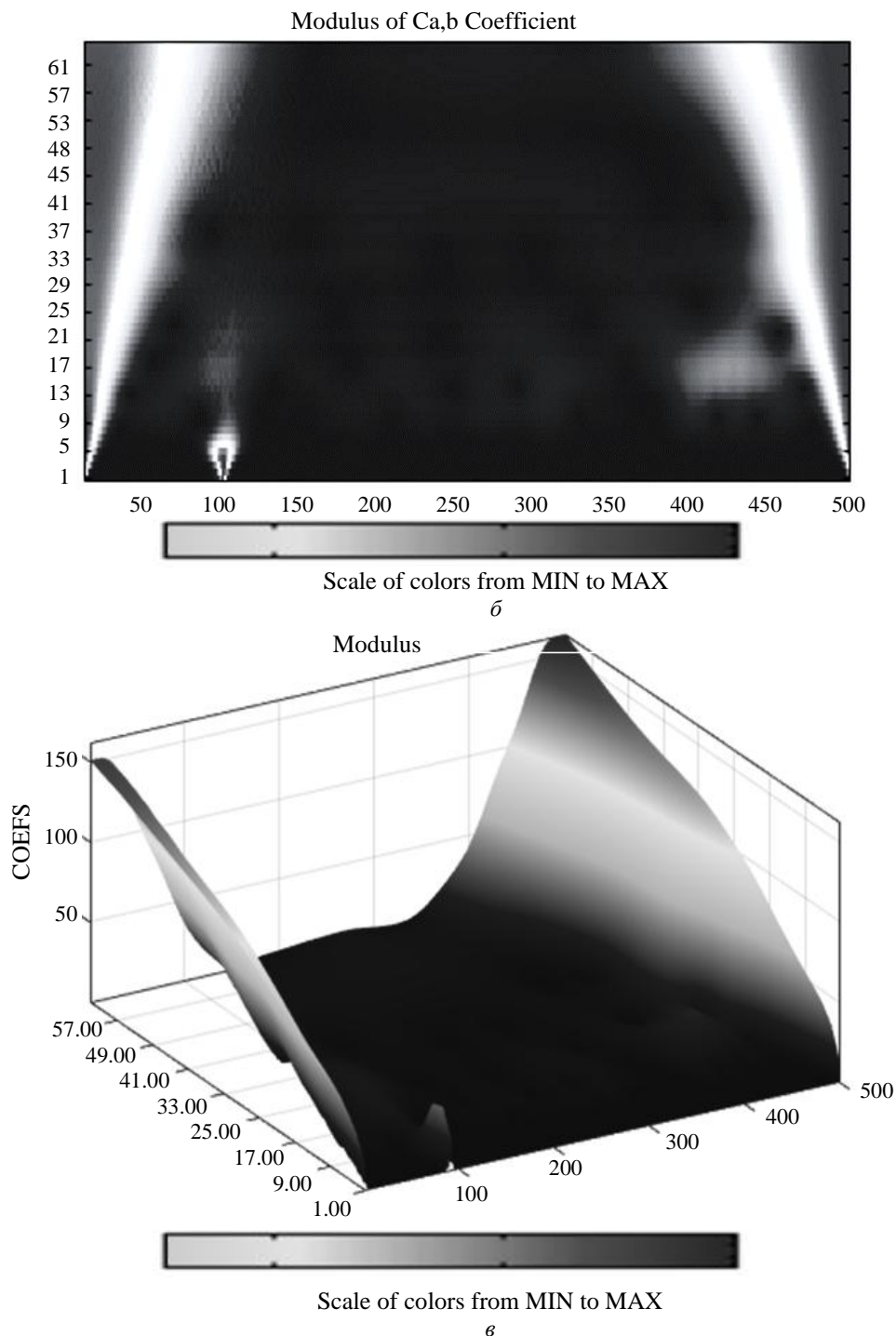
**Результати досліджень.** У результатів наших досліджень встановлено, що зміни технологічних процесів цукрового виробництва відбуваються настільки інтенсивно, а їхні якісні показники бувають настільки непередбачуваними, що для аналізу і прогнозування показників якості напівфабрикатів як вихідних величин технологічного комплексу цукрового заводу, синтез нових аналітичних і обчислювальних підходів, які беруть свій початок у різних галузях знань і є адекватними складній фізико-хімічній природі технологічних процесів, став насущною практичною необхідністю. Потрібно вивчати динаміку процесів, що відбуваються в багатокомпонентних дисперсних системах із лабільними властивостями продуктів, і розглядати причини та механізми виникнення нових режимів і дисипативних просторово-часових структур, оцінювати характерні масштаби й швидкості перехідних процесів, передбачати ймовірні зміни системи з метою забезпечення можливості керування важкопередбачуваними динамічними режимами, які виникають у складних технологічних системах, причому алгоритми керування повинні докорінно відрізнятись від класичних, враховуючи сучасні здобутки теорії нелінійної динаміки.

Були проаналізовані часові ряди основних технологічних змінних технологічного комплексу цукрового заводу: витрати пари, витрати соку, витрати стружки, температури, рН соку. При аналізі часових рядів, що характеризують поведінку процесів цукроваріння, використовувалися різні типи вейвлетів: Gau (Гауса), Morl (Морле), Mhat (мексиканський капелюх) [10]. Вейвлет-перетворення сигналу забезпечувалося за допомогою математичного пакета Matlab. Двомірні масиви коефіцієнтів наведені як точкові зображення, при цьому кількісні сутності показані відтінками чорного та білого кольорів. Максимальним значенням коефіцієнтів вейвлет-перетворення відповідають найбільш яскраві області зображення.

Для забезпечення змістовного з точки зору аналізу вейвлет-перетворень часових рядів стосовно важливих для задач керування аспектів дотримувались принципованих положень [14]: 1) ряди повинні бути як можна довшими: тривалість часових рядів досягала 15000—20000 вимірів, зважаючи на динамічні показники перехідних процесів (2—3 год); 2) періодичність замірів повинна бути рівною протягом ряду і збігатися у всіх рядах, інакше результати аналізу будуть неточними або навіть евристичними (в нашому випадку прийнято 5 сек); 3) дані повинні бути однопорядковими.



**Рис. 1.** Вейвлет-перетворення Морле часового ряду витрати вапнякового молока:  
а — часовий ряд



**Продовження рис. 1. Вейвлет-перетворення Морле часового ряду витрати вапнякового молока:**

$\delta$  — вейвлет-спектограма;  $\epsilon$  — тримірний графік вейвлет-коефіцієнтів

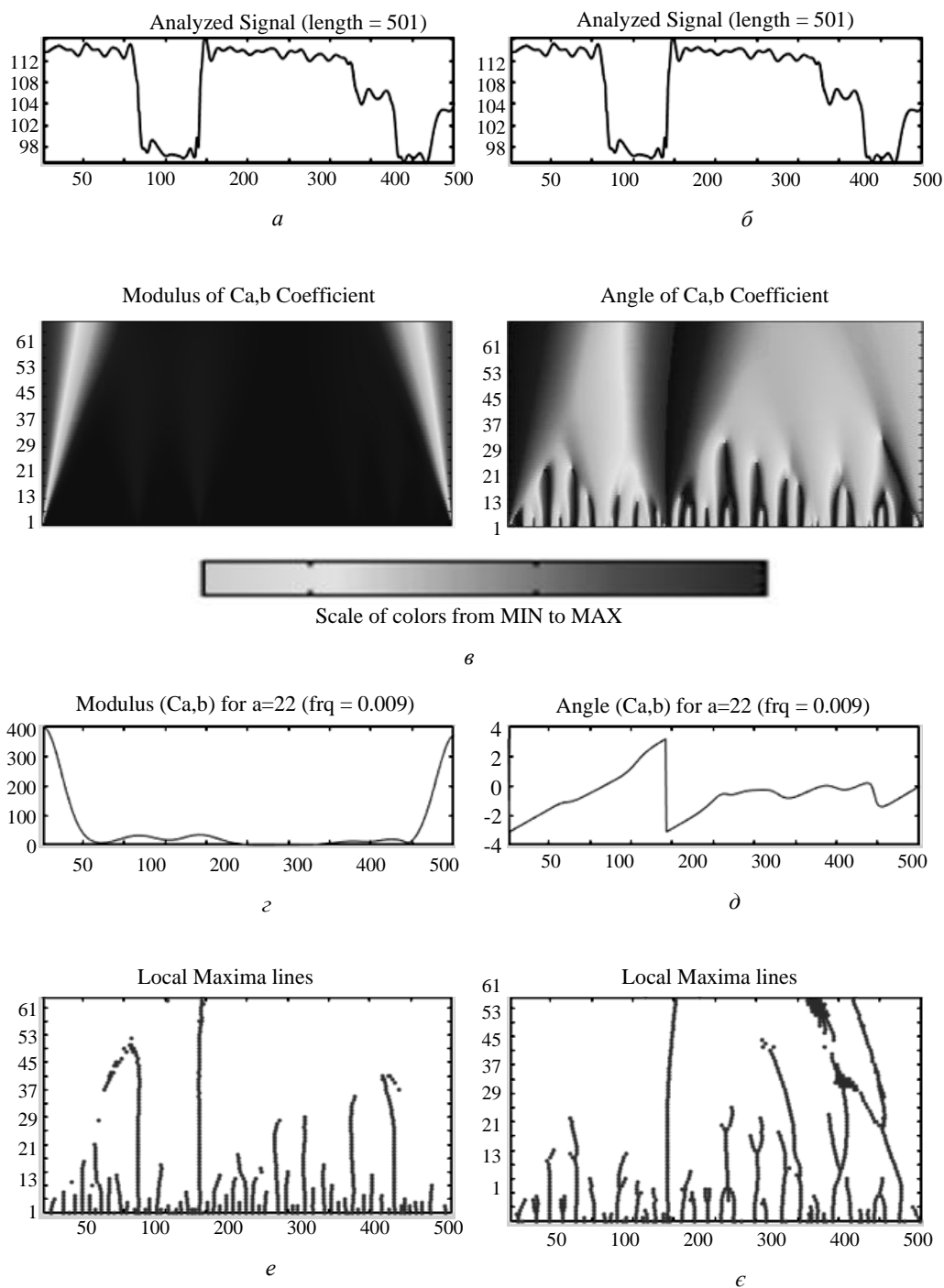


Рис. 2. Вейвлет-перетворення Гауса часового ряду витрати дифузійного соку

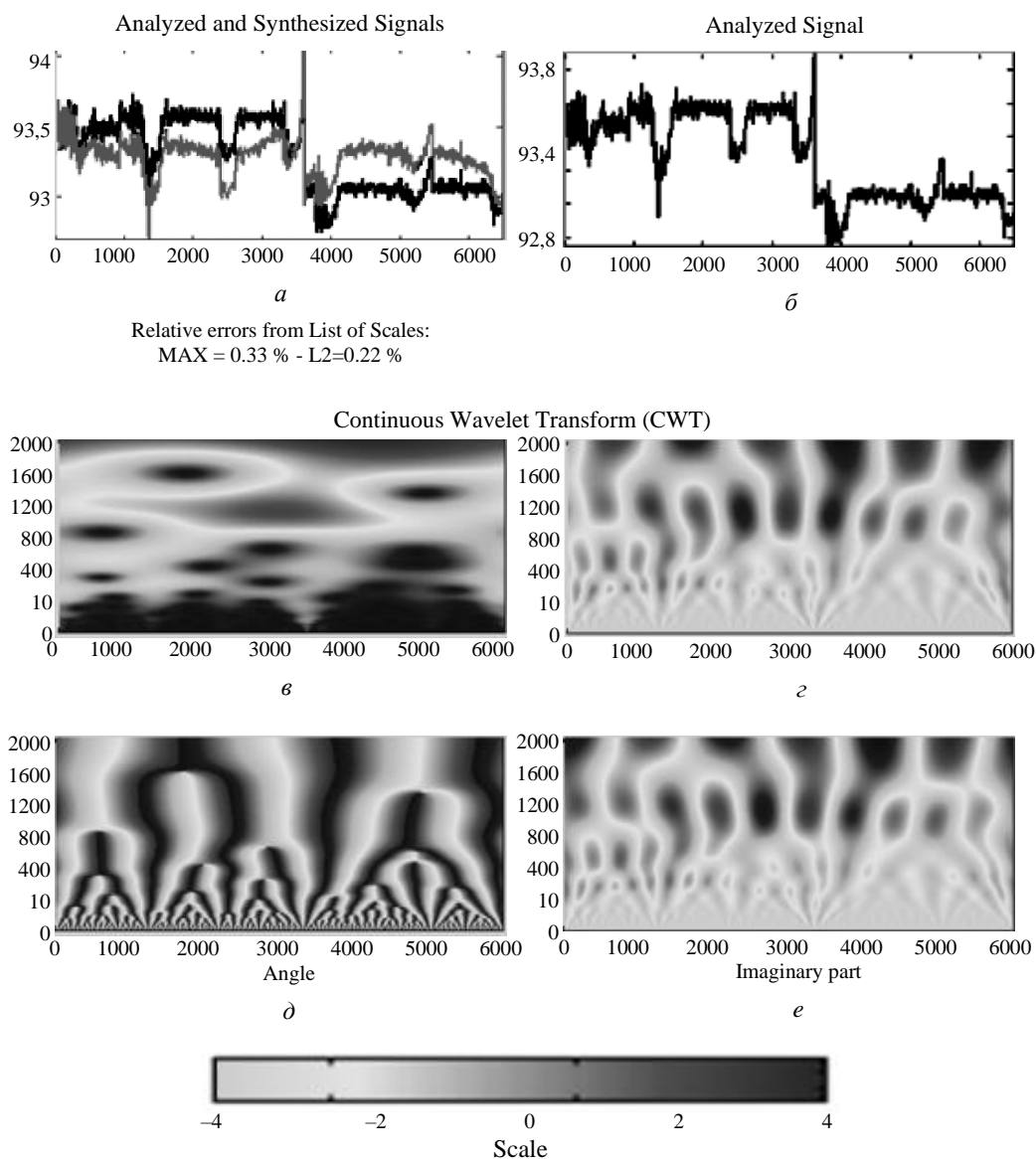


Рис. 3. Вейвлет-перетворення Морле часового ряду температури дифузійного соку

На рис. 1—3 наведені отримані результати проведеного вейвлет-аналізу часових рядів ряду змінних технологічного комплексу цукрового заводу, на яких можна спостерігати визначальні зміни в поведінці об'єкта керування. На рис. 1 при аналізі часового ряду витрати вапнякового молока виділено область різких викидів (сплесків), що забезпечує діагностику аномалій при аналізі ситуацій [10]. Виявлялися аномалії типу викидів, частота яких знаходилась в межах 4—5 годин. Також встановлені пропуски в даних, спричинені недосконалістю засобів вимірювання: проявлялися з дискретністю 18—26 год і тривалістю 2—8 хвилин. Спостерігалися точкові аномалії (випадкові екстремуми, нерегулярності), які зустрічалися дуже рідко.

У часовому ряді витрати дифузійного соку (рис. 2) встановлена нестационарність об'єкта керування, яка проходить на деяких часових інтервалах, що допускає можливість встановлення конкретних оцінок нестационарності як у якісному, так і в кількісному аспекті [16]. Виділялися тренди типу: лінійний тренд, поліноміальний тренд, експоненціальний тренд. Оцінка трендів проводилася за допомогою критеріїв екстремальних точок, знаках різниці, рангового критерію Спірмена [17]. Частота змінювань трендів спостерігалася в межах 1—3 годин.

На рис. 3 в часовому ряді температури дифузійного соку визначені періодичності в поведінці, а вейвлет-спектограма сигналу свідчить про наявність існуючих високочастотних шумів, також визначений їх частотний спектр. Спостерігалася наявність шумової компоненти із застосування критерію Філіпса-Перрона [17], частота якої змінюється в межах 3—5 годин.

Для виявлення хаотичної динаміки досліджуваних часових рядів на основі вейвлет-перетворень за методикою [18] були проаналізовані такі показники хаотичності, як розмірність простору вкладення, кореляційна розмірність і показник Ляпунова. Значення кореляційної розмірності складало від 2,56 до 4,89. Розмірність фазового простору була в межах 4—12.

За рівнем значень вейвлет-коефіцієнтів виділялись області специфічних проявів у поведінці об'єкта керування: зростання коефіцієнтів підвищує різкість характерної області в частотно-часовому спектрі, що реально неможливо при аналізі за допомогою Фур'є-перетворення.

**Висновки.** Вейвлетний аналіз — це особливий вид перетворення сигналів, який доцільно використовувати, коли результат аналізу поведінки об'єкта керування повинен встановити її локальні особливості з установленими координатами як у часовому, так і в частотному сегменті. За допомогою аналітичних і численних методів отримані вейвлет-спектри, скелетограми часових рядів основних змінних технологічного комплексу цукрового заводу, які дають змогу створити класифікацію їх особливостей. Порівняно із розкладом Фур'є вейвлети здатні з вищою точністю виявляти локальні особливості сигналів аж до розривів першого роду. Порівняно з аналізом за Фур'є, вейвлет-перетворення надає можливість проводити двомірну розгортку досліджуваного часового ряду, забезпечуючи представлення частоти і координат як незалежних змінних.

Генеральна ідея вейвлетного перетворення часових рядів полягає в його представленні на різних рівнях декомпозиції на дві групи: апроксимуючу — грубу функцію із повільною динамікою, і деталізуючу — зі швидкою динамікою змін.

Застосування вейвлет-аналізу забезпечує ефективну обробку й прогнозування нестационарних (у часі) або неоднорідних (у просторі) часових рядів технологічних об'єктів керування різних типів.

Результати вейвлетного аналізу з установленням їх особливостей надають можливість фахівцям проводити більш повну та коректну інтерпретацію поведінки складних об'єктів керування й розробки на їх основі ефективних рішень щодо управління.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ladanyuk, A. P., Reshetyuk, V. M., Kishenko, V. D., Smityukh, Y. V. (2014). *Innovative technologies in the management of complex biotechnological objects of the agro-industrial complex: monograph*, Center for Educational Literature, Kyiv.
2. Ladanyuk, A. P., Smityukh, Y. V., Vlasenko, L. O. (2013). *System analysis of complex control systems*, NUHT, Kyiv.

3. Jaffard, S., Meyer, Y., Ryan, R. (2001). *Wavelets: tools for science & technology*, Society for Industrial Mathematics, Philadelphia.
4. Zhengyou, H. (2016). *Wavelet Analysis and Transient Signal Processing Applications for Power Systems*, Wiley, China.
5. Selesnick, I. W., Bayram, I. (2014), Sparse signal estimation by maximally sparse convex optimization, *IEEE Trans. Signal Process*, 62(5), 1078—1092.
6. Kishore, Y., Sreenivasulu, T. (2015). Signal Adaptive Orthogonal Wavelet Decomposition and Hampel filtering for Impulse De-noising of Speech. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 4, 8368—8372.
7. Debnath, L. (2002). *Wavelet transforms and their applications*, Birkhäuser, Boston.
8. Dutkay, D. E., Jorgensen, P. E. T. (2006). Wavelets on fractals. *Rev. Mat. Iberoamericana*, 22, pp. 131—180.
9. Deqiang, L., Pedrycz, W., Nicolino, J. (2015). Fuzzy Wavelet Packet Based Feature Extraction Method and Its Application to Biomedical Signal Classification. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52, 6, pp. 1132—1139.
10. Addison, P. S. (2002). *Illustrated wavelet transform handbook. Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*. Institute of Physics Publishing, Bristol.
11. Almurshedi, A., Ismail, A. K. (2015). Signal refinement: Principal component analysis and wavelet transform of visual evoked response, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 9(2), pp. 106—112.
12. Ding, Y., Selesnick, I. (2015). Artifact-free Wavelet Denoising: Non-convex Sparse Regularization, Convex Optimization, *IEEE Signal Processing Letters*, 22 (9), pp. 1364—1368.
13. Fabec, R., Ólafsson, G. (2003). The Continuous Wavelet Transform and Symmetric Spaces, *Acta Applicandae Math*, 77(1), pp. 41—69.
14. Sakai, M., Okuyama, Y., Wei, D. (2012). Separation of EEG and ECG components based on wavelet shrinkage and variable cosine window, *J Med Eng Technol*, 36(2), pp. 35—43.
15. Vitec, M., Hrubes, J., Kozumplik, J. (2009). A wavelet-based ECG delineation in Multilead ECG signals: Evaluation on the CSE Database, *IFMBE Proceedings*, 25, pp.177—180.
16. Picovici, D., Mahdi, A. E. and Murphy T. (2005). An Enhanced Single-Ended Method for Objective Speech Quality Assessment for Telephony Systems SPECOM. *Proceedings 10th International Conference SPEECH and COMPUTER. Patras, Greece*, pp. 633—636.
17. Davidson, R., MacKinnon, J. (2004). *Econometric Theory and Methods*. New York: Oxford University Press.
18. Shumin, Z., Tang, B., Chen, R. (2009). Comparison between Non-stationary Signals Fast Fourier Transform. and Wavelet Analysis. *International Asia Symposium on Intelligent Interaction and Affective Computing*, 8—9, pp. 128—129.



УДК 662.93:006.86

## INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR OPTIMIZING THE CLEANING OF HEATING SURFACES OF A SOLID FUEL ENERGY BOILER

R. Karpenko

National University of Food Technologies

---

### Key words:

steam production, automation control, inertia of transient processes, adaptation of algorithms, decision support subsystem

### Article history:

Received 09.01.2024

Received in revised form 16.04.2024

Accepted 16.04.2024

### Corresponding author:

rokiseroman@gmail.com

---

### ABSTRACT

One of the main problems today in the country's energy sector is its energy independence and energy stability. After the start of the full-scale invasion of the Russian Federation, and the corresponding decrease in the supply of natural gas and oil products, the need for its replacement with alternative types of fuel increased.

During the operation of the boiler, contamination of the external heating surfaces occurs. On the heating surfaces, slag deposits are possible.

Combustion of alternative types of fuel requires additional mechanical impact on the heating surfaces of the solid fuel boiler, as a deposit appears on them, which impairs the transfer of heat from the furnace to the water pipe circuit, and in case of excessive and prolonged slagging, overheating of its individual sections and, as a result, pipe rupture.

Intelligent decision-making support subsystem for a solid-fuel boiler helps to determine the general degree of contamination of the heating surfaces, and therefore, the frequency and intensity of their automatic soot cleaning, thereby preventing boiler slagging, which also depends on the efficiency of the boiler and its period of trouble-free operation.

Consequently, intelligent decision-making support subsystem will improve the main technical and economic indicators of production and ensure the achievement of the following goals: reduction of regulation errors; prevention of emergency situations when the system lost the necessary accuracy due to disturbances or changes in the object's parameters; reducing the number of ACS settings, accordingly reducing the influence of the human factor on the technological process; stabilization of operational parameters of the technological process to ensure the required steam quality; improvement of the working conditions of service personnel; increasing productivity, increasing resource efficiency of the process.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-8

# ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПІДСИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ ТВЕРДОПАЛИВНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОТЛА

Р. В. Карпенко, здобувач PhD, <https://orcid.org/0009-0006-3873-3455>

Національний університет харчових технологій

*Шлакування поверхонь нагріву твердопаливного котла характеризується накопичувальним ефектом і має ряд негативних впливів, зокрема порушення теплопередачі та гідродинамічного режиму роботи внаслідок зменшення теплосприйняття поверхонь нагрівання; підвищення температури продуктів згоряння на виході з топки; збільшення витрати електроенергії на тягу внаслідок підвищення аеродинамічних опорів; додаткові втрати палива тощо.*

*Підсистема підтримки прийняття рішень для твердопаливного котла в автоматичному режимі визначає періодичність та інтенсивність сажоочистки поверхонь нагріву, зважаючи на їхній загальний ступінь шлакування.*

**Ключові слова:** виробництво пари, інерційність перехідних процесів, порадачий режим, підсистема підтримки прийняття рішень.

**Вступ.** Однією з головних проблем сьогодення в енергетичному секторі країни є її енергонезалежність та енергостабільність. Кожен новий день ставить перед українцями нові виклики. Після початку повномасштабного вторгнення російської федерації та, відповідно, зменшення обсягів поставок палива природного газу і нафтопродуктів зросла потреба в його заміщенні альтернативними видами палива. Ситуація, що склалася, має вкрай негативний вплив на підприємства та опалювальні котельні, що призводить до неможливості їх експлуатації без переведення на альтернативні види палива. Наявне перевантаження електромереж унаслідок використання деякими підприємствами електроенергії з мережі, замість власногенерованої, додатково ускладнює ситуацію. Завдання, що постають перед інженерами, вимагають швидких, але продуманих рішень, які будуть ефективними протягом тривалого часу. Такі дослідження пов'язані із забезпеченням енергонезалежності країни, а отже, є вкрай актуальними.

У процесі роботи котла виникає забруднення зовнішніх поверхонь нагрівання. На поверхнях нагріву можливе відкладення шлаку. Ці відкладення утворюються при температурі газів на виході з топки, більш високій, ніж температура розм'якшення золи, а також у високотемпературних зонах топки при незадовільній аеродинамічній організації топкового процесу в тих випадках, коли розплавлені частки золи, які не встигають остудитися і затвердіти, накидаються потоком газів на стінки топок і труби екранів. Звичайне шлакування починається в проміжках між екранними трубами, а також у застійних зонах і ділянках топки. Якщо температура топкового середовища в зоні утворення шлакових відкладень нижча за температуру початку деформації золи, то зовнішній шар шлаку складається із затверділих часток. При підвищенні температури зовнішній шар шлаку може оплавлятися, що сприяє налипанню нових часток і прогресуючому шлакуванню (рис. 1).

Шлакування зменшує теплосприйняття поверхонь нагрівання, розташованих у топці, і підвищує температуру продуктів згоряння на виході з топки, що може призвести до порушення нормального гідродинамічного режиму роботи екранів. Навколо

пароперегрівника, якщо температура газів низька, мають місце ущільнені відкладення твердих часток золи. В економайзері утворюються пухкі сипучі відкладення дрібних фракцій золи, причому ріст забруднюючого шару супроводжується руйнуванням його більш великими частками, у результаті чого встановлюються динамічна рівновага і сталий стан забруднюючого шару. Зольність палива не впливає на товщину забруднень. Після досягнення визначеної товщини забруднень, зола більше не осаджується на забруднених трубах. Товщина липких забруднень в області низьких температур залежить від характеристик золи і прогресує в часі.



**Рис. 1.** Забруднена водотрубна частина екранних труб і фрагмент перегрітої екранної труби

Унаслідок забруднення конвективних поверхонь нагрівання погіршуються умови теплопередачі і підвищуються їхні аеродинамічні опори. В результаті підвищується температура відхідних газів, збільшуються втрати палива і витрата електроенергії на тягу. Під коефіцієнтом забруднення розуміють термічний опір шару відкладень:

$$\varepsilon = \delta_s / \lambda_s, \quad (1)$$

де  $\delta_s$  — товщина шару відкладень, м;  $\lambda_s$  — теплопровідність шару відкладень, Вт/(м·°С).

$\varepsilon$  залежить від швидкості потоку, діаметра труб, що обтікаються, і їхнього розташування в пучці. Для коридорного розташування поверхонь нагріву  $\varepsilon$  завжди вище, ніж для шахового. Відкладення призводять до зниження коефіцієнта теплопередачі в поверхнях нагрівання і підвищенню температури відхідних газів, тобто зменшується ККД котла [1].

Тож при спалюванні альтернативних видів палива (пелета лущиння соняшника,

гранульований жом, тріска деревини тощо), поряд з наявністю та відносною дешевиною сировини, виникає ряд проблем:

1) підвищена температура вихідних газів перед рукавними фільтрами, що призначені для їх очистки, досягає 190—200 °С, що не дозволяє їх експлуатувати, адже при такій температурі починається руйнування рукавів;

2) зменшення ККД котла за рахунок зменшення коефіцієнта теплопередачі від димових газів до води та пари (водотрубного контуру);

3) підвищення ризику виходу з ладу трубної системи поверхонь нагріву внаслідок перегрівання ділянок труб з надмірним засміченням золою.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Проблема управління та оптимізації виробничого процесу котла для підвищення продуктивності котла активно досліджується в усьому світі [2, 3]. Утворення золи на поверхнях теплопередачі завжди було однією з головних проблем твердопаливних котлів. За оцінками, втрати становлять 1% за нормальних умов експлуатації, що є важливим показником енергоефективності [4]. Дані, зібрані під час опитування, проведеного Інститутом досліджень електроенергії (EPRI), показали, що 7% установок страждають від частого забруднення, у 40% виникають випадкові проблеми [5]. За останні десятиліття можна знайти велику кількість тематичних досліджень [6—11], що свідчить про постійний інтерес у всьому світі до цієї проблеми.

Забруднення золою призводить до зменшення теплопоглинання та втрати термічної ефективності [12]. Традиційно послідовність сажобудування проводиться за періодичним розкладом або за рішенням оператора, що в багатьох випадках призводить до надмірного обдування. З одного боку, кожен зайвий процес сажобудування означає втрату ефективності котла, оскільки це передбачає додаткові енергетичні та економічні витрати. З іншого боку, недостатнє сажобудування викликає перегрів і прискорення ерозії труби, деградацію труб і зниження довговічності котла. Цей факт є очевидним і був визначений ще на ранніх етапах проєктування котлів [13].

Отже, проблема має оптимізаційний характер, оскільки спрямована на мінімізацію сумарних витрат на операції з видалення забруднень і сажі.

Так, у [14] автори звертають увагу на важливі відхилення в розповсюдженні теплового потоку, підкреслюючи локальний характер епізодів очищення в більшості випадків.

**Мета дослідження:** знайти залежності в параметрах роботи твердопаливного котла, щоб в автоматичному режимі визначати періодичність та інтенсивність сажочистки поверхонь нагріву. На основі отриманих залежностей, розробити підсистему підтримки прийняття рішень, що допомагатиме оператору в порадчому режимі вчасно запускати обдувні апарати.

Впровадження інтелектуальної підсистеми підтримки прийняття рішень дасть змогу забезпечити досягнення таких цілей: запобігати шлакуванню поверхонь нагріву, підтримувати ККД котла на сталому рівні, збільшити строк безаварійної роботи, збільшити економію виробництва пари, зменшити вплив людського фактора; стабілізувати параметри технологічного процесу для забезпечення необхідної якості пари; підвищення продуктивності, підвищення ресурсоефективності процесу.

**Матеріали і методи.** Моніторинг забруднення золою можна здійснити за допомогою оперативних розрахунків та спеціального обладнання або комбінації обох методів. Теплопоглинання поверхонь теплопередачі завжди потрібно розраховувати в режимі онлайн. Загальноприйнятим методом розрахунку швидкості теплопоглинання є логарифм середньої різниці температур [16]. Однак це метод статичного ба-

лансу, під час якого не можна показати динамічну поведінку поверхонь теплопередачі. Спеціальні вимірювальні прилади, такі як вимірювачі теплових потоків [17], можуть добре відображати стан поглинання тепла поверхніми теплообміну, надаючи безперервний сигнал. Але їх застосування призводить до значного збільшення вартості датчиків, їх встановлення й обслуговування. Нейронна мережа добре використовується для моніторингу забруднення золою [14, 18], але це складно реалізувати для моніторингу в реальному часі через великий обсяг обчислень. Метод, розроблений у цій статті, можна використовувати для моніторингу рівня забруднення золою поверхонь теплообміну в режимі онлайн без надмірних витрат.

У цій статті представлено комплексний підхід до оперативного моніторингу й оптимізації системи сажобдувки в котлах, що працюють на твердому паливі. Завдяки моніторингу золотого забруднення теплообмінних поверхонь котла на основі методу динамічного масоенергетичного балансу в режимі онлайн можна оцінити роботу системи сажобдувки котла. Розробляються відповідні процедури для оптимізації частоти та тривалості сажобдувки. Для ілюстрації запропонованих методологій наведено результати моніторингу й аналіз експериментального застосування. Запропоновані методи можуть бути застосовані для оцінки стану й управління роботою системи обдувки котла для досягнення мети енергозбереження. Інтелектуальне видалення сажі є поєднанням моделювання, техніки програмного обчислення та онлайн системи для моніторингу продуктивності котла.

**Результати досліджень.** На основі аналізу специфіки роботи твердопаливних котлів було визначено, що сучасні системи автоматизації технологічних процесів володіють різноманітною інформацією, яка може бути використана підсистемою підтримки прийняття рішень з метою підвищення стійкості основних показників ефективності виробництва пари й обладнання котлоагрегату в цілому, під час інерційних перехідних процесів, та залежно від типу твердого палива, що спалюється (тріска деревини, пелета лушпиння соняшника, гранульований жом, кам'яне вугілля тощо), його поточних характеристик.

Парове обдування створює достатній динамічний напір струменя:

$$H = W_l^2 / (2v_n), \quad (2)$$

де  $W_l^2$  — осьова швидкість;  $v_n$  — питомий об'єм пари.

