

ISSN 2073 – 8730

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ODESA NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

НАУКОВІ ПРАЦІ SCIENTIFIC WORKS

ТОМ 87
ВИПУСК 1

VOLUME 87
ISSUE 1



ОДЕСА

2023

ББК 36.81 + 36.82
УДК 663 / 664

Міністерство освіти і науки України



НАУКОВІ ПРАЦІ

Том 87, Випуск 1

Засновник:
Одеський національний
технологічний університет

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

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

Головний редактор
Заступники головного редактора

Відповідальний редактор

Редакційна колегія:

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

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

Технічний редактор
Ружицька Н.В., *Левтринська Ю.О.*,
Паламарчук Г.С.

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

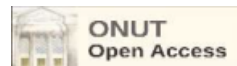
Усі права захищені.
Передрук і переклади дозволяються лише зі згоди
автора та редакції.

Рекомендовано до друку та розповсюдження в
мережі Internet Вченою радою Одеського
національного технологічного університету,
протокол № 08 від 12.12.2023 р.

Мова видання:
українська, англійська

Матеріали друкуються мовою оригінала. Передрукування матеріалів журналу дозволяється лише за згодою редакції. Ліцензія CC-BY.

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



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

Одеський національний технологічний університет

Наукові праці – Одеса, Одеський національний технологічний університет: 2023. – Том 87, Вип. 1. – 160 с.

Адреса редакції:

вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039, e-mail:

np_onaht@ukr.net

terma_onaft@ukr.net

© Одеський національний технологічний університет, 2023 р.

Founder: **Odesa National
University of Technology**

SCIENTIFIC WORKS

Founded in Odessa, 1937

Volume 87, Issue 1

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

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

Editorial Board:

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

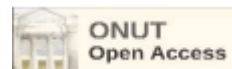
Technical editor: Ruzhitska N.V., Levtrynska Y.O.,
Palamarchuk G.S.

It's recommended for printing and publishing online by
academic council of Odesa National University of
Technology
12 December 2023, protocol № 8

Languages of issue:
Ukrainian, English

Articles are printed in original language.

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



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

Odesa National University of Technology

Scientific Works – Odessa, Odesa National University of Technology: 2023. – Volume 87, Issue 1. – 160 p.

Address of the editorial office:

Ukraine, Odessa, Kanatnaya str, 112, 65039, e-mail:
terma_onaft@ukr.net
np_onaht@ukr.net

© Odesa National University of Technology, 2023

СИСТЕМА ТЕХНОЛОГІЙ АДРЕСНОЇ ДОСТАВКИ ЕНЕРГІЇ ДО ЕЛЕМЕНТІВ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

Бурдо О.Г., д.т.н., проф., Терзієв С.Г. д.т.н., доц., Сиротюк І.В., PhD, доц.,
Молчанов М.Ю., аспірант, Бурдо А.К., доц.
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Аналізуються глобальні прогностичні моделі розвитку людства: цикли Кондратьєва, індустріального революційного розвитку, концепція моделі «Римського клубу». Наведено шляхи виходу із сучасної кризи – конвергенція біо- нано та інформаційних технологій. Обґрунтовано пріоритетні напрямки розвитку: енергія, екологія, їжа. Обговорюються проблеми ключових процесів харчових технологій – екстрагування та дегідратації. Показано, що ефективним інструментом рішення основних проблем є електродинамічні технології. Формулюється гіпотеза можливості використання електромагнітних джерел енергії для адресної доставки енергії безпосередньо до елементів рослинної сировини для ініціювання гібридного процесу. Реалізація такого процесу може на порядки інтенсифікувати дифузійні процеси. В статті вирішується задача візуально підтвердити існування гібридного процесу, вивчити механізми його формування, отримати кількісні залежності впливу ключових факторів на енергетику та кінетику процесу. Наведено опис експериментального стенду та результати досліджень, які визначають наукову новизну роботи. Отримані дані були використані при організації процесу екстрагування в інноваційних мікрохвильових апаратах. Показано, що циркуляційні апарати мають вищу продуктивність по зрівнянню із традиційними. Цей факт є основним прикладним результатом роботи. Крім цього, наведена на принципова технологічна лінія, яка базується на системі інноваційних технологій, що розроблена на кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту.

Ключові слова: енергія, харчові технології, моделювання, концентрування соків, екстракт, випарювання, підведення енергії.

Вступ. Процес індустріального розвитку людства постійно супроводжувався формуванням прогностичних моделей майбутнього. Серед таких моделей виділяються запропоновані 100 років тому цикли Кондратьєва. Створена на основі системного дослідження світової техніки модель Кондратьєва узагальнила періоди депресій, криз, спадів та бурхливих ростів у різні етапи розвитку людства.

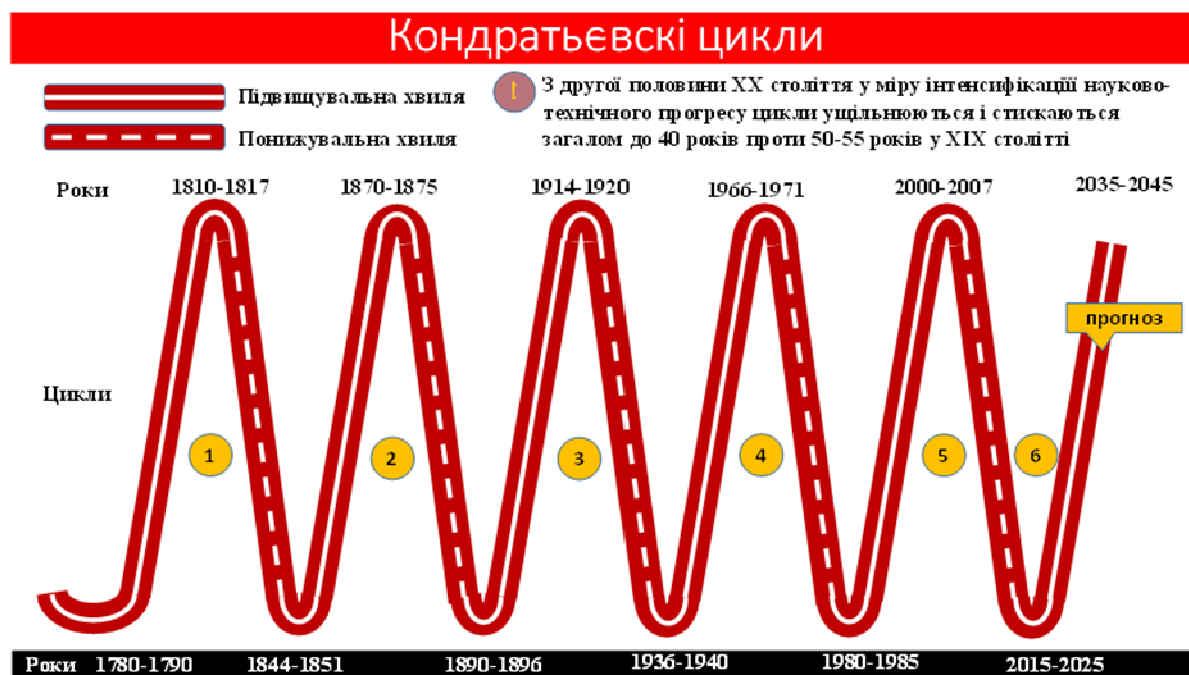


Рис. 1 – Цикли Кондратьєва

Усього розглянуто 6 циклів (укладів), що характеризувались загальними ознаками, загальним ключовим фактором (рис.2).

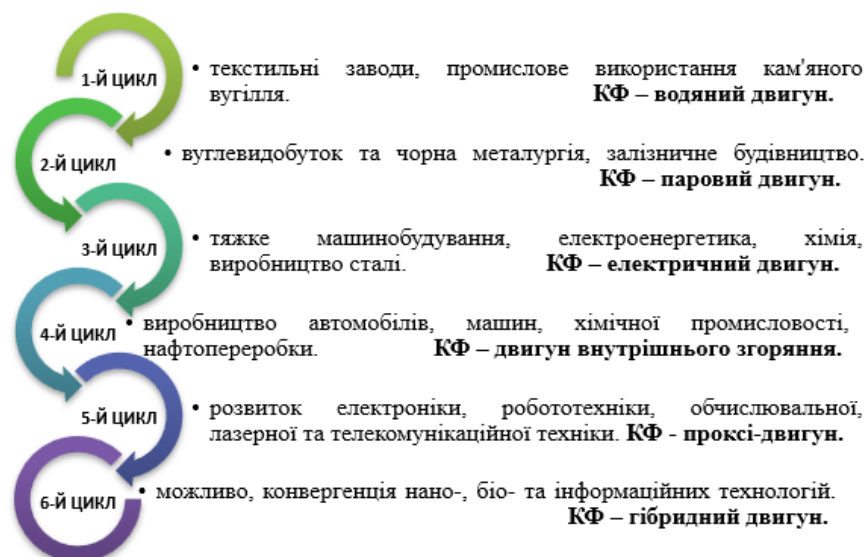


Рис. 2 – Характеристика та ключові фактори етапів циклів Кондратьєва

У першому циклі (1780 – 1850р.) флагманськими галузями були текстильні фабрики, промислове використання кам'яного вугілля, а ключовим фактором – водний двигун. У другому циклі (1850 – 1896р.) – металургія, залізничне будівництво, паровий двигун. У третьому циклі (1896 – 1940р.) – машинобудування, електроенергетика, неорганічна хімія, електричний двигун. У четвертому циклі (1940 – 1985р.) виробництво автомобілів переробка нафти, двигун внутрішнього згоряння. У п'ятому циклі (1985 – 2025р.) – розвиток електроніки, робототехніки, - проксі – двигун. Початок шостого циклу прогнозувався з 2014-2025р., а кінець у 2045 році. Тут мають розвиватися конвергенція нано-, біо- та інформаційних технологій, а ключовим фактором ми вважаємо гібридний двигун. Кожен цикл відрізнявся флагманськими галузями, які диктували завдання іншим. Важливо, що сьогодняшня світова економічна криза прогнозувалася досить точно. Значно пізніше виникла схожа модель та індустріального розвитку людства, яка концептуально повторювала цикли Кондратьєва (рис.3).

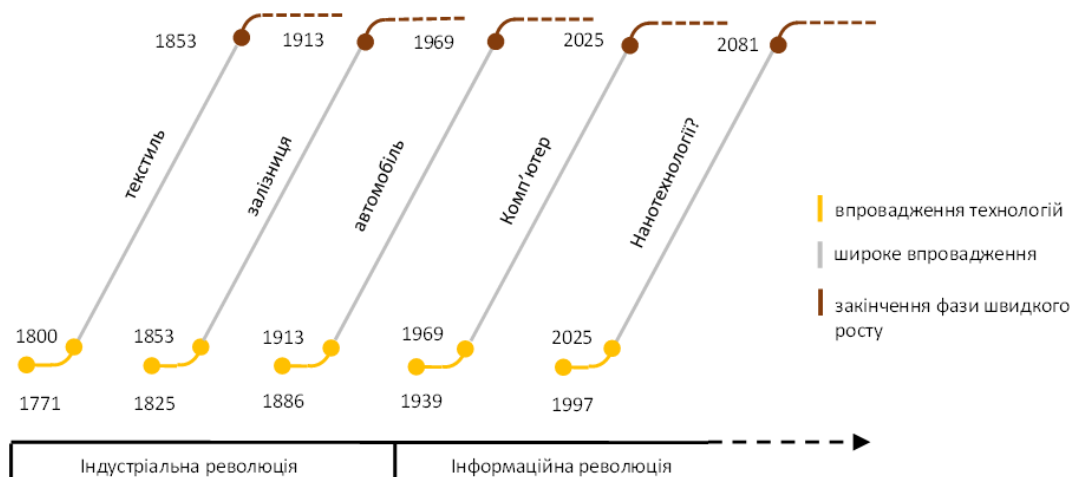


Рис. 3 – Модель індустріального розвитку людства

Модель визначає періоди індустріального розвитку та інформаційної революції.

Порівняємо цикли Кондратьєва з глобальною прогножною моделлю «Римського клубу», на яку визначимо концептуальні становища (табл.1).

Таблиця 1

Періоди формування глобальних криз моделі «Римського клубу»

Кризи	Періоди		
	Розвитки	Росту	Стабілізації
Енергії	1970 - 2000	2000 -2020	2020-2030
Екології	2010-2030	2030-2050	2050 -2070
Їжі	2040-2060	2060-2080	2080- 3000

Видно (табл.1), що ключовими проблемами людства цього століття будуть «енергія – екологія - їжа». Вирішення цих проблем – завдання агропромислової сфери. Інструменти їх вирішення визначимо із розглянутих вище моделей індустріального розвитку. Це – нано-біотехнології. Інноваційний шлях розвитку нанотехнологій харчових та фармацевтичних виробництв – це комбінована дія мікрохвильових, вакуумних та інших технологій для реалізації ефектів «механодифузії», організації гібридних процесів. Гібридний процес введений авторами в класичну класифікацію процесів, як інструмент організації механічних процесів у системі, як рушійна сила деякого «гібридного двигуна».

Нині людство перебуває у 6 циклі (рис.1). Вражає точність прогнозу сучасних проблем, воєн, світової пожежі, тероризму, протестів. А це підстава довіряти і певним шляхам виходу з кризи нашого етапу: конвергенція нано- та інформаційних технологій (рис.2). Схожі висновки випливають із відомої моделі індустріального розвитку людства (рис.3). Базові досягнення в науці та техніці відбуваються приблизно двічі у столітті. Важливо встановити й галузі економіки, які мають стати пріоритетними. Для цього звернемося до відомої глобальної прогнозової моделі Римського клубу [2]. Прогнозується, що у 2030 році людство очікує на гостру енергетичну кризу, до 2060 – екологічну, а до 2090 – кризу їжі. Всі ці проблеми найяскравіше виявляються в агропромисловому секторі [3]. Отже, економіка АПК буде пріоритетною у виході з цієї кризи, і пріоритетними будуть біо- нано технології. В [3] обґрунтовано і механізм взаємодії нанорозмірних елементів харчової сировини та електромагнітного поля (ЕМП). Виконаємо аналіз світового досвіду використання ЕМП у технологіях обробки харчової сировини.

Дослідження процесів обробки харчової сировини у електромагнітному полі.

Сучасний етап розвитку харчової та фармацевтичної індустрій характеризується стабільним зростанням інтересу до інноваційних продуктів, посиленням регламентацій з екологічної безпеки виробництва, підвищенням ефективності використання енергетичних та сировинних ресурсів [4 – 6].

У фармацевтичній індустрії, незважаючи на інтенсивний розвиток методів хімічного синтезу, динамічно зростає інтерес до виробництва біологічно активних препаратів із натуральної рослинної сировини. Фітопрепарати (ФП), що містять комплекс біологічно активних речовин (БАР), характеризуються широким спектром фармакологічної дії, ефективністю та малою токсичністю, що дозволяє використовувати їх тривалий час для профілактики та лікування багатьох захворювань без ризику виникнення побічних явищ. При переробці рослинної сировини ключовими процесами в харчових та фармацевтичних виробництвах є екстрагування, випарювання та сушіння. Традиційні апарати для цих процесів мають ряд загальних недоліків: досить тривалого часу обробки, недостатньої інтенсивності процесу, використання дорогих агентів, псування готового продукту, великих енергетичних витрат, великої трудомісткості процесу та в деяких випадках великих витрат самого продукту. Більше того, деякі традиційні апарати не дозволяють зберегти екологічну безпеку сировини. Використовуються брудні теплоносії, бензини інші не чисті екологічно розчинники як екстрагенти. Усе це визначає актуальність пошуку нових підходів до створення сучасного устаткування.

У світі зростає інтерес до методів, за яких інтенсифікація процесу досягається за рахунок використання електромагнітних технологій, що характеризуються високими питомими за потужністю впливами на біомасу, поміщену в камеру реактора. Так, потужність мікрохвиль вирішальним чином впливає швидкість сушіння, ефективну дифузію вологи і час сушіння. У міру збільшення потужності мікрохвиль швидкість сушіння та ефективна дифузійна здатність вологи збільшувалися, а час сушіння скорочується. Позитивні результати використання МВ отримані при сушінні насіння камелії олійної [7]; при сушінні кукурудзи та скибочок яблук [8]. Енерговитрати на мікрохвильову сушку в рази менше, ніж на електротермічну сушку при тій же завантаженні. Проблеми моделювання ліній сушіння при періодичному мікрохвильовому режимі, досліджені в [9], отримано хорошу відповідність до експерименту.

При сушінні насіння ківано (африканський огірок) вивчався вплив методів мікрохвильового сушіння та сублімаційного сушіння на хімічний склад, органолептичні, текстурні та антиоксидантні властивості насіння ківано, а також можливості мікрохвильового сушіння як альтернатива сублімаційному сушінню. Для цього насіння ківано було висушене за допомогою ліофілізатора та в мікрохвильовій сушарці. Мікрохвильова сушіння збільшила загальний вміст фенолів у насінні ківано, скоротила час процесу. В роботі показано, що мікрохвильова сушіння може стати перспективною інноваційною альтернативою для швидкого виробництва сублімованих фруктових матеріалів при збереженні якості продукту [10]. Проведено оптимізацію умов сушіння для виробництва якісних сушених ананасів з використанням попередньої обробки мікрохвилями перед звичайною сушкою гарячим повітрям. Показано, що мікрохвилі слід розглядати так само, як етап попередньої обробки промислового виробництва ананасу та інших продуктів, щоб скоротити час сушіння та отримати продукцію вищої якості [11].

Вперше кінетика сушіння та дегідратації нарізаної гіркої діни була досліджена з використанням мікрохвильового низькотемпературного сушіння. Щільність потужності мікрохвиль відіграла вирішальну роль у характеристиках дегідратації висушеної гіркої діни при сушінні за допомогою мікрохвиль [12]. При дослідженні мікрохвильового сушіння зеленої ріпи, регульована потужність мікрохвиль, що падає, краще для поліпшення якості продукту і зниження енергоспоживання. Шляхом порівняння безперервного та переривчастого мікрохвильового сушіння з поступовим зниженням мікрохвильової потужності була запропонована стратегія управління мікрохвильовою сушкою стрижневого кореня зеленої ріпи, заснована на експеримен-

тально визначених діелектричних властивостях та зміні напруженості електричного поля залежно від тимчасового вмісту вологи. Експерименти показали, що таке регулювання потужності призводить до більш високого коефіцієнта дегідратації сушеної зеленої ріпи та суттєвого зниження енерговитрат, ніж при безперервному та переривчастому мікрохвильовому сушінні. Крім того, така стратегія управління потужністю може підтримувати температуру матеріалу в межах заданих значень із малими коливаннями [13]. Досліджено вплив потужності мікрохвиль, ступеня вакууму та ваги завантаження на вміст вологи у білому винограді без кісточок під час вакуумного сушіння у мікрохвильовій камері. Встановлено, що під час мікрохвильового вакуумного сушіння ефективний коефіцієнт дифузії вологи білого винограду без кісточок коливається від $1,0232 \times 10^{-9}$ до $4,6354 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ [14].

При дослідженні процесу випарювання вишневий нектар та яблучний сік концентрували з використанням традиційного термічного методу та переривчастого мікрохвильового концентрування в умовах вакууму (при 250 мбар). Загальний вміст фенолів у зразках яблучного соку та вишневого нектару коливався в межах 209,87-216,67 мг/л та 571-588,57 мг/л відповідно [15]. Сік барбарису концентрували двома різними способами (непряме нагрівання та випарювання в мікрохвильовій установці при тиску 100 і 30 кПа) до досягнення 60 градусів за шкалою Брікса. Результати показали, що швидкість мікрохвильового випаровування була на 49% вищою, ніж при непрямому нагріванні. Крім того, застосування цього методу може краще зберегти вміст антоціанів, антиоксидантну активність та загальний вміст фенолів у соку барбарису порівняно із звичайним методом [16]. При концентруванні апельсинового соку з використанням мікрохвильового вакуумного випаровування (MBV) та роторного випаровування (PB) досліджувалась кінетика деградації вітаміну С, загальний вміст фенолів (TPC), загальний вміст каротиноїдів (TCC) та значення кольору. MBV значно підвищив швидкість випаровування. Результати показали, що константи швидкості деградації вітаміну С, TPC та TCC апельсинових соків, концентрованих з використанням PB, були значно вищими, ніж MBV [17]. Досліджувалося використання мікрохвиль як альтернативи традиційним методам випарювання під час концентрування цукрових розчинів. Крім того, діелектрична спектроскопія може бути ефективним інструментом, що допомагає використовувати MBV для отримання високоякісних цукрів [18]. Встановлено, що мікрохвильове нагрівання можна використовувати для концентрування ананасового соку з мінімальним впливом на якісні характеристики [19]. Позитивні результати використання мікрохвиль при сушінні та екстрагуванні були досягнуті при переробці пажитника. Метод був оптимізований з урахуванням і сушіння та екстракції. Рекомендовані режими мінімального споживання енергії [20].

У результаті критичного аналізу науково-технічної літератури зроблено такі висновки.

1. Дослідженням процесів мікрохвильової обробки різнорічної сировини у світі широко займаються. Очевидна позитивна тенденція та різноманітність об'єктів досліджень.
2. Наголошується на доцільності застосування мікрохвильових технологій з метою інтенсифікації процесів перенесення, поліпшення якісних характеристик готового продукту.
3. Відсутні теоретичні основи процесів взаємодії електромагнітних полів із сировиною. Немає рекомендацій щодо керування параметрами електродинамічних систем. Відомі дослідження обмежуються лише лабораторними стендами.

Тому автори поставили завдання:

- Розвинути запропоновану в [3] модель гібридних процесів;
- сформулювати науково-технічну гіпотезу ініціювання гібридних процесів;
- Отримати візуальні картини їх формування, дослідити кінетику та енергетику гібридних процесів.

Результати візуальних, кінетичних та енергетичних досліджень гібридних процесів.

Формулюється наступна науково-технічна гіпотеза: «При взаємодії електродинамічних полів з капілярно-пористими матеріалами можливі умови виникнення гібридного процесу, який ініціює перебіг гідродинамічного перенесення цільових компонентів із глибини об'єму дисперсійну фазу». Розуміння таких умов дозволить параметрами електромагнітного поля керувати локацією, кінетикою та енергетикою гібридних процесів. В результаті з'явиться інструмент управління електродинамічними апаратами, їх оптимізації за продуктивністю, енергетичними витратами, якісними характеристиками готового продукту.

Для вирішення поставлених завдань розроблено експериментальний стенд (рис. 4).

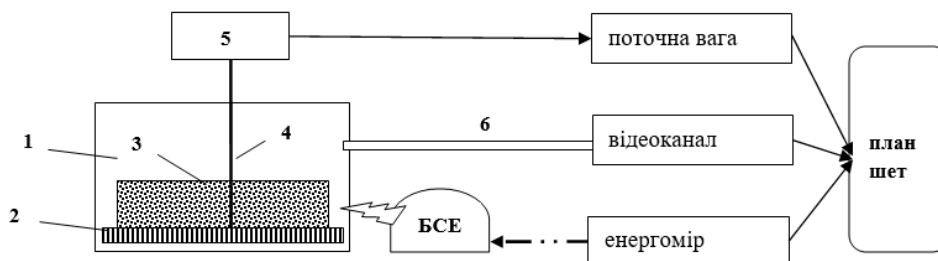


Рис. 4 – Схема експериментального стенду

У резонаторній камері 1 на полиці 2 розміщена робоча ділянка 3 - блок скляних трубок, заповнених підфарбованою водою. Полиця за допомогою ліски 4 підвішена до цифрових ваг 5, марки Radwag PS 750/C/1. Споживана блоком силової електроніки (БСЕ) потужність вимірюється енергоміром Feron TM55. Поточна вага робочої ділянки, споживана потужність та відеоролик викидів з блоку фіксуються планшетом Chuvі.