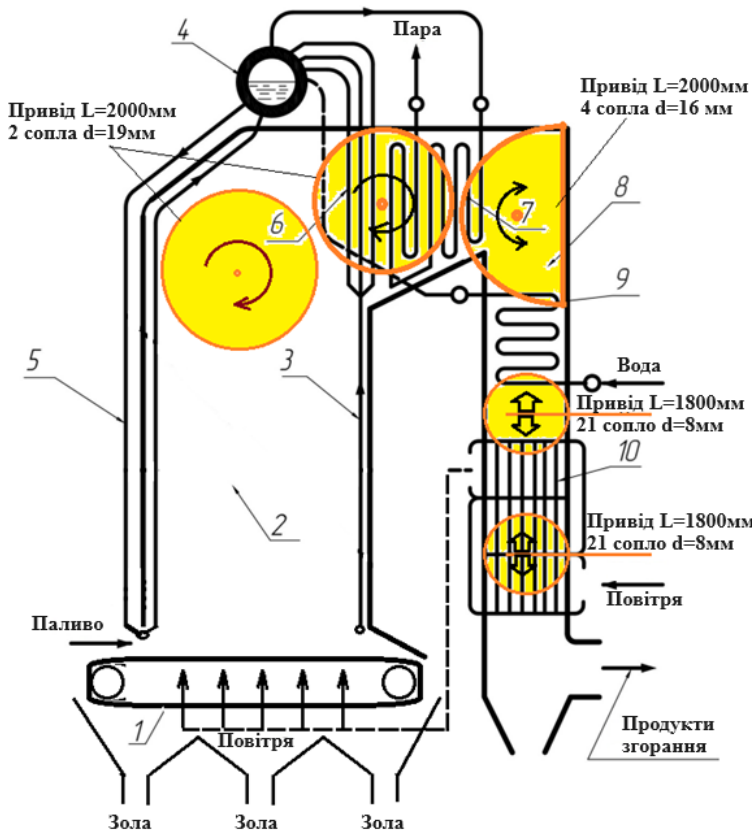
При тиску пари 4 МПа на відстані 3 м від виходу струменя динамічний напір буде дорівнювати  $2000 \text{ Па} < H_{l=3 \text{ м}} > 2000 \text{ Па}$ .

Для видалення сипучих відкладень досить мати тиск  $H_{ек} = 200 \dots 250 \text{ Па}$ .

Для видалення щільних відкладень  $H_{n,n} = 400 \dots 500 \text{ Па}$ .

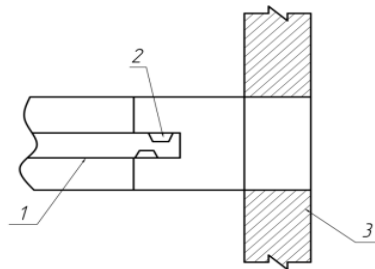
Для видалення шлакових наростів  $H_m = 2000 \text{ Па}$ .

Як видно з графіка (рис. 4), всього за 8 год роботи котла температура вихідних газів зростає з 172 °С до 194 °С, при роботі на твердому паливі (пелета лушпиння соняшника). Після спрацювання всіх апаратів парової обдувки по тракту газоходу частинки сажі збиваються з трубної системи поверхонь нагріву і при цьому покращується теплопередача між водою/парою та димовими газами. Пара та вода відбирають більше тепла в димових газів, а отже, гази охолоджуються, що при значеннях до 180 °С дає змогу використовувати рукавні фільтри очищення димових газів, щоб зменшити забруднення навколишнього середовища. У свою чергу, внаслідок ефективного відбору тепла водою та паром підвищується ККД котла, що призводить до зменшення витрати палива, а отже, економії енергоносіїв.



**Рис. 2. Технологічна карта встановлення парових обдувних апаратів:**

1 — колосникова решітка; 2 — топочна камера; 3 — екранні поверхні нагріву; 4 — барабан; 5 — система опускних труб циркуляційного контуру екранів; 6 — фестон; 7 — пароперегрівник; 8 — опускний газохід; 9 — водяний економайзер; 10 — повітропідігрівник



**Рис. 3. Схема пристрою для парової обдувки:**

1 — обдувочна голівка; 2 — сопла; 3 — обмурівка котла

Дослідження роботи котлів на твердому паливі (кам'яне вугілля) при спалюванні шаром на колосниковій рухомій решітці показує, що налипання частинок легкої золи відбувається не так інтенсивно, як при спалюванні біопалива — пелети лушпиння соняшника чи гранульованого бурякового жому, що надає можливість проводити обдування поверхонь нагріву раз на 2—3 доби. При цьому температура відхідних димових газів рідко підіймається до відмітки 180 °С, що дає змогу безперешкодно використовувати рукавні фільтри очищення димових газів.





Рис. 4. Графік температури вихідних газів та вплив обдувки поверхонь нагріву на процес теплопередачі

Основна концепція інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) полягає в тому, щоб підказати оператору процесу найоптимальніший момент для запуску процедури сажобдуву для максимізації переваги від її застосування. Переваги можна виразити як різницю між перевагами сажобдування та затратами енергії на цей процес. Перевага сажобдування розглядається як підвищення ефективності теплопередачі для кожної поверхні нагріву, а основні втрати, з якими потрібно мати справу, це втрата ефективності котла та витрачання перегрітої пари для забезпечення процесу обдувки.

Загалом, тиск і швидкість потоку перегрітої пари, яка використовується для сажобдування, завжди стабільні протягом усього періоду сажобдувки за рахунок дроселювання потоку. Отже, втрати за рахунок витрати пари при кожному циклі сажобдуву  $Q_{обд}$  можна розрахувати таким чином:

$$Q_{обд} = F_{обд} T_{обд} (h_{др} - h_{гп}), \quad (3)$$

де  $F_{обд}$  — масова витрата пари, що здуває сажу;  $T_{обд}$  — час сажобдування;  $h_{др}$  — ентальпія дренажної пари;  $h_{гп}$  — ентальпія гострої пари, відповідно. Очевидно, що споживання пари лінійно залежить від часу. Переваги (збільшення ефективності теплопередачі), викликані сажобдувом, лінійно залежать від часу. На початковому етапі обдувки ефективність тепловіддачі зростає швидко, а з плином часу — повільніше.

Зазвичай, на ТЕС і ТЕЦ, що працюють на вугіллі чи біомасі, операції з видалення сажі завжди виконуються з фіксованою частотою й тривалістю, тому необхідна оптимізація циклу сажобдувки. В цій статті розглядається застосування методу мінімальних втрат для оптимізації циклу сажобдувки. На рис. 6 графічно показано зростання втрат в часі  $f(t)$  для одного циклу. Втрати від роботи сажобдувок приймаються як постійні втрати  $Q_{обд}$  протягом періоду часу  $T_{обд}$ . Тож втрати ( $B$ ) протягом одного циклу сажобдувки можна виразити як площу під кривою:

$$B = \int_0^{T_1} f(t) dt + Q_{обд} T_{обд} = \int_0^{T_1} f(t) dt + F_{обд} T_{обд} (h_{др} - h_{гп}), \quad (4)$$

де  $T_1$  і  $T_{обд}$  — час циклу та час сажобдування.

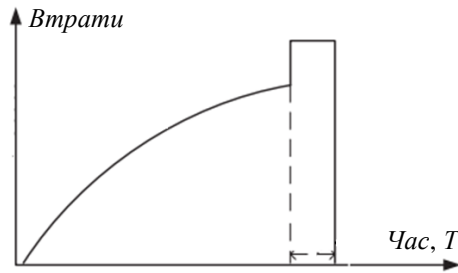


Рис. 5. Втрати в часі між циклами сажобудувки

На рис. 6 зображено декілька циклів сажобудувки, що слідують один за одним. Отже, проблема полягає в мінімізації втрат.

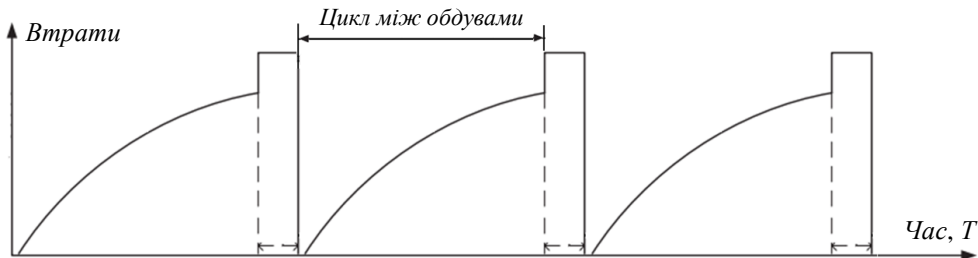


Рис. 6. Втрати в часі протягом декількох циклів сажобудувки

Кожен оптимальний час  $T$  циклу можна порівняти з відповідним часом  $T_{обд}$  циклу сажобудування, щоб визначити пріоритетність обдувного апарату, якщо на котлі більше однієї поверхні теплообміну, на якій вони встановлені. Першою буде обдуватись та поверхня, тривалість циклу якої перевищує оптимальний час циклу. Результати розрахунків для кожної конвекційної поверхні теплообміну в досліджуваному котлі наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Оптимальний час циклу обдувки

Поверхня нагріву	Втрати пари з обдувкою, $Q_{обд}$ , КДж/с	Тривалість обдувки $T_{обд}$ , с	Оптимальний цикл обдувки, $T$ , с	Цикл обдувки	
				Існуючий час $T$ , с	Різниця $T - T_{обд}$ , с
Високотемпературний пароперегрівач (2 ступінь)	3400	1200	13,3	39,6	<b>-26,3*</b>
Пароперегрівач (1 ступінь)	3400	900	25,8	39,6	<b>-13,8*</b>
Водяний економайзер	3400	900	9,6	39,6	<b>-30,0*</b>
Повітряпідігрівач	3400	600	33,9	39,6	<b>-5,7*</b>

*Примітка.* \*Жирним у таблиці виділено результати розрахунків.

На основі результатів розрахунків наступні операції з сажобудувки слід починати спочатку з низькотемпературних поверхонь нагріву з тривалістю, наведеною в табл. 1 (стовпець «Різниця  $T - T_{обд}$ , с»).



Щоб застосувати метод до фактичного процесу системи сажобдудвання, необхідно враховувати коливання навантаження. Крім того, необхідно підтримувати не тільки теплову ефективність кожної поверхні передачі на високому рівні, але також не можна надмірно витратити перегріту пару, яка використовується для сажобдудвання. Мета полягає в тому, щоб уникнути надмірних обдудвань сажі, зберігаючи високу ефективність теплопередачі. У такому випадку проблема оптимізації процедури сажобдудвання полягає в в тому, «коли починати сажобдудання поверхні нагріву?» і «яка тривалість процедури сажобдудання одним апаратом цієї поверхні?»

Припустимо, що існує обмеження для частоти сажобдудання, і подальше обдудвання понад це значення не може підвищити ефективність, і отже, буде марним. Тому основна ідея полягає в тому, щоб обдудувати секцію, яку потрібно очистити, залежно від стану її забруднення.

Як зазначалося вище, втрати від сажовидудання можуть бути визначені шляхом оперативного розрахунку. Швидкість накопичення сажі визначається за зміною ефективності теплопередачі протягом часу роботи комплексу обдудок. Таким чином, переваги сажовидудання можна виразити як зростання ефективності теплообміну:

$$B = \Delta E = E_1 - E_0, \tag{5}$$

де  $E_1$  — ефективність теплопередачі після очищення поверхні нагріву;  $E_0$  — ефективність теплопередачі до очищення поверхні нагріву.

На рис. 7 показаний приклад вимірювань, проведених для оцінки зміни ефективності теплопередачі через сажовидудання за одну добу.

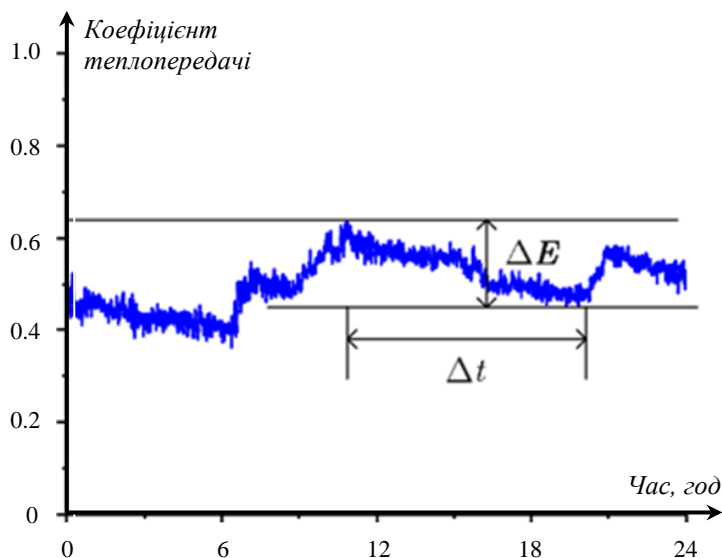


Рис. 7. Ефективність теплопередачі в часі

Таким чином, переваги видалення сажі можна виразити як різниці енергії, що поглинається поверхнями теплопередачі, між інтервалами сажобдудки та інтервалами забруднення золою.

Як показано на рис. 8, енергія, поглинена теплообмінними поверхнями без операції сажобдуду, може бути виражена таким чином:

$$Q_n = A \int_{t_0}^{t_1+t_{обд}} f_n(t) \Delta T dt . \tag{6}$$

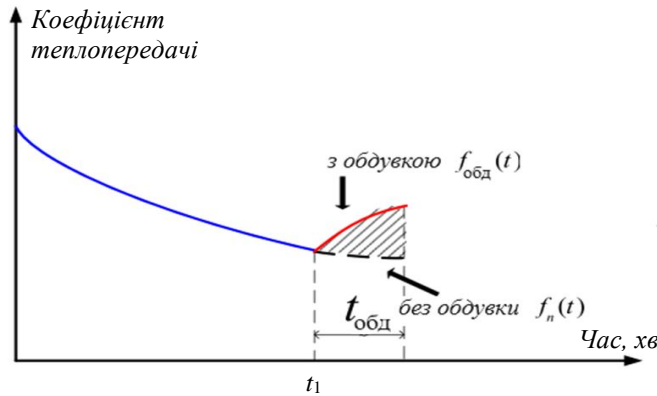


Рис. 8. Крива ефективності сажообдуву

Фактична енергія, що поглинається поверхнями теплообміну під час операції сажообдуву:

$$Q_b = A \int_{t_0}^{t_1+t_{обд}} f_{обд}(t) \Delta T dt, \tag{7}$$

де  $t_0$  — час початку;  $A$  — площа поверхні теплопередачі;  $\Delta T$  — логарифмічна різниця температур;  $f_n(t)$  і  $f_{обд}(t)$  — крива ефективності теплопередачі без сажообдуву й ефективності теплопередачі з сажообдувом. Очевидно,  $f_{обд}(t) = K_r(t)$  і крива ослаблення ефективності теплопередачі демонструє експоненціальний характер в часі. Це можна наближено визначити як:

$$f_n(t) = e^{-\varepsilon t}, \tag{8}$$

де  $\varepsilon$  — константа осадження забруднення.

Отже, переваги сажообдуву можна розрахувати таким чином:

$$\begin{aligned} \Delta E \infty \Delta Q &= Q_b - Q_n = A \left\{ \int_{t_0}^{t_1+t_{обд}} K_r(t) \Delta T dt - \int_{t_0}^{t_1+t_{обд}} e^{-\varepsilon t} \Delta T dt \right\} = B \\ &= A \cdot \Delta T \int_{t_1}^{t_1+t_{обд}} [K_r(t) - e^{-\varepsilon t}] dt. \end{aligned}$$

Тоді чиста вигода

$$B_n = B - Q_{обд} = A \Delta T \int_{t_1}^{t_1+t_{обд}} [K_r(t) - e^{-\varepsilon t}] dt - F_{обд} T_{обд} (h_{др} h_{гп}). \tag{9}$$

Потім задається оптимальний час сажообдувки  $T_{обд}$ :

$$\begin{aligned} &Max B_n; \\ &T_1 > 0, T_{обд} > 0. \end{aligned}$$

Рівень зольності поверхонь теплообміну можна описати фактором чистоти CF:

$$CF = \frac{K_r}{K_0}, \tag{10}$$

де  $K_r$  і  $K_0$  – фактичний коефіцієнт тепловіддачі тепла поверхню передачі та теоретичний коефіцієнт теплопередачі відповідно. Очевидно, значення CF лежить в інтервалі  $[0 \dots 1]$ , де одиниця відповідає стану чистої поверхні теплопередачі.

Теоретичний коефіцієнт тепловіддачі  $K_0$  позначає ефективність тепловіддачі поверхні теплообміну в чистому стані, що, зазвичай, виражається як сума коефіцієнта радіаційного теплообміну і коефіцієнта конвекційної теплопередачі [19].

Відповідний оптимальний коефіцієнт чистоти  $CF_{опт}$  можна отримати, як

$$CF_{опт} = \frac{K_r(T_{обд,опт})}{K_0}. \tag{11}$$

Щоб проілюструвати ефективність методу, в табл. 2 як приклад наведено порів-

няння фактичної тривалості сажообдуву  $T_{обд}$  кожної поверхні теплопередачі з розрахованою оптимальною тривалістю сажообдуву  $T_{обд,опт}$ , визначеною цим методом.

Таблиця 2. Оптимальна тривалість обдувки

Поверхня нагріву	Втрати пари з обдувкою, $Q_{обд}$ , КДж/с	Тривалість обдувки $T_{обд}$ , с	Оптимальна тривалість обдувки, $T_{обд,опт}$ , с	Різниця
				$T_{обд} - T_{обд,опт}$ , с
Високотемпературний пароперегрівач (2 ступінь).	3400	1200	2320	<b>-1120*</b>
Пароперегрівач (1 ступінь).	3400	900	1137	<b>-237*</b>
Водяний економайзер	3400	900	2405	<b>-1505*</b>
Повітряпідігрівач	3400	600	747	<b>-147*</b>

*Примітка.* \*Жирним у таблиці виділено результати розрахунків.

Як показано в табл. 2, оптимальна тривалість сажообдуву для кожної поверхні теплообміну різна. Найдовшу тривалість сажообдуву потребує водяний економайзер. Тож можемо зробити висновок, що водяний економайзер забруднюється найбільше. При порівнянні тривалості оптимального видалення сажі з фактичною тривалістю ми можемо чітко бачити, що обдувні апарати для кожної поверхні теплопередачі працюють недостатньо довго, і кожен ступінь недостатності різний. Треба збільшувати тривалість роботи обдувних апаратів кожної поверхні теплопередачі для досягнення ефективності.

Запропоновану методологію можна використовувати для розрахунку оптимальної тривалості сажообдуву та критичної точки обдувки для кожної поверхні теплообміну в реальному часі. Такий алгоритм системи підтримки прийняття рішень щодо роботи обдувних апаратів представлено на рис. 9.

Отже, процедура розробки та впровадження оптимізації сажообдувки передбачає такі кроки:

**крок 1: моніторинг забруднення золою.** На першому етапі загальний ефект сажообдувки буде характеризуватися моніторингом коефіцієнтів чистоти для кожної поверхні нагріву котла. У той же час інші відповідні термодинамічні параметри будуть контролюватись та вимірюватись у режимі реального часу;

**крок 2: розрахунок оптимізаційної моделі сажообдувки.** Оптимальний час видування сажі  $T_{обд,опт}$  і коефіцієнт критичної чистоти  $CF_{опт}$  будуть розраховуватись за формулою  $MaxB_n$ ;

**крок 3: перевірка на обмеження.** На цьому кроці будуть розглянуті необхідні обмеження процедури сажообдуву. Чи стабільне навантаження? Чи досяг критичного рівня коефіцієнт чистоти  $CF_{опт}$ ?

**крок 4: початок сажообдуву.** Якщо зазначені вище умови задовольняються, активувати обдувний апарат;

**крок 5: оптимізація часу обдувки.** Перевірка на досягнення оптимального часу сажообдуву  $T_{обд,опт}$ ;

**крок 6: завершення обдувки та перехід до наступного циклу.**

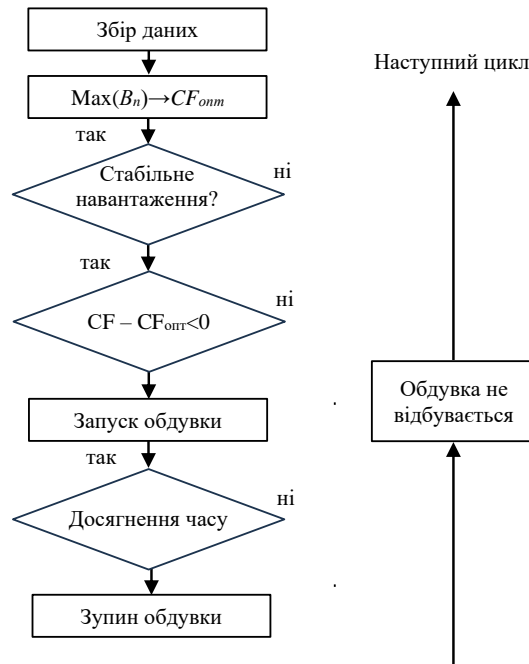


Рис. 9. Блок-схема алгоритму СППР сажобдувки

Приклади реалізації парової обдувки поверхонь нагріву котлів наведені на рис. 10 та рис.11.

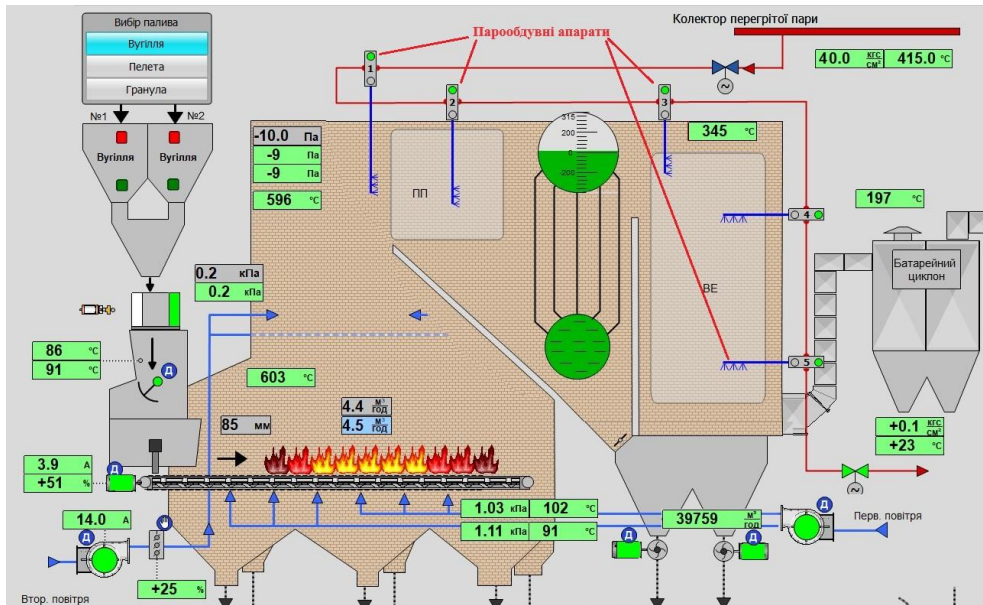


Рис. 10. Мнемосхема котла з паровими обдувними апаратами



Рис. 11. Приклад встановлення парового обдувного обертового апарата

**Висновки.** Робота сажобдувок, заснована на фіксованій частоті та тривалості спрацювання, неминуче призводить до зниження теплової ефективності або перевитрати пари. На основі онлайн-моніторингу забруднення золою вивчається оптимізація процедур застосування сажобдувок для отримання максимально чистої вигоди від очищення поверхонь нагріву.

Запропонована в цій статті математична модель для оцінки ступеня забруднення поверхонь теплообміну забезпечує безперервний оперативний розрахунок коефіцієнтів чистоти в кожній секції котла. При цьому послідовності сажобдуву мають варіативну частоту й тривалість залежно від ступеня забрудненості. Представлена методологія дає змогу в онлайн-режимі розраховувати критичний коефіцієнт чистоти CF кожної поверхні теплообміну, спрямований на оптимізацію періодичності спрацювань і тривалості роботи обдувки.

На прикладі енергетичного твердопаливного котла продуктивністю 75 т пари/год очікується економія палива, а також зменшення викидів в атмосферу за рахунок обмеження сажобдування з поверхонь нагріву лише у випадках, коли це більш імовірно приносить користь.

Розроблені алгоритми також можна застосовувати на початкових стадіях обчислень теплового балансу котла, які потрібні для точної оцінки витрати та вироблення енергії, що підтверджує цінність проведених досліджень.

### ЛІТЕРАТУРА

1. В. І. Частухін. (1980). *Тепловий розрахунок промислових паро-генераторів*. Київ: Вища школа.
2. Usón, S., Royo, J., Canalís, P. (2023). Integration of thermoelectric generators in a biomass boiler: Experimental tests and study of ash deposition effect. *Renewable Energy*.
3. Kim, K., Park, H. R., Kim, H. J., Lee, K., Hwang, W. (2023). Self-cleaning mechanisms according to the wettability of the surface and deposition material. *Applied Surface Science*.
4. Zou, H., Yuan, J. (2023). Online evaluation of the boiler energy efficiency associated with the soot blowing in coal-fired power plants. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*.
5. Qiao, Z., Cheng, M., Jin, Y. (2022). Theoretical model and dynamic wave-amplification effect of the high intensity Helmholtz sound source. *JVC/Journal of Vibration and Control*.

6. Ling, D., Li, C., Wang, Y., Zhang, P. (2022). Fault Detection and Identification of Furnace Negative Pressure System with CVA and GA-XGBoost. *Energies*.
7. Zhong, Q., Chen, Y., Zhu, B., Liao, S., Shi, K. (2022). Temperature field reconstruction method based on acoustic thermometry. Measurement: *Journal of the International Measurement Confederation*.
8. Cui, F., Qin, S., Zhang, J., Li, M., Shi, Y. (2023). A Hybrid Method for Prediction of Ash Fouling on Heat Transfer Surfaces. *Energies*.
9. Xu, L., Huang, Y., Yue, J., Xu, W., Li, Z. (2022). Soot blowing optimization for platen superheater of coal-fired power plant boiler based on heat loss analysis. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*.
10. He, K., Wang, T., Zhang, F., Jin, X. (2022). Anomaly detection and early warning via a novel multiblock-based method with applications to thermal power plants. Measurement: *Journal of the International Measurement Confederation*.
11. Shi, Y., Han, T., Cui, F., Wen, J., Qiao, G. (2022). A GM-TCN based Hybrid Prediction Method for Ash Fouling Prediction in Coal-fired Power Plant Boiler. *Proceedings*. Chinese Automation Congress, CAC.
12. Shi, Y., Li, M., Wang, J., Cui, F., Qiao, G. (2022). *Prediction of Ash Deposition on Heating Surfaces of Coal-fired Power Plant Boiler based on Dynamic Neural Network*. Proceedings of the 34th Chinese Control and Decision Conference, CCDC.
13. R. E. Chappell, J. W. Locke. (2018). *A mathematical approach to automation of sootblower controls*, in: Proceedings of the American Power Conference, XXVII, 412—422.
14. B. Pena, E. Teruel, L. I. Díez. (2019). Soft-computing models for soot-blowing optimization in coal-fired utility boilers. Zaragoza, Spain, 1657—1668.
15. Д. В. Степанов, Є. С. Корженко, Л. А. Боднар. *Котельні установки промислових підприємств*, Вінниця: ВНТУ, 2016.
16. R. S. Echerd, S. A. Zimmerman. (1987). Control of sootblowing in black liquor recovery boiler, *ISA Trans*.
17. Z. Hu, D. Matovic. (2009). *Heat flux monitoring in biomass-fired boilers: possible areas of improvement*, in: Proceedings of the LASTED International Conference on Environmental Management and Engineering.
18. E. Teruel, C. Cotes, L. I. Díez, I. Arauzo. (2005). Monitoring and prediction of fouling in coal-fired utility boilers using neural networks, *Chem. Eng. Sci*.
19. Q. G. Fan, W. P. Yan. (2007). *Boiler Principles*, China Electric Power Press, Beijing.

УДК 637.5(075.8):574.58

# METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF WASTEWATER POLLUTION FROM SLAUGHTERHOUSES

I. Oshchypok

Ivan Franko National University of Lviv

---

## Key words:

slaughterhouse,  
ecology,  
waste water,  
pollution,  
ecosystem

---

## Article history:

Received 06.10.2024

Received in revised form  
09.11.2024

Accepted 21.11.2024

---

## Corresponding author:

him1960@ukr.net

---

## ABSTRACT

The article examines the factors of sewage pollution in slaughterhouses. At the same time, an important factor is the human ability to control the load on the ecosystem operating in this environment. This impact should be evaluated from the standpoint of taking into account the processing capabilities of wastewater before self-purification. The evaluation of wastewater from slaughterhouses and the content of toxic substances in them according to complex indicators is not sufficiently systematized in Ukraine. Data on such pollution and recommendations for the selection of effective methodical approaches for their implementation were the subject of a review that was conducted for a long time in France. It is shown that the waste of production and sanitary-hygienic processing of livestock is not sufficiently controlled in the process of obtaining animal products, there are non-ecological technical solutions, the weak interest of enterprises in fulfilling ecological requirements cause significant damage to the natural environment and contribute to the increase of negative phenomena. The lack of methodological in-depth research in Ukraine in the evaluation of wastewater in the zone of influence of the urban system determines the scientific significance and relevance of such research.

The work shows the solution to the tasks of analysis and generalization of existing research approaches to the problem of ensuring the proper condition of territories from the growing load of contaminated discharges from slaughterhouses; methodical approaches and a methodology for researching their impact on the surrounding ecosystem have been formed. A whole range of indicators were considered, including the method of biological oxygen consumption, chemical oxygen demand (DCO), suspended solids (MES), Kjeldahl nitrogen (NKJ), nitrogen materials Global NGI. Important characteristics of control and disposal of emissions from slaughterhouses are given: significant organic load and biodegradability, high concentration of pollutants, taking into account both the nature of the activity and the regulatory context, providing for the reasoned use of drinking water. The composition of the mixture of wastewater from a multi-purpose slaughterhouse and the main trends in pollution of untreated wastewater are given.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-9



## МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЗАБРУДНЕНЬ СТИЧНИХ ВОД З БОЄНЬ

I. М. Ощипок, д-р технічних наук, <https://orcid.org/0000-0002-5427-3376>

Львівський національний університет ім. І. Франка

*У статті розглянуто фактори забруднення стічних вод у місцях діяльності боєнь і показано вирішення завдань аналізу й узагальнення існуючих підходів дослідження проблеми забезпечення належного стану територій від зростаючого навантаження забруднених скидів з боєнь; сформовано методичні підходи і методологію дослідження їх впливу на прилеглу екосистему. Наведені важливі характеристики контролю та знешкодження викидів з боєнь: значне органічне навантаження та біорозкладність, висока концентрація забруднюючих речовин, що враховують як характер діяльності, так і нормативний контекст, передбачаючи аргументоване використання питної води. Наведено склад суміші стічних вод багатопільової бойні й основні тенденції забруднень необроблених стічних вод.*

**Ключові слова:** бойня, екологія, стічна вода, забруднення, екосистема.

**Вступ.** У сучасних умовах діяльності м'ясої промисловості, коли закриваються великі м'ясокомбінати, важливого значення набувають бойні. Вони забезпечують дрібних і крафтових виробників м'ясом і напівфабрикатами.

Відходи виробництва і санітарно-гігієнічної обробки худоби, недостатній контроль за процесами отримання тваринної продукції, неекологічні технічні рішення, слабка економічна зацікавленість підприємств до виконання екологічних вимог завдають значних збитків природному навколишньому середовищу і сприяють наростанню негативних явищ.

Відсутність методологічних глибоких досліджень в Україні в оцінці стічних вод у зоні впливу урбосистеми визначають наукову значимість та актуальність таких досліджень.

Розглянемо бойні як підприємства, що належать до надійного знаряддя безпечної роботи в процесі отримання м'ясої сировини в належних санітарних умовах, необхідних для розширення асортименту продукції ринку. Вони стали єдиним місцем забою тварин, яке гарантує їх ретельний ветеринарний контроль при ввезенні на територію бойні та вивезенні м'яса на ринок.

Важливим аспектом під час роботи бойні є здатність людини контролювати навантаження на екосистему, яка діє в цьому середовищі, а не на нездійсненну можливість повного очищення від забруднення, кількість якого може бути прийнятною для навколишнього природного осередку, що здатне до самоочищення, якщо забруднення незначне.

Цими питаннями займається екологія. Вона також цікавиться питаннями нашого побуту і надає відповідні інструменти, щоб зрозуміти, яка шкода може бути завдана навколишньому середовищу. Цей вплив не слід недооцінювати, але необхідно враховувати переробні можливості стічної води до самоочищення. Зрештою, екологічне законодавство гарантує суспільний інтерес, що прагне забезпечити виконання завдань, не завдаючи шкоди інтересам інших.

Якісні характеристики природних вод, що використовуються для потреб водопостачання, залежать від фізичних і хімічних властивостей вихідної води, а також її бактеріального забруднення. Природна вода — складна багатоконпонентна динамічна система, її склад, до якого входять мінеральні речовини, гази, колоїдні та гру-



бодисперсні частинки, а також мікроорганізми, формується в результаті взаємодії води з навколишнім середовищем — гірськими породами, ґрунтом, атмосферою.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Під час роботи бойні застосовується питна і промислова вода. Питна вода — це вода високої якості для використання в побуті і пиття людиною, яка повинна відповідати мікробіологічним вимогам. Якість води встановлюється ДСТУ 7525:2014 і ДСанПіН 2.2.4-171-10. Для обробки туш у забійних цехах використовується питна вода з відповідними гігієнічними вимогами, встановленими правилами.