Методика підготовки робочої ділянки. Трубки ретельно калібрувалися, нумерувалися, зважувалися, заповнювалися підфарбованою водою, зважувалися та збиралися до блоку (рис. 5)

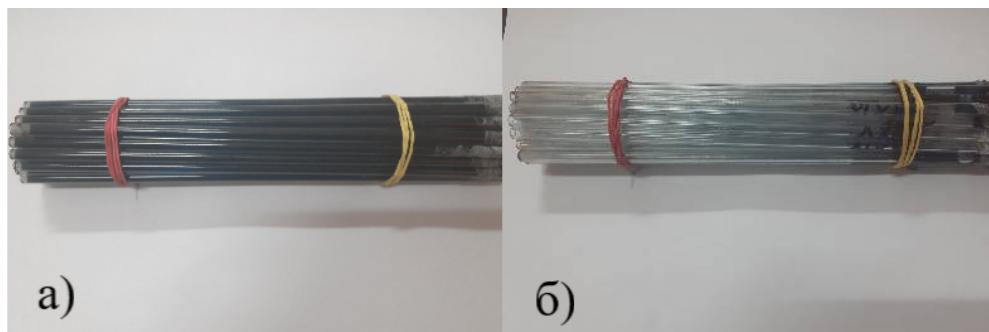


Рис. 5 – Фотографії робочої ділянки: а – перед обробкою; б) – після обробки

Результати досліджень наведено на рис. 6 – 9.

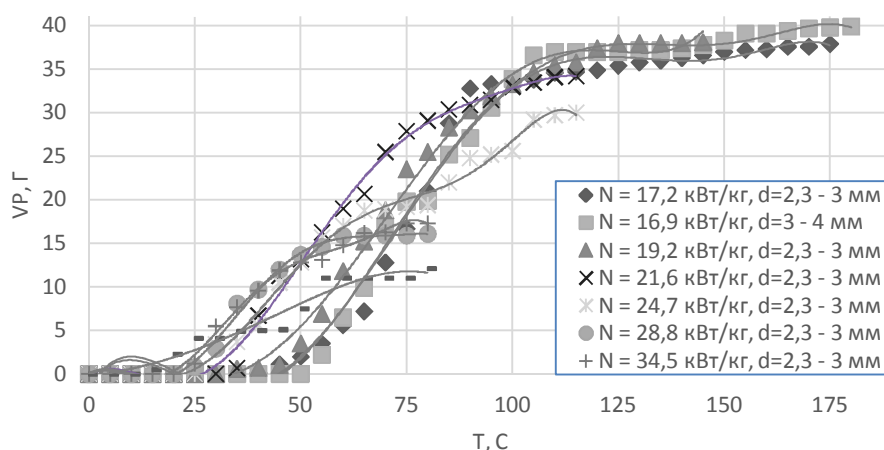


Рис. 6 – Сумарний вихід води у гібридних процесах

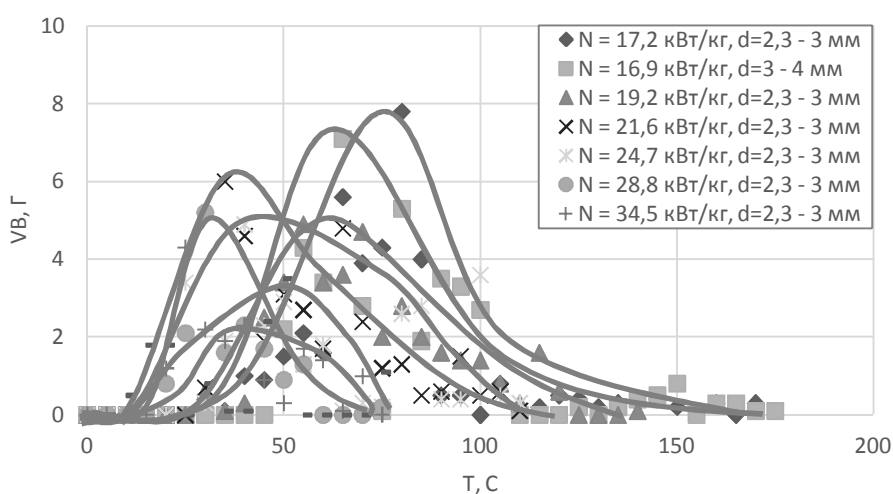


Рис. 7 – Точковий вихід води

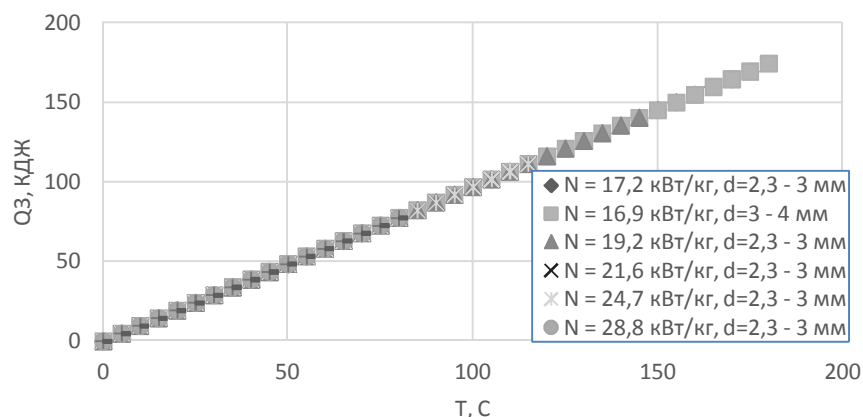


Рис. 8 – Витрата енергії

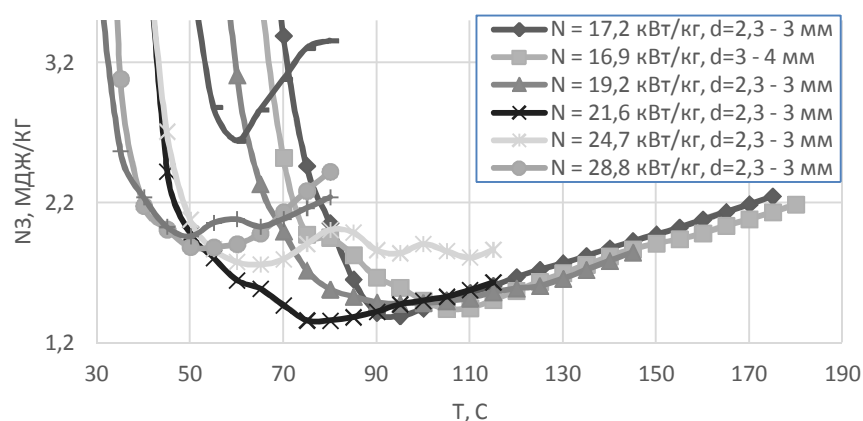


Рис. 9 – Питомі витрати

Умови проведення експериментів з іншими пучками труб, кінетичні та енергетичні характеристики наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Результати експериментального моделювання

Параметри пучка	Наведена потужність, кВт/кг	Час запуску ефекту, с	Час піку ефекту, с	Час згасання ефекту, с	Питома енерговитрата на піку, МДж/кг	Обсяг викидів на піку, г
d = 3-4 мм	42,4	20	55	80	2,1	3,2
d = 3-4 мм	33,9	25	50	75	1,7	3,3
d = 3-4 мм	28,3	30	75	135	2,2	1,2
d = 3-4 мм	24,2	25	50	145	1,7	2,6
d = 3-4 мм	21,2	35	85	180	1,5	5,6
d = 3-4 мм	20,8	35	90	120	1,35	3,7
d = 3-4 мм	18,8	35	115	180	1,5	2,2
d = 3-4 мм	16,9	50	105	180	1,4	2,7
d = 3-4 мм	16,8	55	110	180	1,4	2,7
d = 3-4 мм	12,7	30	150	220	1,5	2,5
d = 3-4 мм	10	55	185	300	1,6	1,5
d = 3-4 мм	5,6	165	340	380	1,3	1,7

Аналіз результатів дослідів показує, що гібридний процес складається з кількох етапів: запуску, зростання інтенсивності та досягнення піку та згасання. При цьому:

- час запуску корелюється з питомою потужністю, а мінімуми питомих витрат енергії відповідають меншим потужностям;
- на піках викидів питомі витрати енергії мінімальні та становлять 1,3 – 1,4 МДж/кг;
- максимальні за обсягом викиди та їх частота спостерігаються на піку ефекту;

- у капілярах більшого діаметра (навіть за однакового обсягу рідини) процес формування гідродинамічного потоку збільшувався на 5...15с;
- при початковій температурі 15°C інтенсивність гібридного процесу була нижчою в 2 рази, ніж за температури 40°C, енергетичні витрати на процеси при початкових температурах 15 і 40°C, за час експерименту в 50 с. склали 2,36 та 1,7 МДж/кг відповідно.

На основі принципів нанотехнологій, при організації гібридних процесів, пропонується технологічна лінія переробки рослинної сировини, яка включає інноваційні апарати, розроблені на кафедрі ПОЕМ (рис.10).

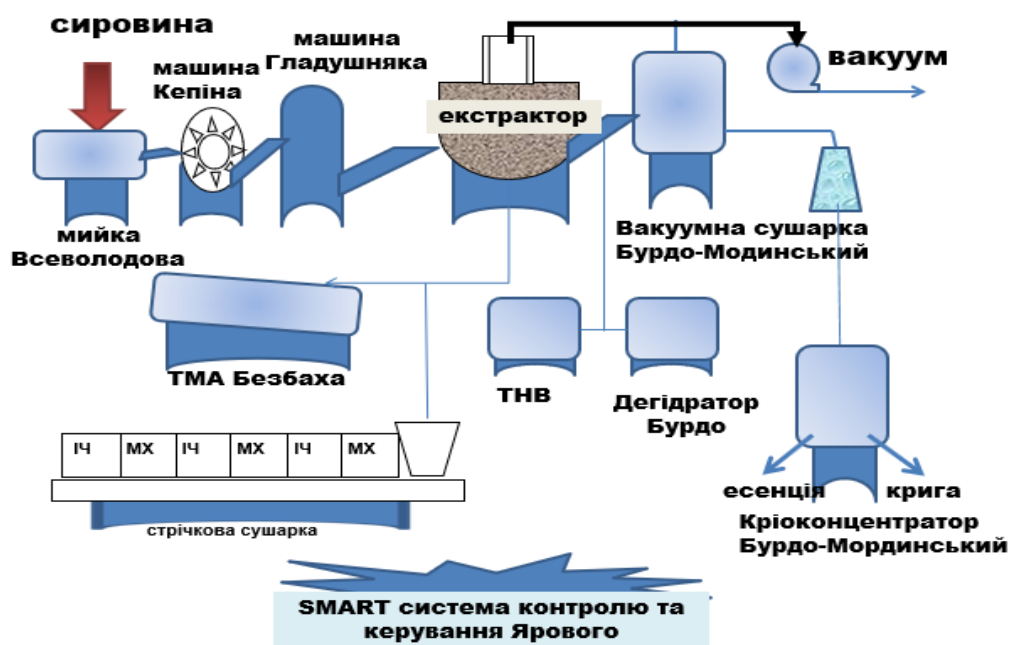


Рис. 10 – Система технологій ОНТУ

Опис обладнання (рис. 10) представлено на сайті [21].

Висновки. Історія свідчить, що вихід із економічних криз завжди базується на інноваційних підходах. Прогнозується, що наразі інструментом таких інновацій має стати поєднання біо- нано – та інформаційних технологій. В роботі представлено дослідження процесів адресної доставки енергії до рідкої фази капілярно-пористої харчової сировини. Експериментально, візуально доказано, що за умов узгодження структури сировини та параметрів мікрохвильового поля має місце специфічний потік паро рідинної суміші із об'єму твердої фази. Потік має гідродинамічне походження, його потужність на порядки перевищує дифузійні потоки. Результати роботи можна використати для розробки основ теорії гібридних процесів масоперенесення, та в практичних задачах організації ефективних режимів екстрагування.

References

1. Tsikli Kondrat'yeva (2023). Retrieved from https://www.banki.ru/wikibank/volnyi_kondrateva
2. Meadowsetal (1972). Thelimitstogrowth: a report to the club of Rome.
3. Kravchenko O. Yu., Molchanov M. Yu., Milinchuk K. S., Terziyev S. H., Petrovs'kiy V. V. (2022). Doslidzhennya protsesiv sushinnya reolohichnikh kharchovikh sistem v ich poli. *Scientific works*. 86(1), 91-99.
4. Trojahn S. (2018). Logistics strategies for resource supply chains. *Transport and telecommunication journal*. 19(3). Doi: 10.2478/ttj-2018-0021.
5. Landgrebe D., Kräusel V., Bergmann M., Werner, M., Rautenstrauch A. (2017). Conserving resources in production - breaking new ground. *Procedia manufacturing*, 8, Doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.079.
6. Irmak S. (2017). Biomass as raw material for production of high- value products. *Biomass volume estimation and valorization for energy*, Doi:10.5772/65507.
7. Zhang, Dy; Huang, D; Zhang, Xy; Zhao, Hy; Gong, Gl; Tang, Xh; Li, Lj. (2023). Drying performance and energy consumption of camellia oleifera seeds under microwave-vacuum drying. *Food science and biotechnology*. Doi10.1007/s10068-022-01239-0.
8. Liu, Hl; Liu, Hy; Liu, Hy; Zhang, X; Hong, Qc; Chen, W; Zeng, X. (2021). Microwave drying characteristics and drying quality analysis of corn in china. *Processes*. 9(9), doi10.3390/pr9091511.
9. Tepe, T.K.; Tepe, B.(2020). The comparison of drying and rehydration characteristics of intermittent-microwave and hot-air dried-apple slices. *Heat and mass transfer*.56(11).Doi10.1007/s00231-020-02907 9.

10. Bolek, S. (2021). Potential of energy saving by microwave drying for waste cucumis metuliferus seeds as alternative to freeze drying. *Environmental engineering and management journal* 20(9).
11. Abano, Ee. (2021). Microwave assisted convective air drying of sugarloaf pineapples (ananas comosus). *Applied engineering in agriculture*. 37(5). Doi10.13031/aea.14380.
12. Nguyen, Tvl; Nguyen, Pbd; Tran, Ttv; Tran, B.L.; Huynh, Tp. (2022). Low-temperature microwave-assisted drying of sliced bitter melon: drying kinetics and rehydration characteristics. *Journal of food process engineering*. 45(12). Doi10.1111/jfpe.14177.
13. Wang, Rf; Zhao, D.H; Gao, Yp; Xu, Q; Wu, L; Li, Zy. Power control in microwave drying of green turnip. *Drying technology*. 40(10). Doi10.1080/07373937.2021.1927073.
14. Lei, Yd; Chen, JI; Zhang, Zh; Deng, Xr. (2022). Influence of microwave vacuum drying on the effective moisture diffusivity of seedless white grapes. *Food science and technology*. 42. Doi10.1590/fst.37020.
15. Dincer, C. (2021). Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*. 55(3). Doi10.1080/08327823.2021.1952837.
16. Nejad, S.L.; Shahedi, M; Fathi, M. (2021). Comparative study of microwave-assisted vacuum evaporation, microwave-assisted evaporation, and conventional evaporation methods on physicochemical properties of barberry juice. *Journal of agricultural science and technology*. 23(2).
17. Bozkir, H; Tekgul, Y. (2022). Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of food processing and preservation*. 46(6). Doi10.1111/jfpp.15902.
18. Tao, Y; Yan, Bw; Zhang, N.N; Wang, M.F; Zhao, Jx; Zhang, H; Chen, W; Fan, Dm. (2021). Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: a study based on dielectric spectroscopy. *Journal of food engineering*. 294. Doi10.1016/j.jfoodeng.2020.110414.
19. Chua, Ls; Leong, C.Y. (2020). Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. *Journal of food processing and preservation*. 44(10). Doi10.1111/jfpp.14786.
20. Khan, Mki; Ghauri, Ym; Alvi, T; Amin, U; Khan, M.I; Nazir, A; Saeed, F; Aadil, R.M; Nadeem, M.T; Babu, I. (2022). Microwave assisted drying and extraction technique; kinetic modeling, energy consumption and influence on antioxidant compounds of fenugreek leaves. *Food science and technology*. 42. Doi10.1590/fst.56020.
21. Nanofood (2023), Retrieved from <http://nanofood.com.ua>

THE SYSTEM OF TECHNOLOGIES OF ADDRESSED ENERGY DELIVERY TO FOOD ELEMENTS

Burdo O.G., d.t.s., professor, Terziev S.G., d.t.s., associate professor, Sirotiyuk I.V., PhD, associate professor, Molchanov M.Yu., assistant, Burdo A.C., c.t.s., associate professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. Global predictive models of human development are analyzed: Kondratiev cycles, industrial revolutionary development, the concept of the "Club of Rome" model. The convergence of bio-nano and information technologies are presented as ways out of the modern crisis. The priority areas of development such as energy, ecology, food, are substantiated. The problems of the key processes of food technology - extraction and dehydration - are discussed. It is shown that electrodynamic technologies are an effective tool for solving the main problems. A hypothesis about the possibility of using electromagnetic energy sources for the targeted delivery of energy directly to the elements of plant raw materials to initiate the hybrid process is formulated. Implementation of such a process can intensify diffusion processes by orders of magnitude. The article solves the task of visual confirming the existence of a hybrid process, studying the mechanisms of its formation, obtaining quantitative dependences of the influence of key factors on the energy and kinetics of the process. A description of the experimental stand and research results that determine the scientific novelty of the work are given. The obtained data were used in the organization of the extraction process in innovative microwave devices. It is shown that circulation devices are more productive compared to traditional ones. This fact is the main applied result of the work. In addition, a basic technological line based on the system of innovative technologies developed at the Department of Processes, Equipment and Energy Management is presented.

Keywords: energy, food technologies, modeling, concentration of juices, extract, evaporation, electromagnetic energy supply.

Список використаної літератури

1. Цикли Кондратьєва: [Веб-сайт]. Одеса, 2023. URL: https://www.banki.ru/wikibank/volnyi_kondrateva/ (дата звернення: 12.11.2023).
2. Meadowsetal. Thelimitstogrowth: a report to the club of rome. – 1972.

3. Дослідження процесів сушіння реологічних харчових систем в іч полі. / Кравченко О. Ю. та ін. // Наукові праці . 2022., вип. 1 Т. 86. С. 91-99.
4. Trojahn S. Logistics strategies for resource supply chains // *Transport and telecommunication journal*. 2018., 19(3). Doi: 10.2478/ttj-2018-0021.
5. Conserving resources in production - breaking new ground. / Landgrebe D. et al. // *Procedia manufacturing*. 2017. № 8. Doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.079.
6. Irmak S. Biomass as raw material for production of high- value products // *Biomass volume estimation and valorization for energy*, 2017. Doi:10.5772/65507.
7. Drying performance and energy consumption of camellia oleifera seeds under microwave-vacuum drying. / Zhang D. et al. // *Food science and biotechnology* Doi10.1007/s10068-022-01239-0.
8. Microwave drying characteristics and drying quality analysis of corn in china / Liu H. et al. // *Processes*. 2021., No. 9 Vol. 9. P. 12. doi10.3390/pr9091511.
9. Tepe, T.K., Tepe, B. The comparison of drying and rehydration characteristics of intermittent-microwave and hot-air dried-apple slices // *Heat and mass transfer*. 2020. 56(11). Doi10.1007/s00231-020-02907-9.
10. Bolek, S. Potential of energy saving by microwave drying for waste cucumis metuliferus seeds as alternative to freeze drying // *Environmental engineering and management journal* 20(9). 2021.
11. Abano, Ee. Microwave assisted convective air drying of sugarloaf pineapples (ananas comosus). *Applied engineering in agriculture*. 2021. 37(5). Doi10.13031/aea.14380.
12. Low-temperature microwave-assisted drying of sliced bitter melon: drying kinetics and rehydration characteristics. / Nguyen T. et al. // *Journal of food process engineering*. 45(12). 2022., No. 12 Vol. 45. P. 100. Doi10.1111/jfpe.14177.
13. Power control in microwave drying of green turnip / Wang R. et al. // *Drying technolog.* null., No. 10 Vol. 40. P. 10-15. Doi10.1080/07373937.2021.1927073.
14. Influence of microwave vacuum drying on the effective moisture diffusivity of seedless white grapes. / Lei Y. et al. // *Food science and technology*. 2022. № 42. P. 236. Doi10.1590/fst.37020.
15. Dincer, C. Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration // *Journal of microwave power and electromagnetic energy*. 2021. 55(3). Doi10.1080/08327823.2021.1952837.
16. Nejad, S.L.; Shahedi, M; Fathi, M. Comparative study of microwave-assisted vacuum evaporation, microwave-assisted evaporation, and conventional evaporation methods on physicochemical properties of barberry juice. *Journal of agricultural science and technology*. 2021. 23(2).
17. Bozkir, H; Tekgul, Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. // *Journal of food processing and preservation*. 2022. 46(6). Doi10.1111/jfpp.15902.
18. Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: a study based on dielectric spectroscopy. / Tao Y. et al. // *Journal of food engineering*. 2021. № 294. Doi10.1016/j.jfoodeng.2020.110414.
19. Chua, Ls; Leong, C.Y. Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. // *Journal of food processing and preservation*. 2020. 44(10). Doi10.1111/jfpp.14786.
20. Microwave assisted drying and extraction technique; kinetic modeling, energy consumption and influence on antioxidant compounds of fenugreek leaves. / Khan M. et al. // *Food science and technology*. 2022. № 42. Doi10.1590/fst.56020.
21. Nanofood: [Веб-сайт]. Одеса, 2023. URL: <http://nanofood.com.ua/> (дата звернення: 15.11.2023).

Отримано в редакцію 11.06.2023
Прийнято до друку 26.09.2023

Received 11.06.2023
Approved 26.09.2023

ТЕРМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАЛИВА З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

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

Анотація. Критична ситуація з твердими побутовими відходами в Україні потребує невідкладних заходів з вирішення цієї проблеми. Затвердженні нормативні документи передбачають зростання рівня перероблення відходів, в тому числі, за рахунок створення об'єктів з виробництва палива з твердих побутових відходів (RDF). Відповідно до морфологічного складу твердих побутових відходів основними компонентами RDF палива є такі горючі компоненти як папір і картон, текстиль, шкіра і гума, полімерні матеріали, деревина. Спалювання палива на основі таких відходів потребує вивчення його фізико-хімічних властивостей, кінетики термічного розкладання компонентів та генерування теплоти. В статті представлені результати термічного аналізу запропонованого RDF палива та його компонентів (пакувальний картон, текстильна тканина, натуральна шкіра, поліетиленова плівка та деревина сосни). Методами термогравіметрії та диференційного термічного аналізу визначено температурні інтервали зневоднення, термічного розкладання органічних і мінеральних речовин, питомий тепловий ефект та середні швидкості термічного розкладання органічних речовин, вологість і зольність зразків. Встановлено, що термічне розкладання органічних речовин в RDF паливі та його компонентах має стабільний характер. Стадії відрізняються за температурними інтервалами і швидкістю розкладання. Найвища загальна середня швидкість розкладання органічних речовин спостерігалась у зразка поліетиленової плівки, а найнижча – у натуральної шкіри. Виявлено, що наявність поліетиленової плівки в складі RDF палива покращує кінетику розкладання. Були обчислені умовні питомі теплові ефекти термічного розкладання зразків палива та його компонентів. Встановлено, що найбільше значення питомого теплового ефекту має шкіра, а найменше – картон. Аналіз отриманих результатів вказує на те, що збільшення вмісту деревини, натуральної шкіри, текстильних і полімерних матеріалів може підвищити теплотворну здатність палива. Показано, що величини умовного питомого теплового ефекту розкладання RDF палива та деревини сосни мають близькі значення. Це свідчить про хороші теплові показники запропонованого складу палива.

Ключові слова: тверді побутові відходи, RDF паливо, термічний аналіз, розкладання, теплота розкладання органічних речовин.

Вступ. В Україні гостро стоїть проблема поводження з твердими побутовими відходами, які щорічно накопичуються у розмірі 10–15 млн тон. Лише 4–5 % з цього обсягу відправляється на переробку, 1–2 % — на спалювання, а більше 90% спрямовується на полігони та звалища [1]. Більша частина полігонів та звалищ перенавантажені та не відповідають екологічним вимогам.