Технічну воду можна розглядати в двох аспектах:

- з одного боку, вода, яка надходить у процес підготовки туші та не вступає з нею в контакт. Це стосується використовуваної води для охолодження машин або виробництва пари. Це також вода, яка подається пожежними гідрантами;

- з іншого боку, вода, отримана в результаті процесу підготовки і переробки худоби, наповнена органічними речовинами. Вона являє собою промислові стоки від забою.

Стосовно оцінки стічних вод з боєнь і вмісту в них токсичних речовин, то в Україні відсутні систематизовані дані таких забруднень і рекомендації щодо вибору ефективної методики їх проведення. Відповідні дослідження проводились за кордоном, зокрема у Франції [9—18]. Отримані результати з великим ступенем імовірності можуть прийматися для оцінки забруднюючого впливу стоків з боєнь на екологію районів їх розташування.

Дослідженню процесів сталого розвитку територій присвячені наукові праці таких іноземних та вітчизняних вчених, як: Ф. Джовані [5], А. Оніші [6], Р. Блінк [7], Г. Кларк [8], М. Долішній [2], З. Герасимчук, І. М. Вахович [3], В. Я. Шевчук [4].

**Мета досліджень:** обґрунтувати методичну базу та методологію дослідження впливу забруднених скидів з боєнь на прилеглу екосистему, проаналізувати й узагальнити існуючі підходи до дослідження проблеми забезпечення належного стану територій від шкідливого навантаження.

**Матеріали і методи.** У роботі використовувалися положення нормативного законодавства, відомчі документи та звіти. Для вирішення поставлених завдань приймалась сукупність загальнонаукових, емпіричних, теоретичних і спеціальних методів. Загальнонауковий метод аналізу — формування наукових проблем, узагальнення сучасних наукових висновків про стан системи місць розміщення бойнь. Узагальнення сучасних наукових знань про екологічну систему, антропогенне навантаження та рівень забруднення.

Узагальнення сучасних наукових знань про антропогенні навантаження та забруднення шкідливими компонентами навколишнього середовища забрудненими стоками, передумовами формування урбосистеми, рівні антропогенних навантажень.

Системний аналіз та інтеграція суб'єктивних, об'єктивних і структурно-функціональних аспектів (з метою аналізу стану територіальної системи як комплексу). Стан екологічної безпеки та визначення типових індикаторів для моніторингу критичних явищ у навантажених зонах.

Оцінку забруднень проводять на основі методу біологічного споживання кисню. Біологічне споживання кисню (БСК) — це термін, який означає кількість кисню, необхідного для окислення речовин аеробними бактеріями, біологічно зброджувана органіка [17]. Це ступінь забруднення води органічними речовинами, що розкладаються природними біологічними шляхами (мікрофлора приймального середовища)

або антропогенного (очисні споруди, біологічні стічні води). Фактичне виділення органічних речовин у воду, придатну для використання аеробними бактеріями, які в ній природно присутні і супроводжується метаболізмом органічних речовин бактеріями, споживаючими кисень. БСК найчастіше вимірюють після п'яти днів ( $BCK_5/BOD_5$ ), а отриманий результат є об'ємом розчиненого кисню, спожитого бактеріями протягом цих п'яти днів, виражених у міліграмах кисню на літр води. Проте це п'ятиденне вимірювання не є достатньо обґрунтованим: можна вважати, що деградація органічної речовини здійснюється у дві фази [16]: «вуглеводнева» фаза, починаючи з відбору проб води та протягом двадцяти днів при температурі 20 °С, дозволяючи знищити сполуки вуглецю, накладені з фазою нітрифікації, що не починається до 6—10 днів і продовжується після двадцятого дня. Незважаючи на це, вважаємо, що кінцева фаза БСК досягається на двадцять перший день.

Хімічна потреба в кисні (DCO) означає концентрацію забруднюючих речовин неорганічної та (або) органічної природи, які не піддаються біологічному розкладанню водними мікроорганізмами у водних біотопах [17]. DCO стічних вод є важливим показником, тому що через коефіцієнт окислюваності  $BOD_5/DCO$  дає змогу оцінити здатність стічних вод очиститися за допомогою біологічного процесу. Наявність крові, шламу або стеркоруальних речовин у воді, відходів забійного процесу призводить до середнього навантаження DCO води близько 3 г·л<sup>-1</sup> [18].

Завислі тверді речовини (MES). Суспензії MES представлені всіма мінеральними та (або) органічними частинками, що містяться в забрудненій воді [17]. Завислі тверді речовини є основною причиною каламутності води. Вони можуть мати цілком природне походження. Вимиті частинки глинисто-гумусового комплексу проточною водою, відірвані від ґрунту чи органіку, що надходить з біоценозу водотоку.

Суспензії бувають двох типів [18]:

- декантні матеріали, які осідають у стані спокою протягом певного періоду часу, зазвичай протягом двох годин;
- колоїдні матеріали, які являють собою дрібні частинки (від 10<sup>-2</sup> до 10<sup>-8</sup> мм), що не декантуються. Натепер неможливо вилучити речовини жирового походження з рідких стоків. Можна намагатися замінити екстракцію хлороформом екстракцією гексаном, проте вона використовується набагато рідше.

Азот К'ельдаля (NKJ) — це сума азоту, що міститься в зразку в органічній речовині та азоту в аміачній формі (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) [14]. Він визначається методом К'ельдаля, який полягає в кислотному розщепленні білків і поліпептидів, що містяться в зразку, з подальшим вивільненням аміаку підлугуванням середовища. Саме в цій аміачній формі дозується азот. Результат має бути нульовий або неповний для азидів, азосполук, гідразонів, гідразинів, гідроксиламінів, нітритів і нітратів. Результатом дозування буде азот NKJ, виражений як концентрація азоту N.

Азотні матеріали (MA) називають азотом Global NGI, які визначаються сумою результатів визначень азоту NKJ, нітратів NO<sub>3</sub> і нітритів NO<sub>2</sub>.

**Результати досліджень.** Досліджувалися забруднюючі навантаження та потоки викидів з боєнь у Франції в 1999 році. Діяльність боєнь дала змогу переробити майже 3 800 000 тонн м'яса всіх видів разом. Враховуючи дослідження FNEAP 1996 р. [10], яке визначило середнє споживання води на бойнях в 5 м<sup>3</sup> на тонну обробленої худоби. Така діяльність призводить до викидів 19 млн м<sup>3</sup> необроблених стоків. Зважаючи на всі обсяги переробки, слід зазначити, що харчова промисловість займає провідне місце зі скидання окисних матеріалів і зважених частинок, і друге за азотом та фосфором після хімічного сектору (парахімія — нафта) [16].

Необроблені стоки від будь-якого функціонування з обробки продуктів тваринництва мають загальну та специфічну характеристику в панорамі їх очищення: навантаження органічними речовинами у вигляді азоту і жирів (оцінюються шляхом вимірювання речовин екстрагованих хлороформом — SEC).

Однак також можна навести деякі інші характеристики, які є такими ж важливими для контролю та знешкодження:

- значне органічне навантаження та біорозкладність;
- висока концентрація забруднюючих речовин, що враховує як характер діяльності, так і нормативний контекст, передбачаючи аргументоване використання питної води;
- значну кількість промивної води у формуванні стічних викидів.

Стоки, характерні для боєнь, містять кров [11], яка утворюється в місці знекровлення. Вона складає в середньому 7% від маси туші. Кров'ю насичується вода, в якій міститимуться білки, але мало вуглеводів і ліпідів: суха речовина різна — від 15 до 20%. По суті, отримуємо дві фази, яку можна розділити центрифугування або декантацією:

- плазма: циркулюючі білки та мінеральні солі;
- форменні елементи, що складаються з еритроцитів, глобули білків і тромбоцитів тощо.

Результати середнього відсоткового аналізу одного літра цільної крові:

- вода: 80%;
- білки: від 12,5 до 18% (незамінні амінокислоти);
- інші: від 2 до 7,5% (ліпіди, глюкоза, солі).

Органічне навантаження з 1 л крові становить:

- 320 г DCO;
- 25 г НКJ.

Вода для очищення травної системи худоби: спорожнення і очищення шлунка і кишечника породжує в жуйних рідку фракцію (розчинені речовини шлунково-кишкового тракту) в значній кількості (30% травного вмісту, тобто від 15 до 25 л на велику рогату худобу), з надто значними забрудненнями (30 г DCO на літр); у свиней — слиз (200 г л<sup>-1</sup> DCO — тонкий кишківник свині — SEMAGREF) і жири (1 г жиру = 2,5 г DCO), розчинені в гарячій воді після ошпарювання, що являють собою значне органічне навантаження.

Рідкі стоки від роботи бойні, якими б вони не були, безпосередньо залежать від кількості споживаної води, яка містить речовини, що забруднюють доквілля. Визначення таких викидів ґрунтується на репрезентативних вибірках, дані яких виражені в обсягах органічного навантаження, пов'язаних з кількістю переробленої худоби різних видів.

Стічні води багатоцільової бойні складаються (рис. 1) із суміші.

Ці стоки найчастіше мають червонуватий відтінок і являють собою значне навантаження різних складових: обрізь, згустки крові, шматочки рогів і копит, фекалії, солону тощо.

Важко встановити довідкові дані фізико-хімічних характеристик утворених забійних стоків. З одного боку, неможливо через витoki в умовах роботи різних боєнь з дуже високою потужністю забою. З іншого боку, щоденна концентрація викидів залежить від обсягу спожитої води, а також кількості очищеної води.

Основні тенденції забруднень необроблених стічних вод узагальнено в табл. 1 [9].

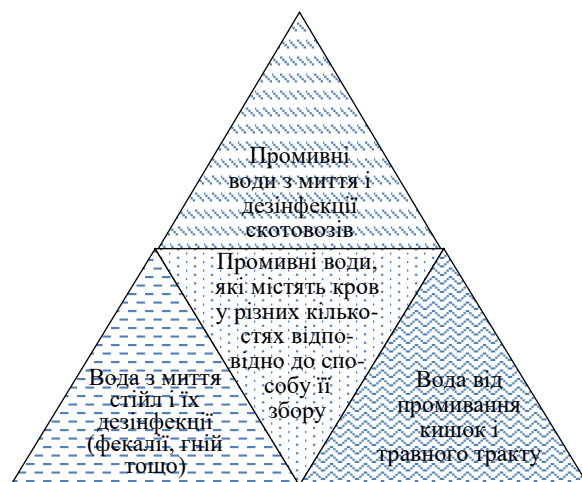


Рис. 1. Стічні води багатоцільової бойні

Таблиця 1. Коефіцієнти викидів бойні

Параметри	Дані СЕМАГРЕФ	Результати АЕЛБ
Об'єм (л. кг <sup>-1</sup> )	7,7	5
ДВО <sub>5</sub> (г. кг <sup>-1</sup> тушу)	13,2	9
БСК (ДВО)	31	23
MES	11,1	7,1
NGL	1,6	1
PT	0,13	0,3
SEC	5,2	2,5

Дослідження СЕМАГРЕФ протягом періоду з 1982 по 1985 роки, зокрема робота SOUCHON, яка в основному стосується діяльності забою і нутрування на багатоцільових бойнях (велика рогата худоба, свині), збір вимірних або екстрапольованих значень [9] водним агентством Луара-Бретань у рамках моніторингу виплат за забруднення м'ясопереробною промисловістю. Дослідження були зосереджені на заході Франції, де ці сектори складають понад 50% національного виробництва.

Останні значення, які відповідають середнім значенням, проведених у період 1982/2000 рр., тобто за 19 років, слід розглядати з обачливістю, оскільки відсутні систематизовані методи проведення досліджень: середні, одноразові покази, екстраполяції для компаній, що підлягають оцінці рівнів забруднення (за допомогою розрахункової таблиці Єдиної ставки ТЕФ, доданої до указу від 28 жовтня 1975 р.). Крім того, рівень функціонування не враховується з точки зору виробленого м'яса або переробленої худоби, спеціалізації та продуктивності інструменту. Всі ці дані означають велику варіабельність результатів, отриманих у контролі скидів забруднюючих речовин.

Дані СЕМАГРЕФ датуються до 1983 р., тобто раніше запровадженого нормативного ліміту споживання води 6 літрів на 1 кілограм обробленої туші (постанова від 1 лютого 1983 р. скасована і замінена указом від 1 лютого 1998 р. [15]). Однак ці дані найкраще відображають реальність на основі неперевіраних неочищених стічних вод порівняно з вимірюваннями АЕЛБ (стоки просіюють і декантують протягом 2 год).

**Висновок.** Бойні є основним осередком забезпечення здоров'я споживачів на території їх роботи, тому в контексті навколишнього середовища повинні вживатись заходи щодо збереження екосистеми, яка постійно стає все більш важливою для суспільного життя. Бойні як постачальники м'яса в громадському харчуванні гарантують безпечну сировину для приготування страв. Проте місцеві громади мають бути не лише споживачами, а й гарантами збереження водних ресурсів, оскільки це спільна спадщина, збереження якої має бути ефективним. Стосовно екології така діяльність людини має передбачати бережливий вплив на навколишнє середовище, проживання в якому повинно бути безпечним і комфортним.

Якщо вода з боень скидатиметься у водойму без належного рівня очищення, наявні в ній забруднюючі речовини, що характеризуються значеннями біологічної та хімічної потреби в кисні (БСК<sub>5</sub>/BOD<sub>5</sub> і DCO), приведуть до зниження вмісту розчиненого кисню у водоймі — її евтрофікації. Суспензії MES представлені всіма мінеральними та (або) органічними частинками, які є основною причиною каламутності води, тому підлягають очищенню. Азот Global NGI, який визначається сумою азоту NKJ, нітратів NO<sub>3</sub> і нітритів NO<sub>2</sub>, необхідно досліджувати методом К'ельдаля. Методологію дослідження за наведеними показниками слід застосовувати, зважаючи на склад забруднень цих вод і доцільність їх очищення з урахуванням санітарно-гігієнічних і техніко-економічних показників. Дані досліджень стічних вод наведені в статті можуть прийматися для розрахунку забруднюючого впливу стоків з боень на екологію районів їх розташування.

Діагностований екологічний стан і методологія визначення гостроти змін у біосистемах оцінена на основі стану урбосистеми свого часу у Франції за соціо-економічними, екологічними показниками. Проаналізовані їх деструктивні впливи на навколишнє середовище, які з великою ймовірністю можуть бути застосовані у нас для оцінки стічних вод з боень.

Показаний структурно-функціональний стан навколишнього середовища, визначені показники оцінки інтегрального рівня екологічної безпеки за індикаторами ресурсного, біосферноцентричного та антропоцентричного блоків для формування матриці критичних станів прилеглих територій. Обґрунтовані методологічні підходи для проведення аналізів під час роботи боень з урахуванням їх соціо-економічного й екологічного стану, виявлені закономірності їх формування.

На основі отриманих даних слід удосконалювати систему комплексного моніторингу зони впливу урбосистеми діяльності боень для управління її сталим розвитком.

## ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Наказ від 23.10.2014 № 1257.
2. Долішній, М. І. (2010). *Сучасні проблеми соціально-економічного розвитку регіонів*: монографія. Дніпропетровськ: ІМА-прес.
3. Герасимчук, З. В., Вахович, І. М. (2002). *Організаційно-економічний механізм формування та реалізації стратегії розвитку регіону*. Луцьк: ЛДТУ.
4. Шевчук, В. Я., Сахасв, В. Г. (2004). *Сталий розвиток і економіка природовідтворення*: монографія. Київ: Геопрінт.
5. Jovane, F., Yoshikawa, H. (2008). The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing. *CIRP Annals. Manufacturing Technology*, 57, 641—659.
6. Onishi, A. (2005). Futures of global interdependence (FUGI) global modeling system: Integrated global model for sustainable development. *Journal of Policy Modeling*, 27(1), 101—135.

7. Clark, G. (2007). Evolution of the global sustainable consumption and production policy and the United Nations Environment Programme's (UNEP) supporting activities. *Journal of Cleaner Production*, 15(6), 492—498.
8. Jegatheesan, V., Liow, J. L., Shu, L., Kim, S. H., Visvanathan, C. (2009). The need for global coordination in sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 17(7), 637—643.
9. AGENCE DE L'EAU LOIRE BRETAGNE. (2001). Bilan de la consommation d'eau et de la production d'effluents dans les industries de transformation de produits d'origine animale, période 1984—2000.
10. AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE. (1997). L'énergie, l'eau et les déchets dans le secteur des abattoirs des animaux de boucherie, 7, 35—55.
11. HOULIER, B. (1998). Récolte et traitements du sang des abattoirs: description des procédés, Cemagref Clermont Ferrand DRCF, Cemagref Editions, Antony, 148.
12. LE BÂCLE, C., BALTU, I., LEPRINCE, A. (2000). Risque de transmission de l'agent de l'encéphalopathie spongiforme bovine aux travailleurs de la filière viande de boucherie. Documents pour le médecin du travail, 4e trimestre, 84, 1—20.
13. LECLERC, H., OGER, (1975). C. Les eaux usées des abattoirs et leur importance épidémiologique. *Rev. Epidém., Méd. Soc. Et Santé Publ.*, 23(7—8), 429—444.
14. LEMAIRE, F. C., LEMAIRE, E. (1975). Dictionnaire de l'environnement, Marabout Université, Verviers, 317.
15. MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT. (1998). Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. *Journal Officiel de la République Française*, 52, 3247.
16. MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT. (1998). Principaux rejets industriels en France — bilan de l'année, Paris, 240.
17. RAMADE, F. (1998). Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau, Ediscience International, Paris, 786.
18. AGENCES DE L'EAU, MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT. (1996). Prévention des pollutions accidentelles dans les abattoirs, les équarrisages, les laiteries, les sucreries, Paris, 62.
19. ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною».

УДК : 615.453.6.014

## THE INFLUENCE OF PRESSING MODES ON THE INDICATORS OF STRENGTH AND ABRASION OF TABLETS

**O. Zomenko**

*National University of Food Technologies*

---

### Key words:

rotary tablet presses, crushing strength, abrasion resistance, operational parameters

### Article history:

Received 27.06.2024

Received in revised form 02.09.2024

Accepted 05.09.2024

### Corresponding author:

zemenkoaleksandr@gmail.com

---

### ABSTRACT

The pharmacopoeial properties of tablet dosage forms are determined by crushing strength, abrasion resistance, weight changes, geometric dimensions, thickness, and disintegration time. These indicators depend on the pressing pressure, wear of guiding elements, excessive pressing speed, and the physico-chemical and mechanical properties of the tableting mass components. Increased pressing pressure improves mechanical strength while lengthening disintegration time. However, higher pressing pressure and excessive tablet press speed cause wear of machine components, reducing their operational lifespan and negatively affecting tablet quality. Specific dependencies have been established between the parameters of pressing pressure, tablet press speed, number of working cycles and the resulting indicators of tablet strength and abrasion resistance. Tablets were produced using a rotary tablet press, with variations in pressing pressure and press speed. The crushing strength and abrasion resistance were measured using a TVT model machine from Erveka. The equipment allowed us to accurately assess correlations between operational parameters and tablet quality characteristics. Research conducted using the Pearson square method revealed direct correlations between the change in pressing pressure and tablet strength. A similar direct relationship was observed between the speed of tablet presses and both the strength and abrasion resistance of tablets. Furthermore, increased equipment wear was directly linked to a loss of tablet strength caused by weight variations in the produced tablets. The findings indicate strong correlations between pressing pressure, operational speed, cycle numbers, and key quality indicators of tablets. Decreased mechanical strength and increased abrasion were primarily due to deviations in pressing pressure, elevated operational speed, and extended operational cycles. By determining the optimal parameters of compression pressure and compression speed, it is possible to produce tablets that meet pharmacopoeial standards and meet DFU requirements.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2020-27-10

---

## ВПЛИВ РЕЖИМІВ ПРЕСУВАННЯ НА ПОКАЗНИКИ МІЦНОСТІ І СТИРАННОСТІ ТАБЛЕТОК

О. С. Зьоменко, здобувач PhD, <https://orcid.org/0009-0002-7370-8870>

Національний університет харчових технологій

*Фармакопейні властивості таблетованих лікарських форм визначаються міцністю до роздавлювання, стійкістю до стирання, змінами ваги, розмірами, товщиною і часом розпаду. Ці показники залежать від тиску пресування, швидкості роботи пресу, зносу обладнання і властивостей компонентів маси. Мета дослідження – визначити зв'язки між тиском, швидкістю, кількістю циклів і показниками міцності та стирання. Дослідження проводили на ротаційному пресі з вимірюванням міцності та стирання. Методом квадратів Пірсона виявлено кореляцію між тиском і міцністю, а також швидкістю пресу і стиранням. Зношування обладнання знижує міцність через зміни ваги таблеток.*

**Ключові слова:** ротаційні таблетпреси, міцність до роздавлювання, стійкість до стирання.

**Вступ.** Серед усіх лікарських форм таблеткам надається більше переваг завдяки їх фармацевтичним, експлуатаційним і виробничим властивостям [1]. Таблетки — це система доставки ліків, у складі якої є лікарська і допоміжні речовини [2]. Виробництво таблетованих форм проходить через три агрегатних перетворення, під час яких шляхом механічного напруження обробляються складові компоненти таблетки, а саме: діюча речовина, допоміжна речовина, лубрикант, зв'язуючі компоненти. Зміни параметрів механічного впливу можуть бути причиною змін властивостей компонентів таблетки, а також можуть впливати на механічні характеристики, такі як міцність [2] і стирання [2].

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** При здійсненні механічних маніпуляцій необхідно усвідомлювати, що збільшення компресії може сприяти посиленню механічної міцності, але за даними деяких фахівців можуть погіршувати вивільнення лікарської речовини під час надходження її в організм. На прикладі удосконаленої технології виготовлення таблеток ізосорбиду динітрату пресування під великим тиском дало змогу отримати задовільні властивості щодо стирання, але стало причиною часткового руйнування поверхні матричних гранул [4]. Зменшення тиску пресування призвело до зниження показників стирання, хоча й запобігало руйнуванню плівкового покриття [3, 13].

Виробництво таблеток у фармацевтичній промисловості здійснюються на пресах з гранульованого або порошкоподібного матеріалу. Це роторні пресувальні машини (РТМ), оснащені матрицями і парами пуансонів, які автоматично відтворюють цикл таблетування з двох послідовних етапів: дозування компонентів таблетки і її пресування з автоматичним виштовхуванням і скиданням. Методом прямого пресування формуються таблетки з негранульованих порошків. Цей метод має певні переваги, тому що дає змогу пропустити технологічні операції, пов'язані з гранулюванням порошків, що сприяє мінімізації вартості і підвищенню ефективності [1, 5, 13]. Але його впровадження у виробництво таблеток є повільним, оскільки оптимальних фармацевтичних інгредієнтів для прямого пресування недостатньо [5]. Основними вимогами до компонентів є ізодіаметрична форма кристалів, сипучість, вологість і здатність до пресування, а також низька адгезія до прес-інструменту [5]. Такими властивостями володіють деякі негранульовані порошки: натрію хлорид, калію йо-



дид, натрію і амонію бромід, гексаметилентетрамін, бромкамфара [1]. Активні фармацевтичні інгредієнти повинні мати фізико-механічні властивості, наприклад, кубічна форма порошкоподібних речовин має кращі характеристики для прямого пресування. За допомогою мікроскопії можна встановити форму частинок порошоків та їх розміри, вони можуть бути у вигляді голочок, паличок, пластинок, довгастих призм, сферичних тіл [5, 8]. Важливою характеристикою є текучість порошку або його здатність рівномірно висипатись із живильника, що обумовлено чистотою речовини, густиною, розмірами частинок і електростатичними силами взаємодії між ними. За таких умов важливим компонентом таблетки стають допоміжні речовини, до яких також висуваються певні вимоги. Так, допоміжні речовини повинні мати плинність, високу здатність до зв'язування, а також покращувати міцність і позитивно впливати на вивільнення лікарської речовини. Пряме пресування вимагає використання декількох допоміжних речовин, що може стати додатковою проблемою сегрегації або несумісності [5]. На сьогодні найбільш поширеною допоміжною речовиною є лактоза та її продукти [5], вона може зустрічатись в  $\alpha$  і  $\beta$  фракціях [6]. Марки лактози відрізняються формою і розмірами частинок, фракційним складом, характеристиками плинності і спресованості [5]. Різні форми мають різну температуру плавлення, розчинність і твердість. Наприклад, просіяна  $\alpha$ -лактоза моногідрат добре пресується, а розмелена використовується у вологому гранулюванні [5, 7]. Спрямована кристалізація, за допомогою якої можна отримати речовини в кристалах із заданою сипучістю, пресованістю і вологістю і так підготувати компоненти до прямого пресування. Таким методом отримують ацетилсаліцилову кислоту і аскорбінову кислоту [1]. Фахівці стверджують, що покращення властивостей таблеток ацетилсаліцилової кислоти досягається при використанні Ludipress у кількості 12% від маси таблетки або Cellactose 80 у кількості 10% чи Pharmatose DCL-21 у кількості 8%. При використанні як допоміжних речовин метаморфіну 10% Cellactose 80 або 8% MicroceLac 100 можна отримати таблетки з бажаними значеннями міцності і стирання. Науковці навели дані щодо важливості комбінованого застосування допоміжних речовин для отримання препаратів з оптимальними показниками міцності і стирання [5, 6].

Як допоміжні речовини використовуються полімери, які в таблетках можуть проявляти властивості зв'язуючих речовин, дезінтеграторів, модифікаторів вивільнення ліків, наповнювачів, що безпосередньо пресуються, плівкового покриття, емульгаторів, суспендуючих агентів загусників, гелеутворювачів, наночастинок тощо [2, 11].

Виготовлення таблеток вимагає розуміння механічної дії при пресуванні таблеток. Невеликі коливання в компонентах таблетки, а також тиск під час прямого пресування впливають на властивості кінцевого продукту [13].

Відомо, що фармако-технологічні властивості таблетованої лікарської форми багато в чому залежать від тиску, який прикладають для її одержання. Вважається, що оптимальною є маса для таблетування, яку можна пресувати в широких діапазонах значень тиску, а одержані при цьому таблетки відповідають вимогам ДФУ (Державної фармакопеї України): однорідність вмісту діючої речовини, однорідність маси, час розчинення [9].

Пресування таблеток залежить від вільного тиску на пуансони, бокового тиску стінок матриці, коефіцієнта зовнішнього тертя пресованої таблетки по стінках матриці, температури пресованого матеріалу. Підвищення питомого тиску веде до збільшення механічної міцності і подовження часу розпаду таблеток [1, 5]. Тиск пресу-

вання впливає не тільки на якісні показники таблеток (міцність, розпадання тощо), а й на зношення, тривалість прес-інструменту таблетувальної машини [1, 2, 9]. Під спресованістю розуміють здатність порошків або гранул набувати і зберігати форму, яку вони отримали під тиском [10]. Спресованість характеризує здатність частинок речовин, які входять до складу таблеток, до когезії або до взаємного механічного зчеплення з утворенням міцної структури. Методів визначення спресованості немає, але непрямою оцінкою цього параметра є визначення міцності таблетки до стискання [10]. Тиск пресування впливає не тільки на якісні показники таблеток (міцність, розпадання тощо), а й на зношення, тривалість використання прес-інструменту таблетпресу [11].

Під час прямого пресування відбувається дія тиску на шари порошку, що впливає на його ущільнення. Ущільнення сприяє консолідації частки системи тверде тіло—газ унаслідок сили пресування, яка прикладається. Під час зменшення об'єму гранул унаслідок пресування зростає тиск, що викликає щільне укладання частинок порошку і консолідації, оскільки сила зростає до такої межі, де вже відбувається деформація частинок, що викликає їх механічну міцність. Результатом цього є взаємодія між частинками, що призводить до створення міцного зв'язку. Консолідація головним чином відповідає за збільшення механічної міцності порошкового шару під дією зростаючої стискаючої сили [2, 10]. Польськими фармацевтами були проведені дослідження вивчення оптимального режиму пресування для одержання якісних таблеток екстракту цикорію і кукурудзи. Дослідники вивчали вплив тиску пресування на стійкість таблеток до роздавлювання, розпадання і стирання в установці псевдорозрідженого шару [2]. Було встановлено, що якість таблеток екстракту цикорію і кукурудзи, які одержали пресуванням з попереднім гранулюванням, залежать від зміни режимів роботи прес-машини. Пресування таблеток обраного складу здійснювали в межах тиску 50—500 МПа. Кожну серію таблеток, спресованих при певному тиску, досліджували на стійкість до роздавлювання, стирання. Науковці прийшли до висновку, що природа зв'язуючої додаткової речовини здійснює вплив на те, що тиск стискання впливає на міцність і стирання. Так, у дослідженнях закордонних фахівців вказується, що зростання тиску компресії може викликати розшарування, що пов'язують з впливом надмірного тиску на розплющування гранул, які втрачають здатність взаємодіяти між собою [10, 15].

Товщина таблетки і її діаметр є параметрами розміру таблетки, також товщина визначає твердість таблетки. Занадто тонкі таблетки нестійкі і мають занижену міцність. Оцінити міцність таблеток можна за їх стиранням та стійкістю до роздавлювання, які повинні знаходитись в межах і бути не більше 1,0% та не менше 30 Н згідно з даними ДФУ. Зв'язувальні речовини: полівінілпіролідон (ПВП К30) та натрій-карбоксиметилцелюлоза (Na-КМЦ), підвищують міцність, що підтверджено меншим стиранням та найбільшим значенням стійкості до роздавлювання порівняно з таблетками з кукурудзяним крохмалем, крихкість яких була завищена (1,38%) [12].

При створенні таблеток з оболонкою останнім моментом є нанесення покриття за допомогою псевдорозрідженого шару, успішне проведення якого пов'язано з міцністю таблетки до стирання, тому що порошок, який утворився, може проникнути у вологу плівку і деформувати поверхню таблетки. Отже, поряд із дотриманням оптимальних параметрів тиску пресування важливим є дотримання оптимальних режимів роботи установок псевдорозрідженого шару [8].

Розшарування таблеток може виникати внаслідок неоптимальних режимів пресування, при надмірній компресії, пресування при напруженнях, вищих за зону текучості, руйнування структури за рахунок тертя при виштовхуванні [3].

**Мета дослідження:** визначити вплив тиску пресування, частоти обертання ротора таблетпресу та кількості циклів пресування на міцність і стирання таблетки, а також встановити кореляційні зв'язки між цими показниками.

**Матеріали і методи.** Двокоопклі, круглі таблетки з кислоти ацетилсаліцилової одержували на настільному таблетпресі типу НТМ-01Е пуансонами діаметром 7 мм і оцінювали за такими показниками якості: стійкість до роздавлювання, стирання.

Вплив режимів роботи оцінювали за технологічними характеристиками таблеток за такими параметрами: міцність і стирання. Визначення впливу тиску пресування на показники стирання та міцності проводили по моделі Хеккеля, за допомогою якої визначали параметри стискання, які дають змогу отримати продукт фармакопейної якості [10].

Визначення стирання проводили згідно з ДФУ на пристрої для визначення стирання таблеток при швидкості 20 об/хв. Для цього завантажували в барабан таблетки, які перед цим зважували. Проводили 100 обертів барабану, після чого таблетки вилучали з барабана, видаляли пил. Стирання визначали за формулою:

$$\Pi = \frac{P_{\text{поч}} - P_{\text{кін}}}{P_{\text{поч}}} \times 100, \quad (1)$$

де  $\Pi$  — стирання, %;  $P_{\text{поч}}$  — маса таблеток до стирання, г;  $P_{\text{кін}}$  — маса таблеток після стирання, г.

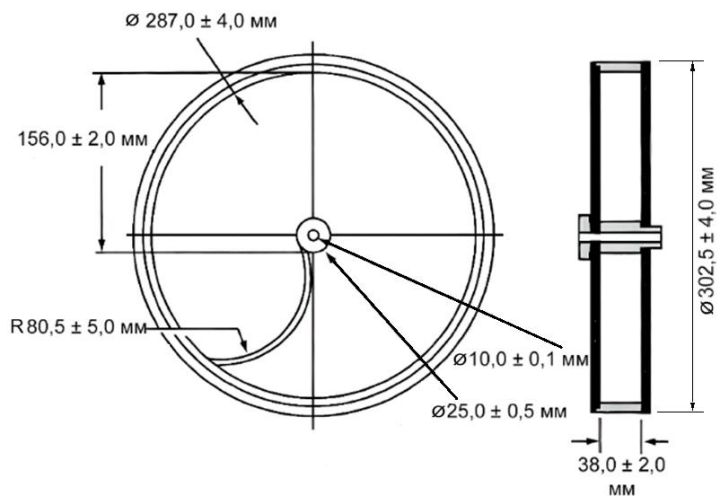


Рис. 1. Пристрій для визначення стирання таблеток

Міцність таблеток визначали на приладі ТВТ фірми «Ервека» (Німеччина) [12]. Таблетки розташовуються ребром між зажимами з урахуванням подільної риски. Міцність таблетки визначається за силою, при якій таблетка руйнується.