Таблиця 1

Середній морфологічний склад ТПВ

№ з/п	Тверді побутові відходи	Обсяг, %
1	Харчові відходи	30 – 45
2	Папір та картон	5 – 15
3	Полімерні матеріали	8 – 17
4	Скло	9 – 14
5	Чорні та кольорові метали	0,5 – 2,5
6	Текстильні матеріали	2 – 5
7	Деревина	0,1 – 2
8	Гума, шкіра	0,5 – 1,5
9	Дрібні будівельні відходи	0,3 – 3,5
10	Вуличний змій, листя	0 – 6
11	Гігієнічні засоби	2,3 – 3,5
12	Комбіновані відходи	0,4 – 1
13	Небезпечні відходи	0,1 – 0,5
14	Інше	2 – 22

Відповідно до Угоди про асоціацію з ЄС, були ухвалені нормативні документи, що мають забезпечити дотримання вимог рамкової Директиви 2008/98/ЄС про відходи. Зокрема, Національна стратегія управління відходами в Україні [2] та Закон України «Про управління відходами» [3] передбачають перехід від видалення відходів на полігони до системи комплексного поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ). Однією з задач Стратегії є зростання рівня перероблення ТПВ, а саме введення в експлуатацію сміттєпереробних заводів та створення об'єктів з виробництва палива з твердих побутових відходів (RDF). RDF (refuse derived fuel) складається з горючих компонентів ТПВ (полімерні матеріали, пластик, папір, картон, етикетки тощо). Це дає можливість отримання додаткового джерела енергії, що заміщує викопні види палива.

Властивості та обсяг ТПВ непостійні і залежать від декількох параметрів, зокрема пори року, місця утворення тощо. Середньорічний морфологічний склад, характерний для великих міст України представлено в табл. 1 [4]. Найбільша частка — це харчові відходи, які важко використати в якості RDF палива. Якщо

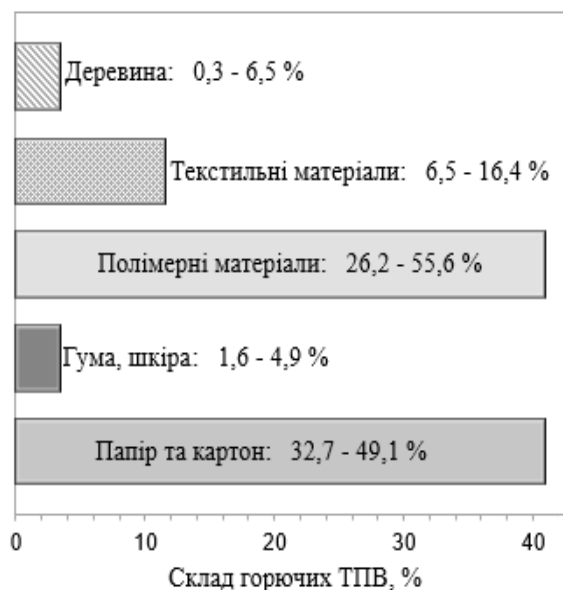


Рис. 1 – Усереднений морфологічний склад горючих ТПВ

виділити горючі складові, то виходячи з табл. 1 отримаємо усереднений морфологічний склад твердих побутових відходів, які можуть використовуватися як сировина для RDF палива (рис. 1).

Національною стратегією управління відходами також передбачено створення умов для належного поводження з відходами сільського господарства рослинного походження, а саме використання відходів біомаси для виробництва енергії. Сировиною для виробництва біопалива є переважно відходи лісової та деревообробної промисловості та сільськогосподарські відходи.

Одним з основних показників, яке обмежує використання RDF є викиди парникових газів. Тому прийнято спалювати RDF паливо разом з біомасою для зменшення загальної кількості зареєстрованих викидів CO₂, оскільки біомаса вважається вуглецево нейтральною [5, 6].

Дослідження характеристик RDF палива активно проводяться у світі [6–8, тощо], проте існують проблеми, пов'язані із забезпеченням якості та точним визначенням термічних характеристик палива через його неоднорідний склад. Спалювання RDF також потребує всебічного вивчення його теплотехнічних характеристик, зокрема дослідження фізико-хімічних властивостей.

тей, кінетики термічного розкладання компонентів та генерування теплоти.

Матеріали та методи. Визначення температурних інтервалів, дослідження кінетики зневоднення, термічного розкладання органічних та мінеральних речовин та оцінювання теплових ефектів проводили за допомогою методів термогравіметричного та диференціального термічного аналізу в дериватографі «Q-1000».

Нагрівання зразків від кімнатної температури до 1000 °C виконували зі швидкістю 7,4 K/хв. Зразки розміщували в відкритий конічний платиновий тигель. В тиглі порівняння знаходилась інертна речовина — Al₂O₃. Збір та обробку інформації здійснювали за допомогою прикладної комп'ютерної програми «Derivatograph» та програмних пакетів «Origin» та «Microsoft Excel».

Виходячи з середнього морфологічного складу ТПВ (табл. 1) термічному аналізу були піддані горючі ТПВ, а саме: картон, текстильна тканина (80% віскози та 20% еластану), натуральна шкіра, деревина сосни, як полімерний матеріал було взято поліетиленову плівку. Зразок картону вилучений з упаковки для харчових продуктів, зразки тканини та шкіри — з одягу та взуття, що були у вжитку, зразок поліетиленової плівки — з поліетиленового пакету, зразок деревини був виготовлений з щепи сосни. Всі матеріали перед дослідженням подрібнені до лінійного розміру ≤0,5 мм. На основі попередньої оцінки та аналізу літературних даних, як варіант, запропоновано для дослідження експериментальне RDF паливо наступного складу: 29% пакувального картону, 13% текстильної тканини, 4% натуральної шкіри, 31% поліетиленової плівки та 23% деревини сосни.

Вологість матеріалів компонентів RDF палива була рівноважна за відносної вологості повітря 40% та температури 20 °C.

Результати досліджень. Процес термічного розкладання представлений кривими на дериватограмах (рис. 2–4), що відображають зміну маси зразків (ТГ), швидкість зміни маси (ДТГ) та різниці температур зразка та інертної речовини (ДТА) в процесі нагрівання.

Термічна деструкція картону (рис. 2а) проходить в три етапи (табл. 2), які супроводжуються тепловими ефектами (крива ДТА). В інтервалі 20–169 °C спостерігається ендотермічний пік видалення води.

Розкладання органічних речовин починається одразу після зневоднення і має дві стадії, які відрізняються швидкостями розкладання (табл. 3). На першій стадії зі швидкістю 2,80% сухого матеріалу/хв. (СМ/хв.) і постійним наростанням тепловиділення (крива ДТА) розкладається 58,56% СМ. Швидкість розкладання досягає свого максимуму при 324 °C. На другій стадії (344–493 °C) спостерігається зниження середньої швидкості розкладання до 1,29% СМ/хв., деградує 29,08% СМ. Незважаючи на зниження швидкості розкладання інтенсивність тепловиділення при цьому зросла через деструкцію компонентів з більш високою теплотворною здатністю. Завершується розкладання органічних речовин при 493 °C.

На третьому етапі (493–1000 °C) зростання температури викликає розкладання мінеральних речовин, що входять до складу картону (4,89% СМ). В інтервалі 645–753 °C розкладається більша частина мінеральних речовин (4,08% СМ). Процес супроводжується ендотермічним ефектом (крива ДТА) і співпадає з інтервалом температур термічної дисоціації карбонату кальцію (крейда), який використовується при виробництві паперу та картону. Вміст золи в картоні склав 7,47% СМ.

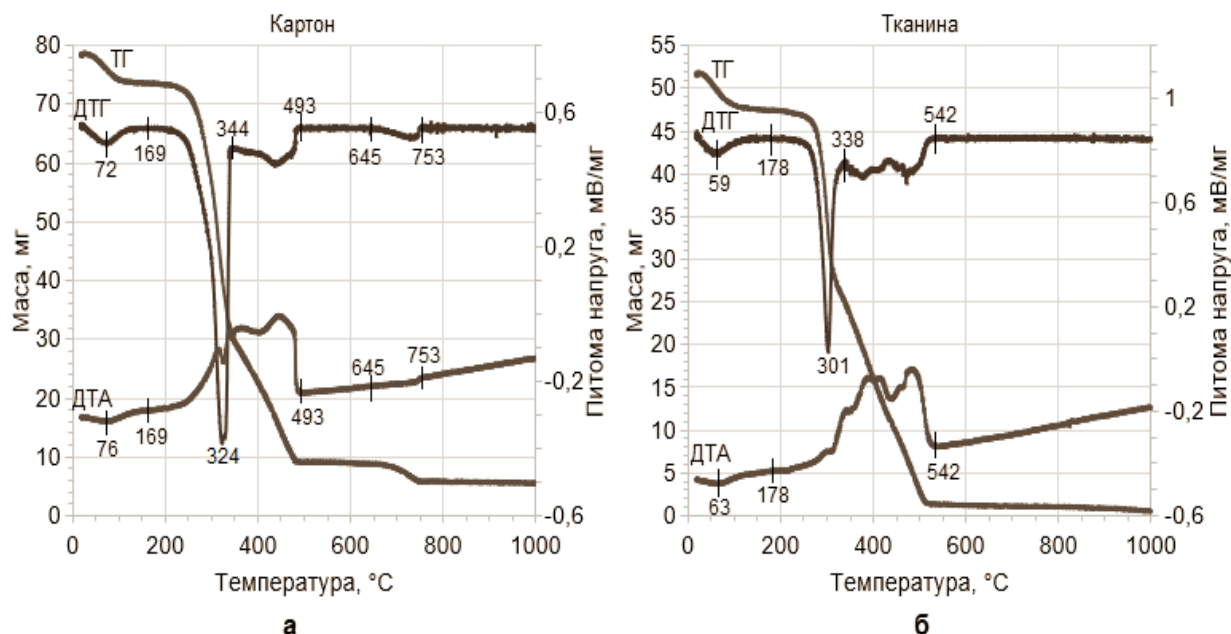


Рис. 2 – Дериватограми картону (а) та текстильної тканини (б)

Аналіз дериватограми зразка текстильної тканини (рис. 2б) показує, що зневоднення матеріалу проходить в інтервалі 20–178 °С з максимумом швидкості при 59 °С. Термічне розкладання органічних речовин відбувається у дві стадії (табл. 2) і має характер кривих подібний картону (рис. 2а). На першій стадії розкладається менше органічних речовин (47,26% СМ) ніж у другій (49,79% СМ), хоча швидкість зменшується з 2,33 до 1,74% СМ/хв. (табл. 3). Часка мінеральних речовин, що розкладаються, та вміст золи в тканині значно менша, ніж у картоні (табл. 2).

Таблиця 2

Результати аналізу термічного розкладання

Матеріал	Видалення води		Термічне розкладання						Зола, % СМ
			органічних речовин				мінеральних речовин		
	інтер- вал, °С	воло- гість, %	1 стадія		2 стадія		інтервал, °С	вміст, % СМ	
			інтервал, °С	вміст, % СМ	інтервал, °С	вміст, % СМ			
Картон	20–169	6,0	169–344	58,56	344–493	29,08	493–1000	4,89	7,47
Текстильна тканина	20–178	7,96	178–338	47,26	338–542	49,79	542–1000	1,90	1,05
Натуральна шкіра	20–156	10,08	156–367	41,42	367–595	53,90	595–1000	1,42	3,26
Поліетиле- нова плівка	–	0	211–402	20,36	402–516	75,50	516–1000	2,16	1,98
Деревина сосни	20–171	6,94	171–346	58,64	346–525	39,83	525–1000	0,68	0,85
RDF паливо	20–165	5,17	165–357	41,47	357–534	51,32	534–1000	3,69	3,52

Дериватографічні криві термічного розкладання шкіри (рис. 3а) мають характер, подібний до кривих картону та тканини. В інтервалі 20–156 °С видаляється вода (табл. 2). Через гідрофільність натуральна шкіра має досить високу рівноважну вологість (10,08%) та порівняно низьку термічну стійкість (156 °С).

Органічні речовини шкіри також розкладаються в дві стадії. На відміну від зразків картону та тканини, на другій стадії розкладається більше половини органічних речовин (табл. 2, 3). В інтервалі 595–1000 °С відмічається розкладання невеликої кількості мінеральних речовин (1,42% СМ). Вміст золи в шкірі порівняно високий і становить 3,26% СМ.

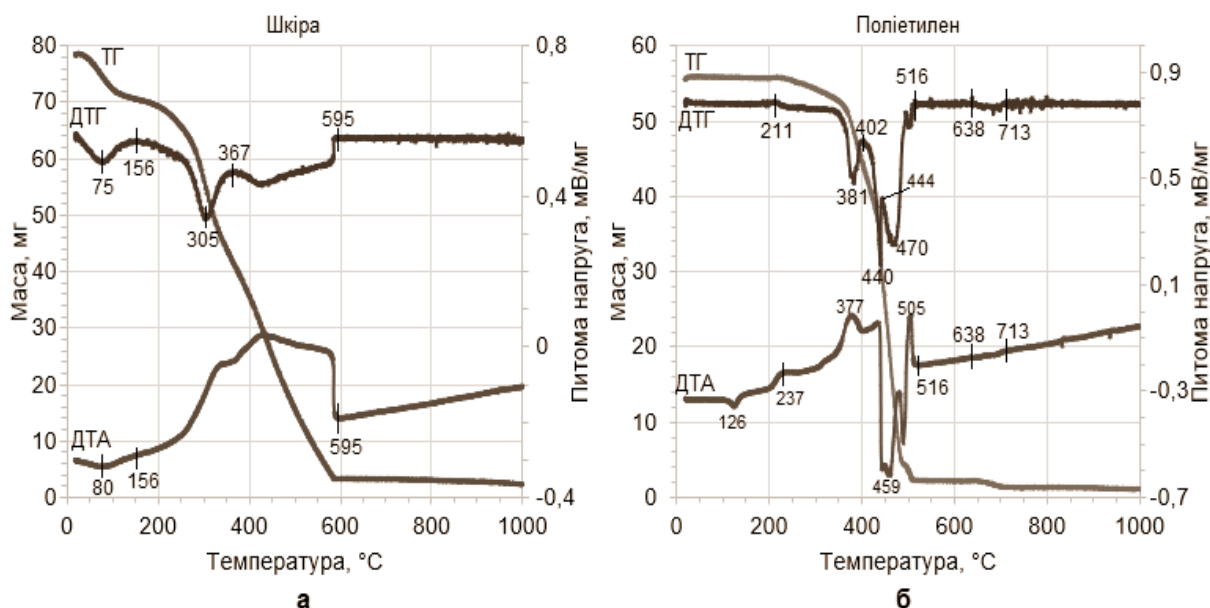


Рис. 3 – Дериватограми натуральної шкіри (а) та поліетиленової плівки (б)

Дериватограма поліетиленової плівки (рис. 3б) суттєво відрізняється. Горизонтальні ділянки на кривих ТГ та ДТГ до 211 °С свідчать, що в матеріалі відсутня вода. На кривій ДТА в точці при 126 °С реєструється стрибок теплоємності (склоперехід), поліетиленова плівка набуває еластичного стану.

Термічна деструкція поліетилену починається з 211 °С і теж має стадійний характер (табл. 2 та 3). Перша стадія — з максимумом швидкості розкладання при 381 °С, завершується при 402 °С. На цій стадії з порівняно невеликою швидкістю (0,85 % СМ/хв.) розкладається всього 20,36 % СМ. Подальше підвищення температури викликає інтенсивне утворення газоподібних речовин, які в певний момент (~438 °С) виходять за межі тигля. Це призводить до різкої втрати теплоти тиглем, що відображається на кривій ДТА в вигляді хибного ендотермічного піка з максимумом при 459 °С. Друга стадія відзначається значно більшою середньою швидкістю (4,42 % СМ/хв.) та глибиною розкладання — 75,50 % СМ.

В поліетиленовій плівці виявлені мінеральні речовини, розклад яких спостерігається в межах 516–1000 °С (табл. 2). Більша частина з них (1,62 % СМ) розкладається в інтервалі 638–713 °С і має виражений ендотермічний характер (крива ДТА), що найбільш вірогідно пов'язано дисоціацією карбонату кальцію. Вміст золи в плівці становить 1,98 % СМ.

Таблиця 3

Кінетика та умовний питомий тепловий ефект термічного розкладання органічних речовин компонентів та RDF палива

Матеріал	Середня швидкість розкладання, % СМ/хв.		Загальна середня швидкість розкладання, % СМ/хв.	Умовний питомий тепловий ефект термічного розкладання, мВ·с·мг ⁻¹ СМ
	1 стадія	2 стадія		
Картон	2,80	1,29	2,01	395,6
Текстильна тканина	2,33	1,74	1,98	467,0
Натупальна шкіра	1,56	1,67	1,62	622,9
Поліетиленова плівка	0,85	4,42	2,33	456,9
Деревина сосни	2,75	1,52	2,07	488,6
RDF паливо	1,71	2,04	1,88	434,1

На рис. 4а представлена дериватограма деревини сосни, яка є класичним зразком термічної деструкції природного рослинного матеріалу, де основними компонентами є геміцелюлоза, целюлоза та лігнін [9]. Дегідратація деревини відбувається в інтервалі 20–171 °С, з максимумом швидкості зневоднення при 77 °С.

На другому етапі відбувається розпад органічних речовин у дві стадії — низькотемпературну (171–346 °С) та високотемпературну (346–525 °С), які супроводжується інтенсивним тепловиділенням. Максимальна середня швидкість розкладання 2,75 % СМ/хв. реєструється на першій стадії, коли деструктивних змін зазнає 58,64 % СМ (табл. 3). Пік швидкості розкладання спостерігається в низькотемпературній стадії при 331 °С. Подальше нагрівання деревини викликає в інтервалі 525–1000 °С розкладання незначної кількості мінеральних речовин (0,68 % СМ). Вміст золи в зразку деревини сосни визначений на рівні 0,85 % СМ.

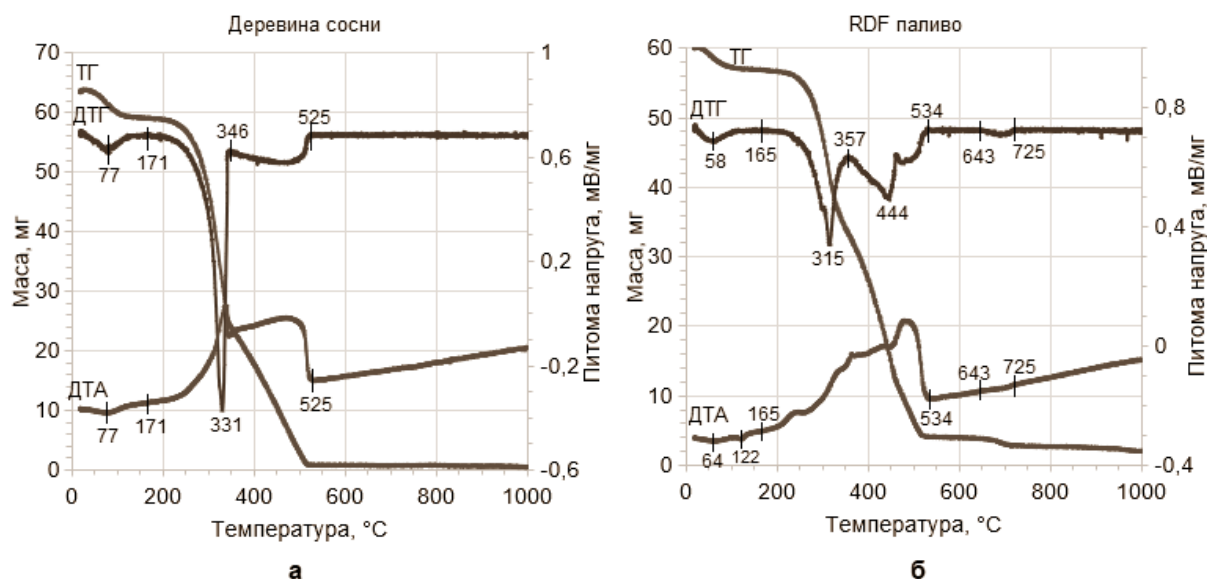


Рис. 4 – Деривитограми деревини сосни (а) та RDF палива (б)

Термічне розкладання RDF палива представлено деривитограмою на рис. 4б. Бачимо, що видалення води з RDF палива відбувається в інтервалі температур 20–165 °С, близькому до тих, що були визначені в окремих компонентах. На кривих деривитограми палива відображаються процеси, що властиві компонентам палива. Так, на кривій ДТА при 122 °С спостерігається скачок теплоємності, що відповідає температурі склування в поліетиленовій плівці. Зниження температури склування з 126 до 122 °С пов'язане з присутністю в зразку інших компонентів палива. Процес дисоціації карбонату кальцію відмічений в інтервалі 643–725 °С, практично в тих же межах температур як в картоні та поліетиленовій плівці.

Розкладання органічних речовин RDF палива відбувається також у дві стадії. На першій стадії спостерігається дещо нижча швидкість розкладання, ніж у другій (табл. 2 та 3), що є наслідком більш глибоких процесів деструкції у другій стадії та впливу кінетики розкладання поліетиленової плівки.

Генерування теплоти наростає у другій стадії і досягає свого максимуму при 482 °С (крива ДТА). Термічно нестійкі мінеральні речовини в компонентах палива в інтервалі 534–1000 °С деградують з утворенням більш простих молекул. Вміст золи в RDF паливі визначений на рівні 3,52 % СМ.

Аналіз кінетики термічного розкладання органічних речовин компонентів RDF палива показав (табл. 3), що на першій стадії, за нижчих температур, вищу швидкість розкладання мають картон, текстильна тканина та деревина сосни. Для шкіри та поліетиленової плівки характерне більш активне розкладання у другій стадії. Найвищу швидкість розкладання в першій стадії має картон, а в другій — поліетиленова плівка.

Найвища загальна середня швидкість розкладання органічних речовин 2,33 % СМ/хв. виявилась у зразка поліетиленової плівки, а найнижча — у натуральної шкіри. Незважаючи на те, що у 65 % компонентів палива реєструється більша швидкість розкладання органічних речовин в першій стадії, через інтенсивну кінетику розкладання поліетиленової плівки у другій стадії розкладання RDF палива в другій стадії зростає.

Для оцінки теплових характеристик палива та його компонентів за допомогою прикладної програми «Derivatograph» були визначені умовні теплові ефекти термічного розкладання за методикою, викладеною в [10], і представлені в табл. 3. Бачимо, що найбільше значення питомого теплового ефекту має шкіра, а найменше — картон, що є наслідком порівняно високої його зольності та вмісту крейди, на термічну дисоціацію якої витрачається енергія.

Знаючи умовні питомі теплові ефекти термічного розкладання компонентів RDF палива та їх вміст в паливі було розраховано умовний тепловий ефект термічного розкладання самого палива, який склав 453,6 мВ·с·мг⁻¹ СМ. Порівнюючи його із значенням отриманим експериментально (434,1 мВ·с·мг⁻¹ СМ), бачимо їх хороший збіг, абсолютні величини відрізняються лише на 4,3 % (табл. 3).

Висновки. Методами термогравіметрії та диференційного термічного аналізу в інтервалі 20–1000 °С досліджено RDF паливо та його компоненти: пакувальний картон, текстильну тканину, натуральну шкіру, поліетиленову плівку та деревину сосни. Визначено температурні інтервали зневоднення, термічного розкладання органічних і мінеральних речовин, вологість та вміст золи.

Показано, що термічне розкладання органічних речовин в компонентах та RDF паливі має стадійний характер. Стадії відрізняються як температурними інтервалами, так і швидкістю розкладання. Поліетиленова плівка в складі RDF палива покращує його кінетику розкладання.

Оцінено теплові ефекти термічного розкладання органічних речовин RDF палива і його компонентів. Отримані результати вказують на те, що для підвищення теплотворної здатності палива бажано збільшувати вміст в ньому таких компонентів як деревина, текстильні і полімерні (поліетиленова плівка) матеріали та

натуральна шкіра. Збільшення в складі RDF палива картону буде зменшувати теплотворну здатність палива через наявність в складі картону (паперу) крейди та високий вміст золи.