**Результати дослідження.** Результати пресування визначаються початковими характеристиками компонентів майбутньої таблетки. До параметрів, які визначають технологічні характеристики таблеткової маси, відносять: сипкість, насипну щільність, кут природного укосу, пресувальність, вологість і фракційний склад. Під час експериментального виробництва таблеток використано порошок кислоти ацетилсаліцилової виробництва Shandong Xihua Pharmaceutical Co. Ltd., Китай [13].

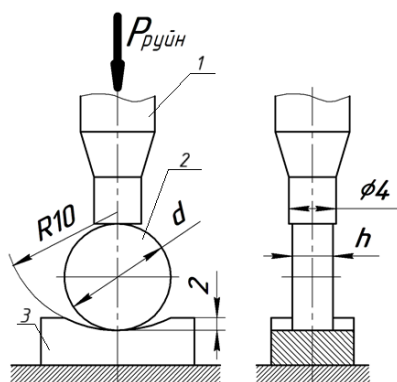


Рис. 2. Схема визначення міцності таблетки: 1 — поршень; 2 — таблетка; 3 — призма фіксації;  $P_{руйн}$  — сила руйнування

Діапазон тиску пресування, при якому отримували таблетки фармакопейної якості, склав: в межах від 40 до 320 МПа. Зафіксовано, що тиск початку пластичної деформації —  $256,41 \pm 18,00$  МПа. Тиск пресування менший за 100 МПа є причиною виходу неміцних таблеток. Оптимальний тиск для поєднання параметрів міцності та стирання знаходиться в діапазоні від 100 до 200 МПа [10]. Результати впливу тиску пресування на міцність показано на рис. 3.

Така закономірність пояснюється тим, що таблетка не може зменшувати висоту постійно. При перевищенні певного значення тиску пресування таблетка не змінює розмір, і, відповідно, її міцність змінюється незначно.

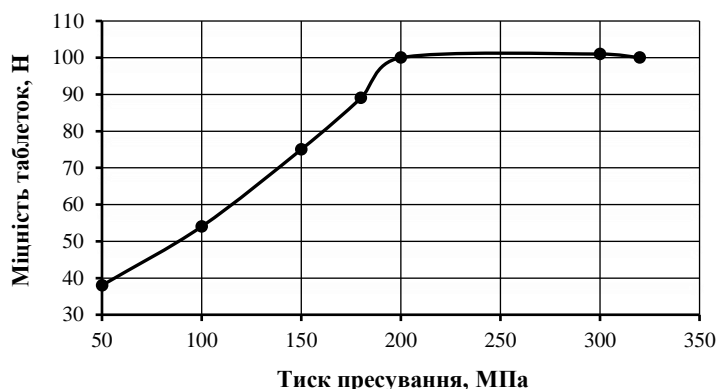


Рис. 3. Вплив тиску пресування на міцність таблеток

Вплив тиску пресування на стиранність таблеток представлено на рис. 4.

Аналіз наведених даних свідчить, що, починаючи з тиску пресування 50 МПа, таблетки залишалися цілими в процесі випробування на стирання. При зростанні тиску компресії від 50 до 90 МПа стирання таблеток зменшується від 0,14 до 0,06%; із підвищенням тиску пресування до 180 МПа стирання змінюється незначно, а подальше підвищення тиску призводить до підвищення стирання. Це пояснюється руйнуванням структури таблетки за високих тисків пресування [14, 15].

Аналогічні результати отримані іншими дослідниками: механічна міцність таблеток суттєво збільшується при зростанні питомого тиску пресування від 50 до 150 МПа,

при цьому міцність зростає в середньому на 50—145 Н [16].

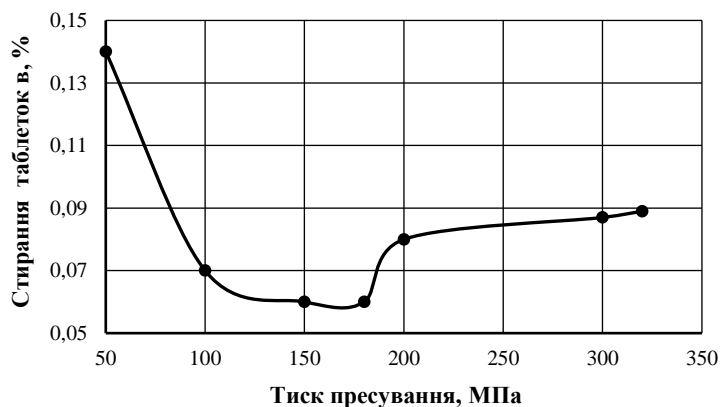


Рис. 4. Вплив тиску пресування на стирання таблеток

При подальшому збільшенні тиску пресування зміна показників міцності таблеток перебуває в межах 20—40 Н. Зі збільшенням питомого тиску пресування до 500 МПа стиранність таблеток екстракту цикорію і кукурудзи поступово зменшується, досягаючи мінімального значення 0,19% [16].

Під час роботи роторних таблетпресів рівномірне пресування відбувається при рівномірному збільшенні тиску. Але при значних перевагах метод прямого пресування має небажані результати: зростання тиску і зміни швидкості пресування можуть стати причиною недостатньої фармакопейної якості препаратів [14, 17]. Високий тиск і висока швидкість пресування можуть викликати прилипання і відшарування верхньої або нижньої опуклої частини. Зниження частоти обертання ротора таблетпресу знаходиться в прямій залежності між показниками фармакопейної якості таблеток: стирання і міцності, що продемонстровано на рис. 5.

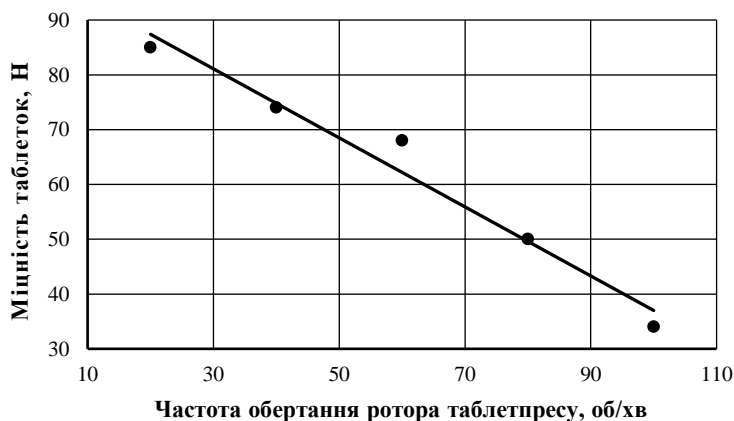
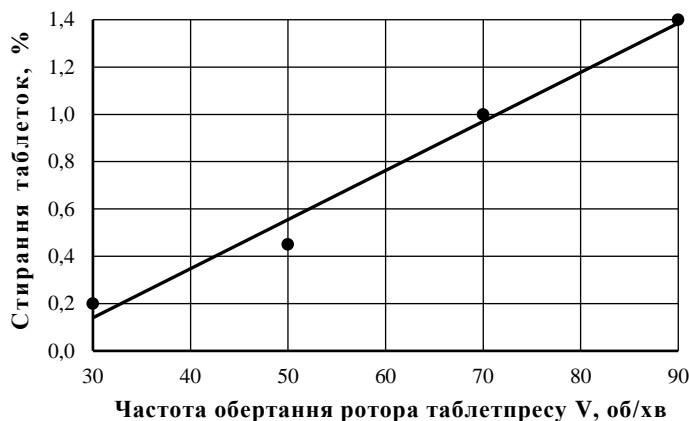


Рис. 5. Міцність таблеток у залежності від швидкості обертання ротора таблетпресу

Швидкість пресування може впливати на нерівномірність заповнення матриці, що є важливим для кінцевої якості таблеток та їх однорідності. Нерівномірність заповнення матриці пов'язана із силою пресування, оскільки відстань між пуансонами в компресійному блоці, зазвичай, фіксується під час поточного виробничого проце-

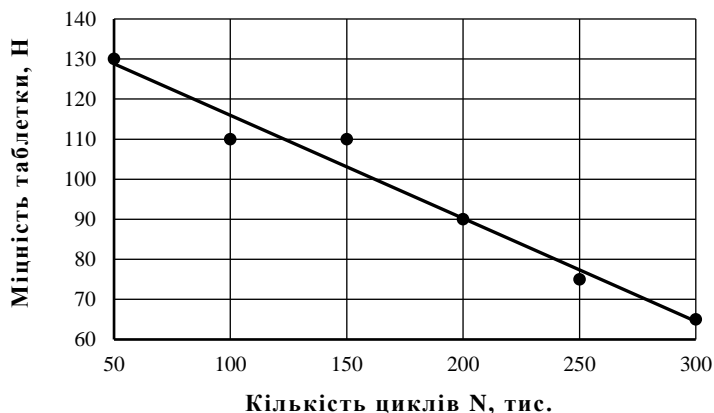
су, тому при закріплених компресійних валках такі властивості таблетки, як механічна міцність, розмір, товщина, пористість будуть залежати від ступеня заповнення матриці [15, 18].

Збільшення частоти обертання ротора демонструє підвищення стирання, що пов'язано зі змінами заповнення матриці (рис. 6).



**Рис. 6.** Стирання таблеток у залежності від швидкості обертання таблетпреса

Роторні таблетпреси мають кратність дії N за один оберт ротора. Завдяки тому, що по колу ротора встановлено певну кількість живильників і прес-інструментів, технологічні цикли пресування N відбувається в кожному комплекті прес-інструменту [15]. Кількість циклів пресування впливає на зношення механізмів таблетпресів, що може змінювати величину внутрішнього тиску і змінить якісні показники таблетки (рис. 7).



**Рис. 7.** Вплив кількості циклів пресування на міцність таблеток

При розрахунках кореляційного зв'язку встановлено, що існує пряма кореляційна залежність, яку розраховували методом квадратів Пірсона: між показниками міцності і тиском пресування, а також між швидкістю роботи таблетпреса і міцністю таблеток вона знаходиться в межах  $\pm 0,82$ .

Сили кореляційного зв'язку оцінюються як середні в межах  $\pm 0,45$  при оцінці впливу тиску пресування на показники стирання та міцності.

Зазначимо, що збільшення швидкості обертання ротора є причиною непостійної ваги таблетки, зменшення міцності та збільшення стирання. Занадто висока сила пресування сприяє розшаруванню внаслідок зносу внутрішньої поверхні матриці. Надмірна сила пресування приводить до відшарування кришки таблетки через пошкодження робочої поверхні пуансона або налипання гранул, що в сукупності негативно впливає на зміну показників міцності і стиранності.

**Висновки.** 1. Зі збільшенням тиску пресування від 50 до 200 МПа міцність таблетки ацетилсаліцилової кислоти збільшується від 40 до 100 Н. Подальше збільшення тиску пресування несуттєво впливає на міцність таблетки.

2. Зі збільшенням тиску пресування до 100 МПа стирання таблеток знижується з 0,14 до 0,06%, у діапазоні тиску 100—200 МПа стирання змінюється несуттєво, а подальше збільшення тиску пресування призводить до збільшення стирання.

3. Збільшення частоти обертання ротора таблетпреса від 20 до 100 об/хв призводить до зниження міцності від 80 до 40 Н і збільшення стирання від 0,2 до 1,4%.

4. Збільшення кількості циклів пресування у преспарі «Пуансон—матриця» від 50 до 300 тис. знижує міцність таблеток від 130 до 70 Н.

5. Існує пряма кореляційна залежність між показниками міцності і тиском пресування, а також між швидкістю роботи таблетпреса і міцністю таблеток.

6. Отримані закономірності дають змогу раціонально вибрати параметри пресування, зокрема, тиск, частоту обертання ротора таблетпреса, а також визначити час роботи пресінструменту між його очищенням (поліруванням). За раціональних параметрів пресування отримані таблетки мають відповідати фармакопейним показникам.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Леськів, О. М. (2021). *Дослідження впливу допоміжних речовин на основі цукрів на технологічні показники таблеток, отриманих методом прямого пресування*: магістерська робота. URL: <https://repository.tdmu.edu.ua/handle/123456789/17083>.
2. Adeleye, O. A. (2019). Relationship between compression pressure, mechanical strength and release properties of tablets. *Polim Med*, 49(1), 27—33. doi:10.17219/pim/111888.
3. Олійников, Д. С., Каплаушенко, А. Г. (2023). Розробка антиангінальних мультидозованих таблеток пролонгованої дії: *матеріали X міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 60-річчю з дня народж. д-ра фармацевт. наук, проф. Гладуха Євгенія Володимировича*, 10—11 травня м. Харків. 86—87.
4. Олійников, Д. С., Каплаушенко, А. Г. (2019). Обґрунтування підходу до розроблення технології виготовлення таблеток ізосорбиду динітрату з модифікованим вивільненням. *Актуальні питання фармацевтичної та медичної науки й практики*, 12(2). 160—165.
5. Демчук, М. В., Грошовий, Т. А., Леськів, О. М., Маланчук, Н. В. (2021). Порівняльні дослідження деяких марок лактози як наповнювачів для прямого пресування таблеток. *Фармацевтичний часопис*, 2. 5—13. URL: <https://doi.org/10.11603/2312-0967.2021.2.12056>.
6. Ren, G., Clancy, C., Tamer, T. M. et al. (2019). Cinnamyl O-Amine functionalized chitosan as a new excipient in direct compressed tablets with improved drug delivery. *Int. J. Biol. Macromol.*, 141. 936—946.
7. Hebbink, G. A., Dickhoff, B. H. (2019). Application of lactose in the pharmaceutical industry. *Lactose*, 175—229.
8. Krivokapić, J., Ivanović, J., Djuriš, J., Medarević, D., Potpara, Z., Maksimović, Z., Ibrić, S. (2020). Tableting properties of microcrystalline cellulose obtained from wheat straw measured with a single punch bench top tablet press. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 28(6), 710—718.
9. І. В. Зупанець, О. А. Рубан. (2019). Сучасний стан розробки таблеток, що розпадаються у ротовій порожнині. *Український біофармацевтичний журнал*, 3(60), 6—13 URL: <https://doi.org/10.24959/ubphj.19.235>.

10. Yadav, P., Sahdev, A. K. (2018). Physics of tablet with compaction and compression process for novel drug dosage form. *Int J. Adv. Sci. Res.*, 3(4), 28—34.
11. Паспорт роторної таблетувальної машини РТМ 41 МЗ.
12. Кугова, О. В., Рубан, О. А., Алхалаф Малек, В. А. (2021). Методичний підхід до визначення оптимального вмісту допоміжних речовин у складі таблеток. *Вісник фармації*, 2(102), 30—36.
13. Макогон, А. Г., Маслій, Ю. С. (2022). Дослідження впливу зв'язувальних речовин на властивості таблеток АГ: матеріали II Міжнародної науково-практичної дистанційної конференції «Сучасні аспекти створення лікарських засобів», 1 лютого, м. Харків, 162—163.
14. Винниченко, М. (2023). *Розробка складу та технології твердої лікарської форми для лікування мігрені*: магістерська робота. 62.
15. Давтян, Л. Л., Андрійчук, Я. Р. (2014). Проблемні аспекти формування асортименту лікарських засобів з адаптогенною та загальнотонізуючою активністю в Україні. *Фармацевт. Часопис*, 4, 73—76.
16. Єзерська, О. І. (2015). Дослідження з розробки технології сухого екстракту цикорію та кукурудзи. *Збірник наукових праць співробітників НМАПО ім. П. Л. Шупика*, 24(5), 104—109.
17. Сівецький, В. І., Швачко, Д. Г. (2023). *Пресове обладнання: навч. посіб.* Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
18. О. В. Тригубчак. (2018) Дослідження оптимальних умов виготовлення таблеток кислоти ацетилсаліцилової з аторвастатином. *Ліки України*, 2(35), 4—11.



УДК 004

# PERFORMANCE ANALYSIS AND INTEGRATION OF UIKIT, REALM AND ALAMOFIRE IN SWIFT MOBILE APPLICATIONS

D. Vdovenko, O. Sedykh, M. Hrama  
National University of Food Technologies

---

## Key words:

Swift,  
UIKit,  
Realm,  
Alamofire,  
architecture,  
programming

---

## Article history:

Received 29.08.2024  
Received in revised form  
17.09.2024  
Accepted 20.09.2024

---

## Corresponding author:

olgased@ukr.net

---

## ABSTRACT

With the development of technology and the growing demand for mobile applications, there is a need to create products that meet high standards of quality and performance, including speed, convenience, efficient data management, and stable operation under intensive network exchanges. Selecting tools that contribute to achieving these goals is essential. UIKit, Realm, and Alamofire are promising options for this purpose, though their integration requires proper justification.

The aim of the research is to analyze the performance of Swift-based mobile applications using UIKit for the interface, Realm for data storage, and Alamofire for network requests. The study examines the advantages and limitations of these tools and their integration to enhance application efficiency.

An evaluation of algorithms was conducted based on the theoretical complexity of operations used in UI creation, request processing, and data storage. As a result, the study of Swift-based app architectures revealed each tool's advantages, which are important to consider in software development.

UIKit, as the standard for iOS UI, enables flexible customization of interface elements. Using UICollectionView for displaying lists ensures efficient data management. Dynamic image loading and animations enhance the user experience with smooth transitions and fast loading times.

Alamofire simplifies working with network requests, making it easy to retrieve data via API. The use of GET requests for movie data and JSON parsing demonstrates its efficiency.

Realm, as a local database, provides high performance and convenience, enabling effective user data management.

Optimizing image loading and caching reduced content loading time by 40%, improving display speed. Network requests via Alamofire showed that 90% of requests are completed in under 2 seconds, enhancing user interaction speed. Data synchronization in Realm increased performance by 30%.

Overall, using UIKit, Alamofire, and Realm ensures high performance and a smooth user experience. It is recommended to use UIKit for the UI, Alamofire for network tasks, and Realm for data storage, ensuring optimal performance for Swift-based applications.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-11

---

# АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ІНТЕГРАЦІЇ UIKIT, REALM ТА ALAMOFIRE В МОБІЛЬНИХ ДОДАТКАХ НА SWIFT

Д. О. Вдовенко, здобувач, <https://orcid.org/0009-0007-0220-8509>

О. Л. Сєдих, <https://orcid.org/0000-0003-4590-2019>

М. П. Грама, PhD, <https://orcid.org/0000-0001-5843-060X>

Національний університет харчових технологій

*Метою дослідження є аналіз продуктивності та інтеграції мобільних додатків, розроблених на мові програмування Swift, з використанням трьох основних компонентів: UIKit, Realm та Alamofire. UIKit забезпечує створення та управління користувацьким інтерфейсом, Realm — зберігання даних, Alamofire — мережеві запити. У дослідженні розглядаються переваги та недоліки кожного інструменту, а також їхня інтеграція для створення ефективних мобільних додатків. Основна мета — надати розробникам знання та рекомендації щодо вибору і комбінування цих технологій для створення якісних додатків.*

**Ключові слова:** Swift, UIKit, Realm, Alamofire, архітектура, програмування.

**Вступ.** Мобільні додатки стали невід’ємною частиною сучасного життя, забезпечуючи користувачів різноманітними послугами та інформацією у будь-який момент. Зі збільшенням попиту на високоякісні мобільні рішення розробники шукають ефективні та надійні інструменти для створення додатків, що відповідають сучасним вимогам. Однією з найвідоміших мов програмування для розробки мобільних додатків є Swift, створена компанією Apple спеціально для екосистеми iOS [1]. Swift вирізняється своєю продуктивністю та зручністю, не маючи аналогів серед інших мов програмування для мобільних платформ.

Важливою частиною розробки мобільних додатків є вибір правильної архітектури та інструментів, які сприяють швидкому й ефективному створенню програмного забезпечення. Три основні інструменти для Swift — це UIKit, Realm та Alamofire. UIKit забезпечує створення та управління користувацькими інтерфейсами з багатьма можливостями для дизайну та взаємодії з користувачем [2]. Realm ефективно зберігає та обробляє дані, що важливо для додатків з великим обсягом інформації [3]. Alamofire спрощує роботу з мережевими запитами, даючи змогу легко інтегрувати функціональність для обміну даними через інтернет [4].

**Постановка проблеми.** З розвитком технологій і збільшенням попиту на мобільні додатки виникає потреба у створенні додатків, які б відповідали високим стандартам якості та продуктивності. Це включає не лише швидкість та зручність використання, але й ефективне управління даними та забезпечення стабільної роботи в умовах інтенсивного мережевого обміну, тому необхідно обрати інструменти, які забезпечать досягнення цих цілей найефективнішим чином. UIKit, Realm та Alamofire є перспективними інструментами для вирішення цих завдань, однак їх інтеграція та використання вимагають детального аналізу й обґрунтування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із ключових аспектів при розробці мобільних додатків є вибір інструментів, які забезпечують не лише продуктивність, але й надійність під час зберігання та обробки даних.

У праці [5] описано проект, у якому розроблено систему замовлення товарів, що складається з трьох основних частин: бекенд-додатку на Node.js, адміністративного

додатку та клієнтського додатку, обидва побудовані з використанням Swift. Це підтверджує, що Swift ефективно використовується не лише для розробки інтерфейсів користувача, але й для взаємодії з бекенд-системами, забезпечуючи можливість інтеграції з різноманітними сервісами.

У дослідженні [6] детально розглянуто досвід використання Realm для локального збереження даних у мобільних додатках. Автор наводить як переваги, так і недоліки використання Realm, зазначаючи, що зміни у версіях Swift призвели до необхідності постійних змін у Realm, що вплинуло на стабільність додатку. Замість цього автор вирішив перейти на інструменти, вбудовані у фреймворк Foundation (NSCoding, FileManager, NSKeyedArchiver/NSKeyedUnarchiver), що забезпечило більшу стабільність і зменшило залежність від сторонніх бібліотек.

Обрані інструменти для розробки iOS-додатків, такі як Swift, Realm, UIKit та Alamofire, відіграють важливу роль у створенні високоякісних і продуктивних мобільних рішень. Однак важливо враховувати специфіку кожного інструменту та адаптувати їх до вимог конкретного проєкту, щоб забезпечити стабільність та гнучкість під час розробки.

**Мета дослідження:** проаналізувати архітектуру мобільних додатків на Swift з використанням UIKit, Realm та Alamofire, виявити переваги та недоліки цих інструментів, а також розробити рекомендації для їх ефективного застосування.

**Матеріали і методи.** У статті описується аналіз архітектури мобільних додатків, розроблених на Swift з використанням трьох основних інструментів: UIKit, Realm та Alamofire. Мова програмування Swift має потужну підтримку різноманітних фреймворків, починаючи від бази даних і закінчуючи відеопрогравачем [7]. Середовищем програмування є програма Xcode, яка надає розробникам зручний інтерфейс для написання коду, відлагодження програм, а також підтримує інтеграцію з різними зовнішніми бібліотеками і сервісами [8]. Важливою функціональною особливістю Xcode є можливість вибору цільової версії мобільної операційної системи (iOS), для якої буде розроблятися додаток. Це дає змогу розробникам не лише створювати програмне забезпечення, але й адаптувати його до різних поколінь iOS, забезпечуючи сумісність з новими функціями і платформами.

Крім того, Xcode надає можливість розробникам тестувати свої додатки на реальних пристроях, таких як iPhone або iPad, що дає змогу перевіряти функціональність і взаємодію програми з обладнанням в реальних умовах перед випуском в App Store. Рекомендовані системні вимоги пристрою для комфортної роботи з Xcode наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Рекомендовані системні вимоги до програми Xcode

Операційна система	macOS
Версія ОС	14.0
Процесор	M1
Оперативна пам'ять	8 ГБ
Відеокарта	графічний адаптер M1
Жорсткий диск	50 ГБ вільного простору

Для цього проєкту було обрано тему розробки бази даних фільмів для iOS. Вибір цієї теми обумовлений зростаючим попитом на додатки для пошуку та перегляду інформації про фільми, що сприяє підвищенню зручності користувачів у доступі до цієї інформації. Крім того, розробка такого додатку дає змогу продемонструвати ефектив-

ність використання фреймворків UIKit, Realm та Alamofire в умовах реального застосування.

Цей додаток надасть користувачам можливість переглядати інформацію про різні фільми, включаючи їхні описи, акторський склад, рейтинги та інші деталі. Користувачі зможуть шукати фільми за різними критеріями та зберігати улюблені фільми до списку перегляду.

UIKit надає різноманітні функції для створення додатків, включаючи компоненти для побудови основної інфраструктури додатків для iOS, iPadOS та tvOS. Фреймворк забезпечує архітектуру вікон і виглядів для реалізації інтерфейсу користувача, інфраструктуру обробки подій для доставлення Multi-Touch та інших типів вводу до вашого додатку, а також основний цикл запуску для управління взаємодіями між користувачем, системою та додатком. Також включає підтримку анімацій, документів, малювання та друку, управління текстом та його відображенням, пошуку, розширень додатків, управління ресурсами та отримання інформації про поточний пристрій [2].

Проте UIKit має певні недоліки: може бути важким для управління пам'яттю, особливо при створенні складних інтерфейсів з великою кількістю елементів. Це може призвести до витоків пам'яті або зниження продуктивності, якщо не дотримуватись найкращих практик. Також UIKit може не підтримувати всі новітні функції, які з'являються у нових версіях iOS, що може вимагати додаткових зусиль для інтеграції нових можливостей у вже існуючі проекти.

Окрім вибору фреймворку для створення структури мобільного додатку важливим етапом є визначення дизайну та основ для його реалізації. Для цього був використаний дизайн, знайдений на платформі Figma, який визнаний оптимальним для інтерфейсу цього мобільного додатку [9]. Figma надає зручний інтерфейс для створення і прототипування дизайну, що дає змогу чітко визначити структуру та вигляд мобільного додатку перед його реалізацією [10].

Наступним важливим кроком є інтеграція функціональності для мережевих запитів, яку буде реалізовано за допомогою Alamofire. Alamofire є потужною бібліотекою для роботи з мережевими запитами в Swift, що значно спрощує процес обробки HTTP-запитів і відповіді від сервера. Зокрема, Alamofire дає змогу легко виконувати запити до API, обробляти отримані дані та управляти мережею. Для цього проекту Alamofire буде використовуватися для отримання даних з The Movie Database (TMDB), що є основним джерелом інформації про фільми [11].

Alamofire забезпечує простий та ефективний спосіб взаємодії з API, що швидко інтегрує функціональність для завантаження і відображення актуальної інформації про фільми у додатку. Це дасть змогу користувачам отримувати свіжі дані про фільми, включаючи новинки та популярні фільми.

Одним з основних недоліків Alamofire є додаткове навантаження на продуктивність при обробці великих обсягів даних або численних запитів одночасно. Це може призвести до затримок у відповідях або підвищеного використання ресурсів. Також, як і інші бібліотеки, Alamofire може стати застарілою або потребувати оновлень при випуску нових версій iOS, що може вимагати додаткових зусиль для забезпечення сумісності.

Окрім інтеграції мережевих запитів, було вирішено додати два рівні доступу до додатку: користувач та адміністратор. Введення цих ролей обумовлено необхідністю забезпечити різний рівень доступу до функціональності додатку з метою підвищення безпеки та зручності використання.

Для цього проєкту необхідно ввести оцінку складності алгоритму. Будуть використані такі методи:

- велика O-нотація (Big O notation). Це стандартний метод оцінки асимптотичної поведінки алгоритму в гіршому випадку. Він допомагає зрозуміти, як алгоритм масштабується зі збільшенням обсягу вхідних даних і є важливим для визначення ефективності алгоритму;
- аналіз гіршого, середнього та найкращого випадку. Цей метод дає змогу оцінити продуктивність алгоритмів у різних сценаріях, що важливо для розуміння реальної поведінки алгоритму під час виконання;
- емпіричний аналіз. Використовується для тестування продуктивності алгоритмів у реальних умовах. Цей метод дає змогу отримати практичні дані щодо ефективності алгоритму під час його виконання в додатку.

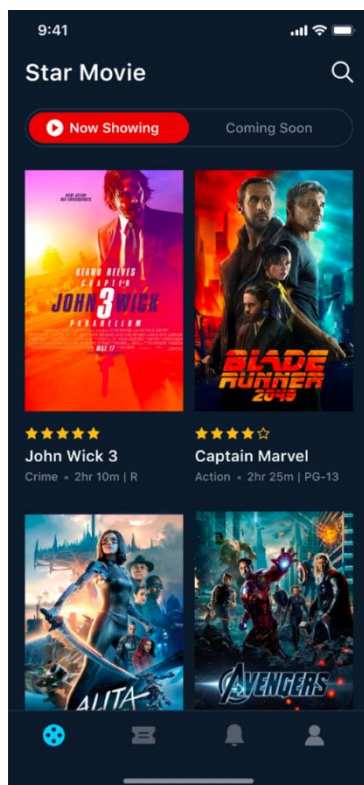


Рис. 1. Прототип інтерфейсу мобільного додатку, розроблений у Figma

Вибір цих методів обумовлений їхньою здатністю забезпечити повну та всебічну оцінку продуктивності алгоритмів, що використовується в додатку, і дає змогу не лише теоретично оцінити їх ефективність, але й перевірити їхню практичну продуктивність у реальних умовах використання [12].

**Результати.** Роль користувача дасть змогу переглядати інформацію про фільми, зберігати улюблені фільми до списку перегляду та здійснювати пошук за різними критеріями. Роль адміністратора, окрім функцій користувача, включатиме можливості для комунікування з користувачами у разі виникнення певних труднощів з до-

датком, блокування та розблокування користувачів, а також модерації відгуків клієнтів про фільми.

Realm забезпечує високу продуктивність і простоту у використанні, що легко реалізує ці функції та забезпечить швидкий доступ до даних. Інтеграція Realm дасть змогу організувати зручне зберігання даних та їхню синхронізацію між різними рівнями доступу.

Проте є й недоліки цієї бібліотеки. По-перше, при обробці великих обсягів даних Realm може вимагати значних ресурсів, що може негативно вплинути на продуктивність додатка. По-друге, у разі виникнення проблем з оновленням або сумісністю версій може знадобитися додатковий час для підтримки актуальності бібліотеки, що може бути фактором ризику для довгострокового розвитку проекту.

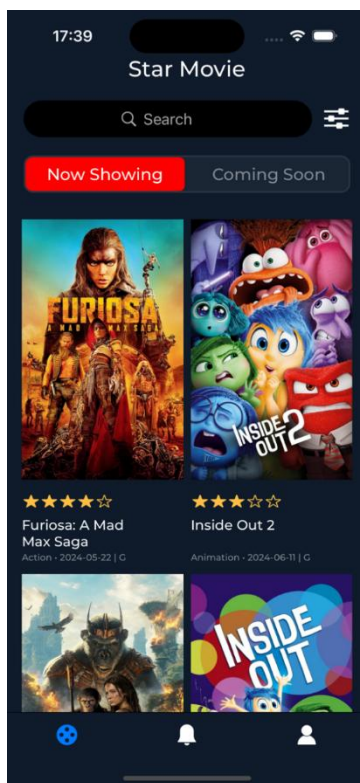


Рис. 2. Інтерфейс реалізованого мобільного додатку з використанням UIKit, Alamofire та Realm

### **Оцінка складності алгоритму:**

#### **1. Складність реалізації користувацького інтерфейсу (UIKit).**

Реалізація користувацького інтерфейсу за допомогою UIKit включає створення різних елементів UI, їх розташування та взаємодію з користувачем.

#### **Основні аспекти складності:**

- відображення списків фільмів. Використання UICollectionView для відображення списків фільмів. Складність  $O(n)$ , де  $n$  — кількість елементів у списку [13];
- динамічне завантаження зображень. Використання кешування для оптимізації завантаження зображень. Складність  $O(1)$  для доступу до кешованих зображень [14];

- анімації та переходи. Реалізація плавних переходів між екранами та анімацій для покращення UX. Складність  $O(1)$  для анімацій та переходів [15].

**1. Складність обробки мережевих запитів ( Alamofire ).**

Alamofire забезпечує простий спосіб обробки мережевих запитів, але все одно необхідно враховувати складність взаємодії з API та обробки даних:

- запити до API. Виконання GET-запитів для отримання даних про фільми. Складність  $O(1)$  для кожного запиту [16];
- парсинг JSON-даних. Обробка отриманих JSON-даних і перетворення їх у моделі Swift. Складність  $O(n)$ , де  $n$  — кількість об'єктів у JSON [17].

**2. Складність зберігання та обробки даних ( Realm ).**

Realm дає змогу зберігати дані локально на пристрої та забезпечує високу продуктивність:

- зберігання даних. Створення та збереження об'єктів у базі даних. Складність  $O(1)$  для кожної операції запису;
- синхронізація даних. Синхронізація даних між різними рівнями доступу (користувач та адміністратор). Складність  $O(n)$ , де  $n$  — кількість об'єктів, які потрібно синхронізувати [3].

У табл. 2 наведено всі необхідні дані для побудови графіка оцінки складності алгоритмів. Дані в таблиці були зібрані на основі теоретичної складності різних операцій, які використовуються в реалізації користувацького інтерфейсу, обробці мережевих запитів і зберіганні даних. Для кожної операції було визначено її асимптотичну складність ( $O(1)$  або  $O(n)$ ), де  $n$  — кількість елементів. Значення  $n$  варіюються від 1 до 1000, що дає змогу побудувати графік для аналізу ефективності алгоритмів при різних масштабах даних.