Виконано порівняння розрахункового та експериментального умовних питомих теплових ефектів розкладання органічних речовин RDF палива. Результатами порівняння доведено, що методика визначення питомого теплового ефекту термічного розкладання органічних речовин в дериватографі заслуговує того, щоб її використовувати для орієнтовної оцінки теплотворної здатності твердих палив органічного походження.

Величина умовного питомого теплового ефекту розкладання використаного RDF палива близька до величини умовного питомого теплового ефекту розкладання деревини сосни, що свідчить про хороші теплові показники запропонованого складу палива.

References

1. *Ekspert rozpoviv, yak vyrishyty problemu tverdykh pobutovykh vidkhodiv v Ukraini.* (2021). EcoPolitic. <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/ekspert-rozpoviv-yak-virishiti-problemu-tverdih-pobutovih-vidhodiv-v-ukraini/>
2. Pro skhvalennia Natsionalnoi stratchii upravlinnia vidkhodamy v Ukraini do 2030 roku, Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 820-p (2020) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-p#Text>
3. Pro upravlinnia vidkhodamy, Law of Ukraine; Specification 2320-IX, comes into force (2022) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
4. Buliandra, O., Haponych, L., Holenko, I., & Topal, O. (2018). Perspektyvy vykorystannia palyva z tverdykh pobutovykh vidkhodiv na TETs tsukrovyykh zavodiv. *Naukovi pratsi NUKhT*, 26(3), 138–146. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2020_26_3_16
5. Yang, Y., Liew, R. K., Tamothran, A. M., Foong, S. Y., Yek, P. N. Y., Chia, P. W., Van Tran, T., Peng, W., & Lam, S. S. (2021). Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2127–2140. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01177-5>
6. Zajemska, M., Magdziarz, A., Iwaszko, J., Skrzyniarz, M., & Poskart, A. (2022b). Numerical and experimental analysis of pyrolysis process of RDF containing a high percentage of plastic waste. *Fuel*, 320, 123981. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123981>
7. Kaniowski, W., Taler, J., Wang, X., Kalembe-Rec, I., Gajek, M., Mlonka-Mędrala, A., Nowak-Woźny, D., & Magdziarz, A. (2022). Investigation of biomass, RDF and coal ash-related problems: Impact on metallic heat exchanger surfaces of boilers. *Fuel*, 326, 125122. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125122>
8. Sever Akdağ, A., Atımtay, A., & Sanin, F. D. (2016). Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Waste Management*, 47, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.037>
9. Korinchevska, T., & Mykhailik, V. (2020). Thermal decomposition of granulated fuel from miscanthus. *Scientific Works*, 84(1), 10–15. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1862>
10. Mykhailik, V.A. Snezhkin, Yu.F., Korinchuk, D.M. (2014). Termichne rozkladannia hranul palyva na osnovi torfu ta derevyiny. *Promyslova teplotekhnika*, 36(2), 13–21

THERMAL CHARACTERISTICS OF FUEL FROM MUNICIPAL SOLID WASTE

Korinchevska T., Ph.D., Mykhailik V., Ph.D., Senior Research Scientist,
Snezhkin Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor

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

Abstract. The critical situation with municipal solid waste in Ukraine requires urgent measures to solve this problem. The approved regulatory documents provide for an increase in the level of waste processing, including through the creation of facilities for the production of refuse derived fuel (RDF) from municipal solid waste. According to the morphological composition of municipal solid waste, the main components of RDF are such combustible components as paper and cardboard, textiles, leather and rubber, polymer materials, and wood. Combustion of fuel based on such wastes requires the study of its physicochemical properties, the kinetics of thermal decomposition of components and heat generation. The article presents the results of the thermal analysis of the proposed RDF and its components (packaging cardboard, textile fabric, natural leather, polyethylene film and pine wood). The temperature intervals of dehydration and thermal decomposition of organic and mineral substances, specific thermal effect and average rates of thermal decomposition of organic substances, moisture and ash content of the samples were determined by thermogravimetry and differential thermal analysis. It was established that the thermal decomposition of organic substances in RDF and its components has a staged nature. The stages differ in temperature intervals and the rate of decomposition. The highest average rate of decomposition of organic substances was observed for polyethylene film, and the lowest for natural leather. It was found that the presence of a polyethylene film in the composition of RDF improves the decomposition kinetics. The conditional specific thermal effects of thermal de-

composition of fuel samples and its components were calculated. It was established that leather has the highest value of the specific thermal effect, and cardboard has the lowest value. Analysis of the obtained results indicates that increasing the content of wood, natural leather, textile and polymer materials can increase the calorific value of the fuel. It is shown that the values of the conditional thermal specific effect of the decomposition of RDF and pine wood have close values. This indicates good thermal performance of the proposed fuel composition.

Key words: municipal solid waste, refuse derived fuel (RDF), thermal analysis, decomposition, heat of decomposition of organic substances.

Список використаної літератури

1. Експерт розповів, як вирішити проблему твердих побутових відходів в Україні. *ЕкоПолітика*. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/ekspert-rozpoviv-yak-virishiti-problemu-tverdih-pobutovih-vidhodiv-v-ukraini/> (дата звернення: 15.05.2023).
2. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 08.11.2017 р. № 820-р : станом на 17 верес. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-r#Text> (дата звернення: 15.05.2023).
3. Про управління відходами : Закон України; Перелік від 20.06.2022 № 2320-IX, набирає чинності. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення: 16.05.2023).
4. Перспективи використання палива з твердих побутових відходів на ТЕЦ цукрових заводів / О. Буляндра та ін. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Т. 26, № 3. С. 138–146. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npukht_2020_26_3_16. (дата звернення: 10.05.2023).
5. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review / Y. Yang et al. *Environmental chemistry letters*. 2021. Vol. 19, no. 3. P. 2127–2140. DOI: 10.1007/s10311-020-01177-5.
6. Numerical and experimental analysis of pyrolysis process of RDF containing a high percentage of plastic waste / M. Zajemska et al. *Fuel*. 2022. Vol. 320. P. 123981. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123981.
7. Investigation of biomass, RDF and coal ash-related problems: impact on metallic heat exchanger surfaces of boilers / W. Kaniowski et al. *Fuel*. 2022. Vol. 326. P. 125122. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125122.
8. Sever Akdağ A., Atımtay A., Sanin F. D. Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Waste management*. 2016. Vol. 47. P. 217–224. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.08.037.
9. Корінчевська Т. В., Михайлик В. А. Термічна деструкція гранульованого палива з міскантуса. *Scientific Works*. 2020. Т. 84, № 1. С. 10–15. DOI: 10.15673/swonaft.v84i1.1862.
10. Михайлик В. А., Снежкін Ю. Ф., Корінчук Д. М. Термічне розкладання гранул палива на основі торфу та деревини. *Промислова теплотехніка*. 2014. Т. 36, № 2. С. 13–21.

Отримано в редакцію 15.06.2023
Прийнято до друку 26.09.2023

Received 15.06.2023
Approved 26.09.2023

АКТИВНІСТЬ ВОДИ ВИСУШЕНИХ ЯГІД ЛОХИНИ (VACCINIUM CORYMBOSUM L.)

Петрова Ж.О., д.т.н., с.н.с., Слободянюк К.С., к.т.н., Кузнєцова І.В., д.с.-г.н., с.н.с.,
Граков О.П., аспірант, Вишневецька Т.А., м.н.с.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м.Київ

Анотація. З кожним роком зростає вирощування та площі під насадження лохини. Лохина високоросла (*Vaccinium corymbosum* L.) через лікувальну та профілактичну здатність набула популярності у харчуванні населення України. Переробка ягід лохини для зберігання відбувається переважно заморожуванням, рідше – сушінням. Останнє обумовлено тривалістю процесу, оскільки застосовуються низькотемпературні режими зневоднення та наявністю воскового нальоту на шкірці ягід. Віск запобігає псуванню свіжих ягід лохини під час зберігання. Але суттєво перешкоджає її переробці. Крім того, ягоди лохини мають високий вміст води 81-87 %. Зменшення вологості шляхом зневоднення знижує активність патогенних мікроорганізмів, підвищує безпеку і подовжує терміни зберігання харчових продуктів. Водночас це призводить до зміни смакових якостей. У цьому напрямі одним з ключових питань є показник, що впливає на структурні властивості продукту, термін зберігання і залежить від природи та кількості компонентів розчинних у водній фазі продукту, а також від способів оброблення сировини, напівфабрикатів продуктів тощо. Відповідно, вирішальним є значення показника «активність води» (a_w), від значення якого залежить не тільки формуючий показник продукту але й розвиток мікроорганізмів.

На основі попередньо проведених досліджень впливу способу попередньої обробки на кінетику сушіння лохини в залежності від різних режимних параметрів теплоносія було вперше визначено показник активності води висушених ягід. Обґрунтовано, що на показник активності води має вплив вміст таких сполук як білок, жирні речовини, цукри, флавоноїди, антоціани, барвні сполуки тощо. Вперше виявлено вплив режимних параметрів теплоносія конвективного та комбінованого (обробка інфрачервоним випромінюванням з одночасною конвекцією) при різній температурі теплоносія, який показав зміну значень коефіцієнта показника активності води для лохини сушеної. Розраховано коефіцієнти показника активності води та показано значний вплив проведення процесу сушіння на якість готового продукту. Отримані значення коефіцієнта показника активності води можуть бути використані для оцінки якості зберігання висушених ягід лохини та порошку з них.

Ключові слова: лохина, сушіння, активність води, інфрачервоне випромінювання, конвекція.

Постановка проблеми. Лохина високоросла (*Vaccinium corymbosum* L.), або ягідник щитковий, або вакциніум щитковий; народні назви: боровиця, яфіра, буяхи – одна з лідируючих ягід, що користується високим споживчим та експортним потенціалом. Багаті на флавоноїди ягоди *V. corymbosum* володіють потенційною здатністю обмежувати розвиток і тяжкість деяких видів раку та судинних захворювань, включаючи атеросклероз, ішемічну хворобу, інсульт і нейродегенеративні захворювання, старіння [1, 2]. Також лохина містить різноманітні БАП з такими біологічними властивостями, як антиоксидантні, протипухлинні, протівірусні, антинейродегенеративні та протизапальні [1, 2, 3]. Саме через вищеописану лікувальну та профілактичну здатність, *Vaccinium corymbosum* L. набула популярності у харчуванні населення України.

З кожним роком зростає вирощування та площі під насадження лохини. Але через неможливість повної реалізації ягід, залишки продукції доцільно переробляти. Листя та ягоди лохини – цінна сировина для виготовлення лікарських засобів. Зрілі плоди заготовляються у липні – серпні переважно заморожуванням, рідше – сушінням. Останнє обумовлено довготривалістю процесу, оскільки застосовуються низькотемпературні режими зневоднення та наявністю воскового нальоту на шкірці ягід. Щільний наліт сформований винятково з аморфного воску, що виникає в результаті злиття кристалів [2]. Між вкритими віском фрагментами є мережа мікротріщин, що мають гладкий шар кутикули і рідко розподілені структури кристалічного воску [2, 4, 5]. Цей віск запобігає псуванню свіжих ягід лохини під час зберігання. Але суттєво перешкоджає її переробці. Крім того, ягоди лохини мають високий вміст води 81-87 %.

Провідну роль в життєдіяльності природного світу має вода, яка як основний компонент клітин всіх живих організмів, в різних кількостях і формах, що міститься в сільськогосподарських рослинах і тваринах, в продовольчій сировині і готових харчових продуктах. У живих організмах вміст і стан води регулюється природними законами, які перешкоджають її використанню патогенними мікроорганізмами [6]. Як відомо, харчові продукти мають показник активності води, який залежить від складу сировини. Тому виникає питання щодо штучного регулювання кількості і стану води. Зменшення вологості знижує активність патогенних мікроорганізмів, підвищує безпеку і подовжує терміни зберігання харчових продуктів. Водночас це

призводить до зміни смакових якостей [7]. У цьому напрямі одним з ключових питань є показник, що впливає на структурні властивості продукту, термін зберігання і залежить від природи та кількості компонентів розчинних у водній фазі продукту [8], а також від способів оброблення сировини, напівфабрикатів продуктів тощо [9]. Відповідно, вирішальним є значення показника «активність води» (a_w), від значення якого залежить не тільки формулюючий показник продукту але й розвиток мікроорганізмів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки градієнт значень активності води продукту і відносної вологості навколишнього середовища є рушійною силою масового обміну за різних термічних та гідротермічних процесів, а також при зберігання, дані щодо показника активності води оброблених продуктів є актуальними для обґрунтування оптимальних режимів технологічних процесів [10]. Відомі дослідження, які присвячені визначенню показника a_w , таких вчених Hazelton J. L., Desrochers J. L., Walker, C.E. [11], Reed K.A., Sims Ch. A., Gorbet D.W., Keefe S.F. [12], Manohar R.S. і Rao P.H. [13] Hayashi et al. [14], Puzenko et al. [15], Dashnau et al. [16], Kataoka et al. [17], Tanaka M. [18], Towey et al. [19], та інших.

Визначено a_w [20] в таких харчових продуктах як: фрукти (0,97), яйця (0,97), борошно (0,80), джем (0,82–0,94) м'ясні вироби. Такі харчові продукти як сухе молоко, крекери та інстант-продукти мають значення показника активності води в межах 0,35–0,5, що зазвичай виявляють таку властивість як крихкість структури [21]. Červenka L. et al. [20], Schmidt S.J. [22] вивчали вплив a_w на розвиток мікроорганізмів у харчових продуктах та визначили наступні межі для: бактерій $a_w = 0,75–0,98$; дріжджів $a_w = 0,62–0,90$; мікроміцетів $a_w = 0,60–0,88$. Отже, показник активності води впливає на якість та зберігання харчового продукту.

Даний показник введено в нормативні показники у стандарти і інші нормативні документи багатьох держав. З 2007 р. в Україні введений в дію ДСТУ ISO на використання показника «активність води» для визначення якості і безпеки продуктів харчування і кормів. Відомими є так звані бар'єрні технології [23] на виробництво цілого ряду продуктів, спрямовані забезпечити безпечність і якість продуктів зі збільшеним терміном зберігання. Дослідження показника активності води сушених ягід лохини в наукових літературних джерелах відсутні.

Постановка завдання. Контролюючи функціонально-технологічні показники продукту, зокрема, показник активності води, можна прогнозувати його здатність до зберігання, що дозволить створити «карти стабільності» харчових продуктів і визначити оптимальні умови їх зберігання. Також показник a_w можна використовувати як критерій для розрахунку температури пастеризації/стерилізації широкого асортименту консервованої продукції (наприклад, низькоокислотні та підкислені соки), що відповідає вимогам промислової стерильності, при максимальному збереженні харчової цінності. Отже, a_w – це ще і важіль маніпуляцій температурою для підбору або розрахунку режиму стерилізації при заданому рН. Враховуючи, що показник активності води був визначеним для низки харчових продуктів, актуальним залишається визначення даного показника для лохини яка є перспективною функціональною сировиною у виробництві широкого спектру харчових продуктів.

Метою досліджень було дослідити показник активності води лохини, сушеної за різних технологічних параметрів обробки.

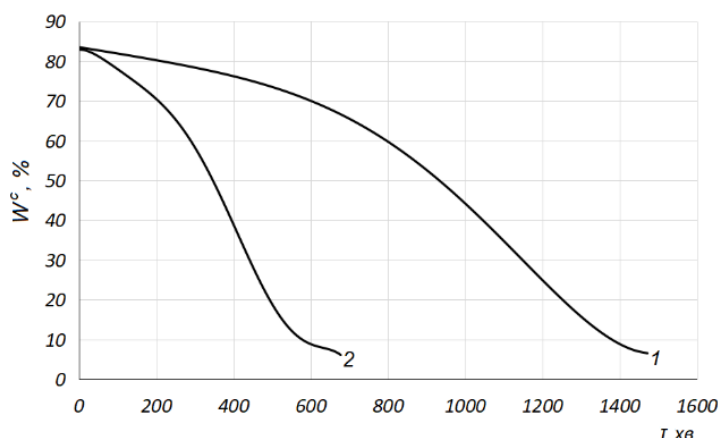
Визначали показник активності води за методикою викладеною в ISO 18787:2017 [24] для 7 зразків лохини сушеної.

Вимірювання термодинамічних показників усіх зразків лохини сушеної здійснювали на приладі Hygrolab-2 (Rotronic, Швейцарія) за температури 18–20 °C з точністю вимірювання 1,5 %, 0,3 °C 0,005 од. $a_w \pm 1.5\%$ від значення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нами раніше досліджувався вплив попередньої підготовки на загальну тривалість конвективного зневоднення ягід лохини в залежності від режиму її проведення [25]. З одного боку під тепловим впливом можливе часткове видалення речовин воскового нальоту, зміна його структури та властивостей. З іншого боку під дією теплоти можлива механічна деформація, що призводить до мікро–тріщин та часткового відшарування шкірки від м'якоті, що сприяє утворенню шляхів для переміщення вологи. Також можливий гідроліз речовин, що цементують клітини шкірки. Таким чином, гіротермічна обробка може як пришвидшувати сушіння, так і сповільнити його з подальшим зростанням енергетичних витрат.

Нами була апробована гіротермічна обробка, яка передбачає бланшування ягід лохини водним розчином харчової соди. Дослідним шляхом було встановлено, що такий спосіб попередньої обробки має подовжує загальну тривалість зневоднення. Замість очікуваного скорочення тривалості спостерігалось сповільнення вологовидалення. Тому, у подальших дослідженнях даний спосіб обробки лохини не використовувався.

Дослідження кінетики сушіння ягід лохини без обробки та після гіротермічної обробки виконувались з постійними режимними параметрами теплоносія (повітря) $t=70$ °C, $v=2$ м/с, $d=10$ г/кг с.п. Застосування гіротермічної обробки дозволило зменшити кількість воску на лохині і тим самим скоротити загальну тривалість процесу зневоднення відносно необроблених ягід [25].



1 – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau = 1599,6\text{ хв}$); 2 – $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau = 689,25\text{ хв}$)

Режимні параметри теплоносія: $v = 3\text{ м/с}$, $d = 10\text{ г/кг с.п.}$ 1 шар.

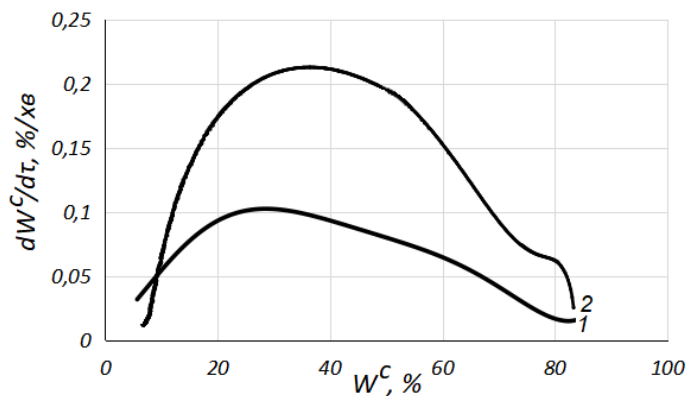
Рис. 1 – Кінетика сушіння гігротермічно оброблених ягід лохини в залежності від температури теплоносія

На рисунку 1 представлено криві сушіння $W^c = f(\tau)$, які показують вплив температури теплоносія на загальну тривалість зневоднення гігротермічно оброблених ягід лохини в залежності від режимних параметрів теплоносія $v = 3\text{ м/с}$, $d = 10\text{ г/кг с.п.}$

Дослідження виконували на експериментальному конвективному стенді розробленому в ІТТФ НАНУ. Ягоди розташовувалися на ситцевому піддоні сушильної камери в 1 шар. Зневоднення проводили до досягнення зразками залишкової вологості $W_3^c = 6\%$.

Дослідження впливу температури теплоносія на кінетику сушіння гігротермічно обробленої лохини показали, що при тривалості зневоднення при температурі теплоносія $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ становила $\tau = 1599,6\text{ хв}$, а при $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $\tau = 689,25\text{ хв}$.

Після проведеного регресійного аналізу графіків залежності $W^c(\tau)$ виконувалося диференціювання в програмному забезпеченні Advanced Grapher. Отримано графіки залежності швидкості сушіння $dW^c/d\tau$, $\%/хв$ від середньої вологості матеріалу W^c , $\%$ (рис. 2).



1 – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

Режимні параметри теплоносія: $v = 3\text{ м/с}$, $d = 10\text{ г/кг с.п.}$ 1 шар.

Рис. 2 – Зміна швидкості сушіння гігротермічно оброблених ягід лохини в залежності від температури теплоносія

Збільшення температури теплоносія від 60 до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ дозволяє скоротити загальну тривалість сушіння гігротермічно оброблених ягід лохини на 57% . З рисунку 2 криві швидкостей сушіння гігротермічно оброблених ягід лохини додатково підтверджують, що температура теплоносія $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ пришвидшує швидкість зневоднення зразків. Проте високотемпературний режим теплоносія не забезпечує збереження властивостей нативної сировини, про що свідчив колір, смак та запах висушеного матеріалу.

Також нами раніше виконувались експериментальні дослідження з використанням інфрачервоного джерела з тепловим потоком 3800 Вт/м^2 , яке нагрівало поверхню ягід лохини, які не мали попередньої обробки. Нагрів інфрачервоним випромінюванням (ІЧВ) тривав протягом 10 хв з одночасним сушінням при режимних параметрах теплоносія (повітря) $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 3\text{ м/с}$, $d = 10\text{ г/кг с. п.}$ Було встановлено, що застосування ІЧ-випромінювання потужністю 100 Вт дозволяє зменшити кількість воску на ягодах лохини відносно гігротермічної обробки і тим самим скоротити загальну тривалість процесу зневоднення в $1,2$ рази [25].

Отримані зразки лохини сушеної розтирали в порцеляновій ступці. Наважку зразку масою 0,5 г перекладали в спеціальний бюкс та здійснювали вимірювання показника активності води.

В дослідженнях використовували лохину висушену згідно наступних режимних параметрів теплоносія (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри сушіння лохини

Зразок	Спосіб оброблення перед сушінням	Температура, °C	Швидкість руху теплоносія, м/с	Залишкова вологість, %
1	бланшування	80	3	5,69
2	бланшування	70	2	3,00
3	бланшування	60	3	3,41
4	бланшування	80/60	3	3,32
5	оброблена ІЧВ 70 Вт з конвекцією 50 °C	60	3	6,00
6	без обробки	70	2	9,30
7	оброблена ІЧВ 100 Вт з конвекцією 60 °C	60	3	12,62

Вивчали зміну a_w для висушеної лохини, для визначення впливу режиму сушіння на даний показник, і відповідно, на якість продукту, що дасть змогу прогнозувати терміни зберігання харчового продукту. В таблиці 2 представлено показники активності води. Слід відмітити, що значення ентальпії різні для зразків лохини сушеної, що вказує на вплив співвідношення концентрацій компонентів ягід, що відповідно, впливає на енергію активації сполук.

Було встановлено [20], що важливе значення має ступінь зв'язку води з компонентами. Вода, що має міцніший зв'язок менше здатна підтримувати процеси, які призводять до псування. Найвищою ентальпія є для зразка 6, де ягоди висушувались за високої температури (80 °C). Будь яка зміна в структурі ягід за сушіння призводить до зниження ентальпії. Зокрема, пом'якшення структури та послаблення зв'язків між вуглеводами і білками, флавоноїдами, антоціанами тощо. Зразок 7 має найнижче значення ентальпії – 36,64 Дж/г. Даний зразок отриманий шляхом конвективного сушіння свіжої ягоди лохини. В той же час як зразок 6 був отриманий шляхом бланшування свіжих ягід з наступним конвективним сушінням. Отже, включення процесу бланшування збільшує кількість утворених барвних сполук та інших сполук за дії високих температур. Відповідно, показник a_w є однаковим для обох зразків, що вказує на не залежність даного показника від енергії проходження хімічних реакцій в ягодах лохини та впливу інших компонентів таких як: флавоноїдів, антоціанів, мікро- і макроелементів тощо. Також перетворення для зразків 1 і 2, які мають майже однакові значення показника активності води але високу різницю між значенням ентальпії. Найбільше відрізняється з усіх зразок 4, який має найбільше значення показника активності води (0,548) та відносно низьке значення ентальпії (36,94 Дж/г). Такий зразок отриманий за умов сушіння при температурі 60 °C, що вказує на вплив процесів розкладання сполук ягід за тривалої дії більш низьких температур.

Активність води продукту визначає її здатність до випаровування з продукту відносно здатності до випаровування чистої води за цієї ж температури [26].

Таблиця 2

Термодинамічна характеристика лохини сушеної (n=3, p<0.05)

№	Показник	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4	Зразок 5	Зразок 6	Зразок 7
1	Ентальпія, Дж/г	37,19	36,78	36,96	36,94	37,61	37,67	36,64
2	Питомий вологовміст, г/кг	7,06	6,98	7,09	7,24	7,31	7,23	7,03
3	Співвідношення концентрацій компонентів суміші, г/кг	7,11	7,02	7,14	7,29	6,98	7,29	7,08
4	Концентрація парів при насиченні, г/м ³	16,34	16,17	16,08	15,70	16,15	16,39	15,92
5	Парціальний тиск водяного пару, гПа	11,30	11,77	11,16	11,58	11,10	11,58	11,24
6	Тиск насиченого пару види, гПа	22,05	21,80	21,67	21,23	21,76	22,11	21,45
7	Активність води (a_w)	0,513	0,512	0,523	0,548	0,538	0,524	0,524

Відповідно, на зміну показника a_w за змін температур сушіння має вплив саме структури сполук ягід, в яких завдяки іонним зв'язкам, гідрофобним і водневим зв'язкам та Ван-дер-Ваальсовим силам відбувається взаємодія вологи продукту з такими сполуками як вуглеводи та білок [27]

Окрім впливу на хімічні реакції і розвиток мікроорганізмів, показник активності води впливає на тексту продуктів [26]. Традиційно застосування методів подовження строків зберігання продуктів, в основі яких зниження вмісту вологи досягається шляхом концентрування або дегідратації, має глибокі наукові основи [26]. Як відомо [27], такі речовини як цукор і кухонна сіль знижують показник a_w в продукті. Зокрема, в насиченому розчині цукру при 20 °C показник активності води становить 0,864, а кухонної солі - 0,753 [26].

Відомий вплив способу обробки сировини та напівфабрикатів на значення показника активності вологи [27]. Значення показника активності води для зразків лохини сушеної знаходиться в діапазоні вище 0,5, що свідчить про слабку крихкість та про вплив жиркових речовин на даний показник, який практично не зв'язує воду.

Активність води згідно теорії Ван-Лаара [13, 14]:

$$a_1 = (1 - x) \cdot e^{\frac{U_0 \cdot x^2}{k \cdot T}}, \quad (1)$$

де (1-x) - мольна частка води;

x - мольна частка компоненту;

U_0 - енергія взаємообміну (середнє збільшення енергії однієї молекули при заміні іншою молекулою), Дж;

k - постійна Больцмана, Дж/к;

T - температура, К.

Коефіцієнт активності води можна розрахувати за формулою:

$$\gamma_1 = e^{\frac{U_0 \cdot x^2}{k \cdot T}}, \quad (2)$$

Після логарифмування з рівняння (2) отримано рівняння (3):

$$\ln \gamma_1 = \frac{U_0 \cdot x^2}{k \cdot T}, \quad (3)$$

За експериментальними даними щодо активності води (табл. 2) розраховано коефіцієнт показника активності, а потім з рівняння (3) були визначені значення $-\frac{U_0}{k \cdot T}$ і представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Значення коефіцієнта показника активності води для лохини сушеної

Зразок	$-\frac{U_0}{k \cdot T}$
1	61,98
2	70,69
3	70,34
4	70,38
5	69,13
6	69,02
7	70,96

Відомо, що чим вище значення показника активності води сполук продукту і більше значення коефіцієнту активності води $-\frac{U_0}{k \cdot T}$, то тим нижчим буде консервуючий ефект компонентів продукту. З даних таблиці 2 і 3 видно, що найбільшим є коефіцієнт показника активності води для зразків 2, 3, 4 і 7, та які мають середнє значення показника активності води. Це показує стабілізуючу здатність продукту для інших харчових компонентів. Отже, значення $-\frac{U_0}{k \cdot T}$ може бути використано для оцінки якості зберігання висушених ягід лохини та порошку з них.

Висновки. Вперше визначено показник активності води для сушених ягід лохини за різних технологічних параметрів сушіння. Значення показника активності води знаходиться в межах 0,5-0,6. За загальною класифікацією лохина сушена відноситься до харчових продуктів із низькою вологістю.

Обґрунтовано, що на показник активності води має вплив вміст таких сполук як білок, жирові речовини, цукри, флавоноїди, антоціани, барвні сполуки тощо.

Вперше виявлено вплив режимних параметрів теплоносія конвективного та комбінованого (обробка інфрачервоним випромінюванням з одночасною конвекцією) при різній температурі теплоносія, який показав зміну значень коефіцієнта показника активності води для лохини сушеної. Найкращого значення набувають зразки оброблені бланшуванням та висушені при температурі теплоносія 60, 70 та 80/60 °C, а також

інфрачервоним короткотривалим випромінюванням 100 Вт з одночасною конвекцією ($t_{\text{теплоносія}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Розраховано коефіцієнти показника активності води та показано значний вплив проведення процесу сушіння на якість готового продукту – зразки лохини виявляють стабілізуючу здатність для харчових систем, що сприяє подовженню терміну зберігання харчових продуктів, вироблених з такими ягодами.

References

1. Migas, P., Cisowski, W., & Dembińska-Migas, W. (2005). Isoprene derivatives from the leaves and callus cultures of *Vaccinium corymbosum* var. Bluecrop. *Acta Poloniae Pharmaceutica*, 62(1), 45-51.
2. Stremoukhov, O. O. (2021). Farmakohnostichne vivchennya listya ta plodiv lokhini dlya stvorenniya novikh likars'kikh zasobiv : dis. na zdobuttya nauk. stupenya doktor filosofiyi : 22, 226 : zakhist 20.12.2021 / nauk. ker. O.M. Koshoviy. Kharkiv: Natsional'niy farmatsevtichniy universitet. 290 s.
3. Kolichev, I. O., Krasnikova, T. O., Koshoviy, O. M. (2014). Rozrobka parametriv standartizatsiyi listya lokhini visokorosloyi // Materiali Ukrayins'koyi naukovopraktichnoyi konferentsiyi / Natsional'niy farmatsevtichniy universitet. Kharkiv: NFaU. S. 110.
4. About metabolic syndrome // American Heart Association: [Website]. URL: <https://www.heart.org/en/health-topics/metabolic-syndrome/about-metabolic-syndrome> (viewed on: 12.02.2019).
5. Takeshita, M., Ishida, Y.-i., Akamatsu, E., Ohmori, Y., Sudoh, M., Uto, H., Tsubouchi, H., & Kataoka, H. (2009b). Proanthocyanidin from Blueberry Leaves Suppresses Expression of Subgenomic Hepatitis C Virus RNA. *Journal of Biological Chemistry*, 284(32), 21165-21176. <https://doi.org/10.1074/jbc.M109.004945>.
6. Fennema, O. (1996). *Water and ice : Food Chemistry*. Marcel Dekker.
7. Levine, H., Slade, L., & Karel, M. (1988). *Moisture Management in Food Systems* / Center for Professional Advancement.
8. Scott, W., Mrazek, E., & Stewart, G. (1957). Water relations of food spoilage microorganisms. *Advances in Food Research*, 7, 83-127.
9. Kress-Rogers, E., & Christopher, J. B. B. (2001). *Instrumentation and sensors for the food industry*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781855736481>.
10. Leung, H. (1987). Influence of water activity on chemical reactivity. *Water activity: Theory and application to food* (p. 27-53). Marcel Dekker.
11. Hazelton, J. L., DesRochers, J. L., & Walker, C. E. (2003). BISCUITS, COOKIES, AND CRACKERS | Chemistry of Biscuit Making. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* (p. 533-539). <https://doi.org/10.1016/b0-12-227055-x/00105-x>.
12. Reed, K. A., Sims, C. A., Gorbett, D. W., & O'Keefe, S. F. (2002). Storage water activity affects flavor fade in high and normal oleic peanuts. *Food Research International*, 35(8), 769-774. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(02\)00073-X](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(02)00073-X).
13. Sai Manohar, R., & Haridas Rao, P. (1999). Effects of water on the rheological characteristics of biscuit dough and quality of biscuits. *European Food Research and Technology*, 209(3-4), 281-285. <https://doi.org/10.1007/s002170050494>.
14. Hayashi, Y., Puzenko, A., & Feldman, Y. (2006). Slow and fast dynamics in glycerol-water mixtures. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(42-49), 4696-4703. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.01.113>.
15. Puzenko, A., Hayashi, Y., & Feldman, Y. (2007). Space and time scaling in glycerol-water mixtures. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353(47-51), 4518-4522. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.12.122>.
16. Dashnau, J. L., & Vanderkooi, J. M. (2007). Computational Approaches to Investigate How Biological Macromolecules Can Be Protected in Extreme Conditions. *Journal of Food Science*, 72(1), R001-R010. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00242.x>.
17. Kataoka, Y., Kitadai, N., Hisatomi, O., & Nakashima, S. (2011). Nature of Hydrogen Bonding of Water Molecules in Aqueous Solutions of Glycerol by Attenuated Total Reflection (ATR) Infrared Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 65(4), 436-441. <https://doi.org/10.1366/10-06183>.
18. Tanaka, M., Sato, K., Kitakami, E., Kobayashi, S., Hoshida, T., & Fukushima, K. (2014). Design of biocompatible and biodegradable polymers based on intermediate water concept. *Polymer Journal*, 47(2), 114-121. <https://doi.org/10.1038/pj.2014.129>.
19. Towey, J. J., & Dougan, L. (2011). Structural Examination of the Impact of Glycerol on Water Structure. *The Journal of Physical Chemistry B*, 116(5), 1633-1641. <https://doi.org/10.1021/jp2093862>.
20. Cervenka, L., Brožková, I., & Vytrásová, J. (2006). Effects of the principal ingredients of biscuits upon water activity. Effects of the principal ingredients of biscuits upon water activity. *Journal of Food and Nutrition Research*, 45(1), 39-43.
21. Sereno, A. M., Hubinger, M. D., Comesana, J. F., & Correa, A. (2001). Prediction of water activity of osmotic solutions. *Journal of Food Engineering*, 49, 103-114.
22. Schmidt, S. J. (2004). Water and solids mobility in foods. *Advances in Food and Nutritional Research*, 48, 1-101. DOI: 10.1016/S1043-4526(04)48001-2

23. Lyaystner L. Bar'ernye tekhnologii: kombinirovannye metody obrabotki, obespechivayushchie stabil'nost', bezopasnost' i kachestvo produktov pitaniya: perevod s anhl / za red. L. Lyaystner, H. Hould. M: VNII myasnoy promyshlennosti im. V.M. Horbatova, 2006. 236 s.
24. ISO 18787:2017 Food stuffs - Determination of water activity. Publication date: 2017-11. P. 9.
25. Petrova, Z., Slobodianiuk, K., & Grakov, O. (2023). Determining the influence of pre-preparation of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) on the total duration of drying. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (11 (122)), 83-90. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276097>
26. Tsukanov M. F., Chernomorets A. B. Tekhnologicheskije aspekty pokazatelya «aktivnost' vody» i eho rol' v obespechenii kachestva produktsii obshchestvennoho pitaniya // Tekhniko-tekhnologicheskije problemy servisa. 2010., vip. 1 T. 11. S. 58-63.
27. Miyazaki, M. R., Hung, P. V., Maeda, T., & Morita N. (2006). Recent advances in application of modified starches for breadmaking. Trends in Food Science & Technology. Vol.17. P. 591-599.

WATER ACTIVITY OF DRIED BLUEBERRIES (*VACCINIUM CORYMBOSUM* L.)

**Petrova Z.O., Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher,
Slobodianiuk K.S., Ph.D., Senior Researcher,**

**Kuznietsova I. V., Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher,
Grakov O.P., graduate student, Vyshnievska T.A.**

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

Abstract. Every year, cultivation and areas under blueberry plantations are increasing. Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) has gained popularity in the nutrition of the population of Ukraine due to its medicinal and prophylactic properties. Blueberry berries are processed for storage mainly by freezing, less often by drying. The latter is due to the long duration of the process, as low-temperature dehydration regimes are used and the presence of a wax coating on the skin of the berries. Wax prevents fresh blueberry berries from spoiling during storage. But it significantly hinders its processing. In addition, blueberries have a high moisture content of 81-87 %. Reducing humidity through dehydration reduces the activity of pathogenic microorganisms, increases safety and extends the shelf life of food products. At the same time, it leads to a change in taste qualities. In this direction, one of the key issues is an indicator that affects the structural properties of the product, the shelf life and depends on the nature and amount of components soluble in the aqueous phase of the product, as well as on the methods of processing raw materials, semi-finished products, etc. Accordingly, the value of the "water activity" indicator is decisive (a_w), the value of which depends not only on the forming indicator of the product, but also on the development of microorganisms. On the basis of previously conducted studies of the influence of the pretreatment method on the kinetics of blueberry drying, depending on the different regime parameters of the heat carrier, the indicator of water activity of dried berries was determined for the first time. It is substantiated that the content of such compounds as protein, fatty substances, sugars, flavonoids, anthocyanins, color compounds, etc., affects the indicator of water activity. For the first time, the effect of mode parameters of the convective and combined heat carrier (infrared radiation treatment with simultaneous convection) at different temperatures of the heat carrier was revealed, which showed a change in the values of the coefficient of the water activity indicator for dried blueberries. The coefficients of the water activity indicator were calculated and the significant influence of the drying process on the quality of the finished product was shown. The obtained values of the coefficient of the water activity indicator can be used to evaluate the storage quality of dried blueberry berries and their powder.

Key words: blueberry, drying, water activity, infrared radiation, convection.

Список використаної літератури

1. Migas P. , Cisowski W. , Dembińska-migas W. Isoprene derivatives from the leaves and callus cultures of *Vaccinium corymbosum* var. Bluecrop // *Acta Poloniae Pharmaceutica*. 2005., No. 1 Vol. 62. P. 45-51.
2. Стремоухов О. О. Фармакогностичне вивчення листя та плодів лохини для створення нових лікарських засобів : дис. на здобуття наук. ступеня доктор філософії : 22, 226 : захист 20.12.2021 / наук. кер. О.М. Кошовий. Харків: Національний фармацевтичний університет, 2021. 290 с.
3. Количев І. О., Краснікова Т. О., Кошовий О. М. Розробка параметрів стандартизації листя лохини високорослої // Матеріали Української науково-практичної конференції / Національний фармацевтичний університет. Харків: НФаУ, 2014. С. 110.
4. About metabolic syndrome // American Heart Association: [Website]. URL: <https://www.heart.org/en/health-topics/metabolic-syndrome/about-metabolicsyndrome> (viewed on: 12.02.2019).
5. Proanthocyanidin from Blueberry Leaves Suppresses Expression of Subgenomic Hepatitis C Virus RNA / M. Takeshita et al. *Journal of Biological Chemistry*. 2009. Vol. 284, no. 32. P. 21165-21176. URL:

- <https://doi.org/10.1074/jbc.m109.004945> (date of access: 19.05.2023).
6. Fennema O. Water and Ice : Food Chemistry / editor. by Owen Fennema. New York: Marcel Dekker, 1996. 1069 p.
 7. Levine H., Slade, L., Karel, M. Moisture Management in Food Systems / Center for Professional Advancement. – 1988.
 8. Scott W., Mrak E., Stewart G. Water relations of food spoilage microorganisms // *Advances in Food Research*. 1957., No. 1 Vol. 7. P. 83-127.
 9. Rodel W., Kress-Rogers E., Brimelow C. Water activity and its measurement in food // *Instrumentation and Sensors for the Food Industry: 2nd edition* Woodhead / editor. by Erika Kress-Rogers, Christopher J.B. Brimelow. Cambridge, 2001. P. 453-483.
 10. Leung H. L. Influence of water activity on chemical reactivity // *Water activity: theory and application to food*. New York: Marcel Dekker, 1987. P. 27-53.
 11. Hazelton J. L., Desrochers J. L., Walker C. E. BISCUITS, COOKIES, AND CRACKERS: Encyclopedia of food science and nutrition. Amsterdam, New York: Academic Press, 2003. 533-539 c. (Chemistry of Biscuit Making).
 12. Storage water activity affects flavor fade in high and normal oleic peanuts / Reed K. A. et al. // *Storage water activity affects flavor fade in high and normal oleic peanuts. Food Research International*. 2002, Vol. 35 (8). P. 769-774.
 13. Manohar R. S., Rao P. H. Effects of water on the rheological characteristics of biscuits dough and quality of biscuits // *European Food Research and Technology*. 1999. № 209. P. 281-285.
 14. Hayashi Y., Puzenko A., Feldman Y. Slow and fast dynamics in glycerol-water mixtures // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2006. № 209. P. 281-285. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2006.01.113
 15. Puzenko A., Hayashi Y., Feldman Y. Space and time scaling in glycerol–water mixtures // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2007. № 353. P. 4518-4522. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2006.12.122
 16. Dashnau J. L., Vanderkooi J. M. Computational Approaches to Investigate How Biological Macromolecules Can Be Protected in Extreme Conditions // *Journal of Food Science*. 2007., No. 72 Vol. 1. P. R1–R10. doi: 10.1111/j.1750-3841.2006.00242.x
 17. Nature of Hydrogen Bonding of Water Molecules in Aqueous Solutions of Glycerol by Attenuated Total Reflection (ATR) Infrared Spectroscopy / Y. Kataoka et al. *Applied Spectroscopy*. 2011. No. 4 Vol. 65. P. 436-441. URL: <https://doi.org/10.1366/10-06183>
 18. Design of biocompatible and biodegradable polymers based on intermediate water concept / M. Tanaka et al. *Polymer Journal*. 2014. No. 2 Vol. 47. P. 114-121. URL: <https://doi.org/10.1038/pj.2014.129>
 19. Towey J. J., Dougan L. Structural Examination of the Impact of Glycerol on Water Structure // *The Journal of Physical Chemistry B*. 2011. No. 5, Vol. 116. P. 1633-1641. URL: <https://doi.org/10.1021/jp2093862>
 20. Cervenka L., Brožková I., Vytřasová J. Effects of the principal ingredients of biscuits upon water activity // *Journal of Food and Nutrition Research*. 2006., No. 45 Vol. 1. P. 39-43.
 21. Prediction of water activity of osmotic solutions / Sereno A. M. et al. // *Journal of Food Engineering*. 2001. № 49. P. 103-114. URL: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00221-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00221-1)
 22. Schmidt S. J. Water and solids mobility in foods // *Advances in Food and Nutritional Research*. 2004. № 48. P. 1-101.
 23. Ляйстнер Л. Барьерные технологии: комбинированные методы обработки, обеспечивающие стабильность, безопасность и качество продуктов питания: перевод с англ / за ред. Л. Ляйстнер, Г. Гоулд. М: ВНИИ мясной промышленности им. В.М. Горбатова, 2006. 236 с.
 24. ISO 18787:2017 Food stuffs - Determination of water activity. Publication date: 2017-11. P. 9.
 25. Petrova, Z., Slobodianiuk, K., Grakov, O. (2023). Determining the influence of pre-preparation of blueberries (*vaccinium corymbosum* L.) on the total duration of drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023., No. 11 (122) Vol. 2, P. 83–90. URL: DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276097>
 26. Цуканов М. Ф., Черноморец А. Б. Технологические аспекты показателя «активность воды» и его роль в обеспечении качества продукции общественного питания // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2010., вып. 1 Т. 11. С. 58-63.
 27. Recent advances in application of modified starches for breadmaking. // Miyazaki M. R. et al. *Trends in Food Science & Technology*. 2006., V.17. P. 591-599.

Отримано в редакцію 22.05.2023
Прийнято до друку 26.09.2023

Received 22.05.2023
Approved 26.09.2023

ВПЛИВ ЕКСТРУЗІЙНОЇ ОБРОБКИ НА СТАН ЖИРІВ КОРМОВИХ СУМІШЕЙ

Іваницький Г.К. д.т.н., с.н.с.^{1,2}, Целень Б.Я. к.т.н., с.н.с.¹, Недбайло А.Є. к.т.н., н.с.,¹

Радченко Н.Л. к.т.н., с.н.с.¹

¹Інститут технічної теплофізики НАНУ, м. Київ

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація. В статті розглянуто питання підвищення якості та терміну зберігання кормів за рахунок заміни в їх складі комбінації рослинних і тваринних жирів на повножирову сою шляхом її обробки методом екструзії. Обробка цим методом дозволяє досягти руйнування ферментів, які спричиняють окислення жирів та одночасно пригнітити розвиток шкідливої мікрофлори в екструдаті, що у підсумку впливає на термін зберігання корму. На основі аналізу матеріалів існуючих досліджень запропоновано два способи підвищення ефективності екструзійного методу обробки за рахунок раціонального використання теплоти, яка виділяється з частинками екструдату на виході з екструдера. У першому способі – для змішування і знезараження інших рідких компонентів при отриманні багатокомпонентних пастоподібних сумішей, у другому – для напilenня порошкових компонентів на частинки екструдату, які набувають адгезійних властивостей внаслідок руйнування клітин та виділення жирів при отриманні багатокомпонентних гранульованих сумішей. Дослідження проведені на створеному експериментальному стенді з відповідними вузлами змішування змонтованими на виході з екструдера і напрацьовано пробні партії сумішей. На першому етапі дослідження експериментально підтверджено ефективність екструзії та вибраних режимів для обробки повножирової сої шляхом оцінки рівня інактивації уреаз, на другому – експериментально здійснено оцінку ефективності пропонованих способів використання теплоти шляхом визначення якості жирів та мікробіологічних показників сумішей. Зокрема, результати показали помірне зростання кислотного та пероксидного числа і незначне зростання мікробіологічних показників протягом 3 місяців, а також відсутність ентеропатогенних штампів кишкової палички, токсин утворюючих анаеробів та сальмонел в усіх досліджуваних зразках. На основі одержаних результатів обґрунтовано можливість використання запропонованих способів у технологіях виробництва кормів.

Ключові слова: екструдер, повножировая соя, пероксидне число, кислотне число, мікробіологічний показник.

Вступ. Організація повноцінної годівлі сільськогосподарських тварин неможлива без системного контролю якості кормової бази незалежно від країни-виробника корму. До основних показників, при оцінці якості кормів, відносять збалансований склад білків, жирів, вітамінів та мінеральних речовин, а також його високу та швидку засвоюваність без втрати енергії на перетравлення. Не менш важливим параметром під час оцінки якості корму є тривалість його зберігання. Даний параметр визначається не лише мікробіологічним показником, а й найменшими змінами зовнішнього вигляду, запаху, кольору, смаку корму в процесі його зберігання. Як правило, при зберіганні якості білка, клітковини та золи залишаються незмінними. Часто причиною зміни органолептичних показників стає окислення жирів в процесі їх зберігання, яке призводить до зниження загальної ліпідної поживності корму. Фактори, які можуть прискорювати початок процесу окислення жирів пов'язані з якістю та походженням сировини, способом обробки та умовами зберігання. Найменші порушення балансу вмісту жирів у кормах спричиняють порушення процесів обміну у тварин. Тривале споживання таких кормів викликає морфологічні та функціональні зміни, які в подальшому призводять до зниження рівня імунітету та продуктивності тварин в цілому [1]. У зв'язку з цим, одним із важливих напрямків під час пошуку і вибору складових компонентів кормових сумішей є забезпечення оптимального балансу рослинних і тваринних жирів та вибір оптимального способу їх обробки так як він має одночасно забезпечувати збереження цілісності жирового комплексу та його стабільність при зберіганні.