Таблиця 2. Дані для побудови графіка оцінки складності алгоритмів

n	Динамічне завантаження зображень ( $O(1)$ )	Відображення списків фільмів ( $O(n)$ )	Анімації та переходи ( $O(1)$ )	Запити до API ( $O(1)$ )	Парсинг JSON-даних ( $O(n)$ )	Зберігання даних ( $O(1)$ )	Синхронізація даних ( $O(n)$ )
1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	10	1	1	10	1	10
100	1	100	1	1	100	1	100
1000	1	1000	1	1	1000	1	1000

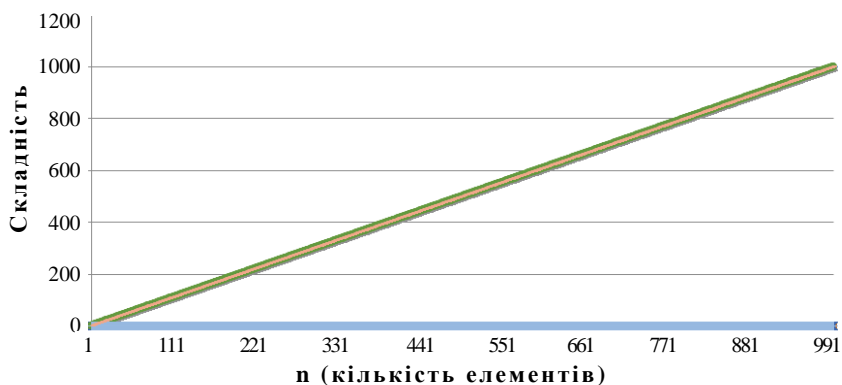


Рис. 3. Графік оцінки складності алгоритмів

**Висновки.** У результаті дослідження архітектури мобільних додатків на Swift з використанням UIKit, Realm та Alamofire було виявлено, що кожен інструмент має свої власні переваги і недоліки, які варто враховувати при розробці програмного забезпечення.

UIKit, як стандартний інструмент для створення інтерфейсу користувача на iOS, дає змогу гнучко налаштувати UI елементи і забезпечує великий контроль. Використання UICollectionView для відображення списків фільмів забезпечує ефективне управління великою кількістю даних. Динамічне завантаження зображень і реалізація анімацій за допомогою UIKit покращують користувацький досвід, забезпечуючи плавні переходи та зменшення часу завантаження вмісту.

Alamofire значно спрощує роботу з мережевими запитами, що дає змогу легко взаємодіяти з API й обробляти отримані дані. Використання GET-запитів для отримання даних про фільми і парсинг JSON-даних у моделі Swift демонструє його ефективність і зручність у розробці.

Realm, як база даних для локального зберігання даних, надає високу продуктивність і зручність у використанні. Її можливість синхронізації даних між різними рівнями доступу дає змогу ефективно управляти даними користувачів і адміністраторів.

Згідно з результатами тестування, оптимізація завантаження зображень і використання кешування скорочує час завантаження контенту на 40%. Це підвищило швидкість відображення вмісту для користувачів. Мережеві запити через Alamofire показали, що 90% запитів до API виконуються менше ніж за 2 секунди, що значно покращує швидкість взаємодії з користувачем. Ефективна синхронізація даних у Realm також підвищила продуктивність на 30% порівняно з аналогічними рішеннями. Ці результати підтверджують, що використання UIKit, Alamofire і Realm забезпечує високий рівень продуктивності і якісну взаємодію з кінцевим користувачем.

Для успішної розробки мобільних додатків на Swift рекомендується використовувати UIKit для створення UI, Alamofire для мережевої взаємодії і Realm для зберігання та синхронізації даних, що забезпечить оптимальну продуктивність і задоволення від кінцевого продукту.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Swift — Apple Developer. *Apple Developer*. URL: <https://developer.apple.com/swift/>.
2. UIKit | Apple Developer Documentation. Apple Developer Documentation. URL: <https://developer.apple.com/documentation/uikit>.
3. Atlas Device SDK for Swift — Atlas Device SDKs. MongoDB: The Developer Data Platform | MongoDB. URL: <https://www.mongodb.com/docs/atlas/device-sdks/sdk/swift/>.
4. Alamofire: бібліотека для клієнт-серверних додатків на iOS | студія Brander. Створення і розробка інтернет-магазинів від Brander. URL: <https://brander.ua/technologies/alamofire>.
5. Nguyen, T. (2019). iOS Shopping Cart Mobile Application, *Vaasa*. 11—29. URL: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019052812622>. Nguyen, Thi (2019)
6. Chris Yerina 'Close By Places' iOS App. URL: <https://digitalcommons.calpoly.edu/cpesp/275/>.
7. GitHub — matteocrippa/awesome-swift: A collaborative list of awesome Swift libraries and resources. Feel free to contribute! GitHub. URL: <https://github.com/matteocrippa/awesome-swift>.
8. Xcode — Apple Developer. Apple Developer. URL: <https://developer.apple.com/xcode/>.
9. Staiano, F. (2022). *Designing and Prototyping Interfaces with Figma: Learn essential UX/UI design principles by creating interactive prototypes for mobile, tablet, and desktop*, Packt Publishing.
10. Star Movie UI Kit (Community). Figma. URL: [https://www.figma.com/design/CRJZOM10ofPrxAcQcEpZY6/Star-Movie-UI-Kit-\(Community\)?node-id=0-1&mode=design](https://www.figma.com/design/CRJZOM10ofPrxAcQcEpZY6/Star-Movie-UI-Kit-(Community)?node-id=0-1&mode=design)



11. The Movie Database. The Movie Database (TMDB). URL: <https://www.themoviedb.org/about?language=ua>.
12. EPAM Campus. Як це працює? Оцінка складності алгоритмів. URL: <https://rdp.epam.com/ua/blog/420>.
13. UICollectionView | Apple Developer Documentation. Apple Developer Documentation. URL: <https://developer.apple.com/documentation/uikit/uicollectionview>.
14. Caching network data | Apple Developer Documentation. Apple Developer Documentation. URL: <https://developer.apple.com/tutorials/app-dev-training/caching-network-data>.
15. Animation | Apple Developer Documentation. Apple Developer Documentation. URL: <https://developer.apple.com/documentation/swiftui/animation>.
16. GitHub — Alamofire/Alamofire: Elegant HTTP Networking in Swift. GitHub. URL: <https://github.com/Alamofire/Alamofire>.
17. Parsing JSON with similar identifiers. Swift Forums. URL: <https://forums.swift.org/t/parsing-json-with-similar-identifiers/38556/10>.

УДК 662.99

## HEAT RECOVERY OF WASTE WATER OF FOOD ENTERPRISES

Y. Skuibida, V. Kostyuk

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

waste heat recovery,  
waste water,  
heat pump,  
heat exchanger,  
power of heat flow

**Article history:**

Received 20.10.2023  
Received in revised form  
29.03.2024  
Accepted 30.03.2024

**Corresponding author:**

trynog0@ukr.net

---

**ABSTRACT**

A significant amount of energy used in the food industry is wasted in the form of heat from exhaust gases, air flows and liquids. In the case of food enterprises that use a large amount of water in production and discharge a lot of heat in the form of waste water, heat recovery is appropriate. Every day, humanity is more and more aware of the importance of water and energy for life, as well as the difficulty of obtaining them.

Waste heat utilization projects should be based on a careful study of existing sources of heat loss and their absorption in order to study acceptor heat flows and choose appropriate technical solutions for preventing losses and reusing the corresponding heat flows.

The article discusses the most effective heat recovery technologies for food enterprises of the dairy, bakery and non-alcoholic beer industries. An increase in the value of thermal discharges is achieved with the help of heat pumps, the efficiency of which depends on the conversion factor (COR) of a specific heat pump, which determines the ratio of the received thermal energy to the amount of consumed electricity, which is spent on the operation of the compressor unit of the pump. Heat exchangers are also an effective solution for waste water heat recovery, which can have a variety of designs, for example, a design in the form of spiral copper coils wrapped around a copper riser, etc. Compared to the use of heat pumps, heat exchangers do not require additional electricity consumption and can be placed close to the consumer, which allows to avoid losses during heat transfer. Direct use of low-potential coolant in heat exchangers does not require significant capital investments and current costs. For an average dairy, non-alcoholic beer, and bakery enterprise, the indicators of water flows and power of heat flows discharged into the sewage system and economic losses at the same time are given. The study proves that recuperative systems implemented in the technological process chain enable the reuse of heat, which helps to reduce the amount of electricity, fuel and water consumed.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-12

---

## РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛА СТИЧНИХ ВОД ХАРЧОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Є. Л. Скуйбіда, аспірант, <https://orcid.org/0009-0000-6597-797X>

В. С. Костюк, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0009-0000-5507-6027>

Національний університет харчових технологій

*Значна кількість енергії, що використовується в харчовій промисловості, марно витрачається у вигляді тепла вихлопних газів, повітряних потоків і рідин. Харчові підприємства використовують у виробництві велику кількість води та скидають багато тепла у вигляді стічних вод, тому доцільно проводити рекуперація тепла. Людство з кожним днем все більше усвідомлює важливість води та енергії для життя, а також складність їх отримання.*

*Проекти використання відпрацьованого тепла повинні базуватися на ретельному дослідженні існуючих джерел теплових втрат та їх поглинання з метою вивчення акцепторних теплових потоків і вибору відповідних технічних рішень для запобігання втратам та повторного використання відповідних теплових потоків.*

*У статті розглянуті найбільш ефективні технології рекуперації тепла для харчових підприємств молочної, пиво безалкогольної та хлібопекарської промисловості. Збільшення цінності теплових скидів досягається за допомогою теплових насосів, ефективність використання яких залежить від коефіцієнта перетворення (COP) конкретного тепло насоса, що визначає відношення отриманої теплової енергії до кількості спожитої електрики, яка витрачається на роботу компресорного блока насоса. Також ефективним рішенням для рекуперації тепла стічних вод є теплообмінники, які можуть мати різноманітну конструкцію, наприклад, у вигляді спіральних мідних котушок, обмотаних навколо мідного стояка, тощо. Порівняно з використанням теплових насосів, теплообмінники не вимагають додаткового споживання електроенергії та можуть бути розміщені близько до споживача, що дає змогу уникнути втрат під час перенесення тепла. Пряме використання низькопотенційного теплоносія у теплообмінниках не вимагає значних капіталовкладень і поточних витрат. Для середньостатистичного молочного, пивобезалкогольного та хлібопекарського підприємства наведені показники стоків води та потужності теплових потоків, що скидаються в каналізацію, та економічні втрати при цьому. Дослідження доводить, що рекуператорні системи, впроваджені в ланцюжок технологічного процесу, дають змогу використовувати тепло повторно, що допомагає скоротити кількість споживаної електроенергії, палива та води.*

**Ключові слова:** рекуперація відпрацьованого тепла, стічні води, тепловий насос, теплообмінник, потужність теплового потоку.

**Вступ.** В Україні виробництво продуктів харчування потребує до п'яти разів більше енергії, якщо порівняти з індустріально розвиненими країнами. На більшості промислових підприємств харчової промисловості відбуваються технологічні процеси, до яких відносять нагрівання певних середовищ. Джерела відпрацьованого тепла включають гарячі димові гази, що викидаються в атмосферу, нагріті продукти, що виходять з промислових процесів, і передачу тепла від гарячої поверхні обладнання та стоків води [1].

У харчовій промисловості утворюється велика кількість відпрацьованого тепла, яке практично не використовується як ресурс для економії енергії та скорочення викидів. Кількість тепла, що не використовується, за результатами дослідження стано-

вить від 20 до 50% промислового споживання енергії. На харчових підприємствах України щодня можливо економити значну кількість коштів і ресурсів шляхом впровадження енергоефективних процесів і технологій, таких як рекуперація — процес повторного використання частини енергії, яка виникає при нагріванні припливної води, з метою її подальшого використання [2].

Рекуперація відпрацьованого тепла має вирішальне значення підвищення енергоефективності будь-якої галузі. Сьогодні технології дають змогу вловлювати та повторно використовувати надлишкове тепло від існуючих процесів для опалення, вироблення електроенергії тощо. Вода є найбільш широко використовуваною сировиною в харчовій промисловості. Внаслідок утворення великої кількості стічних вод як відходів харчових підприємств і зростання дефіциту питної води, повторне використання потоків стічних вод є важливою економічною та екологічною проблемою [3]. Крім того, в харчовій промисловості існують процеси, які використовують значну кількість тепла, що потім виводиться у вигляді стічних вод, також технологічні процеси з використанням пари і гарячої води: пастеризація, стерилізація, сушіння продуктів, пивоваріння, виробництво молочних та кондитерських виробів і напоїв тощо. Стічні води харчових підприємств містять від 5 до 25% теплової енергії залежно від умов і процесів виробництва [4].

Розглянемо на прикладі молочних, пивобезалкогольних і хлібопекарських підприємств особливості рекуперації тепла.

Невід'ємною складовою кожного технологічного процесу, наприклад, на підприємствах молочної промисловості, є використання води. Воду використовують у різноманітних технологічних процесах — миття технологічного обладнання, тари, підлог, санітарно-гігієнічних цілей, у вигляді теплоносія (пари) тощо. Чиста вода, яка використовується на різні технологічні потреби, забруднюється різноманітними домішками, переважно органічними.

До основних показників їх забруднень належать складові продуктів, миючі засоби та сторонні предмети [1].

Умовно чисті води молочних виробництв, що утворюються в результаті експлуатації охолоджувально-пастеризаційних установок, аміачних і повітряних компресорів, рекомендується після відповідної обробки (охолодження, механічної очистки тощо) направляти в системи оборотного чи повторного водопостачання підприємства [2, 3].

Вилучаючи з неї всі корисні речовини, воду, що залишилася, можна використовувати на технічні потреби. Це стосується заводів, де з молока вилучаються його складові частини. Якщо продукт готується з незбираного молока чи у вигляді вторинного продукту із сироватки, то вода, яка міститься в молоці, йде на споживання. У такому разі необхідна певна кількість свіжої (водопровідної) води для миття обладнання.

Стічні води підприємств молочної промисловості мають значний діапазон коливань концентрації забруднень, який обумовлюється не лише різноманітним асортиментом продукції, але й коливаннями виходу і забрудненості стоку протягом доби. Так, вміст жирів у стічних водах цехів, що випускають молокопродукти які мають високий вміст жиру (масло, вершки, сметана) складає 100 мг/л, в окремих випадках 200...300 мг/л [24].

Оскільки у стічних водах молокозаводів можуть міститись нерозчинені мінеральні домішки, перед подачею їх на біологічні очисні споруди необхідно влаштувати механічне очищення стоків [1, 15, 16].

Для вилучення із стоків жирів, що потрапляють при митті технологічного обладнання, влаштовують жировловлювачі. Для затримання піску, окалини та іншого бруду — пісковловлювачі та спеціальні решітки, а завислі речовини видаляються, застосовуючи первинні відстійники.

Велика кількість води використовується на підприємствах пиво безалкогольних виробництв. У виробництві пива більша частина води задіяна у виробництві напою, а інша — в процесах охолодження та санітарної обробки обладнання, внаслідок чого утворюється значний обсяг забруднених стічних вод з відповідними біологічними та хімічними показниками, наприклад, вміст фосфатів досягає 19 мг/дм<sup>3</sup> включаючи відбракований продукт і воду для промивки обладнання. Також стічні води пивоварних заводів мають органічні включення (цукри, крохмаль, етанол, леткі жирні кислоти).

На хлібзаводах воду використовують у процесах для приготування тіста, підігрівання жирів, патоки, приготування заварки тощо. Використовують і водяну пару для кондиціонування повітря в розстійних шафах, зволоження печей і пекарних камер, сушки напівфабрикатів, тари та інших процесів з температурою теплоносія вище 100 °С.

Без попереднього очищення, в кількості (50%..65%) від споживаного об'єму води, можуть скидатися в каналізаційну мережу стічні води підприємств хлібопекарських виробництв, при цьому завислі речовини (ЗР) можуть становити 380 мг/дм<sup>3</sup>. Допускається сумісне очищення виробничих і господарських стічних вод за дотримання таких вимог: температура стоків — 30—60 °С; загальна концентрація розчинних солей — не більше 10 мг/дм<sup>3</sup>.

Стосовно використання вторинних енергетичних ресурсів, то перспективним напрямом є опалення тепличних господарств підприємства. Для теплиць можуть бути використані відхідні гази печей, сушарок та іншого технологічного обладнання, котельних агрегатів, в тому числі гаряча вода або пара. Гарячу воду, що має високу температуру, використовують у традиційних системах водяного опалення теплиць, низькотемпературну воду — в контактних апаратах для нагріву і зволоження повітря, що подається в теплицю [15].

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** У вітчизняних і зарубіжних джерелах питання рекуперації тепла харчових виробництв, зокрема використання тепла стічних вод з метою зменшення витрат на отримання теплової енергії, досліджується досить активно. Розглядаються різні підходи рекуперації тепла стічних вод та обґрунтовується необхідність використання такої енергії. В табл. 1 наведено порівняльні дані категорій скинутих стічних вод за 2020 і 2021 роки згідно з узагальненими даними державного обліку водокористування у 2021 р. Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України [17].

Таблиця 1. Порівняльна характеристика скидів стічних вод

Обсяги скинутих стічних вод за категоріями	2020 р. млн м <sup>3</sup>	2021 р. млн м <sup>3</sup>
Усього	5159	4684,6
Забруднені	518	541,5
Без очищення	100	119,3
Недостатньо очищені	418	422,2
Нормативно очищені	1425	1430,2
Нормативно чисті без очистки	3216	2712,9

Комплексна оцінка потенціалу технології рекуперації тепла стічних вод харчової промисловості, проведена в дослідженні [5], представлена чотирихетапною структурою рекуперації відпрацьованого тепла разом з акцепторними потоками. Автори дослідження наполягають на системному підході з попередньої оцінки потенціалу системи рекуперації шляхом визначення точок генерування потоків відпрацьованого тепла і його виведення (акцепторів теплової енергії). Результати дослідження демонструють значний потенціал низькоякісної рекуперації відпрацьованого тепла, що забезпечує цілеспрямовану, ресурсозберігаючу економію енергії підприємства.

Ефективність системи рекуперації відпрацьованого тепла на пивоварнях доведено у дослідженні [6]. Автори визначили, що тепло втрачається в основному в котлі, трубі нагрівача технологічної води та димоході котла. Проведене в дослідженні математичне моделювання утилізації відпрацьованого тепла показало можливість отримання від рекуперації 17,5 кВт потужності, що може заощаджувати до 456 л палива на день.

У дослідженні [7] обґрунтовується також екологічний ефект від використання систем рекуперації стічних вод на харчових підприємствах. Наголошується, що багато країн зменшують повторне використання стічних вод через законодавче обмеження, проблеми з громадським здоров'ям і екологічною безпекою. В Україні згідно зі ст. 10 Закону України «Про водовідведення та очищення стічних вод» в 2018 р. затверджено «Порядок повторного використання очищених стічних вод та осаду стічних вод за умови дотримання нормативів гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин», але на практиці таке використання обмежене непридатною для споживання людиною лише технічною водою. Використання стічних вод з метою повернення відпрацьованої теплової енергії дасть змогу значно оптимізувати використання води в технологічних процесах харчової промисловості і знизити негативний вплив на екологію в аспекті рекуперації тепла стічних вод.

У комплексному дослідженні технології енергозбереження для обробки та виробництва харчових продуктів [8] стверджується, що лише 3% споживаної енергії у виробничому процесі рекуперується, що робить харчову промисловість привабливою з точки зору енергозаощадження, та свідчить про можливості невикористаних шляхів енергозбереження.

У статті [9] зазначається, що переробка молочних продуктів вимагає великої кількості енергії для охолодження пастеризації, із супутніми утвореннями великої кількості відходів, в тому числі і відпрацьованого тепла. Тому застосування інноваційних технологій енергозбереження у харчовій промисловості, таких як використання відпрацьованої теплової енергії з одного технологічного процесу, як придатної енергії для іншого процесу, а також виробництво енергії на місці зменшує витрати енергії і має велике економічне значення.

Для підігріву води та для гарячого водопостачання, опалення промислових, складських і офісних приміщень, підігріву рідин і газів, які використовуються для технологічних процесів, та для попереднього підігріву сировини можливе використання рекуператорів [11, 12]. Дослідження ефективності технологій рекуперації тепла на підприємствах є актуальним. Принцип роботи усіх систем рекуперації базується на акумуляції або передачі залишкового тепла, наприклад, від стічної води до систем попереднього нагріву холодної води, що надходить до бойлера, проточного нагрівача, тобто назад до системи тепlopостачання.

**Мета досліджень:** огляд ефективних способів систем рекуперації тепла харчових підприємств.

**Матеріали і методи.** Недавні європейські норми та директиви щодо відновлювальних джерел енергії поступово розширюють зобов'язання використовувати системи рекуперації тепла.

Для вирішення поставлених завдань у процесі дослідження було використано такі методи: описовий, аналітичний і графічний. Теоретичною основою дослідження є праці провідних зарубіжних і вітчизняних вчених, присвячені питанням розробки і впровадженню систем рекуперації тепла на промислових підприємствах, що використовуються не в повній мірі.

**Результати досліджень.** Тривалий час технології рекуперації тепла стічних вод розвиваються швидкими темпами. Ще з 1980-х років централізовані системи в Німеччині, Швейцарії та скандинавських країнах використовують тепло стічних вод, яке збирається або в каналізаційних колекторах, або на очисних спорудах.

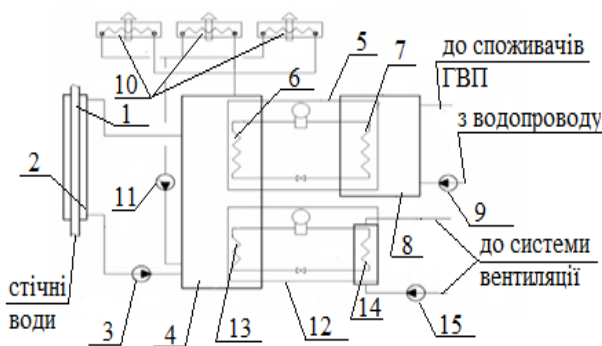
Існує кілька схем рекуперації тепла стічних вод. Найпростіша схема — «пряме» використання низькопотенційного теплоносія у теплообмінниках першого рівня підігріву гарячого водопостачання та припливного повітря. Такі схеми рекуперації не вимагають значних капіталовкладень і поточних витрат. Проте вказані схеми утилізації мають один істотний недолік: низький температурний напір, як правило, не більше 20 °С, що не дає змоги повністю вирішити питання теплопостачання систем гарячого водопостачання та вентиляції, а отже, необхідно встановлювати додаткові ступені підігріву.

В іншій схемі рекуперації тепла стічних вод використовується тепловий насос для підвищення корисного температурного тиску. Така схема більш енерговитратна, вимагає значних капіталовкладень і дає змогу досягти необхідного температурного рівня теплоносіїв (50—60 °С). Створення сприятливих у часі умов роботи теплового насоса можливе за наявності приймальних резервуарів каналізаційних насосних станцій з використанням їх як акумуляторів. Проте переважно в таких випадках отримана теплота використовується для теплопостачання самої насосної станції. Це не дозволяє максимально використовувати теплову енергію стоків (потрібні теплопостачання каналізаційних насосних станцій значно нижче ніж тепловий потенціал стічних вод). З іншого боку, у централізованих системах теплопостачання харчових підприємств тепло стоків частково втрачається у теплових мережах, тому для підприємств також важливо впровадження децентралізованих теплових мереж. У такому разі використання теплових насосів є досить перспективним [13].

Наприклад, особливістю використання тепла стічних вод житлових приміщень є випередження за часом споживання тепла щодо скидання стічних вод. Для вирішення цієї проблеми, а також для згладжування піків споживання гарячої води встановлюють акумулятор гарячої води (рис. 1).

З метою досягнення можливості одночасної рекуперації тепла від різних джерел (технологічне обладнання, вентиляційні системи, тощо) та забезпечення рівномірної роботи компресора теплового насоса доцільно встановити акумулятор тепла проміжного теплоносія.

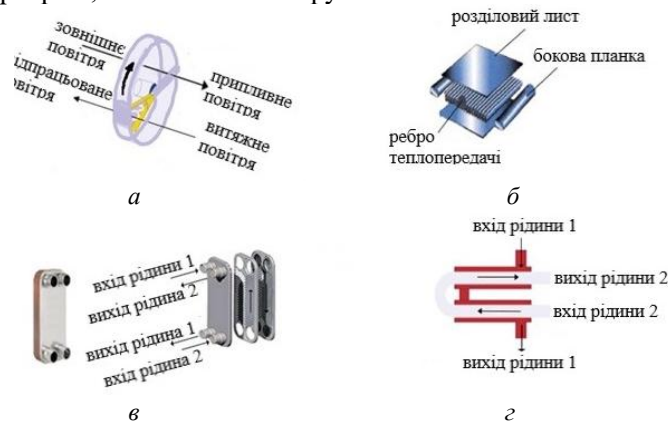
Приведена схема має низку переваг. Встановлення бака акумулятора дає змогу згладити нерівномірності в часі споживання гарячої води та скидання в каналізацію. У випадку надлишкового тепла, яке надходить від конденсатора теплового насоса, над необхідною кількістю тепла для потреб гарячого водопостачання, циркуляційні насоси проміжного теплоносія видалять його повітрям з каналізаційними стоками.



**Рис. 1. Схема рекуперації тепла стічних вод [15]:** 1 — каналізаційний колектор; 2 — теплообмінник «труба у трубі»; 3, 9, 10, 11 — циркуляційний насос проміжного теплоносія контуру каналізації; системи ГВП (гаряче водопостачання), теплопостачання контуру вентиляції, контуру витяжної вентиляції; 4, 8 — бак акумулятор проміжного теплоносія гарячої води; 5, 12 — тепловий насос системи ГВП контуру вентиляції; 6, 13 — випарник теплового насоса; 7, 14 — конденсатор теплового насоса

Також варто відзначити, що наведена схема має можливість підключення до бака-акумулятора інших джерел низькопотенційного тепла, що розширює можливості використання енергії для рекуперації.

Ще однією технологією рекуперації тепла стічних вод є використання теплообмінників. Теплообмінники забезпечують перенесення теплоти від носія з вищою температурою до носія з нижчою температурою без контакту чи змішування між ними. Існують різні теплообмінні технології, пристосовані до різних потреб (рис. 2): ротаційні, обребрені, пластинчасті та трубчасті теплообмінники.



**Рис. 2. Види теплообмінників [14]:** а) ротаційний теплообмінник «повітря — повітря»; б) обребрений теплообмінник «повітря — повітря, повітря — рідина»; в) пластинчастий теплообмінник «рідина — рідина, газ — газ, газ — рідина»; г) трубчастий теплообмінник «рідина — рідина, газ — газ, газ — рідина»

Розглянемо більш детально кожний вид. Так, у ротаційному теплообміннику (рис. 2, а) обертовий контактний пристрій безперервно прорізає потоки гарячого і холодного середовищ, (найчастіше газів), які мають протилежно напрямлений рух. У таких теплообмінниках, що включають тонкі пластини з металевого або керамі-



чного матеріалу, контактний обертовий пристрій виконаний з пористою структурою.

За конструктивними ознаками використовують ротаційні генератори дискового (а) та барабанного (б) типу (рис. 3).

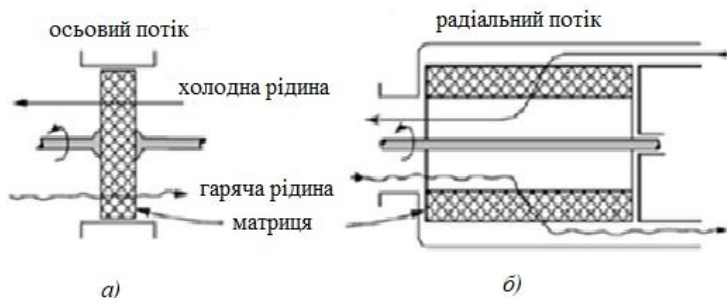


Рис. 3. Схема ротаційного дискового (а) та барабанного (б) регенеративного теплообмінника [25]

Найпростішою за формою конструкції теплообмінника є тип «труба в трубі» (рис. 4, а, б), де одне середовище протікає по внутрішній трубі, а в кільцевому зазорі між поверхнями двох труб рухається інше середовище. Поверхнею теплопередачі є стінка внутрішньої (меншої) труби. З метою зменшення габаритів і більшої компактності такі теплообмінники виготовляють секціями.

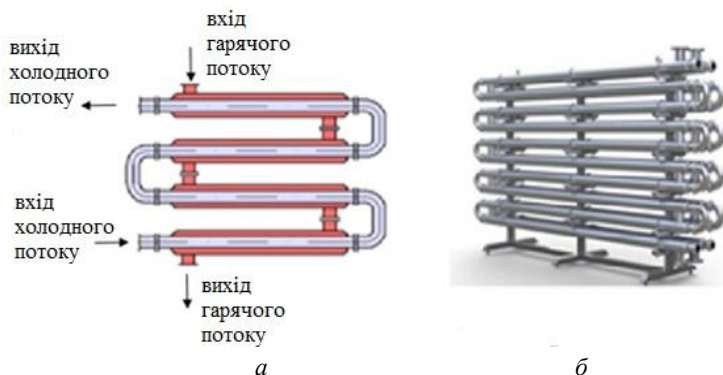


Рис. 4. Схема теплообмінника «Труба в трубі» [25]

Для забезпечення відносно великої питомої площі теплообміну використовують промисловий теплообмінник з великою кількістю секцій, (рис. 4, б), що дає змогу змінювати площу теплообміну до 47 м<sup>2</sup> та отримувати конструкцію модульного типу.

Пластинчасті теплообмінники (рис. 5) можуть застосовуватися для відбору тепла від стічних вод або інших рідких стоків, що утворюються виробничими процесами [15].

Основною перевагою пластинчастих теплообмінників є велика питома площа теплообміну за рахунок розподілення середовищ тонким шаром між пластинами, що дає змогу отримати більший у 2-4 рази коефіцієнт теплопередачі між середовищами порівняно з трубчастими теплообмінниками.

Використання теплообмінників для утилізації теплоти стічних вод має кілька переваг порівняно з тепловими насосами:

- не вимагає споживання електроенергії;

- має компактніший дизайн і нижчу вартість;
- може бути розміщений безпосередньо біля споживача, що дає змогу уникнути втрат тепла під час транспортування [16].

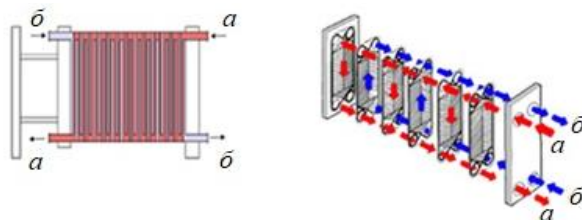


Рис. 5. Схема пластинчастого теплообмінника: потоки: *a* — гарячий теплоносіє; *б* — холодний теплоносіє

В окремих рекуператорах, зазвичай, вмонтована стандартна система очищення, за допомогою якої можна утилізувати і брудні стічні води. При спільному застосуванні теплового насоса і теплообмінника — рекуператора для нагріву води виникає необхідність 10% загального запасу енергії.

Гравітаційні пластинчасті теплообмінники працюють за принципом термосифону: гаряче середовище з низькою густиною піднімається вгору, а холодне середовище з високою густиною опускається вниз. Це сприяє створенню вільного теплового потоку між двома середовищами без використання додаткової енергії. Ефективною конструкцією теплообмінників для рекуперації теплоти стічних вод є пристрої у формі спіральних мідних котушок [23], які огортають мідний каналізаційний стояк (рис. 6, *a*, *б*).

Для рекуперації тепла стічних вод, побутових приміщень на підприємствах, може використовуватися два принципи: циліндричний блок рекуперації тепла (рис. 6, *б*) і піддон під душем (рис. 7). Схеми використовуються в країнах Європи, також вони набули популярності у світі. Такі рекуператори мають форму циліндра та виготовлені з міді.

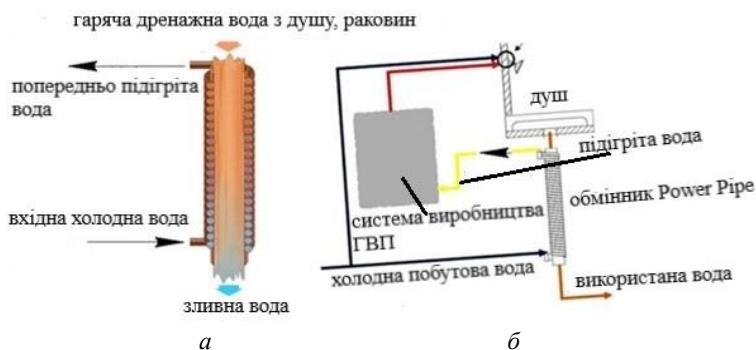


Рис. 6. Рекуперація тепла дренажної води (*a*) та схема циліндричного блоку рекуперації тепла (*б*) [23]

Конструктивно їх можна поділити на дві системи: перша — дві трубки є коцентричними, одна всередині іншої. Гаряча стічна вода проходить через внутрішню трубку, а чиста вода, яка буде нагріватися, проходить навколо першої труби. Максимальний діаметр трубки для стічної води становить 50 мм; Друга система — це котушка з трубки, яка намотана навколо прямолінійної труби. Діаметр труби стічної

води може становити 50, 75 або 100 мм. Ця система підходить для однієї або декількох душових кабін.

На рис. 7 представлена схема рекуперації тепла з використання піддону під душем. У таких випадках, як правило, теплообмінники є пластинчастими, недоліком є проблеми забруднення, для чого можуть використовуватися механізми їх очищення.

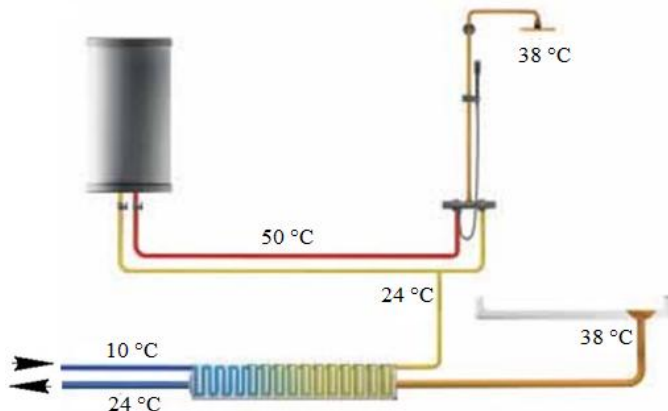


Рис. 7. Схема розташування плити рекуператора (піддону) тепла в душі [27]

Відома система утилізації тепла стічних вод фірми PKS — THERMPIPE (Німеччина) створена на базі теплопровідної системи FRANK PKS, в якій шляхом заміни звичайної каналізаційної труби тепло стічних вод можна використовувати для економного опалення або охолодження житлових і комерційних будівель [22]. Контур рекуператора занурений у розчин пропіленгліколю, а зсередини труби гладкі, що дає змогу стічним водам вільно рухатися по контуру. Така система утилізації тепла стічних вод виготовлена з поліетилену високої якості PE 100, який використовується також для водопостачання, питної води і газопостачання

Як згадувалось вище, важливим фактором рекуперації стічних вод є якість самого використаного середовища. Параметри забруднення стічної води можуть створювати свої специфічні впливи на ефективність проведення процесу рекуперації тепла з таких середовищ.

У табл. 2 наведено характеристики забруднень стічних вод для підприємств молочної, пивобезалкогольної та хлібопекарської промисловості.

Залежності від місця відбору теплоти можна виділити три категорії використання енергії стічних вод: низькопотенційна теплота стічних вод, що отримується всередині приміщень технологічних ліній, теплота, відібрана в каналізаційних колекторах, що ведуть до очисних станцій, теплота, відібрана на очисних спорудах.

Показники стічних вод за 2020 р. [18] для середньостатистичного молокозаводу, пивзаводу, хлібзаводу наведені в табл. 3. Згідно з даними, годинні скиди стічних вод підприємства становлять для молокозаводу 0,711 м<sup>3</sup>, пивзаводу — 0,687 м<sup>3</sup>, хлібзаводу — 0,215 м<sup>3</sup>.

Кількісно оцінити процеси втрат теплової енергії можна за формулою (1) [26], що дає змогу визначити потужності теплового потоку початкової та кінцевої води стічних вод, кВт:

$$P = \frac{cM(t_2 - t_1)}{3600}, \quad (1)$$

де  $c$  — питома теплоємність води  $c = 4,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$ ;

$M$  — годинна пропускна здатність, кг/год;

$t_1, t_2$  — початкова та кінцева температура стічних вод,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_1 - t_2 = \Delta t$  — перепад температур за рекуперації теплового потоку,  $^\circ\text{C}$ .

Таблиця 2. Характеристика стічних вод підприємствами

Походження стічних вод	Показники забруднень, мг/дм <sup>3</sup>	pH	Температура Стоків, $^\circ\text{C}$
Молокозавод	ХСК .....1500 БСК .....1200 ЗР .....320 Нітроген загальний.....50 Флюор .....до 16 Жири .....до 100 Хлориди .....150	3,6—10,4	16—33
Пивзавод	ХСК .....4187 БСК .....2596 ЗР .....1392 Нітроген амонійний .....14 Фосфати .....19 Жири .....відсутні	5—10,5	25—38
Хлібозавод	ХСК .....720 БСК .....400 ЗР .....380 Азот амонійний .....5,1 Фосфор .....3,1	6,5	30—60

**Примітка.** ХСК — хімічне споживання кисню; БСК — біологічне споживання кисню; ЗР — завислі речовини.

Таблиця 3. Показники стічних вод харчових підприємств

Показники		Молокозавод	Пивзавод	Хлібозавод
Сумарні річні скиди в поверхневі водні об'єкти зворотних (стічних) вод всього підприємствами, млн м <sup>3</sup>		0,965	0,208	0,231
Кількість підприємств		157	35	124
Скиди стічних вод, всього для одного середньо-статистичного підприємства, м <sup>3</sup>	в рік	6146	5943	1863
	в місяць	512,16	495,25	155,25
	за добу	17,072	16,508	5,175
	за годину	0,711	0,687	0,215

Визначення годинної пропускної здатності прийемо з урахування значень табл. 3. Оскільки скиди стічних вод подані в м<sup>3</sup>, то для переходу від об'ємної до вагової пропускної здатності прийемо  $1 \text{ м}^3 = 1000 \text{ кг}$ .

Максимальна потужність теплових потоків, яку можна отримати на підприємствах, становитиме на:

молокозаводі:

$$P_{\text{МОЛОКО}}^{\text{макс}} = \frac{4,18 \cdot 711(33-16)}{3600} = 14,03 \text{ кВт} ;$$

пивзаводі:

$$P_{\text{ПИВО}}^{\text{макс}} = \frac{4,18 \cdot 687(38-25)}{3600} = 10,369 \text{ кВт} ;$$

хлібозаводі:

$$P_{\text{ХЛІБ}}^{\text{макс}} = \frac{4,18 \cdot 215(60-30)}{3600} = 7,489 \text{ кВт} .$$

Результати проведеного дослідження представлені діаграмою (рис. 8) залежності максимальної потужності теплових потоків від температури води в технологічних процесах різних підприємств.

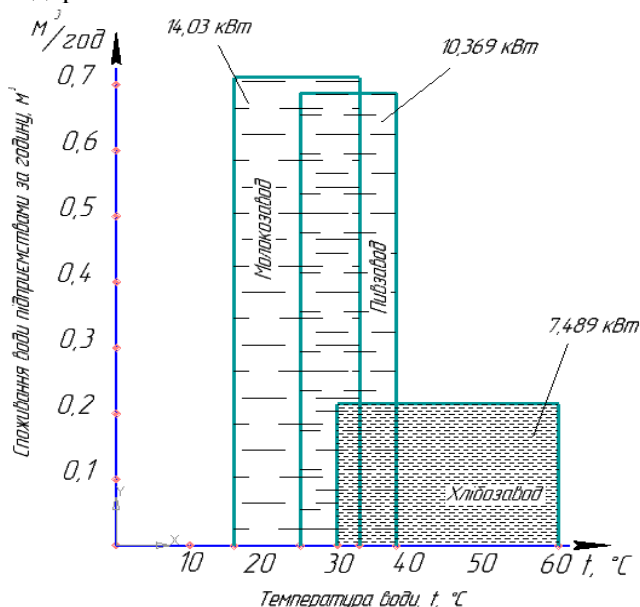


Рис. 8. Характеристики стічних вод та годинна максимальна потужність їх теплових потоків

Враховуючи вартість електроенергії за тарифами 2023 р. (5—6 грн за 1 кВт·год для підприємств, табл. 4), економія від рекуперації тепла становитиме:

$$E = P B_{\text{ел}}, \quad (2)$$

де  $P$  — потужність теплового потоку;

$B_{\text{ел}}$  — вартість електроенергії для підприємства.

Економія з максимальної потужності теплового потоку, наприклад, для молока, становитиме:

$$E_{\text{МОЛОКО}}^{\text{макс}} = P_{\text{МОЛОКО}}^{\text{макс}} B_{\text{ел}} = 14,03 \cdot 5 = 70,15 \text{ грн.}$$

У табл. 4 наведені економічні показники грошового еквіваленту максимальної потужності теплових потоків підприємств, а також рекуперативної потужності теплових потоків за перепаду температури  $\Delta t = 5^\circ\text{C}$  та  $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ .

Річна економія за цілодобової рекуперації тепла становитиме :

$$PE = 365 \cdot 24E, \quad (3)$$

де 365 — кількість днів у році; 24 — кількість годин в добі.

Таблиця 4. Економічні показники низькопотенційної рекуперації тепла

Показники	Молокозавод	Пивзавод	Хлібозавод
<b>Максимальна потужність (<math>P^{max}</math>) теплових потоків (за годину), кВт</b>	14,03	10,369	7,489
Вартість електроенергії ( $B_{el}$ ) 1 кВт·год, грн:	Грошовий еквівалент економії ( $E^{max}$ ) від рекуперації, грн.		
5	70,15	51,845	37,445
5,5	77,165	57,029	41,189
6	84,16	62,214	44,934
<b>Рекуперативна потужність теплового потоку (за годину) при <math>\Delta t = 10</math> °C, кВт</b>	8,25	7,97	2,49
Вартість електроенергії ( $B_{el}$ ) 1 кВт·год, грн:	Грошовий еквівалент економії ( $E^{\Delta t 10^\circ C}$ ) від рекуперації, грн.		
5	41,25	39,85	12,45
5,5	45,375	43,835	13,695
6	49,5	47,82	14,94
<b>Рекуперативна потужність теплового потоку (за годину) при <math>\Delta t = 5</math> °C, кВт</b>	4,127	3,988	1,248
Вартість електроенергії ( $B_{el}$ ) 1 кВт·год, грн:	Грошовий еквівалент економії ( $E^{\Delta t 5^\circ C}$ ) від рекуперації, грн.		
5	20,635	19,994	6,24
5,5	22,698	21,93	6,864
6	24,762	23,928	7,488

Максимальна можлива річна економія рекуперації тепла стічних вод при для молокозаводу:

$$PE_{\text{МОЛОКО}}^{max} = 365 \cdot 24 E_{\text{МОЛОКО}}^{max} = 365 \cdot 24 \cdot 70,15 = 614514 \text{ грн.}$$

Річна економія рекуперації при  $\Delta t = 5$  °C для молокозаводу:

$$PE_{\text{МОЛОКО}}^{\Delta t = 5^\circ C} = 365 \cdot 24 \cdot E_{\text{МОЛОКО}}^{\Delta t = 5^\circ C} = 365 \cdot 24 \cdot 20,635 = 180762,6 \text{ грн.}$$

Зменшення споживання енергії від традиційних джерел можливе за модернізації кожної окремої будівлі й технологічного устаткування, а також обмеження теплових втрат із застосуванням невичерпних відновлювальних альтернативних джерел енергії для виробництва теплоти на підігрівання води, опалення та вентиляцію приміщень тощо.

Аналіз використання різних технічних пристроїв і вирішення питань рекуперації тепла стоків води на харчових підприємствах свідчить про актуальність заходів до впровадження енергозбереження. Особливого значення такі роботи набувають нині, тому потребують досліджень у кожній галузі виробництва з впровадженням інноваційних і рекупераційних магістральних систем ще на етапі проектування підприємства.

З метою збільшення енергоефективності харчових підприємств використовуються різноманітні шляхи рекуперації енергії та їх технічне забезпечення, кожний з яких має свої переваги та недоліки. Важливим є і вплив самої конструкції рекуператора на ефективність використання стічних вод, а також значення показника коефіцієнта перетворення тепла, обумовленого зокрема характеристиками матеріалів, що використовуються в технічних рішеннях.

**Висновки.** Стан поведіння з ефективним використанням рекуперації тепла стічних вод на підприємствах харчової промисловості свідчить про економічну доціль-

ність проведення заходів рекуперації тепла з використанням найбільш ефективних технологічних проєктів. Дослідження вказують, що річна економія енергії, наприклад, на молокозаводі може становити 180762,6 грн в рік за рекупераційного температурного перепаду 5 °С, а за пропорційного збільшення температурного перепаду стічних вод отримаємо пропорційне збільшення економії енергії. Не менш важливим є фактор відношення максимально можливої річної економії рекуперації тепла стічних вод до рекуперації при  $\Delta t = 5$  °С, який для підприємств складає: молокозаводу — 3,4; пивзаводу — 2,6; хлібозаводу — 6,0.

З метою досягнення максимально можливого ефекту кожен окремих випадок повинен бути розглянутий індивідуально і базуватися на ретельному дослідженні існуючих джерел теплових втрат та їх поглинання з метою вивчення акцепторних теплових потоків і вибору відповідних технічних рішень для запобігання втратам та повторному використанню відповідних теплових потоків.

Для ефективної роботи систем рекуперації тепла важливо, щоб джерело відпрацьованого тепла й тепловідведення були розташовані поруч. Якщо вони надто віддалені один від одного, при плануванні слід враховувати втрати енергії при транспортуванні трубопроводами. Для окупності установки рекуперації тепла необхідно, щоб між джерелом тепла, що відходить, і тепловідведенням станції дотримувалося значення  $\Delta t$  не менше 5...10 °С.

Рекуперація тепла стічних вод особливо виправдовує себе при використанні в рамках виробничих процесів, що діють постійно, як у харчовій промисловості. Також система рекуперації тепла вигідна за низького рівня відпрацьованого тепла, але високого робочого навантаження, тобто рекуперація тепла тим вигідніша, чим довше обладнання знаходиться в роботі, наприклад, у броварнях, виробництві хліба, молочних продуктів і кондитерських виробів.

До перспектив подальших наукових розробок слід віднести дослідження комбінованих рекупераційних систем для харчових підприємств із застосуванням додаткового джерела теплової енергії, а також проєктування децентралізованих систем енергопостачання з повним циклом утилізації відпрацьованого тепла, пошуків шляхів ефективних акумуляторів тепла, використання енергоприводів у часи мінімальних пікових навантажень енергоспоживань.

Забезпечення рекуперації тепла на харчових підприємствах показує ефективність енергозбереження енергії та ресурсів, про що свідчить можливі показники економії.

Використання можливого рекупераційного потенціалу енергії на підприємствах дає змогу підвищити ефективність використання традиційних джерел енергії, забезпечити раціональне споживання ресурсів і зменшити вплив на екологію навколишнього середовища. Але через низьку впровадженість у виробництві існуючих технологій рекуперації на наших підприємствах заходи повернення тепла стічних вод мало поширені.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Шидловський, А. К. (2007). *Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії*. К.: «Українські енциклопедичні знання»
2. Клименко, В. В., Кравченко, В. І., Телюта, Р. В. (2020). *Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках*: навч. посіб. Кропивницький: ПП Ексклюзив-Систем.
3. Бурдо, О. Г., Трішин, Ф. А., Яровий І. І. Бурдо, О. Г. *Енергетичний моніторинг харчових виробництв*. Електронний довідковий посібник, Одеса: ОНАХТ, Електронне видання. DOI: <https://card-file.ontu.edu.ua/bitstream/123456789/11792/1/776-A1.pdf>.
4. Степанець, О. І., Пригодій, Д. В., Ткачук Н. А. (2017). Динаміка і енергетична рекуперація в технологічних машинах. *Наукові праці НУХТ*, 23(5). <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2017-23-5-2-5>.

5. Luo, Y., Jagtap, S., Trollman, H., Garcia-Garcia, G. (2023). A framework for recovering waste heat energy from food processing effluent. *Water*, 15(1), 12. <https://doi.org/10.3390/w15010012>.
6. Kebedel, A. Y., Hassen, A. A. (2020). Design and simulation of waste heat recovery system for heavy oil preheating in Dashen brewery company. Chapter № 3. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-43690-2\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-030-43690-2_43).
7. Shrivastava, V., Ali, I., Marjub, M. M., Rene, E. R., Soto A. M. (2022). Wastewater in the food industry: Treatment technologies and reuse potential. *Chemosphere*, 293(4). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133553>.
8. Vetriselvan, S., Shanmugaraj, G. (2020). Energy conservation techniques for food processing and manufacturing industries. *Researchgate*, 8. <https://www.researchgate.net/publication/342503636>.
9. Akama O. Energy use in food processing industry. *A Research. J. Food Technol. Pres.*, 6(7): 210—215. DOI: <https://www.alliedacademies.org/food-technology-and-preservation/>.
10. Соколенко, А. І., Васильківський, К. В., Степанець О. І. (2016). Рекуперация кінетичної енергії в технологічних машинах. *Харчова промисловість*, 20, 138—145. DOI: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khp\\_2016\\_20\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khp_2016_20_22).
11. Піддубний, В. А., Кравченко, М. Ф., Стадник, І. Я., Михайлик, В. С. (2022). Ефективність перерозподілу енергетичних ресурсів на підприємствах харчової промисловості системою повітряного теплоноса. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-205-0-11>.
12. Клименко, В. В., Кравченко, В. І., Телота, Р. В. (2020). *Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках*: навч. посіб. Кропивницький: ПП Ексклюзив-Систем.
13. Denysova, A. E., Klymchuk, O. A., Ivanova, L. V., Zhaivoron, O. S. (2020). Energy efficiency of heat pumps heating systems at subsoil waters for south-east regions of Europe. *Problemele energeticii regionale*, 4(48), 78—89.
14. Титар, С. С., Климчук, А. А. (2011). Використання скидного тепла у системі автономного теплопостачання житлових будівель. Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ»: зб. наук. тр. темат. вип.: *Енергетичні та теплотехнічні процеси та обладнання*, 6, 121—125. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/1146>.
15. Кьовенер, Д., Вільгельм, Б. (2021). *Міжгалузеві технології, здатні підвищити енергоефективність українських підприємств*. Проект «Консультавання підприємств щодо енергоефективності». GIZ. DOI: <https://sae.gov.ua/sites/default/files/blocks/2021-Cross-Cutting-Technologies-ukr.pdf>.
16. Кожушко, О. Д., Кізєєв, М. Д. (2017). Утилізація теплової енергії стічних вод та питної води в системах водопостачання і каналізації населених пунктів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 7, 94—100. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb\\_2017\\_7\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2017_7_16).
17. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Режим доступу: <https://mep.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>.
18. Показники використання води за 2020 рік. Режим доступу: [https://davt.gov.ua/fls18/st2019/KVED\\_2020.pdf](https://davt.gov.ua/fls18/st2019/KVED_2020.pdf).
19. Буляндра, О. Ф., Драганов Б. Х., Федорів, В. Г. та ін. (1998). *Теплотехніка*: навч. Посібник. Київ: Вища школа.
20. Босий, М. В. (2014). Перспективи застосування відновлювальних джерел енергії у системах теплопостачання. *Наукові записки*, 15, 89—92.
21. F. Schmid Sewage water: interesting heat source for heat pumps and chillers/ 9th International IEA Heat Pump Conference, 20—22 May 2008, Zürich, Switzerland.
22. Теплові насоси фірми Altermetica. Режим доступу: <https://altermetica.com.ua/>.
23. Zaloum C., Lafrance, M., Gusdor, J. (2007). Drain water recovery characterization and modeling. Sustainable Buildings and Communities. Natural Resources Canada, Ottawa. Url: [http://www.gfxtechnology.com/NRCAN-6\\_29\\_07.pdf](http://www.gfxtechnology.com/NRCAN-6_29_07.pdf).
24. Гивлюд, А. М. (2014). Моніторинг забруднення стічних вод молокопереробних підприємств. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування*, 787, 301—305. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPX\\_2014\\_787\\_59](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPX_2014_787_59).
25. *Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування*: навч. посіб. / За ред. проф. І. Ф. Малежика. К.: НУХТ, 2012.
26. *Технічна термодинаміка*: підруч. для студентів енерг. спец. вищ. навч. закладів. К.: Техніка, 2001.
27. Спеціалізована насосна компанія Tvist режим доступу: <https://euro-pump.com.ua>.



УДК 66.067:663.8

## SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF THE FILTERING PROCESS DURING CLARIFICATION OF KOMBUCHA BEVERAGE

S. Udodov, R. Savchuk, O. Chepeliuk, O. Chepeliuk

National University of Food Technologies

---

**Key words:**

kombucha,  
filtration,  
pore size,  
modeling

---

**Article history:**

Received 05.09.2024

Received in revised form  
04.10.2024

Accepted 09.10.2024

---

**Corresponding author:**

almeat@ukr.net

---

**ABSTRACT**

In the production of fermented beverages made for the trade network, low temperatures without mixing can be used to reduce the number of microorganisms in finished products, which promotes yeast sedimentation. At the same time, sedimentation hardly reduces the number of bacteria. The long sedimentation process in production is replaced by filtration.

The study aims to substantiate the rational operation modes of a filter with cardboard filter elements measuring 200×200 mm for clarifying a fermented beverage such as Kombucha. The research was carried out using physical (production experiment) and computational modeling methods in the Solid Works, Flow Simulation application.

The expedient duration of the filtration process and the quality of the clarified beverage significantly depend on the pore size of the filtration carton. When using the Colombo 18 filter, the recommended pore size of the filter carton is 10 microns. Under these conditions, the quality of the beverage does not change, and it is possible to preserve its marketable condition and extend its storage period. The filter productivity, determined by the volumetric method, changes slightly, by 18.7%, within 1.5 hours of operation, then decreases sharply from 12.2 to 3.4 l/min. With further filtering of the beverage, up to 120 minutes or more, the filter productivity decreases by more than half, which leads to irrational energy consumption. During the period of effective filtering, approximately 500...600 liters of filtered beverage are obtained. As the particles move towards the outlet, their number decreases significantly to 12% of the initial content. At a distance of approximately 80 mm from the filter element inlet, the density and thus the content of the dispersed phase stabilizes at a minimum level.

The results of the computational experiment confirm the results of physical modeling regarding filter productivity. The deviation from the values obtained in production does not exceed 2.7%.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-13

---

## ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРУВАННЯ ПРИ ОСВІТЛЕННІ НАПОЮ ТИПУ «КОМБУЧА»

С. О. Удодов, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0001-6149-9974>

Р. О. Савчук

О. О. Чепелюк, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-5417-9398>

О. М. Чепелюк, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0001-6295-6305>

Національний університет харчових технологій

Для дослідження освітлення ферментованого напою типу «Комбуча» використані методи фізичного (виробничий експеримент) і обчислювального моделювання в пакеті Solid Works, додаток Flow Simulation. Тривалість процесу фільтрування і якість освітленого напою суттєво залежать від розміру пор фільтраційного картону і температури напою. При використанні фільтра Colombo 18 рекомендовані значення пор становлять 10 мкм. За цих умов не змінюється якість напою, зберігається його товарний вигляд і подовжується термін зберігання. Найбільш ефективно процес фільтрування відбувається протягом 60...90 хв, при цьому отримують 500...600 л відфільтрованого напою.

**Ключові слова:** комбуча, фільтрування, розмір пор, моделювання.

**Вступ.** Збільшення споживання ферментованих напоїв, зокрема типу «Комбуча», безпосередньо пов'язано зі зростанням популярності здорового способу життя.

На основі досліджень *in vitro* та *in vivo* задокументовано кілька переваг чайного гриба для здоров'я, таких як антиоксидантна, протимікробна, протизапальна та протипухлинна дія [1]; він є натуральним пробіотичним напоєм [2, 3], а також має інші терапевтичні властивості для покращення імунної системи людини та запобігання деяким хронічним захворюванням [4]. Для досягнення найбільшого ефекту варто вживати такі напої безпосередньо в місцях виробництва, неосвітленими. Однак для виходу на ринок, постачання в торговельну мережу освітлення доводиться виконувати для збереження товарного виду і подовження терміну зберігання напою.

**Аналіз результатів останніх досліджень і публікацій.** При освітленні напою «Комбуча» відбувається видалення біоплівки, властивості яких залежать від складу мікроорганізмів, характеристик субстрату, факторів навколишнього середовища і параметрів ферментації [5].

Біоплівка комбучі складається із симбіотичної культури бактерій і дріжджів, вона плаває на поверхні рідини під час ферментації напою. Панівними бактеріями в біоплівках комбучі є оцтовокислі бактерії (*Acetobacter* і *Gluconobacter*), а основними дріжджами — *Zygosaccharomyces*, *Saccharomyces*, *Saccharomycodes* та *Schizosaccharomyces* [6], причому 84% дріжджів, знайдених у чайному грибі, належать до роду *Zygosaccharomyces* [7].

Основними продуктами ферментації чайного гриба є етанол та органічні кислоти — молочна, оцтова (надає чайному грибу кислуватого смаку), глюконова та глюкоуронова [8]. Додатковим побічним продуктом виробництва оцтової кислоти бактеріями є целюлоза, яка забезпечує каркас для асоційованих з біоплівкою мікробів [9].

Під час бродіння та після фасування в пляшки частина цієї еукаріотично-бактеріальної мікробної спільноти дріжджів і бактерій почне осідати на дні, інша — пере-

буватиме у завислому стані. Для вилучення цих часточок використовують як осаджування, так і фільтрацію, хоча багато виробників таких ферментованих напоїв акцентують на недоцільності цих процесів і необхідності зберегти в напоях живу культуру мікроорганізмів.

У виробництві ферментованих напоїв, як і в пивоварній промисловості, для зменшення кількості дріжджів у готових виробках можна застосовувати вплив низьких температур при відсутності перемішування, що сприяє осіданню дріжджів. При цьому седиментація майже не зменшує кількість бактерій. Тривалий процес осаджування на виробництві замінюють фільтруванням.

**Актуальність досліджень.** Прокаріотичні клітини, зазвичай, є значно меншими за еукаріотичні, тому правильне визначення селективності фільтра може забезпечити видалення дріжджів і волокон фільтрацією. Однак використання фільтрів із надто малим розміром пор, здатних затримувати переважну кількість дріжджів, може перешкодити карбонізації напою. Для реалізації процесу фільтрування на практиці, зокрема у виноробній галузі, широко застосовують фільтр-преси Colombo 18, що обумовлено їх доступністю і дешевизною. Однак таке обладнання має невисоку продуктивність, зокрема через потребу частої заміни фільтрувального матеріалу — картону. В науковій літературі не наведена інформація щодо вибору раціональних режимів роботи такого обладнання. Зважаючи на потреби промисловості і відсутність загальноприйнятих рекомендацій, вирішення питання обґрунтування раціональних режимів роботи фільтр-пресів із картонними фільтрувальними елементами при освітленні ферментованих напоїв є актуальним завданням.

**Мета і завдання досліджень.** Мета статті — визначити раціональні режими роботи фільтра, які забезпечать виробництво якісного, без осаду і завислих часточок, ферментованого напою при забезпеченні заданої продуктивності фільтра. Відповідно до поставленої мети сформульовані основні завдання дослідження:

- за допомогою фізичного моделювання проаналізувати процес відділення завислих часточок з напою типу «Комбуча»;
- розробити імітаційну модель процесу фільтрування напою в обладнанні з картонними фільтрувальними елементами і перевірити її адекватність;
- на основі отриманих результатів рекомендувати раціональні режими роботи фільтра.

**Матеріали і методи.** Об'єктом дослідження є готовий до фасування ферментований напій, вистояний за технологією 10 діб. За цей час в ньому утворилася невелика кількість осаду, який потрібно видалити. Температура слабогазованого напою «Комбуча»  $t = 3...5$  °C, такі її значення обумовлені потребою зберегти якомога більше CO<sub>2</sub> в напої, розчинність якого при низьких температурах вища.

Дослідження проводилися методами фізичного (виробничий експеримент) і обчислювального моделювання в пакеті Solid Works, додаток Flow Simulation.

У виробничих умовах досліджено процес фільтрування ферментованого напою типу «Комбуча» із застосуванням фільтра Colombo 18, до складу якого входять електронасос і фільтрувальні елементи з картону (рис. 1). Розмір фільтрувальних пластин — 200×200 мм, розмір пор — від 0,6 до 10 мкм. Продуктивність фільтра, зазначена виробником, — 550...800 л/год.

Під час проведення фізичного експерименту об'ємним методом визначалася якість освітленого напою і фактична пропускна здатність фільтра.

Проведені шість серій дослідів з кроком 30 хв по часу, експеримент в кожній серії повторювався тричі (табл. 1, рис. 2).

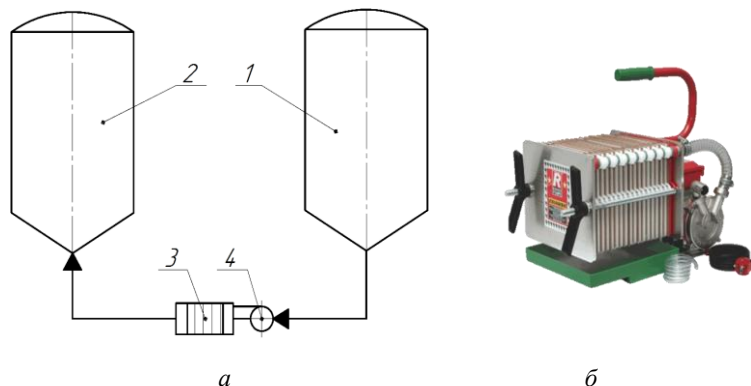


Рис. 1. Схема комплексу фільтрування: а: 1 — циліндро-конічний апарат; 2 — форфас; 3 — фільтр Colombo 18; 4 — насос; б — фільтр Colombo 18

Таблиця 1. Зміна в часі продуктивності фільтра з фільтраційним картоном з розміром пор 10 мкм

Продуктивність Q, л/хв	Тривалість роботи фільтра τ, хв					
	0	30	60	90	120	150
Q <sub>1</sub>	15,0	14,6	13,3	12	6,0	3,5
Q <sub>2</sub>	14,8	14,3	13,5	12,4	6,2	3,3
Q <sub>3</sub>	15,2	14,8	12,9	12,1	5,8	3,4
Q <sub>ср</sub>	15,0	14,6	13,2	12,2	6,0	3,4

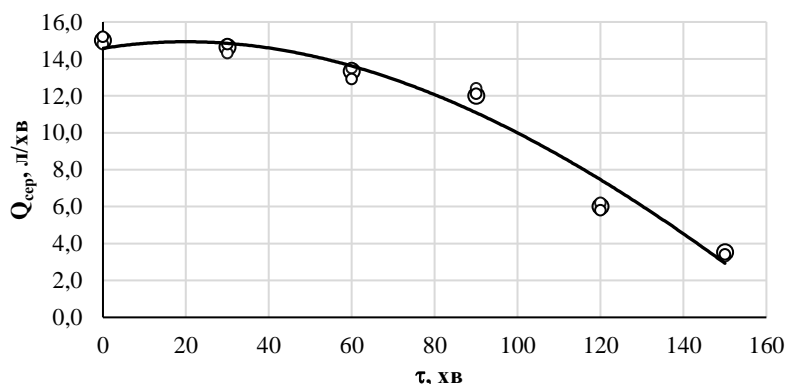


Рис. 2. Зміна продуктивності фільтра в часі

**Результати дослідження.** За результатами перших дослідів, спрямованих на визначення якісних показників напою, було виявлено, що фільтрувальний картон із розміром пор менше 1 мкм взагалі недоцільно використовувати для фільтрування ферментованого напою, оскільки фільтр затримує не лише дріжджі, але й бактерії (розмір *Acetobacter* 0,6...0,8×1,0...4,0 мкм, *Gluconobacter* 0,7...0,9 мкм×2 мкм), з діяльністю яких пов'язано набуття смаку, кольору та поживної цінності напою типу «Комбуча». Використання фільтрувального картону з розміром пор 5 мкм показало,

що колір і смак напою суттєво не змінюються, однак корисна мікрофлора в готовому напої практично відсутня.

Фільтраційний картон з розмірами комірок 10 мкм не змінює органолептичні показники напою, а більшість дріжджів і драглеподібний осад практично затримуються фільтром, в тому числі за рахунок утворення на поверхні пластин додаткового шару осаду, який затримує мікроорганізми, розмір яких менший за номінальний розмір пор фільтрувальних елементів.

Саме фільтраційний картон із розміром комірок 10 мкм був обраний як найбільш доцільний для використання і подальших досліджень, проведення як фізичних, так і обчислювальних експериментів.

Продуктивність фільтра  $Q_{\text{ср}}$ , визначена об'ємним методом, не дуже суттєво, на 18,7%, змінюється протягом 1,5 год роботи, надалі різко зменшується від 12,2 до 3,4 л/хв (табл. 1, рис. 2). При подальшому фільтруванні напою, до 120 хв і більше, продуктивність фільтра зменшується більш ніж удвічі внаслідок закупорювання пор фільтраційного картону. Недоцільність подальшої експлуатації фільтра понад 100 хв обумовлена нерациональними енерговитратами.

При восьмигодинній тривалості зміни, за умови заміни пластин кожні 1,5 год, продуктивність фільтра (середньодобова теоретична) орієнтовно становитиме:

$$8 \times 60 \times 12,2 = 5856 \text{ л/зміну,}$$

що в 2,9 раза перевищує продуктивність 2000 л/зміну, передбачену виробничою програмою.