Аналіз останніх досліджень. На сьогоднішній день діюча в Україні нормативна база, яка використовується при розробці нових рецептур кормів не нормує вміст сирого жиру [2]. Однак, під час відгодівлі тварин кормами з ненормованим вмістом або низькою якістю жирів виникає ряд проблем, які ведуть до зниження загальної продуктивності тварин. Для підвищення енергетичної цінності корму виробники використовують різноманітні комбінації жирів рослинного та тваринного походження. Проте, з позиції організації технологічного процесу виникає ряд труднощів пов'язаних з природою походження цих жирів, їх консистенцією і властивостями та, як наслідок, виникненням проблеми при виборі способу введення їх до складу кормової суміші. У підсумку ці фактори впливають не лише на загальну вартість корму, його енергетичну цінність, консистенцію, а і на термін зберігання.

Одним зі шляхів вирішення даної проблеми стала заміна в рецептурах різноманітних комбінацій тваринних і рослинних жирів на повножирову сою. Це стало можливим завдяки її високій кормовій цінності, зокрема, вмісту білка (до 42%), який наближений до тваринного та цінному складу жирів (до 32%). Жир сої на 94...95 % складається з нерозчинних гліцеридів жирних кислот. Засвоєння соєвого жиру може досягати 98%, що дозволяє вважати його одним з кращих кормових жирів [3]. Окремо до переваг сої відносять її багатий склад вітамінів, мінеральних речовин та різноманітних біологічно активних сполук. Однак через наявність у ній шкідливих ферментів існує необхідність у обов'язковій попередній тепловій обробці.

До недавнього часу в складі кормів використовували лише соєвий шрот, який є побічним продуктом процесу екстракції рослинної олії з бобів сої [4, 5]. Проте, соєвий шрот при досить високому вмісті білка має досить низький рівень обмінної енергії (220...240 ккал), що потребувало повторного його збагачення жирами. Тому використання саме повножирової сої в складі кормів стало дуже затребуваним [6, 7, 8]. Однак, спірним залишається питання вибору способу її термічної обробки.

Аналіз наявної теоретичної та експериментальної бази [9-14] свідчить, що переважна більшість авторів схиляється до пріоритетності використання саме екструзійного способу з поміж існуючих традиційних технологій обробки сої. Пояснюється це його високою ефективністю, простотою та універсальністю.

Рекомендації щодо режимів ведення процесу екструзійної обробки варіюються через різновидність видів отримуваних кормів (рідкі, пастоподібні, гранульовані, ЗНМ і т.д.) та їх вікового призначення. Розрізняють кілька режимів ведення процесу: суху екструзію і вологу.

В режимі "сухої" або ж "жорсткої" екструзії при невеликому вмісті вологи в сировині відбувається інтенсивне "сухе" ущільнення та подрібнення сировини, яке веде до стрімкого підвищення тиску і температури в каналі. В результаті дії цих факторів крохмаль, що знаходиться в сировині частково гідролізується, складні білкові сполуки розпадаються на менші, починається деструкція та гідроліз жирів. На виході з екструдера відбуваються значні втрати вологи, які супроводжуються утворенням пористої структури екструдату і вивільненням значної кількості теплоти. У випадку збільшення відносно оптимальних значень тривалості теплової обробки або температури відбувається зниження перетравності білка внаслідок формування важкорозчинних сполук.

В режимі "вологої" або "м'якої" екструзії сировина попередньо додатково зволожується. Наявність достатньої кількості вологи під час обробки в екструдері створює більш "м'які" режими при яких зростання тиску, температур і зсувних напружень більш помірне. При цьому в сировині відбувається ряд поступових глибоких фізико-хімічних та структурних перетворень. Зокрема, на першому етапі руйнується клітинна структура, змінюється крохмальний і целюлозно-лігніновий склад сировини. На другому етапі відбувається перехід з сипучого у в'язкий гелеподібний стан, який супроводжується поступовими структурними змінами білків і клітковини [9]. На етапі екструзії внаслідок швидкого переходу з зони високого тиску в зону атмосферного, миттєво вивільняється значна кількість накопиченої енергії, що дорівнює швидкості вибухового розриву міжклітинних перегородок. Також при руйнуванні міжклітинних перегородок відбувається виділення значної кількості жиру і метаболічна енергія сої підвищується до 4282 ккал/кг, порівняно з 3230 ккал/кг у "сирої" сої [14].

В процесі екструдуювання тепло, яке виникає при терті руйнує також і антипоживні фактори, передусім інгібітор трипсину хімотрипсину, уреазу, лектинів і ліпази, а також знешкоджується шкідлива мікрофлора. Головним ефектом від використання екструзійної обробки є підвищення засвоюваності екструдату, покращення його смакових якостей, можливість знешкодження шкідливої мікрофлори і токсинів, а також продовження, за рахунок цього, терміну зберігання [9].

Для підвищення ефективності роботи екструдерів та якості отримуваних продуктів використовуються одно- та дво- шнекові екструдери з додатковим введенням зон впорскування пари, а також різноманітних змішувальних елементів для поліпшення якості подрібнення та перемішування сировини тощо. Однак, такі заходи суттєво підвищують вартість виробництва.

Тому на основі проведеного аналізу літератури авторами запропоновано кілька можливих шляхів підвищення ефективності процесу екструзійної обробки. Перший передбачає використання теплоти екструзії, яка вивільняється з екструдатом на виході з екструдера для змішування з рідкими компонентами та наступного знезараження всієї пастоподібної суміші.

Другий можливий шлях використання теплоти екструзії полягає у інтенсифікації процесу наплення порошкових компонентів на гарячі частинки екструдату за рахунок набуття ним легких властивостей внаслідок руйнування клітинної структури і виділення жирів.

Використання таким чином теплоти екструзії при отриманні пастоподібних сумішей дозволить досягти їх знезараження, а у випадку отримання сумішей гранульованих на основі екструдованої сої дозволить інтенсифікувати процес наплення.

Формулювання мети та постановка завдання. *Об'єкт досліджень* – пастоподібна суміш на основі екструдованої сої та суміш гранульована на основі екструдованої сої.

Мета і завдання:

- вивчення механізму впливу теплоти, яка вивільняється з екструдатом на виході з екструдера та використовується для змішування компонентів пастоподібної суміші на якість жирового складу та мікробіологі-

чні показники при зберіганні;

- вивчення механізму впливу теплоти, яка вивільняється з екструдатом на виході з екструдера та використовується для напilenня на якість жирового складу та мікробіологічні показники гранульованої суміші при зберіганні.

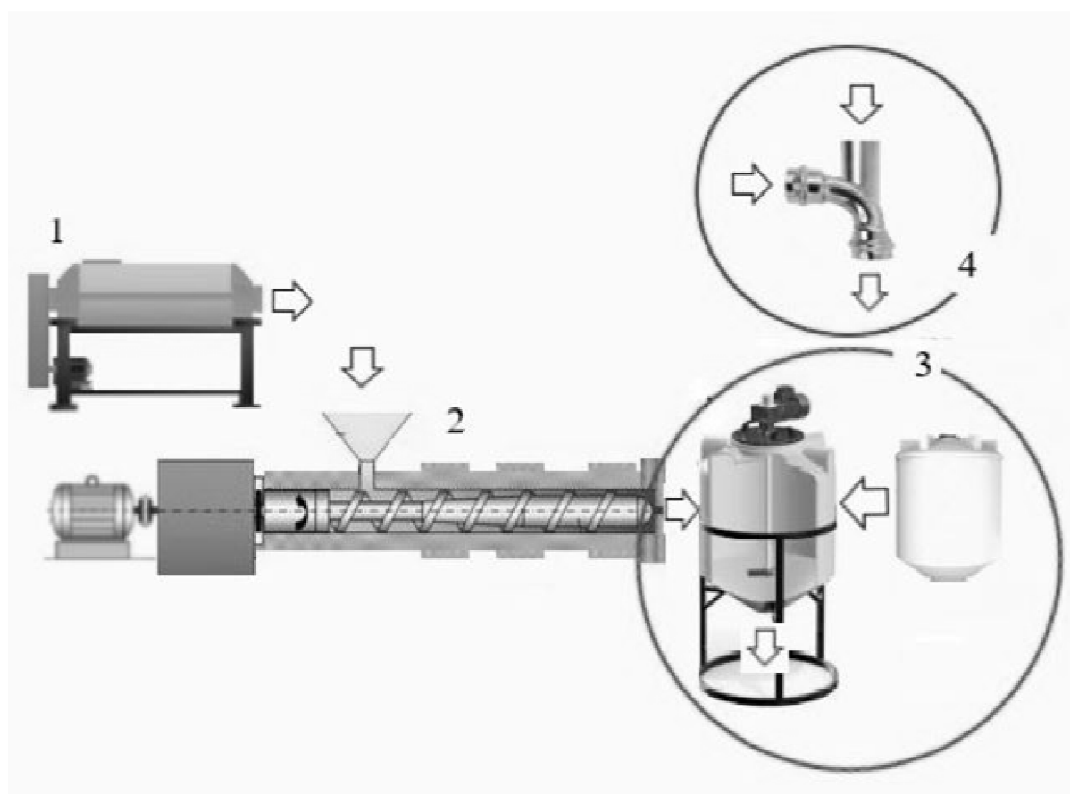
Проведення експериментальних досліджень. Для досліджень обрано боби сої сорту “Устя”, які піддавали обробці в екструдері. В результаті обробки напрацьовано дослідні партії продукту з яких відібрано зразки:

- повножировий соєвий екструдат (контрольний зразок);
- суміш гранул, яка отримана на основі повножирової екстудованої сої з напilenням на її поверхню порошкового вітамінно-мінерального комплексу в кількості 5 % (рис. 1, вузол змішування 3);
- пастоподібна суміш з концентрацією сухих речовин 50 % на основі екстудованої повножирової сої, молочної сироватки (4 % сухих речовин), рідкого фосфатидного концентрату, вітамінно-мінерального комплексу в кількості 5 % (рис. 1, вузол змішування 4).

Дослідження проводили на експериментальному стенді основу якого складав екструдер (рис. 1).

Обробку бобів сої проводили в режимі “м’якої” екструзії, якому відповідає вологовміст сої 13...14 %, температура екстудованої сої на виході з екструдера – 135...140 °С.

Згідно методики проведення експериментів заздалегідь зволожені (за 24 години) у зволожувачі 1 боби сої рівномірно надходили для обробки в екструдер 2, де піддавались за рахунок обертання шнека послідовному стисненню, подрібненню, рівномірному перемішуванню та під дією зростаючих температур та тиску, які створюються за рахунок сил тертя та зсувних напружень, високотемпературній обробці. На виході з екструдера за схемою для першої серії експериментів змішування гарячого екстудату відбувалось відразу на виході з екструдера (вузол 3), а для другої серії експериментів гарячі частинки екстудату подавались на змішування у вузол 4.



1 – зволожувач зерна; 2 – екструдер з електродигуном для обробки зерна;
3 – вузол для напilenня на екструдат порошкових компонентів протитечією;
4 – вузол для змішування екстудату з рідкими компонентами

Рис. 1 – Схема експериментального стенда

Перша серія експериментів передбачала отримання суміші гранул на основі екстудованої сої за допомогою вузла змішування 3. Реалізовували процес шляхом розпилювання порошкового компоненту на гарячу поверхню частинок екстудату, які рухались у вигляді факела з екструдера назустріч (протитечією).

При виділенні теплоти разом з екструдатом останній набуває адгезійних властивостей через розплавлений жир, який виділився внаслідок руйнування клітинної структури сировини. Це повинно інтенсифікувати

налипання порошкових компонентів на поверхню частинок екструдату. Процес напilenня здійснювали в спеціально сконструйованій камері оснащений в нижній частині (конус) додатково мішалкою для запобігання злипанню гранул при їх вивантаженні (вузол 3).

Друга серія експериментів передбачала отримання пастоподібної суміші за допомогою вузла змішування 4. Пастоподібну суміш на основі екструдованої сої і підготовленої суміші рідких компонентів отримували шляхом миттєвого змішування частинок гарячого екструдату, які рухались у вигляді факела з екструдера з рідкими компонентами суміші, які надходили з патрубку розташованого вертикально (вузол 4). При цьому, теплота яка вивільнялась разом з екструдатом повинна забезпечити руйнування шкідливої мікрофлори досягаючи знезараження всієї пастоподібної суміші.

Ефективність запропонованих способів використання теплоти контролювали за допомогою кислотного та пероксидного числа, які відповідають за якість жиру в процесі його зберігання, а також за мікробіологічними показниками.

Оцінку якості жирів проводили за ДСТУ 8048:2015 «Комбікорми. Комбікормова сировина. Метод визначення кислотного числа жиру» та за ДСТУ 4570:2006 «Жири рослинні та олії. Метод визначення пероксидного числа» і за методичними рекомендаціями [15]. Методика оцінки мікробіологічних показників проводилась за ДСТУ EN 12824:2004 «Мікробіологія харчових продуктів і кормів для тварин». Контрольні вимірювання здійснювались в день приготування сумішей і впродовж 90 діб зберігання. Зразки екструдату та суміші гранул на основі екструдованої сої зберігали при кімнатній температурі в темному місці, а пастоподібної – в герметичній упаковці при +4 °C.

Оцінку якості обробки сої в екструдері проводили шляхом визначення ферменту уреазу в зразках отриманого соєвого екструдату, а також в зразках пастоподібної суміші і екструдованої суміші гранул. Для визначення вмісту антиліментарних речовин в обробленій сої використовували непрямий показник – активність ферменту уреазу. Доцільність застосування цього підходу базувалась на експериментально доведеному факті, що при активності уреазу 0,1...0,3 од. рН антипоживні речовини бобів сої інактивуються до безпечного рівня [9]. Активність уреазу визначалась відповідно до ДСТУ 8365:2015 «Жмихи і шпроти. Метод визначення активності уреазу».

Аналіз результатів. Проведено оцінку якості обробки сої в екструдері, яку контролювали шляхом визначення уреазної активності в зразках соєвого екструдату, суміші гранульованої на основі екструдованої сої та пастоподібної суміші (табл.1). Отримані дані свідчать, про те що для всіх дослідних зразків уреазна активність знаходиться в межах норми (до 0,3 од. рН). Тобто параметри попереднього зволоження бобів сої, час екструзійної обробки, температура та кількість вологи в каналі екструдера забезпечують достатню якість обробки соєвих бобів.

Таблиця 1

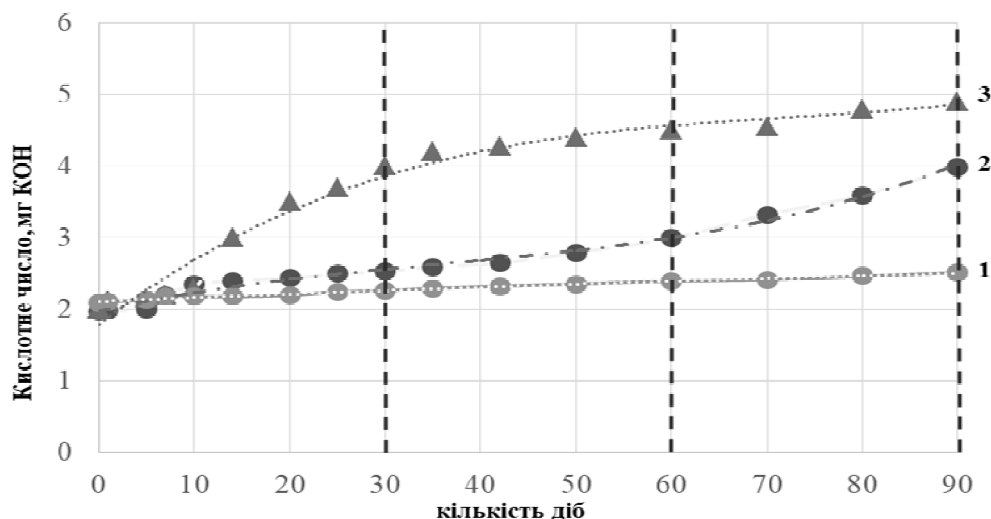
Рівень активності уреазу в контрольних зразках екструдованої сої та сумішей на її основі

Продукт	Активність уреазу, Δ рН
Соєвий екструдат (без домішок)	0,05
Суміш гранульована на основі екструдованої сої	0,05
Пастоподібна суміш на основі екструдованої сої	0,16

Наступний етап передбачав оцінку ефективності двох запропонованих способів використання теплоти екструзії на якість жирового складу отримуваних сумішей при їх зберіганні та за мікробіологічним показником. Дослідження проводили за величинами пероксидного та кислотного чисел, які визначають ступінь свіжості жирів та їхню придатність до використання протягом всього терміну їх зберігання. Зокрема, кислотне число вказує на ступінь розщеплення жиру характеризуючи вміст у ньому вільних жирних кислот та інших титрованих лугом речовин. Під час зберігання і нагрівання жиру кількість вільних жирних кислот може суттєво зростати. Подальше їх окислення викликає порушення смаку і запаху, а більш глибокі процеси призводять до непридатності використання такого жиру взагалі.

Результати першої серії експериментів для суміші гранульованої на основі екструдованої сої показали найбільше зростання кислотного числа у порівнянні з іншими зразками (рис.2, крива 3) з 2,00 мг КОН у день приготування сумішей і до 4,9 мг КОН через 90 днів.

Результати другої серії експериментів для пастоподібної суміші на основі екструдованої сої показали більш помірне зростання кислотного числа, яке в перший день після приготування становило 1,99 мг КОН через 30 діб зросло до 2,53 мг КОН та досягнуло 3,99 мг КОН через 90 діб (рис. 2, крива 2). Для контролю досліджено також зміну в часі кислотного числа зразків соєвого екструдату (крива 1). Результати показали найменше зростання – з 2,11 мг КОН до 2,52 мг КОН.

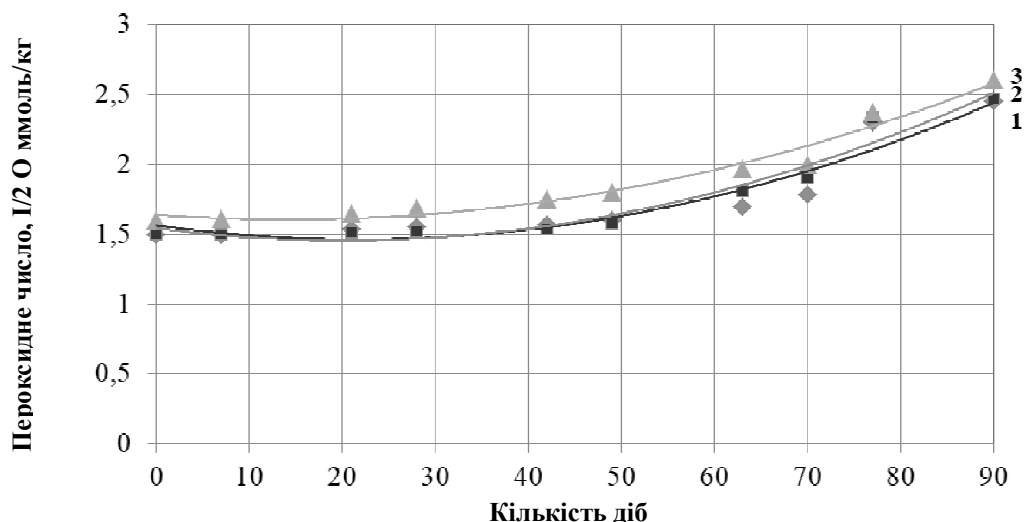


1 – екструдована соя; 2 – пастоподібна суміш на основі екструдованої сої;
3 – суміш гранульована на основі екструдованої сої.

Рис. 2 – Зміна кислотного числа досліджуваних зразків в процесі зберігання, мг КОН

Пероксидне число характеризує перебіг процесу окислення жирів під впливом кисню повітря. При цьому відбувається накопичення різних продуктів розпаду котрі в подальшому можуть погіршувати їхні органолептичні властивості. Окислення жирів киснем може призвести до зниження загальної якості, а тому дуже важливим є вивчення динаміки його в процесі зберігання.

Результати досліджень пероксидного числа в зразках суміші гранульованої на основі екструдованої сої показали поступове помірне зростання з 1,50 1/2О ммоль/кг в день приготування суміші до 2,47 1/2О ммоль/кг через 90 діб (рис.3, крива 1). Дослідження зміни пероксидного числа в зразках пастоподібної суміші показало зростання з 1,59 1/2О ммоль/кг до 2,60 1/2О ммоль/кг через 90 діб (крива 3), а контрольний зразок екструдату за цей же час змінився з 1,50 1/2О ммоль/кг до 2,45 1/2О ммоль/кг часу (крива 2).



1 – суміш гранульована на основі екструдованої сої; 2 – екструдована соя; 3 – пастоподібна суміш на основі екструдованої сої

Рис. 3 – Зміна пероксидного числа досліджуваних зразків в процесі зберігання

Підсумкові результати досліджень показали, що використання теплоти на виході з екструдера для отримання сумішей дозволяє зберегти цінні властивості жирового комплексу і забезпечити їх досить стабільними протягом трьох місяців зберігання.

Наступний етап передбачав дослідження механізму впливу теплоти, яка вивільняється з екструдатом на виході з екструдера на ступінь знешкодження шкідливої мікрофлори в дослідних зразках сумішей. Даний параметр є одним з основних факторів, який впливає на термін зберігання продукту. Результати досліджень зразків пасти показали незначне зростання мікробіологічного показника з 6 КУО (через добу), 16 КУО (че-

рез 1 місяць), 22 КУО (через 2 місяці) і до 24 КУО (через 3 місяці зберігання). Отже теплота, яка вивільняється з екструдату на виході з екструдера дозволяє знешкоджувати шкідливу мікрофлору при миттєвому змішуванні гарячого екструдату з іншими рідкими компонентами та забезпечує пастеризацію всієї суміші. Дослідження кількісного та якісного складу мікрофлори свідчить про відсутність ентеропатогенних штамів кишкової палички, токсин утворюючих анаеробів та сальмонел в усіх досліджуваних зразках. Результати досліджень мікробіологічних показників суміші гранул на основі екструдованої сої та контрольних зразків екструдованої сої також показали незначне зростання кількості мікроорганізмів – до 10 КУО протягом 3 місяців зберігання та відсутність ентеропатогенних штамів кишкової палички, токсин утворюючих анаеробів та сальмонел. Отже, отримані дані свідчать про ефективність застосування запропонованого способу і теплота, яка використовується для напilenня порошкових компонентів дозволяє пригнітити розвиток шкідливої мікрофлори та забезпечити тривале зберігання суміші до 90 діб.

Висновки. На основі результатів досліджень механізму впливу теплоти, що вивільняється з екструдатом на виході з екструдера на якість жирів та мікробіологічні показники сумішей авторами запропоновано два можливі шляхи підвищення ефективності процесу екструзійної обробки.

1. Використання теплоти, яка вивільняється з екструдатом на виході з екструдера для знезараження компонентів пастоподібної суміші при їх миттєвому змішуванні. Ефективність застосування підтверджується мікробіологічним показником, який показав незначне зростання з 6 КУО до 24 КУО (через 3 місяці), що свідчить про досягнення необхідного ступеня пастеризації пастоподібної суміші, а також даними зростання кислотного числа – з 1,99 мг КОН до 3,99 мг КОН через 90 діб та перексидного – з 1,59 1/2О ммоль/кг до 2,60 1/2О ммоль/кг через 90 діб.

2. Використання теплоти екструзії для інтенсифікації процесу напilenня порошкових компонентів на гарячі частинки екструдату за рахунок набутих ним адгезійних властивостей внаслідок руйнування клітинної структури і виділення жирів. Ефективність застосування підтверджується мікробіологічним показником – до 10 КУО протягом 3 місяців зберігання та динамікою кислотного числа з 2,00 мг КОН до 4,9 мг КОН через 90 діб та перексидного числа – з 1,50 1/2О ммоль/кг до 2,47 1/2О ммоль/кг через 90 діб.

Оцінка якості обробки в екструдері показала зниження активності уреаз до норми для всіх дослідних зразків сумішей (0,05 од. рН), а також для контрольного зразка екструдованої сої (0,16 од. рН).

Запропоновані авторами шляхи підвищення ефективності процесу екструзійної обробки показали свою ефективність та у перспективі можуть бути використані в технологіях виробництва кормових сумішей.