При проведенні обчислювального експерименту у програмі SolidWorks Flow Simulation, як і при фізичному моделюванні, розглянуто пористий матеріал — фільтраційний картон з розмірами пор 10 мкм. Вхідними параметрами є відносна швидкість, розмір і кількість часточок у рідині.

Найбільша концентрація часточок після надходження напою «Комбуча» у фільтр спостерігається поблизу впускного патрубка. У мірі руху до впускного патрубка їх кількість суттєво зменшується (рис. 3) і становить 12% від початкового вмісту. Найбільше часточок затримується у верхній частині фільтруючої пластини.

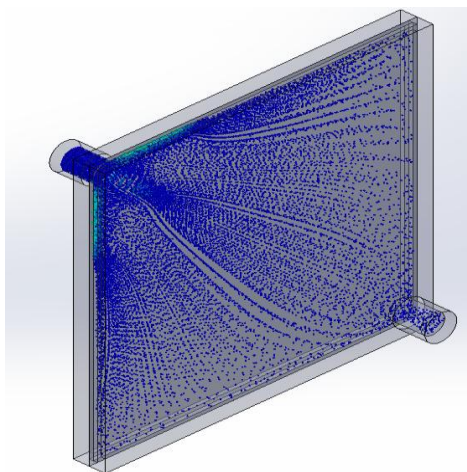


Рис. 3. Концентрація часточок на поверхні фільтрувального елемента

Проаналізувати зміну вмісту твердої фази можна і за густиною рідини. Вже на відстані приблизно 80 мм від входу у фільтрувальну пластину густина  $i$ , відповідно, вміст дисперсної фази стабілізуються на мінімальному рівні.

На вході у фільтр тиск рідини становить 1,2 МПа, а після надходження безпосередньо у робочу область фільтра стабілізується на рівні 0,8 МПа.

Швидкість рідини при русі у фільтрі також суттєво змінюється — від 0,35 м/с на вході до 0,034 м/с у відповідному патрубку. Причому всередині фільтрувального простору швидкість потоку в середньому становить 0,05 м/с (рис. 4).

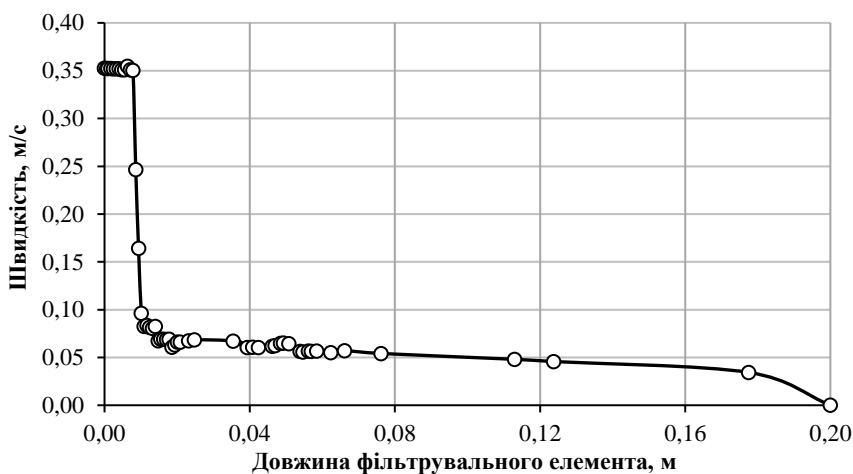


Рис. 4. Розподіл швидкості руху часточок по довжині фільтрувального елемента

Значення швидкості рідини, отримані в ході обчислювального експеримента, підтверджують результати фізичного моделювання щодо продуктивності фільтра і за розрахунками становить 11,9 л/хв. Відхилення від значень, отриманих на виробництві, не перевищує 2,7%.

**Висновки.** Доцільна тривалість процесу фільтрування і якість освітленого напою суттєво залежать від розміру пор фільтраційного картону та температури напою. При використанні фільтра Colombo 18 для освітлення напою типу «Комбуча» рекомендовано використовувати фільтрувальний картон з розміром пор 10 мкм, який не змінює якість напою, надає можливість зберегти його товарний вигляд і подовжити термін зберігання.

Найбільш ефективно процес фільтрування відбувається протягом 60...90 хв. Надалі суттєво зменшується продуктивність фільтра і виникає необхідність замінити фільтрувальний картон. Протягом проміжку часу ефективного фільтрування отримують приблизно 500...600 л відфільтрованого напою.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Kitwetcharoen, H., Phung, L. T., Klanrit, P., Thanonkeo, S., Tippayawat, P., Yamada, M., Thanonkeo, P. (2023). Kombucha Healthy Drink — Recent Advances in Production, Chemical Composition and Health Benefits. *Fermentation*, 9(1): 48. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation9010048>.
2. Kurniawan, M. A., Safiyr, S., Mutiara, R., Nabila, K. T., & Nurfatihah, J. K. (2023). Exploring the Health Potential of Kombucha Tea: Empowering the Community of Koto Perambahan Village: Eksplorasi Potensi Kesehatan Teh Kombucha: Pemberdayaan Masyarakat Desa Koto Perambahan. *MULTIPLE: Journal of Global and Multidisciplinary*, 1(3), 302—308. Retrieved from <https://journal.institercom-edu.org/index.php/multiple/article/view/70>.

3. Tamang, J. P., & Lama, S. (2022). Probiotic properties of yeasts in traditional fermented foods and beverages. *Journal of applied microbiology*, 132(5), 3533—3542. <https://doi.org/10.1111/jam.15467>.
4. Jayabalan, R., & Waisundara, V. Y. (2019). *Kombucha as a Functional Beverage. Functional and Medicinal Beverages*, Academic Press.
5. Thinzar Aung, Mi Jeong Kim. (2024). A comprehensive review on kombucha biofilms: A promising candidate for sustainable food product development. *Trends in Food Science & Technology*, 144, 104325.
6. Thinzar Aung, Jong-Bang Eun. (2021). Production and characterization of a novel beverage from laver (*Porphyra dentata*) through fermentation with kombucha consortium. *Food Chemistry*, 350, 129274. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129274>.
7. Watawana, M., Jayawardena, N., Gunawardhana, C., & Waisundara, V. (2016). Enhancement of the antioxidant and starch hydrolase inhibitory activities of king coconut water (*Cocos nucifera* var. *aurantiaca*) by fermentation with kombucha "tea fungus". *International Journal of Food Science & Technology*, 51(2), 490—498. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13006>.
8. Blanc, P. (1996). Characterization of the tea fungus metabolites. *Biotechnology Letters*, 18, 139—142. [10.1007/BF00128667](https://doi.org/10.1007/BF00128667).
9. Gordon, A. S., & Moore, B. (2011). *The Kombucha Biofilm: a Model System*. Yale University, Final report on research conducted during the Microbial Diversity course, Marine Biological Laboratories, Woods Hole, MA.

УДК 621.869.8

## SYNTHESIS OF BOTTLE MANIPULATOR FOR CASE PACKING

L. Krivoplias-Volodina, V. Kostin, A. Derenivska

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

bottle manipulators for case packing, gripping head, mechanism for moving packages, reactions in kinematic pairs, energy intensity

**Article history:**

Received 15.04.2024

Received in revised form 25.04.2024

Accepted 26.04.2024

**Corresponding author:**

vkostin1951@gmail.com

---

**ABSTRACT**

Manufacturing automatic packaging equipment samples using advanced design methods is a strategically important direction for industry development. One effective approach to addressing this challenge is ensuring high levels of automation and precision in packaging operations.

One area of packaging equipment development involves the rational design of devices for reorienting layers of glass bottles. Significant dynamic loads occur during the reorientation process, which can result in packaging and product loss. Therefore, the primary task in determining the design parameters and operating modes of bottle manipulators for case packing is the development of structural, kinematic, and power parameters.

The purpose of this study is to analyze existing designs of bottle manipulators for case packing, identify opportunities to increase the productivity of such machines, improve existing samples, and determine the influence of various factors on productivity and the capability of automatic machines.

The objects of study are the bottle gripper heads of manipulators for case packing and the functioning of their working bodies. The main method for improving and selecting the optimal structure of bottle manipulators for case packing involves analytically studying their characteristic parameters, such as the movement of constituent elements along rectilinear and curvilinear trajectories when loaded and unloaded.

The conducted analysis of the influence of various parameters on the acting forces at the hinge of the gripping head showed that the normal component of the reaction, which drives movement in corresponding sections, depends on factors such as the total weight of the gripping head, the weight of the bottles, and the angle at which the reaction is directed relative to the fixed guide. Additionally, it is influenced by the size of the hinge and friction coefficients. These dependencies allow for the synthesis of movement mechanisms under conditions of minimal load on kinematic pairs during the rotation of the connecting rod within 65 to 130 degrees.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-14

---



## СИНТЕЗ ВИКОНАВЧОГО МЕХАНІЗМУ УКЛАДАЛЬНИКА ПЛЯШОК

Л. О. Кривопляс-Володіна, д-р техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-1516-6153>

В. Б. Костін, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0009-0006-6040-2476>

А. В. Деренівська, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-0032-7583>

Національний університет харчових технологій

*У статті проведено аналіз впливу різних параметрів на діючі зусилля в шарнірі підвіски захватної головки укладальника скляних пляшок. З'ясовано, що величина нормальної складової реакції, яка є рушійною силою на відповідних ділянках руху, залежить від сумарної ваги захватної головки та упаковок, а також від кута, під яким реакція направлена стосовно нерухомої напрямної. На неї впливають розміри шарніра, коефіцієнти тертя. Отримані залежності дають змогу виконати синтез механізму переміщення за умови мінімального навантаження в кінематичних парах кріплення захватної головки під час повороту шатуна в межах 65...130 град.*

**Ключові слова:** укладальник, захватна головка, механізм переміщення упаковок, реакції в кінематичних парах, енергоємність.

**Вступ.** Виготовлення зразків автоматичного пакувального обладнання з використанням прогресивних методів проєктування є стратегічно важливим напрямком розвитку промисловості. Постійне оновлення й удосконалення пакувальних матеріалів, зміни в технологіях пакування вимагають від розробників пакувального обладнання пошуку нових шляхів, які б забезпечували ефективність, якість і безпеку. Одним із ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є забезпечення умов високої автоматизації і точності виконання технологічних операцій пакування.

Завдяки використанню передових технологій проєктування та відповідних матеріалів досягаються найкращі результати у вигляді компактних, потужних та енергоефективних технічних систем, що відповідають вимогам сучасного ринку пакувального обладнання. Наукові дослідження щодо оптимізації синтезу структури та роботи різних зразків пакувального обладнання забезпечує їхню ресурсо- та енергоощадність, продуктивність і безперебійну роботу.

Одним із напрямів розвитку пакувального обладнання є раціональне проєктування пристроїв переорієнтування шару скляних пляшок. У процесі переорієнтування виникають великі динамічні навантаження, що може призвести до втрати упаковки та продукту. Тому першочерговим завданням для визначення конструкції, параметрів і режимів роботи виконавчого механізму укладальника пляшок є розробка структурних, кінематичних і силових параметрів, які б забезпечували виконання вимог, поставлених перед розробниками, [1—6].

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Існуючі методики вибору оптимальної структури пакувальних машин наведено в наукових працях [1, 7]. В процесі проведення оптимізаційних досліджень враховуються дійсні значення технічних характеристик і параметрів роботи укладальних пристроїв. Функціональний підхід проєктування вимагає враховувати фактори, які характеризують якісне виконання функцій, що поставлені в технічному завданні на проєктування.

Оцінку параметрів якості пакувальних машин здійснюють за експлуатаційними та виробничо-технічними властивостями [8—10]. До експлуатаційних властивостей відносять показники призначення, надійності, ергономіки та естетики. До виробни-

чо-технічних — трудомісткість, металомісткість, енергомісткість, показники стандартизації та уніфікації.

**Мета дослідження:** проаналізувати існуючі конструкції укладальників упаковок в ящики з метою виявлення можливостей підвищення продуктивності таких машин та удосконалення існуючих зразків, визначити вплив різних факторів на продуктивність і роботоспроможність машин-автоматів.

**Матеріали і методи.** Об'єктом дослідження є машини-автомати для пакування й укладання упаковок в споживчу та транспортну тару і функціонування їхніх робочих органів. Основним методом удосконалення та вибору оптимальної структури пакувальної машини є аналітичне дослідження характерних параметрів переміщення складових елементів укладальника пляшок у тару на прямолінійному і криволінійному відрізках траєкторії руху завантаженої та не завантаженої захоплювальної головки.

**Результати досліджень.** У результаті проведеного аналізу існуючих конструкцій укладальників пляшок у тару було прийнято рішення в подальшому удосконалити схему, наведену на рис. 1. На першому етапі проектування виконавчого механізму переміщення шару упаковок були аналітично визначені залежності для розрахунку геометричних і кутових характеристик майбутньої конструкції [11, 12]. На схемі введені такі позначення:  $h$  — довжина ділянки підйому захватної головки над вузлом формування шару;  $H$  — довжина ділянки опускання пляшок в тару;  $R$  — радіус криволінійної ділянки;  $l_2$  — довжина приводного важеля;  $l_3$  — довжина шатуна. Крім двох останніх, інші параметри визначаються з урахуванням розмірів упаковки, транспортної тари, габаритів вузлів формування відповідного шару упаковок і відведення тари.

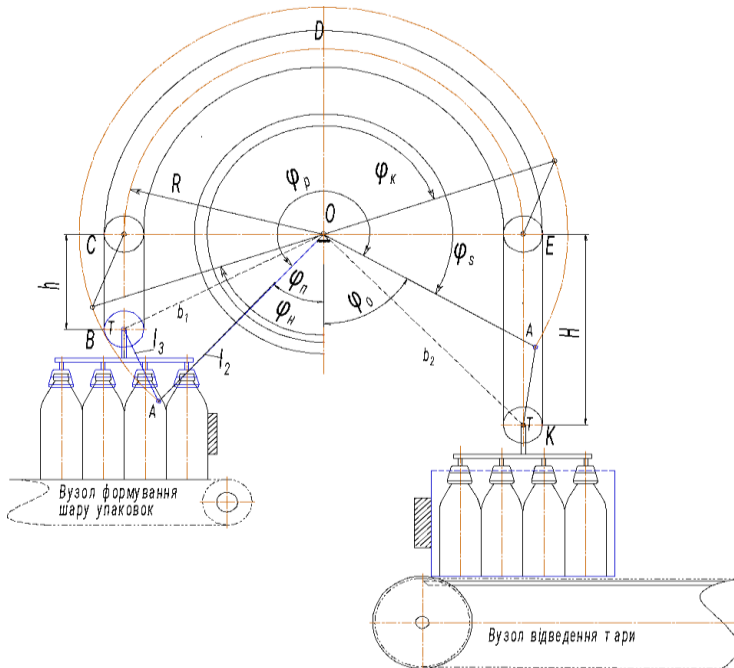


Рис. 1. Схема визначення параметрів руху захватної головки

Враховуючи відомі параметри, відстані  $b_1$  та  $b_2$  в крайніх положеннях точки підвіски захватної головки визначаються згідно із залежностями:

$$b_1 = \sqrt{R^2 + h^2}, b_2 = \sqrt{R^2 + H^2}. \quad (1)$$

Початковий кут положення приводного важеля над вузлом формування шару упаковок за теоремою косинусів дорівнюватиме:

$$\varphi_{\Pi} = \frac{\pi}{2} - \left( \frac{R^2 + h^2 + l_2^2 - l_3^2}{2l_2\sqrt{R^2 + h^2}} \right). \quad (2)$$

Кут положення приводного важеля над конвеєром для транспортної тари:

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} + \left( \frac{R^2 + H^2 + l_2^2 - l_3^2}{2l_2\sqrt{R^2 + H^2}} \right). \quad (3)$$

Кут, який визначає робочий хід захватної головки з пляшками при русі від вузла формування до транспортної тари, визнається як різниця (4):

$$\varphi_p = \left( \pi + \frac{h}{R} \right) + \frac{H}{R} + \left( \frac{a_0^2 + h^2}{2l_2\sqrt{R^2 + h^2}} \right) - \left( \frac{a_0^2 + H^2}{2l_2\sqrt{R^2 + H^2}} \right), \quad (4)$$

де  $a_0$  заміна виду:

$$a_0^2 = R^2 + l_2^2 - l_3^2. \quad (5)$$

1. Вертикальна прямолінійна ділянка підйому шару упаковок над вузлом формування шару: початок руху визначається згідно із залежністю (2). Кінець руху і початок руху вдовж криволінійної напрямної:

$$\varphi_H = \frac{\pi}{2} \left( \frac{R^2 + l_2^2 - l_3^2}{2Rb_2} \right). \quad (6)$$

2. Криволінійна ділянка переміщення захватних головок: початок руху визначається залежністю (6), кінець руху вдовж криволінійної напрямної:

$$\varphi_K = 3 \frac{\pi}{2} \left( \frac{R^2 + l_2^2 - l_3^2}{2Rb_2} \right). \quad (7)$$

3. Вертикальна ділянка руху при завантаженні упаковок в тару: початок руху визначається залежністю (7), кінець операції завантаження відповідає куту:

$$\varphi_S = \left( 3 \frac{\pi}{2} - \frac{H}{R} \right) - \left( \frac{R^2 + l_2^2 - l_3^2}{2Rl_2} \right). \quad (8)$$

На другому етапі визначимо ряд обмежень стосовно вибору довжини ланок механізму переміщення упаковок (рис. 2).

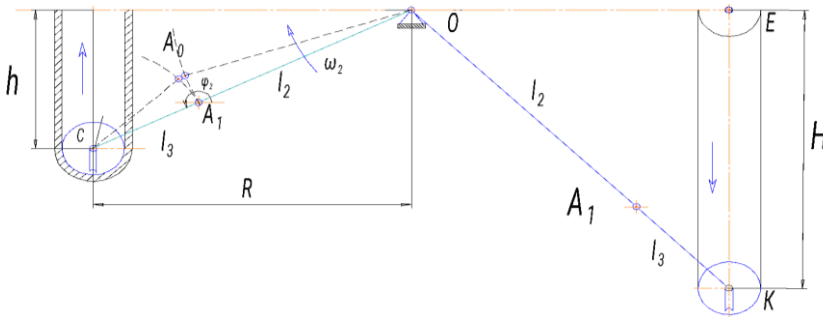


Рис. 2. Схема розрахунку для ділянки підйому вантажу

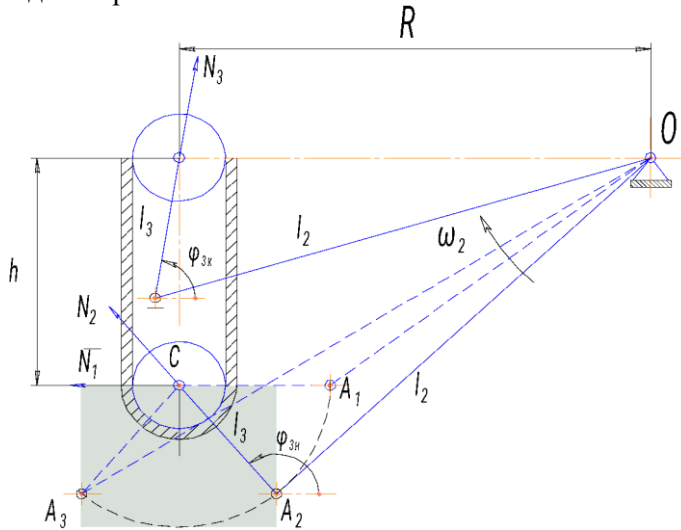
Найменша сумарна довжина ланок механізму буде у разі розташування їх вдовж ліній ( $CA_1O$ ), для ділянки підйому вантажу — як показано на схемі (рис. 2). Аналогічно для ділянки опускання упаковок в тару — це буде лінія  $OA_1K$ . Але тоді існування з'єднання в кінематичній парі  $A$  можливе лише в точці  $A_1$ , тому що при будь-

якому русі ланок відбувається її руйнування (точка  $A_0$ ). Для існування кінематичної пари в точці  $A_1$ , де з'єднуються ланки 2 і 3, потрібно, щоб виконувалася умова:

$$l_2 + l_3 > \sqrt{R^2 + H^2}. \quad (9)$$

Більш точні рекомендації щодо вибору довжин ланок 2 і 3 можна дати, аналізуючи вплив нормальної складової реакції ланки 3 на шарнір залежно від можливих варіантів його руху [1, 4, 5, 8]. Так, залежно від кута між напрямком руху і напрямком нормальної складової реакції в точці підвіски захватної головки шарнір може обертатися (чисто кочення), обертатися і одночасно ковзати, просто ковзати або блокувати рух (заклинювання) [13].

Крім того, точка дотикання шарніра з нерухомою напрямною в процесі підйому вантажу буде змінюватися і діяти на ліву або праву сторону вертикальної напрямної. Це залежить від співвідношенні довжин ланок, а також від кута повороту шатуна, що добре видно на рис. 3.



**Рис. 3.** Напрямок дії нормальної складової реакції  $N$ :  $N_1$  — рух відсутній (заклинювання);  $N_2$  — тиск на лівий бік напрямної;  $N_3$  — тиск на правий бік напрямної

Якщо розглянути рівномірний підйом захватної головки безуважання сил інерції, то навантаження для такого випадку представлено у вигляді схеми на рис. 4.

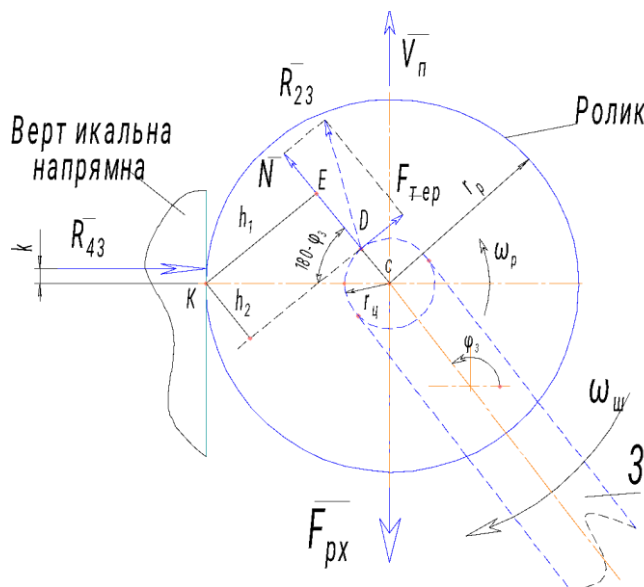
Повна реакція  $R_{23}$  — на шарнір з боку шатуна, буде направлена вдовж дотичної до кола тертя. Якщо враховувати мікрозазори між цапфою і внутрішнім отвором шарніра, то нормальна складова реакції  $R_{23}$  буде направлена вдовж осі шатуна і прикладена в точці  $D$ , дотикання цапфи і шарніра.

Як уже вказувалося, при підйомі вантажу можливі різні варіанти руху, але найбільш ощадливий (найменші втрати на тертя) — це чисте кочення шарніра вдовж напрямної. Для того, щоб шарнір перекочувався вдовж вертикальної напрямної, а не ковзався, потрібно, щоб виконувалася умова — сума моментів діючих сил відносно точки  $K$  (рушійних та тих, що гальмують рух):

$$Nh_1 + F_{\text{тер}}h_2 \geq R_{43}k + F_{\text{рх}}r_p. \quad (10)$$

Якщо врахувати, що  $F_{\text{мер}} = fN$  і зробити перетворення нерівності відносно сили  $N$ , яка є рушійною силою (з боку шатуна), то отримаємо:

$$N \geq \frac{R_{43}k + F_{\text{рх}}r_p}{h_1 + fh_2}. \quad (11)$$



**Рис. 4.** Схема розрахунку рівномірного підйому захватної головки без урахування сил інерції: 3 — шатун;  $F_{px}$  — сила, яка навантажує виконавчий механізм укладальника на ділянці робочого ходу (вага захватної головки та шару упаковок);  $R_{43}$  — реакція на шарнір з боку нерухомої напрямної;  $R_{23}$  — реакція на шарнір з боку шатуна;  $F_{fep}$  — сила тертя ковзання між шарніром та цапфою на шатуні;  $N$  — нормальна складова реакції  $R_{23}$ ;  $\varphi_3$  — кут повороту шатуна;  $\omega_3$  — кутова швидкість шатуна;  $\omega_p$  — кутова швидкість обертання шарніра (в нашому випадку не впливає на рух інших елементів — зайвий ступінь рухливості);  $r_p$  — радіус шарніра;  $r_u$  — радіус цапфи в точці монтажу шарніра;  $h_1$  — відстань до лінії дії нормальної складової реакції;  $h_2$  — відстань до лінії дії сили тертя;  $k$  — коефіцієнт тертя кочення в точці контакту шарніра з нерухомою напрямною

Відстані  $h_1$  і  $h_2$  можна визначити з трикутника  $KEC$ :

$$h_1 = r_p \sin \sin (180 - \varphi_3) \quad \text{і} \quad h_2 = r_p \cos \cos (180 - \varphi_3) - r_u. \quad (12)$$

Залежність для визначення реакції  $R_{43}$  можна знайти, спроектувавши діючі сили на горизонтальну вісь  $OX$ :

$$R_{43} = -N(\cos \cos \varphi_3 + f \sin \sin \varphi_3). \quad (13)$$

Після підстановки та відповідних перетворень отримаємо рівняння для визначення нормальної складової реакції  $R_{23}$ :

$$N \geq \frac{F_{px}}{\sin \sin \varphi_3 \left(1 + f \frac{k}{r_p}\right) - \cos \cos \varphi_3 \left(f - \frac{k}{r_p}\right) - f \frac{r_u}{r_p}}. \quad (14)$$

З метою більш ретельного аналізу отриманих залежностей виконані відповідні розрахунки в системі MathCAD з узагальненням результатів у вигляді графічної залежності.

Зміна величини нормальної складової реакції в точці фіксації захватної головки залежно від кута повороту шатуна та різної ваги захватної головки і упаковок показана на рис. 5.

Як видно з графіка, найменші значення реакції  $N$  (відповідно, мінімальні витрати енергії) припадають на діапазон зміни кута  $\varphi_3$  в процесі підйому вантажу від  $65^\circ$  до  $130^\circ$  (на рис. 5 затемнена зона). Це буде найменш енергоємний режим і, відповідно, його можна використовувати як критерій для вибору довжин приводного важеля та

шатуна, які безпосередньо впливають на кут  $\varphi_3$ . Слід також зауважити, що зі збільшенням  $F_{px}$  можливий діапазон зміни кута  $\varphi_3$  буде зменшуватися.

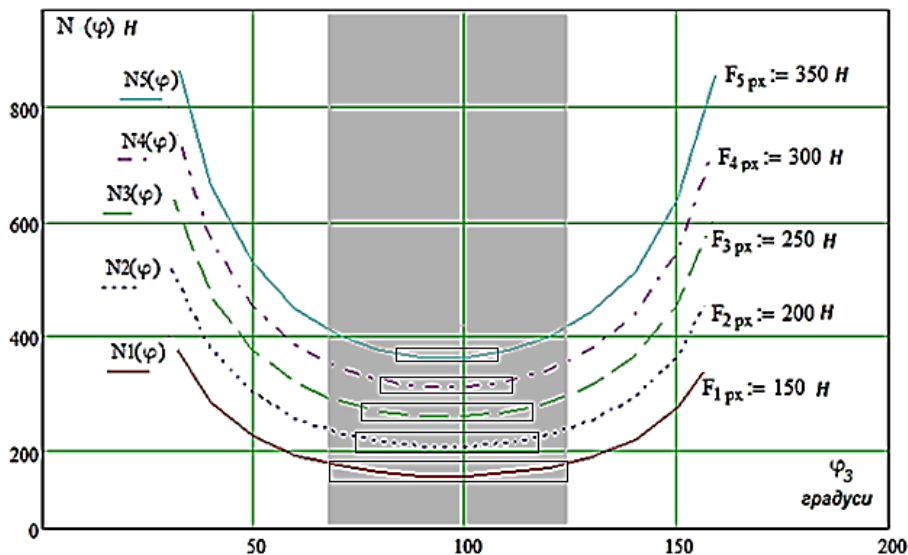


Рис. 5. Графік зміни величини  $N$  залежно від кута  $\varphi_3$  для різної кількості упаковок у шарі, який вкладається в тару

Використовуючи отримані результати аналітичного дослідження, можна визначити параметри механізму переміщення упаковок, які для вибраного поєднання тари і споживчої упаковки будуть реалізовувати найбільш економний процес завантаження шару упаковок в транспортну тару. Так, знаючи параметри  $h$ ,  $H$ ,  $R$ , визначаємо згідно з (1)  $b_1$ . Далі, використовуючи графік (рис. 5), задаємо кут  $\varphi_3$  з урахуванням величини  $F_{px}$  (ваги захватної головки та шару упаковок), при значенні якого нормальна складова реакції в точці підвіски захватів буде близька до мінімальної. Після чого, використовуючи теорему косинусів для ланок механізму на початку руху вдовж вертикальної ділянки та в кінці, визначаємо довжини приводного важеля та шатуна.

**Висновки.** Проведений аналіз впливу різних параметрів на діючі зусилля в шарнірі підвіски захватної головки показав, що величина нормальної складової реакції, яка є рушійною силою на відповідних ділянках руху і, в основному, залежить від сумарної ваги захватної головки й упаковок, а також від кута, під яким реакція направлена стосовно нерухомої напрямної. На неї впливають розміри шарніра, коефіцієнти тертя. Отримані залежності дають змогу виконати синтез механізму переміщення за умови мінімального навантаження в кінематичних парах кріплення захватної головки під час повороту шатуна в межах 65—130 град.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Михайлов, Є. П., Лінгур, В. М. (2019). *Маніпулятори та промислові роботи*: навч. посіб. з дисципліни для студ. Бакалаврів. Одеса: Одес. нац. політех. ун-т.
2. Kaltsoukalas, K., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2015). On generating the motion of industrial robot manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 32, 65—71.
3. Abderrahim, M., Khamis, A., Garrido, S., & Moreno, L. (2004). *Accuracy and calibration issues of industrial manipulators. Industrial robotics: programming, simulation and application*, 131—146.

4. Павленко, І. І. (2016). *Промислові роботи та РТК*: монографія. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф.
5. Павленко, І. І., Годунко, М. О. (2014). *Захватні пристрої роботів*: навч. посіб. Кіровоград: Лисенко В. Ф.
6. Губарев, О. П., Ганпанцурова, О. С. (2016). *Мехатроніка: циклічно-методичний підхід до вирішення практичних задач автоматизації*. Київ: КПІ.
7. Демидюк, М. В., Ширко, М. І. (2007). Оптимізація режимів руху та параметрів дволанкового маніпулятора з активними й пасивними приводами. *Мат. методи та фізико-математичні поля*, 50(2), 183—190.
8. Демидюк, М. В., Гошовська, Н. В. (2016). Параметрична оптимізація руху дволанкового маніпулятора з використанням ортогональних поліномів. *Прикладні проблеми механіки і математики*, 14, 168—175.
9. Moskvychov, A. A. (2017). *Zakhvatnye ustroystva promyshlennyykh robotov y manipulyatorov: uchebnoe posobie*. K: forum.
10. Губарев, О. П., Ганпанцурова, О. С. (2016). *Мехатроніка: циклічно-методичний підхід до вирішення практичних задач автоматизації*. Київ: КПІ.
11. Savchenko, V. V. (1992). *Razrabotka metodyk rascheta uspolnytelnykh mekhanyzmov mashyn dlia ukladyvaniya fasovanykh pyshchevyykh produktov v taru: dys. kand. tekhn. nauk*. Kyev: NUHT.
12. Novykov, B. M. (1977). *Avtomaty dlia yzvlacheniya butylok yz yashchykov y ukladky ykh v yashchyku*. M.: Pyshchevaia promyshlennost.
13. Кірієнко, О. А. (2022). *Теорія механізмів і машин. Синтез і аналіз механізму приводу*: навч. посіб. з кредитного модуля. К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського.