References

1. Za materialamy HK «Yedinstvo» (2015). Korysni pozhyvni rehovyny v skladi kombikormiv [Useful nutrients in compound feed]. *Tvarynnystvo s'ohodni*, 4, 2-4 https://ait-magazine.com.ua/sites/default/files/edinstvo_2.pdf (in Ukrainian).
2. Chornolata L. (2018). Kroky kontroliu kormiv. Yak zabezpechyty yakisnu hodivliu tvaryn [Feed control steps. How to ensure quality animal feed]. *Ahrobiznes sohodni*, 5 (9), 50-52 <http://agro-business.com.ua/tvarynnystvo-ta-veterynariya/item/10319-kroky-kontroliu-kormiv-yak-zabezpechyty-yakisnu-hodivliu-tvaryn.html> (in Ukrainian).
3. Petrychenko V. F. (2012). Naukovi osnovy vyrobnytstva ta vykorystannia soi u tvarynnystvi [Scientific bases of soybean production and use in animal husbandry]. *Mizhvidomchyi tematychnyi naukovyi zbirnyk Kormy i kormovyrobnytstvo*, 71, 3-12 (in Ukrainian).
4. Soy Food Products Market: Trends and Global Forecasts 2012-2017 [Electronniy resurs]. – Retrieved from <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/soybean-food-products-market-706.html>
5. Makarynska A.V., Vorona N.V. (2019). Obhruntuvannya vyboru syrovyny dlia vyrobnytstva bilkovoi kormovoi dobavky [Rationale of raw materials choice for production of protein feed additive]. *Scientific Works*, 83(2), 26-32. Retrieved from: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1522> (in Ukrainian).
6. Verbych I., Bratkovska H. (2020). Vykorystannia u hodivli molodniaka synei kombikormu z riznymi sposobamy pererobky soi iz soniashnykovoiu makukhoiu [Use in feeding young pigs feed with different methods of processing soybeans with sunflower cake]. *Kormy i kormovyrobnytstvo*, 89, 205-215 (in Ukrainian).
7. Ruzhytska V. (2014). Tostovana ekspodovana povnozhyrova soia – tsinni komponent kombikormiv dlia ptytsi [Toasted expanded full-fat soybeans are a valuable component of compound feed for poultry]. *Suchasne ptakhivnytstvo*, 12, 13-14 (in Ukrainian).
8. Radzykhovskiy A. (2015). Zdorova alternatyva soievomu shrotu [Healthy alternative to soybean meal]. *The Ukrainian Farmer*, 3, URL: <https://agrotimes.ua/article/zdorova-alternativa-soievomu-shrotu/> (in Ukrainian).
9. Vanshyn V. V. (2021). Ekstruzionnaia obrabotka rastytelnogo Syria [Extrusion processing plant raw]. Orenburh, OHU, 108 (in Russian).
10. Lenkova T.N., Ehorova T.A., Kashporov L.M., Sysoeva Y.H. (2020). Korm yz ekstrudirovannoi soy v ratsyonakh broileriv. [Extruded soybean feed rations of broilers]. *Ptytsevodstvo*, 11, 22-26 DOI 10.33845/0033-3239-2020-69-11-22-26 (in Russian).
11. Puhachev P. (2020). Farmet: sposob povysheniya efektyvnosti y enerhosberezheniya pry pererabotke soy [Increase method efficiency and energy saving when processing soy]. *Kombykorma*, 4, 16-21 (in Russian).

12. Radchenko N. L., Ivanitsky G. K., Tselen B.Ya., Nedbailo A. Ye. (2023). The main provisions of the model of extrusion processing of plant mass in the areas before entering the extruder matrix and in the extruder matrix. *"The current stage of development of scientific and technological progress '2023"*, 25, 16-22 DOI: 10.30888/2709-1783.2023-25-01-013 (in English).
13. Radchenko N. L., Ivanitsky G. K., Tselen B.Ya., Nedbailo A. Ye. (2023). Difficulties in modeling processes in the zones before entering the extruder matrix and in the extruder matrix and their solution by creating a universal mathematical model. *Modern engineering and innovative technologies*, 25-01, 36-41 DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2023-25-01-013> (in English).
14. V. Sichkar (2008). Vykorystannia ekstrudovanoi ta povnozhyrovoi soi v hodivli silskohospodarskykh tvaryn i ptytsi [The use of extruded and full-fat soybeans in feeding farm animals and poultry]. *Propozitsiia* [Electronniy resurs]. – Retrieved from <https://propozitsiya.com/ru/vikoristannya-ekstrudovanoi-ta-povnozhirovoyi-soyi-v-godivli-silskogospodarskikh-tvarin-i-ptici>
15. Shemanska Ye.I., Radziievska I. H., Babenko V. I., Hromova O. M. (2012). Metodychni rekomendatsii do vykonannya laboratornykh robot z rozdilu "Tekhnolohiia zhyriv i zhyrozaminnykiv" dlia stud. napriamu 6.051701 "Kharchovi tekhnolohii ta inzheneriia" usikh form navchannia K, NUKhT, 43, URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/1194> (in Ukrainian).

THE EFFECT OF EXTRUSION TREATMENT ON THE STATE OF FATS IN FEED MIXTURES

Ivanitsky G.K. D.Sc.,^{1,2} Tselen B.Ya Ph.D.¹, Nedbailo A.Ye. Ph.D.¹, Radchenko N.L. Ph.D.¹

¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv

² National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Abstract. The article discusses the issue of improving the quality and storage period of feed by replacing the combination of vegetable and animal fats with full-fat soybeans by processing it by the extrusion method. Processing by this method allows achieving the destruction of enzymes that cause the oxidation of fats and at the same time to suppress the development of harmful microflora in the extrudate, which ultimately affects the storage period of the feed. On the basis of the analysis of existing research materials, two methods of increasing the efficiency of the extrusion method of processing due to the rational use of heat, which is released with the extrudate particles at the exit from the extruder, are proposed. In the first method - for mixing and disinfection of other liquid components when obtaining multi-component paste-like mixtures, in the second - for spraying powder components on extrudate particles, which acquire adhesive properties due to the destruction of cells and the release of fats when obtaining multi-component granular mixtures. The research was carried out on the created experimental stand with the appropriate mixing units mounted at the exit from the extruder, and trial batches of mixtures were developed. At the first stage of the study, the effectiveness of extrusion and selected modes for processing full-fat soybeans by assessing the level of urease inactivation was experimentally confirmed, at the second stage, the effectiveness of the proposed methods of heat use was experimentally evaluated by determining the quality of fats and microbiological parameters of mixtures. In particular, the results showed a moderate increase in the acid and peroxide number and a slight increase in microbiological indicators during 3 months, as well as the absence of enteropathogenic strains of *E. coli*, toxin-producing anaerobes and salmonella in all studied samples. On the basis of the obtained results, the possibility of using the proposed methods in feed production technologies is substantiated.

Keywords: extruder, full-fat soy, peroxide number, acid number, microbiological index

Список використаної літератури

1. За матеріалами ГК «Єдинство». Корисні поживні речовини в складі комбікормів. *Тваринництво сьогодні*. 2015. №4. С.2-4. URL: https://ait-magazine.com.ua/sites/default/files/edinstvo_2.pdf (дата звернення 20.04.2023).
2. Чернолата Л. Кроки контролю кормів. Як забезпечити якісну годівлю тварин. *Агробізнес сьогодні*. 2018. №5(9). С.50-52. URL: <http://agro-business.com.ua/tvarynnytstvo-ta-veterynariya/item/10319-kroky-kontroliu-kormiv-yak-zabezpechyty-iakisnu-hodivliu-tvaryn.html> (дата звернення 23.05.2023).
3. Петриченко В.Ф. Наукові основи виробництва та використання сої у тваринництві. *Міжвідомчий тематичний науковий збірник Корми і кормовиробництво*. 2012. №71. С. 3-12.
4. Soy Food Products Market: Trends and Global Forecasts 2012-2017 [Electronniy resurs]. URL: <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/soybean-food-products-market-706.html> (дата звернення 06.04.2023).
5. Макаринська А.В., Ворона Н.В. Обґрунтування вибору сировини для виробництва білкової кормової добавки. *Наукові праці*. 2019. №83(2). С. 26-32. URL: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1522> (дата звернення 08.02.2023).

6. Вербич І.В., Братковська Г.В. Використання у годівлі молодняка свиней комбікорму з різними способами переробки сої із соняшниковою макухою. *Корми і кормовиробництво*. 2020. №89. С. 205-215
7. Ружицька В. Тостована експондована повножирова соя. *Сучасне птахівництво*. 2014. №12. С.13-14
8. Радзиховский А. Здоровая альтернатива соевому шроту. *Український фермер*. 2015. №3. URL: <https://agrotimes.ua/article/zdorova-alternativa-soevomu-shrotu/> (дата звернення 08.04.2023).
9. Ваншин В. В. Экструзионная обработка растительного сырья. Оренбург: ОГУ, 2021. 108 с.
10. Ленкова Т.Н., Егорова Т.А., Кашпоров Л. М., Сысоева И.Н. Корм из экструдированной сои в рационах бройлеров. *Птицеводство*. 2020. №11. С. 22-26.
11. Пугачев П. Способ повышения эффективности и энергосбережения при переработке сои. *Комбикорма*. 2020. №4. С. 16-21.
12. Radchenko N. L., Ivanitsky G. K., Tselen B.Ya., Nedbailo A. Ye. The main provisions of the model of extrusion processing of plant mass in the areas before entering the extruder matrix and in the extruder matrix. *"The current stage of development of scientific and technological progress '2023"*. 2023. 25. P.16-22 DOI: 10.30888/2709-1783.2023-25-01-013
13. Radchenko N. L., Ivanitsky G. K., Tselen B.Ya., Nedbailo A. Ye. Difficulties in modeling processes in the zones before entering the extruder matrix and in the extruder matrix and their solution by creating a universal mathematical model. *Modern engineering and innovative technologies*. 2023. №25-01. P. 36-41
14. DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2023-25-01-013>
15. Січкач В. Використання екструдованої та повножирової сої в годівлі сільськогосподарських тварин і птиці. *Пропозиція*. 2008. URL: <https://propozitsiya.com/ru/vikoristannya-ekstrudovanoji-ta-povnozhirovoyoji-soji-v-godivli-silskogospodarskih-tvarin-i-ptici> (дата звернення 04.05.2023).
16. Шеманська Є.І., Радзівська І. Г., Бабенко В. І., Громова О. М. (2012). Метод. рекомен. лаборатор. робіт з розд. "Технологія жирів і жирозамінників" для студ. напряму 6.051701 "Харчові технології та інженерія" усіх форм навчання. К.: НУХТ, 2011. – 43 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/1194> (дата звернення 12.02.2023).

Отримано в редакцію 24.05.2023

Прийнято до друку 26.09.2023

Received 24.05.2023

Approved 26.09.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НАСИЧЕННЯ ЦУКРОЗОЮ ЧАСТИНОК КОРЕНЯ МОРКВИ

Гузьова І.О., к.т.н., доцент, Атаманюк В.М., д.т.н., професор
НУ «Львівська політехніка», м. Львів

Анотація. Дифузійні процеси в харчовій промисловості відбуваються під час виробництва таких корисних продуктів, як цукати та відіграють ключову роль в таких виробництвах. Актуальним питанням є встановлення механізму дифузійних процесів та скорочення часу насичення.

В статті досліджуються дифузійні процеси насичення цукрозою частинок кореня моркви. Проаналізовано фотографії клітин сирої та бланшованої моркви. Визначено середній діаметр пор між клітинами моркви, загальну довжину каналів між клітинами та середню площу поперечного перерізу клітини моркви, а також розраховано середню площу пор між клітинами. Отримані числові значення дають змогу порівняти пористість поверхні масообміну для бланшованої моркви.

Проаналізована зміна концентрації частинок кореня моркви в часі в процесі насичення його цукрозою. Доведено, що температура водного розчину цукрози значно впливає на час насичення цукром кореня моркви. Зростання температури від 50°C до 90°C зменшує час насичення більше, ніж в 2 рази.

На основі результатів експерименту, розраховано коефіцієнти ефективної дифузії крізь зовнішню поверхню частинки та коефіцієнти ефективної дифузії в середині частинки кореня моркви. На основі залежності коефіцієнтів дифузії від температури та рівняння Ареніуса, розраховано енергію активації процесу, яка приймає значення $E_a = 19,159$ кДж/моль та не залежить від температури, від внутрішньої структури бланшованої частинки кореня моркви, а визначає енергію, необхідну для початку масообмінного процесу насичення цукрозою частинки моркви.

Обґрунтовано механізм дифузійного перенесення цукрози з розчину великого об'єму у тверду частинку моркви. Наведено аналітичний розв'язок рівнянь для визначення зміни концентрації цукрози в частинках моркви в часі, адекватність яких перевірено експериментально. Виведена аналітична залежність дозволяє розрахувати зміну концентрації цукрози в часі в частинці бланшованого кореня моркви циліндричної форми діаметром $d=12$ мм та висотою $h=4$ мм в межах температур 50 – 90°C.

Ключові слова: частинка кореня моркви, ефективний коефіцієнт дифузії, енергія активації

Формулювання проблеми. Дослідження дифузійних процесів в рослинній сировині є надзвичайно актуальним з точки зору виготовлення якісної продукції та енергозбереження самого процесу. Дифузійні процеси в харчовій промисловості відбуваються під час виробництва варення, джемів, цукатів, різного роду консервацій та відіграють ключову роль в таких виробництвах. Актуальним питанням є оптимізація таких процесів, скорочення часу насичення. Швидкість дифузії та ефективні коефіцієнти дифузії, як відомо, значно залежать від концентрації розчинів, температури, внутрішньої структури та форми частинок рослинної сировини. Експериментальні та теоретичні дослідження цих факторів, виведення аналітичних залежностей, дадуть змогу оптимізувати процеси та спроектувати в подальшому енергоощадне обладнання для здійснення процесів насичення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження дифузійних процесів в рослинній сировині розглядається в ряді робіт, а саме: при різних температурних режимах, досліджуються процеси дегідратації жовтого момбіну [1], грибів [2], зерна соєвих бобів [3], плодів «Героба» [4], листя *Schinus terebinthifolius* Raddi [5], визначаються коефіцієнти ефективної дифузії та енергія активації процесу дегідратації. Розробляються математичні моделі, які демонструють найкращу відповідність отриманим експериментальним даним.

В роботі [6] досліджуються процеси адсорбції екологічно чистих адсорбентів, таких як листя журавлини, материнки, лаванди. Доведено, що такий процес відбувається на основі механізму внутрішньої дифузії. Проведено узагальнення дифузійних процесів, на основі обраної моделі Ленгмюра та Френдліха.

В статті [7] розглядається кінетика зневоднення зеленого горошку бланшованого та не бланшованого. Зневоднення відбувається за різних параметрів: температур, вологості та форм і розмірів самого горошку. Відзначено, що процес «з бланшуванням» відіграє суттєву роль у зниженні вмісту води за різних температур і діаметрів за менший час порівняно з «без бланшування». Енергія активації та коефіцієнт дифузії води, в статті [7] визначаються за допомогою законів Фіка. Доведено, що процес зневоднення бланшованого горошку є енергоощадним процесом.

На основі отриманої моделі в статті [8] показано, що зростання коефіцієнту дифузії води та початкова концентрація води в плодах і зменшення геометричних розмірів зразків мають прямий вплив на швидкість зневоднення, а також зворотний вплив на тривалість зневоднення. Використана в статті [8] модель є корисним інструментом для прогнозування кінетики зневоднення фруктів та для оптимізації процесу в цілому.

Як бачимо, з вище наведеної літератури, значна увага приділяється процесам дегідратації та зневоднення рослинної сировини. В той самий час, як процесам насичення, які відбуваються за аналогічним механізмом та залежать від тих самих параметрів, приділено недостатньо уваги. З аналізу досліджень і публікацій, авторами статті зроблено висновок, що коефіцієнт дифузії та початкова концентрація цукрози у розчині мають прямий вплив на швидкість насичення. Також на коефіцієнт ефективної дифузії будуть впливати геометричні параметри плодів, їх внутрішня структура, температура насичення. За допомогою розроблених моделей можна прогнозувати кінетику насичення цукрозою фруктів та овочів та перевірити їх відповідність шляхом узагальнення експериментальних даних, а також створювати оптимальні умови для процесу насичення цукрозою частинок рослинної сировини.

Формулювання мети статті. Дослідження дифузійних процесів насичення частинок бланшованого кореня моркви, визначення ефективних коефіцієнтів дифузії через поверхню та в середині частинки, визначення енергії активації процесу насичення та встановлення аналітичних залежностей для розрахунку зміни концентрації цукрози в часі в частинці бланшованого кореня моркви циліндричної форми.

Методи дослідження. Об'єктом дослідження є частинки циліндричної форми кореня молодшої моркви. Для визначення поверхні масоперенесення (m , $\text{мкм}^2/\text{мкм}^2$) частинки кореня моркви аналізували за допомогою мікроскопа. Для цього відбиралися окремо зразки сирого кореня та бланшованої частинки кореня моркви.

Методика, за допомогою якої препарувалися та аналізувалися зразки, описана в [9, 10]. Згідно такої методики, авторами статті визначено середнє значення ширини пор між клітинами моркви, загальну довжину каналів між клітинами та середню площу поперечного перерізу клітини моркви, а також розраховано середню площу пустот між клітинами. Загальну площу фрагменту клітини вимірюють за допомогою даної програми AIS [9, 10]. Фотофіксація здійснюється цифровою камерою.

Для визначення зміни концентрації частинок кореня моркви в часі під час насичення цукрозою з її розчину, експеримент проводили наступним чином. Готували розчин цукрози концентрацією 65 % (мас). Готували циліндричні частинки кореня моркви ($d=12\text{мм}$, $h=4\text{мм}$) і завантажували в розчин. Відношення маси частинок до маси розчину становило 1:5, концентрація цукрового розчину змінювалася незначно. Кожні 10 хв. відбирали проби частинок кореня моркви.

Дослідження проводили за умов температур 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C. Вміст цукрози в частинках моркви визначали рефрактометричним методом [9, 11].

Виклад результатів та їх аналіз. Загальний вигляд клітин сирої та бланшованої моркви (збільшення в 400 разів, окуляр 10) наведено на рис. 1а та 1б відповідно. Клітини сирої моркви майже прямокутні, пори чітко виражені. Після бланшування, клітини моркви майже круглі, а пори значно ширші, що сприятиме кращій дифузії молекул цукрози до середини частинки моркви.

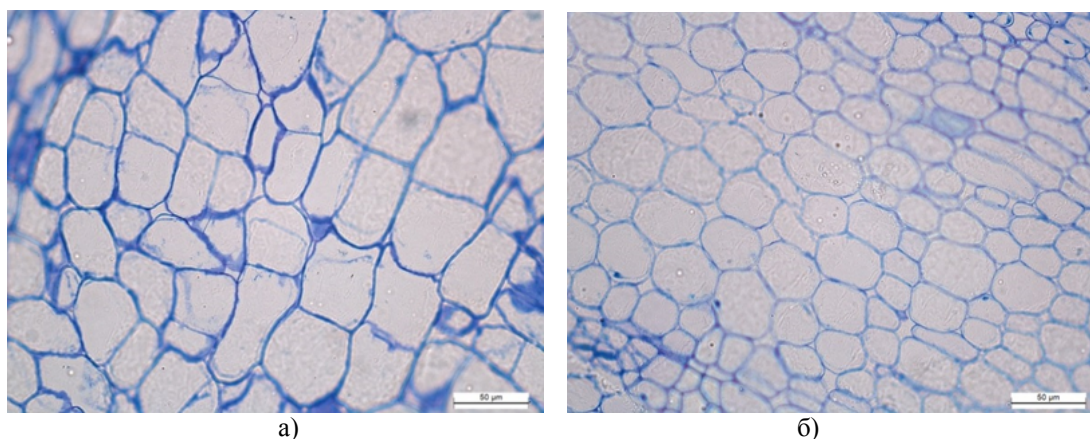
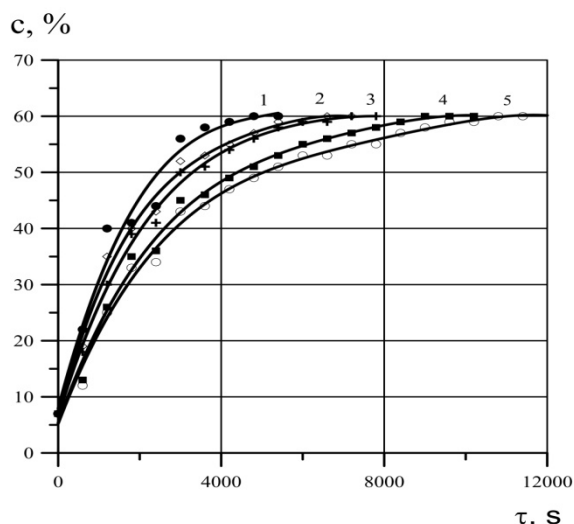


Рис. 1 – Фотографії клітини кореня моркви а) сирої; б) бланшованої

За зображенням бланшованої моркви (рис. 1б) визначено середній діаметр пор між клітинами моркви ($D_{\text{сер}} = 3\text{ мкм}$), загальну довжину каналів між клітинами ($L = 19,74\text{ мкм}$) та середню площу поперечного перерізу клітини моркви ($S_{\text{заг}} = 620\text{ мкм}^2$), а також розраховано середню площу пустот між клітинами: $S_{\text{пустот}} = \pi \cdot D_{\text{сер}} \cdot L = 186\text{ мкм}^2$. Отримані числові значення дають змогу поррахувати пористість поверхні масоперенесення для бланшованої моркви: $m = S_{\text{пустот}}/S_{\text{заг}} = 0,3\text{ мкм}^2/\text{мкм}^2$.

На рис. 2 зображено зміну концентрації частинок кореня моркви в часі під час насичення його цукрозою. Як видно з рис.2, температура водного розчину цукрози значно впливає на час насичення цукром кореня моркви. Так, час насичення частинок за температури 50°C становить 10800 с, а насичення частинок за температури 90°C становить 4800 с. Тобто зростання температури від 50°C до 90°C зменшує час насичення більше, ніж в 2 рази.



1 – кінетична крива насичення за температури 90 °С; 2 – кінетична крива насичення за температури 80 °С; 3 – кінетична крива насичення за температури 70 °С; 4 – кінетична крива насичення за температури 60 °С; 5 – кінетична крива насичення за температури 50 °С

Рис. 2 – Залежність зміни концентрації цукрози в частинках кореня моркви в часі

Проведемо узагальнення результатів експерименту, зображеного у вигляді кінетичних кривих на рис. 2, використовуючи перший закон Фіка [11]:

$$dM = -D \cdot dF \cdot \frac{dc}{dn} \quad (1)$$

Запишемо рівняння (1) для розрахунку кількості поглинутої речовини в умовах проведеного експерименту:

$$M = D \cdot F \cdot \frac{c^* - c_0}{r} \quad (2)$$

Під час насичення цукрозою частинок кореня моркви, відбувається одночасно дифузія цукрози крізь зовнішню поверхню частинки та в середині частинки. Однакова кількість речовини проходить через поверхню частинки та в середині частинки. Використовуючи експериментальні дані, за рівнянням (2), розрахуємо коефіцієнт ефективної дифузії крізь зовнішню поверхню частинки:

$$D = \frac{M}{F} \cdot \frac{c^* - c_0}{r} \quad (3)$$

та коефіцієнт ефективної дифузії в середині частинки кореня:

$$D_m = \frac{m \cdot M}{F} \cdot \frac{c^* - c_0}{r} \quad (4)$$

D – коефіцієнт ефективної дифузії через поверхню частинки, м²/с

D_m – коефіцієнт ефективної дифузії в середині частинки, м²/с;

M – кількість сиропу, що продифундувала з розчину цукрози в середину бланшованого кореня моркви, м³/с;

F – загальна зовнішня поверхня частинки кореня моркви, м²;

m – пористість поверхні масоперенесення (м²/м²);

r – еквівалентний радіус частинки кореня моркви, м;

c – поточна концентрація цукрози в частинці кореня моркви, (об'ємна частка);

c* – рівноважна концентрація цукрози в частинці кореня моркви, (об'ємна частка);

c₀ – початкова концентрація цукрози в частинці кореня моркви, (об'ємна частка).