УДК 621.87

## DETERMINATION OF POWER AND ENERGY INDICATORS OF VACUUM GENERATORS WITH ENERGY SAVING FUNCTION

V. Yakymchuk, O. Gavva, M. Yakymchuk  
*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

vacuum,  
suction,  
vacuum generator,  
energy saving,  
packaging,  
mathematical model

---

**Article history:**

Received 29.08.2024  
Received in revised form  
26.09.2024  
Accepted 02.10.2024

---

**Corresponding author:**  
mykolaikymchuk.2016@  
gmail.com

---

**ABSTRACT**

Generators with the function of energy saving belong to a new group of designs of vacuum generators, which is just beginning to develop. At the research stage, the complex task of determining the kinematic characteristics of the movement of the device for capturing the device during the movement of the package in space was considered for three typical cases when the vectors of the forces of weight, inertia and resistance of the external environment coincide with the axes of the coordinates of the movement of the package in the vertical plane (lifting operation); movement in the horizontal plane (movement operation) and movement in the OXZ plane are combined in time. Taking into account the elastic properties of the gripping elements, the gripping device with packaging is presented in the form of a two-mass discrete model, which consists of a driving mass in the form of combined mass elements of a vacuum drive with a gripping head and a packing mass. The developed mathematical models for ensuring the movement of the gripping device allow to determine the kinematic parameters of the movement of the package according to the known law of motion of the gripping device. The change in the amount of rarefaction in the elements during the holding of the package and during its movement was studied. The proposed approach to determining the holding power of a package with a vacuum suction cup takes into account the requirements for the operation of vacuum generators with an energy saving function. The results of theoretical studies showed that the most necessary when moving the package is the combination of movements in the vertical and horizontal planes, the value of which is recommended to be taken as the maximum when the generator with the energy saving function is working. The obtained changes in the amount of vacuum depending on the diameter of the suction cup for packaging from different packaging materials.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-15

---



## ВИЗНАЧЕННЯ СИЛОВИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВАКУУМНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ІЗ ФУНКЦІЮ ЕНЕРГОЗАОЩАДЖЕННЯ

В. М. Якимчук, д-р філ. наук

О. М. Гавва, д-р техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-2938-0230>

М. В. Якимчук, д-р техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-1905-3546>

Національний університет харчових технологій

*Запропонований комплексний підхід до визначення зусилля утримання упаковок вакуумним присмоктувачем з урахуванням експлуатаційних вимог до вакуумних генераторів з функцією енергозбереження. Результати аналітичних досліджень показали, що найбільший вакуум спостерігається під час піднімання упаковок шляхом суміщення рухів по вертикальній і горизонтальній площинах, величина якого рекомендується приймати за максимальне значення при роботі генератора з функцією енергозбереження. Отримані закономірності зміни величини вакууму від діаметра присмоктувача для упаковок з різного типу пакувального матеріалу.*

**Ключові слова:** вакуум, присмоктувач, вакуумний генератор, енергозбереження, упаковка, математична модель.

**Вступ.** Для утворення групової упаковки з харчовими продуктами вкладання штучних і дрібноштучних виробів у тару використовують вакуумні пристрої захоплення. Традиційна система вакууму складається з двох основних елементів — присмоктувачів і пристрою створення вакууму. Існують два основні способи створення вакууму: за допомогою вакуумного насоса, який відкачує повітря з резервуару, та використання ежекторів, які створюють вакуум завдяки кінетичній енергії стисненого повітря. В пакувальному обладнанні вакуум здебільшого створюється за допомогою ежекторів, оскільки цей спосіб є більш економічним. На ринку України споживачам пропонується широкий асортимент вакуумних генераторів, що мають додаткові технологічні функції, такі як вмикання та вимикання вакуумного генератора, подача імпульсу для відриву упаковки від елементів захоплення, додаткове очищення повітря, контроль глибини вакууму тощо.

У зв'язку з тим, що пакувальне обладнання є складним мехатронним комплексом і потребує швидкої реакції для підтвердження виконання кожної технологічної операції, включаючи захоплення упаковок за допомогою вакуумних елементів захоплення, можна стверджувати, що використання вакуумних генераторів з повним спектром додаткових технологічних функцій є оптимальним конструкторським рішенням.

Одним із важливих недоліків вакуумних генераторів є значні витрати стисненого повітря, що призводить до підвищення собівартості продукції. Так при перенесенні упаковки пристроєм захоплення потрібно подавати стиснене повітря на генератор з моменту виконання операції захоплення, піднімання, перенесення та опускання до моменту відділення упаковки від елемента захоплення. Це призводить до значних витрат стисненого повітря.

Генератори з функцією енергозаощадження відносять до нової групи конструкцій вакуумних генераторів, яка тільки починає активно розвиватись. А тому для зниження енергетичних витрат під час створення розрідження для виконання тех-

нологічних операцій є розробка нових моделей вакуумних генераторів і методик визначення величини розрідження під час налаштування вакуумної системи.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** У працях [1—9] наводиться опис видів і типів пристроїв захоплення з пневматичним приводом та методик їх розрахунку. Однак із застосуванням нових пакувальних матеріалів, зменшенням їх товщини та збільшенням повітропроникності ці методики потребують доповнення й уточнення. Поряд із цим не враховано особливості роботоздатності нових вакуумних генераторів.

У працях [4—9] розглянуто застосування вакуумних пневматичних пристроїв для захоплення виробів. Наведені методики розрахунку і підбору вакуумних пристроїв захоплення не враховують зміну величини вакууму в процесі переміщення упаковки при суміщенні руху в різних площинах і можуть лише наближено використовуватись для визначення його мінімального та максимального значення при налаштуванні вакуумних генераторів із функцією енергозаощадження.

У зарубіжних інформаційних джерелах питанням розрахунку вакуумних пристроїв захоплення присвячені праці [7, 8]. Аналіз праць показує, що з розвитком конструкції та системи керування пневматичними приладами в математичних моделях потрібно враховувати технічні характеристики елементів керування, спосіб регулювання параметрів і можливість постійного контролю за процесом виконання ними функцій.

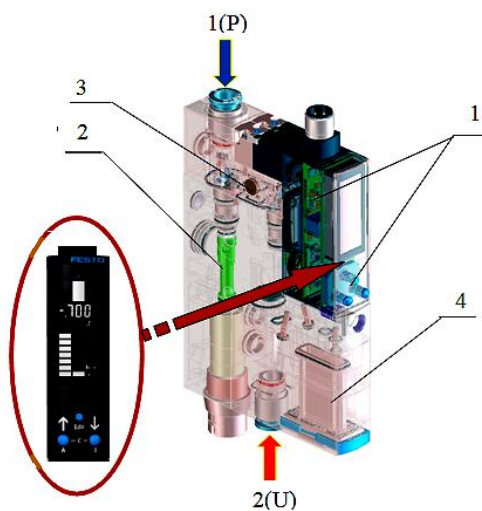
**Мета дослідження:** визначення енергетичних показників створення величини вакууму з метою налаштування вакуумних генераторів з функцією енергозаощадження під час виконання операцій пакування. Пропонується умову перевірки утримання і переміщення упаковки вакуумним пристроєм захоплення здійснювати за трьома показниками експлуатаційних вимог, що передбачає застосування комплексного підходу дослідження.

**Матеріали і методи.** Об'єктом дослідження є енергетичні витрати вакуумних генераторів з функцією енергозаощадження. Основним методом визначення енергетичних показників величини вакууму є аналітичний опис умови утримання та переміщення упаковки пристроєм захоплення.

**Результати досліджень.** Аналіз типових конструкцій (рис. 1) вакуумних генераторів з функцією енергозаощадження показав, що вони мають електронну систему керування 1, яка забезпечує створення вакууму заданої величини ежектором 2, систему очистки 4 та слідкування за його параметрами через зворотний зв'язок системи слідкування 3. Запропоновані системи працюють локально і є автономними елементами.

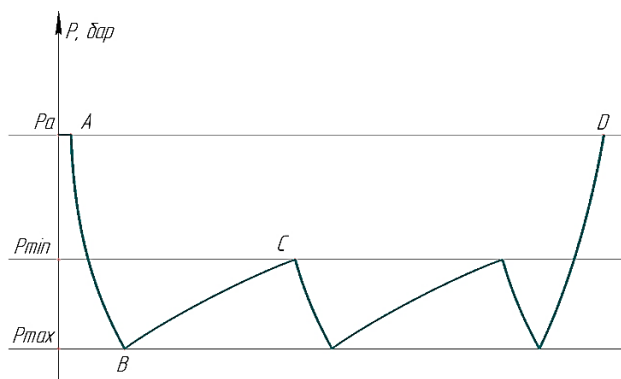
Робота вакуумного генератора з функцією енергозаощадження передбачає три етапи (рис. 2). На першому відбувається захоплення упаковки шляхом вмикання ежектора та початок утворення вакууму (точка *A*, рис. 2). Величину створеного вакууму вимірює датчик тиску, який через систему зворотного зв'язку передає сигнал на електронну систему керування. Після досягнення попередньо заданого рівня вакууму (точка *B*, рис. 2), електронна система керування відключає подачу стисненого повітря на ежектор та перекриває отвір 2, герметизуючи порожнину елемента пристрою захоплення з упаковкою.

Зменшення сформованого вакууму забезпечує необхідне зусилля утримання упаковки, а електронна система генератора дає команду на виконання наступних операцій. Генератор переходить до другого етапу роботи.



**Рис. 1. Конструкція вакуумного генератора з функцією енергозбереження:**

- 1 — електронна система керування; 2 — ежектор для виробництва вакууму;  
 3 — система слідкування за параметрами вакууму через зворотній зв'язок;  
 4 — система очистки



**Рис. 2. Зміна вакууму під час роботи вакуумного генератора з функцією енергозаощадження**

Залежно від виду матеріалу упаковки та ступеня зношення елемента присмоктування в герметичній порожнині відбувається підсмоктування повітря з навколишнього середовища, що призводить до часткового падіння рівня вакууму.

Другий етап роботи характеризується циклічною роботою генератора, де послідовним повторенням є утримання значення вакууму в заданих межах (точка *C*, рис. 2).

Третій етап характеризується завершенням переміщення упаковки в зону вивантаження та її відриву від елемента пристрою захоплення (точка *D*, рис. 2).

На першому етапі дослідження розглянуто задачу визначення величини кінематичних характеристик руху пристрою захоплення при перенесенні упаковки в просторі для трьох типових випадків, коли напрямки векторів сил ваги, інерції й опору зовнішнього середовища збігаються з осями координат переміщення упаковки у вертикальній площині (операція піднімання), переміщення упаковки в горизонталь-

ній площині (операція переміщення) та переміщення в горизонтальній і вертикальній площинах, суміщеними в часі.

За таких умов коливальну систему вакуумного пристрою захоплення з упаковкою можна навести у вигляді двомасової дискретної моделі, яка складається з ведучої маси у вигляді зведеної маси елементів привода вакуумного енджектора з голівкою захоплення  $m_1$  та маси упаковки —  $m_2$ , з'єднаних пружно-віджимним матеріалом присмоктувача, що має жорсткість  $C_{12}$  та в'язкість  $b_{12}$  (рис. 3).

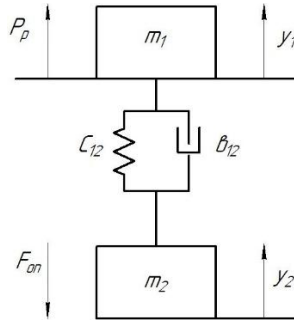


Рис. 3. Двомасова модель переміщення упаковки у вертикальній площині вакуумним пристроєм захоплення

Рух зведених мас під час піднімання упаковки вакуумним пристроєм захоплення можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 = P_p - C_{12}(y_1 - y_2) - b_{12}(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \\ m_2 \ddot{y}_2 = -F_{on} + C_{12}(y_1 - y_2) + b_{12}(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \end{cases} \quad (1)$$

де  $P_p$  — рушійна сила приводу переміщення пристрою захоплення у вертикальній площині;  $F_{on}$  — зведена сила опору переміщення маси  $m_2$ .

Якщо знехтувати перехідними процесами на початковому етапі руху маси  $m_1$  та врахувати що, значення її швидкості є величиною сталою  $\dot{y}_1 = \mathcal{Q}_1 = const$ , то прискорення системи дорівнює  $\ddot{y} = 0$ . За таких умов система рівнянь (1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \ddot{y}_2 = \frac{1}{m_2} (C_{12}(\mathcal{Q}_1 t - y_2) + b_{12}(\mathcal{Q}_1 - \dot{y}_2) - F_{on}) \\ b_{12} \dot{y}_2 + C_{12} y_1 = C_{12} \mathcal{Q}_1 t + b_{12} \mathcal{Q}_1 - P_p \end{cases} \quad (2)$$

З системи рівнянь (2) можна визначити кінематичні параметри переміщення маси  $m_2$  за умови відомої швидкості пристрою захоплення.

Модель переміщення упаковки у горизонтальній площині вакуумним пристроєм захоплення наведена на рис. 4.

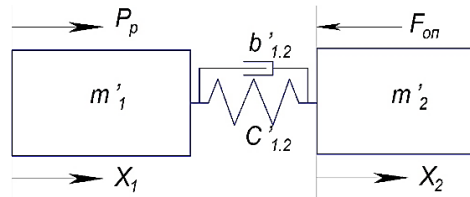


Рис. 4. Двомасова модель переміщення тарного вантажу в горизонтальній площині вакуумним захоплюючим пристроєм

Відповідно до технічних характеристик елементів захоплення, можна прийняти, що вони здебільшого характеризують властивостями, тобто  $b_{12} = 0$ .

За цих умов переміщення упаковки в горизонтальній площині вакуумним пристроєм захоплення описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} m'_1 \ddot{x}_1 = P_p - C'_{12} (x_1 - x_2); \\ m'_2 \ddot{x}_2 = -F'_{on} + C'_{12} (x_1 - x_2) \end{cases} \quad (3)$$

Якщо і в цьому випадку знехтувати перехідними процесами на початковому етапі руху маси  $m_1$  та врахувати, що значення її швидкості є величиною сталою, то прискорення маси  $m_1$  дорівнює  $\ddot{x}_1 = 0$ . За таких умов прискорення  $\dot{x}_1 = \mathcal{G}_1 = const$  маси  $m_2$ :

$$\ddot{x}_2 = -\frac{F'_{on}}{m'_2} + C'_{12} \left( \mathcal{G}_2 t - \mathcal{G}_2 t + \frac{P_p}{C'_{12}} \right) \frac{1}{m'_2} \quad (4)$$

З системи рівнянь (4) можна визначити кінематичні параметри переміщення маси  $m_2$  за умови відомої швидкості руху пристрою захоплення.

Для підвищення продуктивності обладнання укладання суміщають рух упаковки у вертикальній і горизонтальній площинах. Тоді абсолютне значення прискорення маси  $m_2$  визначається за формулою:

$$\ddot{S} = \sqrt{\ddot{x}_2^2 + \ddot{y}_2^2} \quad (5)$$

На другому етапі досліджено величину вакууму на утримання упаковки в процесі її переміщення під час суміщення рухів у вертикальній і горизонтальній площинах за умови обраного діаметра присмоктувача  $D$  та геометричних розмірів упаковки  $h \times l$  (рис. 5).

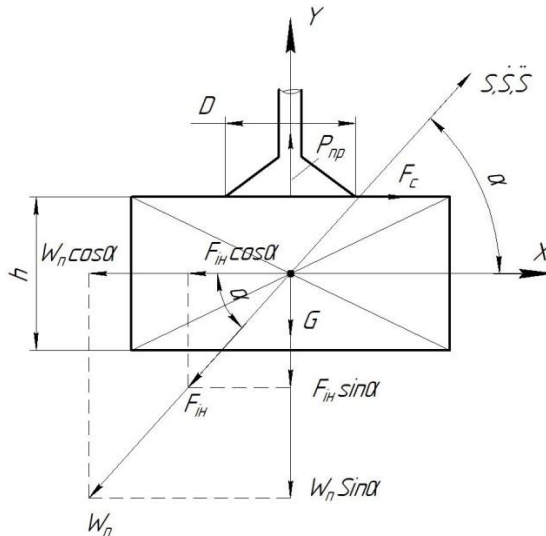


Рис. 5. Схема дії сил на упаковку під час її переміщення при суміщенні рухів у горизонтальній і вертикальній площинах

Приймаємо припущення, що вектори прискорення, швидкості збігаються з напрямком руху упаковки і направлені під кутом  $\alpha$  до горизонтальної площини. В процесі переміщення упаковки на неї діють сили, які прагнуть відірвати та зрушити її

відносно присмоктувача. Це сила тяжіння  $G$  упаковки, сили інерції  $F_{in}$ , сила опору повітря  $W_n$ , сила зчеплення між поверхнею упаковки та присмоктувачем  $F_k$ .

Сила утримання є складовою двох факторів — ефективної площі контакту присмоктувача до поверхні упаковки для круглих присмоктувачів  $f_e = (\pi D^2)/4$  та величини вакууму в камері присмоктувача, який під час практичної експлуатації має менше значення з урахуванням пористої структури (коефіцієнта повітропроникності) пакувального матеріалу упаковки та шорсткості поверхні контакту. В подальшому цей фактор будемо враховувати технологічним коефіцієнтом експлуатації  $k_1$ . Тоді зведену силу утримання упаковки, з урахуванням умов експлуатації присмоктувача, можна визначити:

$$P_{np} = k_1 \cdot f_e (P_1 - P_2), \quad (6)$$

де  $k_1 < 1$  — коефіцієнт експлуатації, який враховує характеристику пакувального матеріалу упаковки.

З іншого боку, для запобігання відриву упаковки від присмоктувача під час її транспортування приведена сила утримання має бути більша за сили опору:

$$P_{np} > F_{in} \sin \alpha + W_n \sin \alpha + G. \quad (7)$$

Тоді умова надійного утримання упаковки для вертикального переміщення забезпечується виконанням умови:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{k_2 ((F_{in} + W_n) \sin \alpha + G)}{k_1 \cdot f_{ex}}, \quad (8)$$

де  $k_2$  — коефіцієнт безпеки для переміщення у вертикальній площині, в галузевому машинобудуванні приймається в межах від 1,5 до 2,5 [1].

На етапі горизонтального переміщення упаковки величина вакууму для запобігання її зсуву відносно елементів пристрою захоплення залежить від шорсткостних властивостей поверхні пакувального матеріалу упаковки. Для врахування такого впливу у формулі для визначення величини вакууму запропоновано використовувати результати проведених експериментальних досліджень для низки типових пакувальних матеріалів:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{y(F_{зч})}{\mu k_1 f_e \left(1 - \frac{1}{k_4}\right)}, \quad (9)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт зчеплення між кромкою елемента присмоктувача та поверхнею упаковки;  $y(F_{зч})$  — експериментально одержані залежності зміни зусилля зчеплення упаковки від величини діаметра присмоктувача. Для проведення дослідження були використані зразки, широко використовувані в пакувальній індустрії марок картону (МО, ММ, Н, НМ тощо) з товщиною від 0,30 мм до 0,50 мм. Характеристики повітропроникності та шорсткості зразків картону визначались за допомогою електронного приладу К513 за методом Бендтсена. Результати дослідження наведено у вигляді рівнянь апроксимації:

- для марки МО:  $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,61d + 10,5$  і  $R^2 = 1$ ;
- для марки ММ:  $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,53d + 11,8$  і  $R^2 = 1$ ;
- для марки Н:  $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,529d + 11,1$  і  $R^2 = 1$ ;
- для марки НМ:  $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,424d + 9,9$  і  $R^2 = 1$ .

У процесі переміщення упаковки висотою  $h > 0,5l$  (де  $l$  — довжина упаковки) виникає додатковий момент відриву. Для визначення величини вакууму з урахуванням

моменту відриву розглянемо епюру розподілення тиску кромки присмоктувача по поверхні контакту (рис. 6).

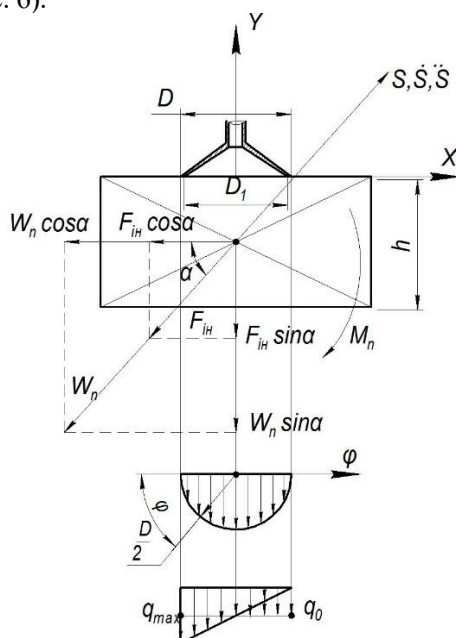


Рис. 6. Схема розподілення тиску по поверхні контакту елемента захоплення з поверхнею упаковки за умови дії додаткового відривного моменту

З епюри видно, що зменшення тиску контакту елемента присмоктувача  $q_1$  може призвести до ймовірного відриву від поверхні упаковки. Зміна тиску контакту з *max* до *min* визначається з рівняння:

$$q = q_0 + \frac{M_r}{I_r} r_\varphi, \quad (10)$$

де  $q_0$  — середнє значення тиску за умови його рівномірного розподілення,

$$q_0 = \frac{P_{np}}{f_e} = k_1 (P_1 - P_2), \quad (11)$$

$r_\varphi$  — кутова координата, яка описує зону зміни тиску:  $-D/2 < r_\varphi < D/2$ ;  $D$  — діаметр присмоктувача;  $I_r$  — момент інерції опорної площини  $I_r = SR^2$ , де  $R$  — радіус інерції відносно площі опорної поверхні.

Умова, що забезпечує надійний контакт присмоктувача з поверхнею упаковки має вигляд:

$$q < [q], \quad (12)$$

де  $[q]$  — допустимий мінімальний тиск між упаковкою і елементами захоплення, що забезпечує утримання упаковки.

Відрив упаковки почнеться при умові  $q=0$ , за цієї умови визначимо величину вакууму:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{(F_{in} + W_n) \cos \alpha \cdot \frac{h}{2} \cdot k_5}{k_1 \cdot I_r} \cdot \frac{D}{2}, \quad (13)$$

де  $k_5$  — коефіцієнт безпеки при дії додаткових моментів відриву, в галузевому машинобудуванні приймається 2 [1, 5].

Пропонується, що з трьох показників експлуатаційних вимог (8), (9) та (13) формується комплексна методика визначення максимального та мінімального значень вакууму, які розраховуються за різних умов переміщення упаковки вакуумним пристроєм захоплювання.

Розрахунок величини максимального та мінімального значень вакууму проведено для упаковки прямокутної форми розмірами 400×300×300 мм та масою 25 кг у двох площинах. У вертикальній площині переміщення здійснюється мехатронним модулем з пневматичним приводом з прискоренням 5 м/с<sup>2</sup>, а в горизонтальній площині переміщення здійснюється мехатронним модулем з електричним приводом з прискоренням 8 м/с<sup>2</sup>. Коефіцієнт зчеплення між кромкою присмоктувача та упаковкою становить 0,5; коефіцієнт експлуатації — 0,9; коефіцієнт безпеки під час переміщення тарного вантажу — 1,5.

Вакуумний присмоктувач марки SAF 125 компанії J. Schmalz GmbH має діаметр робочої кромки 118 мм. Результати розрахунку величини вакууму для функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом для утримання упаковки представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Розрахункові значення максимального та мінімального вакууму для мехатронного модуля пристрою захоплювання упаковки з функцією енергозощадження

Показник вимог експлуатації	Математичні моделі	Розрахункові значення вакууму, Па	Прийняті значення вакууму, Па (бар)	Межі регулювання
I	$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{k_2((F_{in} + W_n) \sin \alpha + G)}{k_1 \cdot f_{ex}}$	57 575	57 000 (-0,43)	$P_{max}$
II	$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{y(F_{zu})}{\mu k_1 f_c \left(1 - \frac{1}{k_4}\right)}$	68 799	68 000 (-0,32)	$P_{min}$
III	$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{(F_{in} + W_n) \cos \alpha \cdot \frac{h}{2} \cdot k_5}{k_1 \cdot I_r} \cdot \frac{D}{2}$	99 967	—	—

Порівняльний аналіз енергоощадних характеристик типового генератора та генератора з функцією енергозощадження за умови визначення показників зміни вакууму за наведеною методикою показано на прикладі компонентів компанії Festo між типовим генератором VN-10-H-T3-PQ2-VQ2-RQ2 та генератора з функцією енергозощадження OVEM-10-H-B-GO-CE-N-2N. За результатами дослідження різниця становить до 4%.

**Висновки.** Розроблений методологічний підхід до визначення зусилля утримання упаковки вакуумним присмоктувачем з урахуванням експлуатаційних вимог до вакуумних генераторів з функцією енергозощадження показав, що при збільшенні розмірів і маси упаковки з харчовим продуктом зростають динамічні навантаження та, відповідно, величина вакууму. Найбільший вакуум потрібний під час піднімання упаковки шляхом суміщення рухів у вертикальній і горизонтальній площинах, величина якого приймається за максимальне значення при роботі вакуум-генератора. Переміщення упаковки в горизонтальній площині потребує меншої величини вакууму



до 16%, що можна прийняти за мінімальне значення під час роботи генератора. При цьому встановлено, що витрати енергії на роботу генератора з функцією енергозощадження порівняно з типовим генератором зменшуються до 4%.

Отримані закономірності зміни величини вакууму від діаметра присмоктувача для упаковки з різного типу пакувального матеріалу на момент їх утримання показують необхідність подальших досліджень, щодо уточнення значення коефіцієнта безпеки в аналітичних моделях, як диференційованої величини, що залежить від діаметра присмоктувача та марки пакувального матеріалу.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Павленко, І. І., Годунко, М. О. (2020). *Захватні пристрої роботів*: монографія. Кропивницький: ТОВ «КОД».
2. Filaretov, V. F., Gubankov, A. S., Gornostaev, I. V. (2016). The formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed. *Proc. of International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications*, 3—5 October, 93—96.
3. Іакимчук, М., Гавва, О., Беспалко, А. (2014). Research of mechatronik linear module with pneumatic drive on the use of proportional pressure regulators. *Journal of food and packaging science, technique and technologies*, 3, 92—97.
4. Арендаренко, В. М., Іванов, О. М. (2019). *Вакуумна техніка та технологія*: навч. посіб. Полтава: ПДАА.
5. Митропольський, І. Є., Грицак, Р. В. (2018). *Вакуумна техніка*: навч. посіб. Ужгород: УНУ «Говерла».
6. Якимчук, М. В. та ін. (2020). Дослідження впливу конструкцій захоплювальних пристроїв на динаміку роботи лінійних двигунів у мехатронних модулях переміщення упаковок. *Харчова промисловість*, 27, 114—125.
7. Savkiv, V., Mykhailyshyn, R., Duchon, F. (2019). Gasdynamic analysis of the Bernoulli grippers interaction with the surface of flat objects with displacement of the center of mass. *Vacuum*, 159, 524—533.
8. Savkiv, V. et al. (2017). Justification of design and parameters of Bernoulli-vacuum gripping device. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14(6), 1—10.
9. Якимчук, М. В. та ін. (2020). Вплив інерційних і геометричних параметрів вакуумних захоплювальних пристроїв на допустиме зусилля утримання тарноштучних вантажів. *Наукові праці НУХТ*, 26(5), 65—74.

## ДО ВІДОМА АВТОРІВ

### *Шановні колеги!*

Редакційна колегія журналу «Харчова промисловість» запрошує вас до публікації наукових праць.

Засновник і видавець журналу: Національний університет харчових технологій.

Журнал затверджений наказом МОН України (постанова № 32 від 15.01.2018) як наукове видання з технічних наук.

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

Обсяг статей — до 15 машинописних аркушів (до 15000 друкованих знаків).

### ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Статті мають бути підготовлені з урахуванням Постанови Президії ВАК України № 7-05/6 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України». Друкуються наукові статті, які мають такі необхідні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання певної проблеми і на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з цього дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі.

До публікації приймаються не публіковані раніше статті, що містять результати фундаментальних теоретичних розробок та найважливіших прикладних досліджень викладачів, наукових співробітників, докторантів, аспірантів і студентів. Усі статті підлягають обов'язковому рецензуванню провідними спеціалістами у відповідній галузі харчових технологій, яких призначає науковий редактор журналу.

Рукопис статті надсилається у двох примірниках, українською мовою, включаючи таблиці, рисунки, список літератури.

Статті подаються у вигляді **вичитаних** роздруківок на папері формату А4 (поля з усіх сторін по 2 см, шрифт Arial або Time New Roman, кегль 14, інтервал 1,5) та електронної версії (редактор Microsoft Word) на електронному носії. На електронному носії не повинно бути інших версій та інших статей, у тексті статті — порожніх рядків. Між словами допускається лише один пробіл. Усі сторінки тексту мають бути пронумеровані.

На першій сторінці наводяться: у лівому верхньому куті — шифр УДК (напівжирним шрифтом), нижче ініціали і прізвища авторів (напівжирним шрифтом), наукові ступені авторів, назва установи, де працює автор; далі — назва статті великими напівжирними літерами, під назвою — анотація українською мовою з ключовими словами (5—6 слів/ключових словосполучень) набрана світлим курсивом; фраза «**Ключові слова**» — напівжирним шрифтом.

У кінці першої сторінки, під короткою рисою, ставиться знак авторського права, ініціали, прізвища авторів, рік.

Матеріали, представлені у статті, мають бути розділені на основні змістові розділи, такі як: постановка проблеми, огляд літератури, мета досліджень, матеріали та методи, результати досліджень, висновки. Кожен із наведених розділів статті починається з нового абзацу («**Постановка проблеми**», «**Огляд літератури**», «**Мета досліджень**», «**Матеріали і методи**», «**Результати досліджень**», «**Висновки**» — напівжирним шрифтом).

Після тексту статті в алфавітному або порядку згадування в тексті наводиться список літературних джерел (кожне джерело з абзацу). Бібліографічні описи оформляються згідно з ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 «Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання». У тексті цитоване джерело позначається у квадратних дужках цифрою, під якою воно стоїть у списку літератури. Бібліографічний опис подається мовою видання. Не допускається посилання на неопубліковані матеріали. У переліку джерел мають переважати посилання на роботи останніх років.

Прізвища зарубіжних авторів у тексті статті треба наводити в українській транскрипції.

Після списку літератури наводиться: анотація та ключові слова (Summary) англійською мовою (розмір анотації не менше 1800 знаків, має містити коротку інформацію по кожному із основних змістових розділів); фраза «**Keywords**» — напівжирним шрифтом.

---

Усі анотації мають містити коротку інформацію щодо об'єкта та методик досліджень з наведенням основних результатів роботи та рекомендаціями щодо сфери їх застосування.

Після тексту анотацій та ключових слів наводиться фраза «Одержана редколегією (дата)» (набраним світлим курсивом). За дату одержання статті вважають дату надходження її до редакції.

Роздрукований варіант статті підписують усі автори.

У разі одержання статті, оформленої з порушенням запропонованих вимог, редакція статтю не реєструє. За необхідності доопрацювання статті відповідно до зауважень рецензента авторам направляється екземпляр рукопису, який разом із рецензією, відповіддю рецензентові, двома екземплярами виправленої статті та електронним носієм з виправленим текстом слід повернути до редакції.

Таблиці виконувати у Microsoft Office Word в форматі DOC. Кожна таблиця повинна мати тематичний заголовок, набраний напівжирним шрифтом, і порядковий номер (без знака №), якщо таблиць кілька. Якщо таблиця одна, то дається тільки заголовок (без слова «Таблиця»). Слово «Таблиця» і номер — курсивним шрифтом, заголовок — напівжирним. Таблиці мають бути закритими — з боковими, нижньою і горизонтальними лініями у полі таблиці.

Ілюстрації мають бути виконані ретельно, в програмі CorelDraw або будь-якому іншому графічному редакторі, на білому папері й розміщені в тексті та в окремих файлах (формати CDR, TIF, JPG; роздільна здатність не менше 300 dpi).

Фотографії друкуються лише у разі крайньої потреби, вони мають бути чіткими, контрастними, виконаними на білому фотопапері, розмірами 6×9 см.

Підписи до рисунків набираються на окремій сторінці або безпосередньо під рисунками прямим напівжирним шрифтом.

Повторення одних і тих самих даних у тексті, таблицях і на рисунках не допускаються.

Формули вставляються прямо в текст за допомогою редактора формул. Нумерація формул — арабськими цифрами у круглих дужках біля правого поля сторінки.

Використовувані в статті фізичні, хімічні, технічні та математичні терміни, одиниці фізичних величин та умовні позначення мають бути загальноприйнятими. Скорочення позначень одиниць фізичних величин мають відповідати Міжнародній системі одиниць (SI).

До статей додаються: виписка з протоколу засідання кафедри (підрозділу) з рекомендацією роботи до друку; відомості про авторів (прізвище, повне ім'я та по батькові, науковий ступінь, місце роботи, номери контактних телефонів, електронна адреса), кафедральний висновок/експертний висновок (для статей сторонніх організацій), заяву з підписами автора(-ів) про те, що надіслана стаття раніше не друкувалася і не подана до будь-яких інших видань.

**Головний редактор журналу: доктор технічних наук, професор**

**Олександр ГАВВА**

**Відповідальний секретар журналу: кандидат технічних наук, доцент**

**Анастасія ДЕРЕНІВСЬКА**

**Контактні телефони: міський — (044) 287-92-45, внутрішній — 92-45**

**E-mail: foodpromnuft@gmail.com**

Наукове видання

# ХАРЧОВА ПРОМИСЛОВІСТЬ

Науковий журнал

№ 35

Журнал «Харчова промисловість» затверджений наказом МОН України (постанова № 32 від 15.01.2018) як наукове видання з технічних наук.  
Ресестаційне свідоцтво: серія КВ № 6890 від 23.01.2003.  
Засновник і видавець: Національний університет харчових технологій.

Журнал є продовженням міжвідомчого тематичного збірника «Харчова промисловість», заснованого в 1965 р. Виходить двічі на рік.

Статті друкуються в авторській редакції.

Відповідальний редактор журналу О. Гавва  
Відповідальний секретар А. Деренівська

Комп'ютерна верстка: І. Максименко

Підп. до друку 02.10.2024 р. Формат 70×100/16.  
Гарнітура Times New Roman. Друк цифровий.  
Ум. друк. арк. 11,29. Обл.-вид. арк. 12,32.  
Наклад 100 прим. Зам. № 02-25

НУХТ, 01601, Київ-33, вул. Володимирська, 68