Коефіцієнт ефективної дифузії, як через границю розділу фаз, так і в середині частинки значно залежать від температури. Залежність коефіцієнтів дифузії від температури описується рівнянням Ареніуса, модифікованого для масообмінних процесів [2]:

$$D = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (5)$$

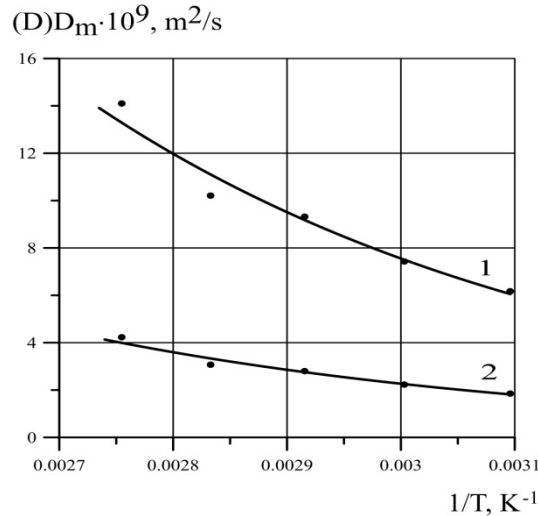
A – передекспоненційний множник;

E_a – енергія активації процесу насичення цукрозою частинок кореня моркви, Дж/моль;

R – універсальна газова стала, Дж/моль·К;

T – температура насичення, К

Рівняння (5) дає змогу розрахувати енергію активації, за відомими значеннями температур та розрахованими, за рівнянням (3) значеннями коефіцієнтів ефективної дифузії (D) через границю розділу фаз і, розрахованими, за рівнянням (4) значеннями коефіцієнтів ефективної дифузії (D_m) в середині частинки. Узагальнення експериментальних даних на основі рівняння (5) наведені на рис. 3.



1 – коефіцієнти ефективної дифузії (D) через границю розділу фаз; 2 – коефіцієнти ефективної дифузії (D_m) в середині частинки

Рис. 3 – Криві залежності коефіцієнтів ефективної дифузії від температури

Як видно з кривих 1, 2 (рис. 3) дифузія на поверхні частинки відбувається в рази інтенсивніше, ніж в середині, де дифузійний процес, в основному, відбувається в каналах, між клітинами.

Експериментально визначені значення коефіцієнтів ефективної дифузії (D) через границю розділу фаз можна узагальнити експоненційною залежністю (рис. 3, крива 1), а також визначити енергію активації за рівнянням:

$$D = 7,62 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{2305,49}{T}} = 7,62 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{19158,62}{RT}} \quad (6)$$

Аналогічно, значення коефіцієнтів ефективної дифузії (D_m) в середині частинки узагальнюються експоненційною залежністю (рис. 3, крива 2) та визначається енергія активації за рівнянням (7):

$$D_m = 2,29 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{2305,49}{T}} = 2,29 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{19158,62}{RT}} \quad (7)$$

З рівнянь (6, 7) видно, що енергія активації приймає значення $E_a = 19,159$ кДж/моль та не залежить від температури (в діапазоні $50 - 90^\circ\text{C}$), від внутрішньої структури бланшованої частинки кореня моркви, а визначає енергію, необхідну для початку масообмінного процесу насичення цукрозою частинок моркви. Енергія активації, яка вказує на мінімальну енергію для початку процесу дифузії, визначається самою природою масообмінного процесу та властивостями речовин, що приймають в ньому участь.

Розглянемо механізм дифузійного перенесення цукрози з розчину великого об'єму у тверду частинку. Такі умови відповідають умовам експерименту, результати якого наведені на рис. 2. Бланшована частинка кореня моркви являє собою пористе тіло із значною внутрішньою поверхнею. Для створення математичної моделі, приймаємо, що всі канали між клітинами є кінетично рівноцінними, а тверде тіло є ізотропним у дифузійному відношенні. Крім того, приймаємо, що дифузійний процес відбувається по каналах між клітинами. Таке припущення цілком можливе, тому що канали між зруйнованими (бланшованими) клітинами максимально насичуються цукрозою.

З великого об'єму нерухомого розчину цукроза дифундує шляхом самодифузії до поверхні частинки, яка має циліндричну форму. На поверхні частинки виникає градієнт концентрації, за рахунок якого швидкість дифузії і, відповідно коефіцієнт ефективної дифузії крізь зовнішню поверхню буде зростати, порівняно зі швидкістю самодифузії у розчині. Завдяки концентраційному градієнту цукроза дифундує через поверхню в середину частинки, де, протягом певного часу (від 0 до $\tau \rightarrow \infty$) проходить шлях r . Такий механізм зображений на рис. 4. В середині частинки швидкість і ефективний коефіцієнт дифузії зменшуються, порівняно з дифузією навколо частинки, тому що внутрішня поверхня частинки є більша, ніж зовнішня. Цей факт підтверджують експериментальні дані, зображені на рис. 3.

Складність математичного опису такого механізму полягає в тому, що кожна бланшована частинка має надзвичайно складну внутрішню структуру, що значно ускладнює аналітичний розв'язок, тому скористаємося наближеним методом з використанням інтегральних рівнянь, адекватність яких перевіримо експериментально.

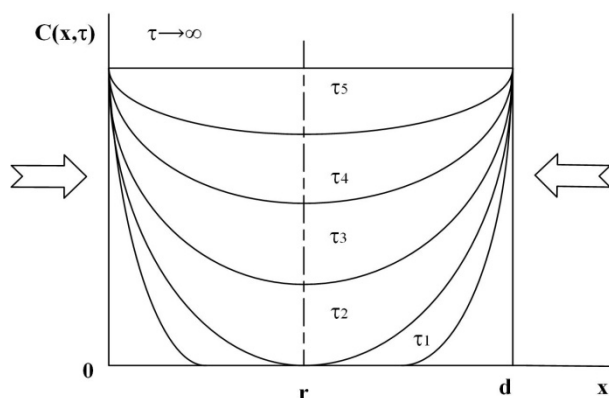


Рис. 4 – Дифузія з великого об'єму водного розчину цукрози в частинку бланшованого кореня моркви

З рис. 4., встановимо: початкові умови $c(x, 0)$ та граничні умови $c(0, \tau) = c(d, \tau) = c^*$

Зміна розподілу концентрації цукрози в середині частинки циліндричної форми описується рівнянням [11]:

$$\frac{c^* - c}{c^* - c_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} \cdot e^{-\mu_n^2 \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (8)$$

При розкладанні кореня характеристичного рівняння, отримаємо рішення для розподілу концентрацій в часі [11].

$$\frac{c^* - c}{c^* - c_0} = A \cdot e^{-s \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (9)$$

A, s – коефіцієнти, знайдені експериментальним шляхом [9 – 11].

Для перевірки обраної математичної моделі (рівняння 8, 9) на адекватність, представимо результати експерименту у вигляді залежності:

$$\frac{c^* - c}{c^* - c_0} = f\left(\frac{D_m \cdot \tau}{R^2}\right) = f(Fo_d)$$

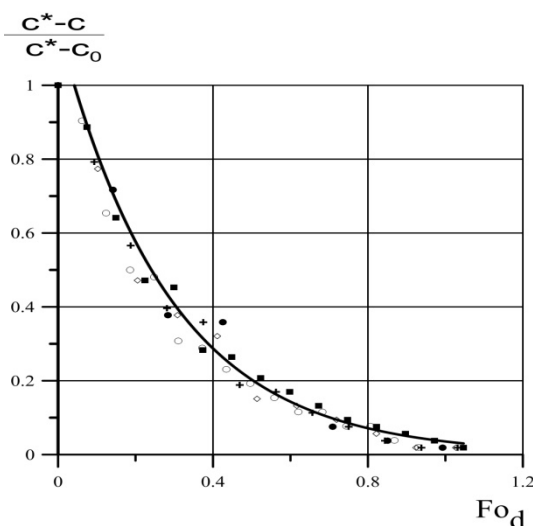


Рис. 5 – Крива узагальнення експериментальних даних зміни концентрації цукрози в бланшованому корені моркви в часі за температур (50 – 90°C)

Як видно, з рис. 5, усі експериментальні дані можна апроксимувати однією експоненційною залежністю, яка має вигляд:

$$\frac{c^* - c}{c^* - c_0} = 1,16 \cdot e^{-3,482 \cdot Fo_d} \quad (10)$$

Із залежності (10) видно, що предекспоненційний множник, який залежить від форми частинки дорівнює 1,16. Для частинок циліндричної форми, такий предекспоненційний множник, як стверджують автори [9 – 11] може бути в межах 0,69 – 1,62. Другий коефіцієнт, який залежить від температури та в'язкості роз-

чину, в залежності (10) приймає значення 3,482 та є однаковим для температур в межах 50 – 90°C, що є цілком достовірним, бо з ростом температури розчину, його в'язкість зменшується.

Залежність (10) дозволяє розрахувати зміну концентрації цукрози в часі в частинці бланшованого кореня моркви циліндричної форми діаметром $d=12\text{ мм}$ та висотою $h=4\text{ мм}$ в межах температур 50 – 90°C. Отримана залежність (10) добре узгоджується з результатами експериментальних досліджень, а середнє квадратичне відхилення приблизно становить 3%.

Висновки. За допомогою мікроскопа, фотофіксації та аналізу фотозразків, досліджено структуру клітин сирого та бланшованого кореня моркви. Доведено, що бланшований корінь моркви має більший діаметр каналів між клітинами, що сприяє кращій дифузії цукрози в середину частинки. Визначено пористість поверхні масоперенесення для бланшованої моркви, яка дозволяє розрахувати ефективний коефіцієнт дифузії в середині частинки. Наведені результати експериментальних досліджень зміни концентрації частинки кореня моркви в часі під час насичення його цукрозою за температур 50 – 90°C. На основі отриманих даних експерименту та першого закону Фіка, розраховані коефіцієнти ефективної дифузії через поверхню частинки та коефіцієнти ефективної дифузії в середині частинки. Визначено енергію активації процесу насичення $E_a = 19,159\text{ кДж/моль}$, доведено її незалежність від температури та внутрішньої структури за даних умов. Проведено узагальнення експериментальних даних зміни концентрації цукрози в бланшованому корені моркви в часі за температур 50 – 90°C. Виведена залежність (10), яка дозволяє розрахувати зміну концентрації цукрози в бланшованому корені моркви в часі.

References

1. Gleyce K. I. Pinheiro, Daniel E. C. de Oliveira, Weder N. Ferreira Junior, Osvaldo Resende. (2019). Drying kinetics of yellow mombin (*Spondias mombin* L.) epicarp. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental – Agriambi*, 24(2), 121 – 127. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n2p121-127>
2. M. E. Rezagah, M. Kashaninejad, H. Mirzaei and M. Khomeiri. (2010). Osmotic dehydration of button mushroom: Fickian diffusion in slab configuration. *Latin American applied research*, 40(1), 23–26. <http://www.scielo.org.ar/pdf/laar/v40n1/v40n1a04.pdf>
3. Daniel Emanuel Cabral de Oliveira, Osvaldo Resende, Jaqueline Ferreira Vieira Bessa, Adrieli Nagila Kester. (2013). Kinetic and thermodynamic properties of soybean grains during the drying process. *Journal of Agricultural Engineering*, 44(2), 43 – 46. <https://doi.org/10.4081/jae.2013.308>
4. Ana P. P. Jorge, Weder N. Ferreira Junior, Lígia C. de M. Silva, Daniel E. C. de Oliveira, Osvaldo Resende. (2020). Drying kinetics of 'gueroba' (*Syagrus oleracea*) fruit pulp. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental – agriambi*, 25(1), 23 – 29. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p23-29>
5. André Luís Duarte Goneli, Maria do Carmo Vieira, Henrique da Cruz Benitez Vilhasanti, Alexandre Alves Gonçalves. (2014). Mathematical modeling and effective diffusion of *Schinus terebinthifolius* leaves during drying. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44(1), 56 – 64. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000100005>
6. Nada S. Al-Kadhi. (2019). The kinetic and thermodynamic study of the adsorption Lissamine Green B dye by micro-particle of wild plants from aqueous solutions. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 45(3), 231 – 238. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.05.004>
7. Mohammad Sirousazar. (2017). Approximate Mathematical Modeling of Osmotic Dehydration of Cone-Shaped Fruits and Vegetables in Hypertonic Solutions. *Turkish Journal of Agriculture -Food Science and Technology*, 5(6), 581-585. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v5i6.581-585.821>
8. Om Prakash Pandey, Bimal Kumar Mishra, Ashok Misra. (2019). Comparative study of green peas using with blanching & without blanching techniques. *Information Processing In Agriculture*, 6(2), 285 – 296. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.10.002>
9. Huzova I. (2022). Doslidzhennja dyfuzii' cukrozy v plodah jabluka u vyrobnyctvi jabluchnyh cukativ. *Scientific works*, 86(1), 23–30. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2398>
10. Atamanyuk V., Huzova I., Gnativ Z. (2017). Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production. *Food Science and Technology*, 11(4), 21–28. doi.org/10.15673/fst.v11i4.72
11. Huzova I. et al. (2021). [Study of diffusion processes in carrot particles](#). Chemical technology and engineering proceedings of the 3rd International scientific conference. Lviv, 70–71. doi.org/10.23939/cte

STUDY OF DIFFUSION PROCESSES OF SUCROSE SATURATION OF CARROT ROOT PARTICLES

Huzova I., PhD of Technical Sciences, Associate Professor
Atamanyuk V., Doctor of Technical Sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University

Abstract. Diffusion processes in the food industry occur during the production of candied fruits and play a key role in such productions. Establishing the mechanism of diffusion processes and reducing the saturation time is an urgent issue.

Diffusion processes of sucrose saturation of carrot root particles are investigated in the article. Photographs of raw and blanched carrot cells were analyzed. The average diameter of pores between carrot cells, the total length of channels between cells and the average cross-sectional area of a carrot cell were determined, and the average area of voids between cells was calculated. The obtained numerical values make it possible to calculate the porosity of the mass transfer surface for blanched carrots.

The change in the concentration of carrot root particles over time during its saturation with sucrose was analyzed. It has been proven that the temperature of the aqueous sucrose solution significantly affects the time of sugar saturation of the carrot root. An increase in temperature from 50°C to 90°C reduces the saturation time by more than 2 times.

Based on the results of the experiment, the effective diffusion coefficients through the outer surface of the particle and the effective diffusion coefficients in the middle of the carrot root particle were calculated. The value of the activation energy was calculated in the article: $E_a = 19.159 \text{ kJ/mol}$. The activation energy does not depend on the temperature, on the internal structure of the blanched carrot root particle. The activation energy determines the energy required to start the mass exchange process of saturation of carrot particles with sucrose.

The mechanism of diffusion transfer of sucrose from a large volume solution to a solid carrot particle is substantiated. An analytical solution of the equations was established to determine the change in the concentration of sucrose in carrot particles over time. The adequacy of the derived equations was verified experimentally. The derived analytical dependence is necessary for: calculating the change in sucrose concentration over time in a particle of blanched carrot root of cylindrical shape with a diameter of $d=12\text{mm}$ and a height of $h=\text{mm}$ within the temperature range of 50-90°C.

Key words: carrot root particle, effective diffusion coefficient, activation energy

Список використаної літератури

1. Gleyce K. I. Pinheiro, Daniel E. C. de Oliveira, Weder N. Ferreira Junior, Osvaldo Resende. Drying kinetics of yellow mombin (*Spondias mombin* L.) epicarp // Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental - Agriambi. 2019. 24(2). P. 121 – 127
2. M. E. Rezagah, M. Kashaninejad, H. Mirzaei and M. Khomeiri. Osmotic dehydration of button mushroom: Fickian diffusion in slab configuration // Latin American applied research. 2010. 40(1), P. 23–26.
3. Daniel Emanuel Cabral de Oliveira, Osvaldo Resende, Jaqueline Ferreira Vieira Bessa, Adrieli Nagila Kester. Kinetic and thermodynamic properties of soybean grains during the drying process // Journal of Agricultural Engineering. 2013. 44(2). P. 43 – 46
4. Ana P. P. Jorge, Weder N. Ferreira Junior, Lígia C. de M. Silva, Daniel E. C. de Oliveira, Osvaldo Resende. Drying kinetics of ‘gueroba’ (*Syagrus oleracea*) fruit pulp // Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental – agriambi. 2020. 25(1). P. 23 – 29.
5. André Luís Duarte Goneli, Maria do Carmo Vieira, Henrique da Cruz Benitez Vilhasanti, Alexandre Alves Gonçalves. Mathematical modeling and effective diffusion of *Schinus terebinthifolius* leaves during drying // Pesquisa Agropecuária Tropical. 2014. 44(1). P. 56 – 64
6. Nada S. Al-Kadhi. The kinetic and thermodynamic study of the adsorption Lissamine Green B dye by micro-particle of wild plants from aqueous solutions // Egyptian Journal of Aquatic Research. 2019. 45(3) P. 231 – 238
7. Mohammad Sirousazar. Approximate Mathematical Modeling of Osmotic Dehydration of Cone-Shaped Fruits and Vegetables in Hypertonic Solutions // Turkish Journal of Agriculture -Food Science and Technology. 2017. 5(6). P. 581-585.
8. Om Prakash Pandey, Bimal Kumar Mishra, Ashok Misra. Comparative study of green peas using with blanching & without blanching techniques // Information Processing In Agriculture. 2019. 6(2). P. 285 – 296.
9. Гузьова І. О. Дослідження дифузії цукрози в плодах яблука у виробництві яблучних цукатів // Наукові праці. 2022. 86(1). С. 23–30.
10. Atamanyuk V., Huzova I., Gnativ Z. Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production // Food Science and Technology. 2017. 11(4). P. 21–28.
11. [Study of diffusion processes in carrot particles](#). Huzova I. et al. // Chemical technology and engineering proceedings of the 3rd International scientific conference. Lviv, 2021. P. 70–71.

Отримано в редакцію 05.07.2023
Прийнято до друку 26.09.2023

Received 05.07.2023
Approved 26.09.2023

ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ БІОМАСИ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИХ МІКРОВОДОРОСТЕЙ CHLORELLA VULGARIS

Дячок В.В., д. т. н. професор, Кочубей В.В., к. х. н. доцент,
Національний університет «Львівська Політехніка», м. Львів

Анотація. В роботі представлено результати досліджень щодо можливостей використання біопалива на основі біомаси хлорофілсинтезуючих мікроводоростей як сировини для карбонізації з одночасним зменшення вуглецевого сліду (пов'язаних з біо-CCU). Переробка біомаси мікроводоростей у біовугілля знаходить застосування для секвестрації вуглецю, сировини для виробництва теплової енергії, а також активованого вугілля для адсорбції токсичних сполук із забрудненого повітря, води та ґрунту. Біопаливо вважається вуглецево-нейтральним, оскільки CO₂, що виділяється після їх спалювання, використовується рослинами та водоростями для фотосинтезу, що призводить до фіксації вуглекислого газу. Отримання енергії за рахунок спалювання карбонізованої біомаси мікроводоростей базується на ефекті нейтралізації вуглекислого газу, що суттєво відрізняє цей спосіб від відомих традиційних методів, і не спричиняє забруднення навколишнього середовища парниковими газами. Результати комплексного термогравіметричного та диференційного термічного аналізів теплотвірної здатності біовугілля на основі біомаси хлорофілсинтезуючих мікроводоростей *Chlorella vulgaris* отриманої в результаті сорбції парникових газів, утворених при спалюванні твердого, рідкого чи газоподібного палива засвідчують перспективність розвитку цього напрямку. Встановлено, що біомаса мікроводоростей, отримана при поглинанні діоксиду карбону – продукту спалювання палива із домішками діоксиду сульфору, має більшу теплотвірну здатність у порівнянні із біомасою, отриманою при поглинанні чистого діоксиду карбону. Горіння біомаси мікроводоростей, яка містить у внутрішньому об'ємі клітин сполуки сульфору, які утворюються внаслідок метаболізму діоксиду сульфору, супроводжується більш значними екзотермічними ефектами. За результатами термічних досліджень було встановлено, що теплотвірна здатність такої біомаси мікроводоростей перевищує теплотвірну здатність осики, яка є альтернативним джерелом енергії на теренах України, та близькою до теплотвірної здатності селективно виведеної енергетичної верби *Energetic willow (Salix Viminalis)*.

Ключові слова: термічний аналіз, диференційного термічний аналіз, мікроводорості *Chlorella vulgaris*, парникові гази, альтернативне паливо.

Постановка проблеми. Сьогодні біомаса рослинної сировини (деревини), як в Україні так і в світі є четвертим видом палива для вироблення енергії [1-5]. Як джерело енергії застосовують близько 20 видів рослин. До них найчастіше відносять вербу (*Salix*), тополь (*Populus*), міскантус (*Miscanthus*), евкаліпт (*Eucalyptus*), осика (*Populus tremula* L.), топінамбур (*Heliánthus tuberósus*), тощо. Особливо популярною і поширеною в усьому світі є «Вербова енергетика». Енергетична верба – селективно виведена, невибаглива до умов зростання та поглинає у рази більше вуглекислого газу в порівнянні з іншими видами деревини. Теплотвірна здатність верби близька до вугілля. Вербова енергетика є наближена до виробництва замкнутого циклу.

Одноклітинні хлорофіл синтезуючі мікроводорості в тому числі і *Chlorella vulgaris*, також відносять до рослин, а їх біомаса подібно до деревини може бути використана, як альтернативне джерело енергії. Як показують результати власних досліджень та аналізу літератури джерел, тепловий ефект при спалюванні біомаси мікроводоростей є близьким, а, в деяких випадках, більшим від теплового ефекту спалювання деревини. Значні запаси біомаси хлорофілсинтезуючих мікроводоростей накопичуються у випадку її застосування для біологічного очищення промислових газових викидів від діоксиду карбону та інших продуктів спалювання палива. В основу цього методу очищення покладено фотосинтез [6-8].

Як відомо, використання мікроводоростей для поглинання парникових газів вважається екологічно чистим виробництвом [11-14]. Проте у продуктах спалювання палива, завжди містяться інші оксиди, зокрема діоксид сульфору. За хімічною будовою молекули вуглекислого газу (CO₂) та двоокису сірки (SO₂) подібні, що є причиною проникнення SO₂ за механізмом пасивного транспорту у внутрішній об'єм клітин мікроводоростей. На етапі фотосинтезу SO₂ не може бути засвоєним і більше того, виступає блокаторм процесу фотосинтезу, проте залишаються у внутрішньому об'ємі клітини у вигляді хімічних сполук - продуктів метаболізму які стають складовими компонентами що формують біомасу. Обсяги такої біомаси мікроводоростей, як згадувалось раніше є надзвичайно великими.

Сьогодні є очевидним, що накопичені відходи біотехнологічних виробництв, зокрема очищення промислових газових викидів від парникових газів становлять серйозну загрозу навколишньому середовищу, а від так потребують утилізації. Методи вторинного використання біомаси слід розробляти аналогічними до тих, що реалізуються у природному середовищі, зокрема в біосфері. Як відомо – біосфері в цілому власне явище кругообігу основних біогенних елементів. Тому в основу технологій рециклізації та утилізації

накопиченої біомаси мікродоростей слід максимально запозичувати процеси притаманні біосфері. Саме це визначає необхідність створення і погоджених глобальних заходів у напрямках реалізації принципів сталого розвитку. Такий стан справ спонукає до розроблення способів і методів використання біомаси хлорофілсинтезуючих мікродоростей, як потенційного джерела альтернативного палива. Від так це питання потребує більш ретельного вивчення на предмет можливого застосування біомаси мікродоростей, одержаної при очищенні промислових газових викидів, як потенційного альтернативного джерела енергії.

Мета роботи полягає у дослідженні методом комплексного термічного аналізу теплотвірної здатності зразків біомаси мікродоростей *Chlorella vulgaris*, одержаних внаслідок очищення промислових газових викидів від діоксиду карбону із домішками діоксиду сульфуру, а також оцінити вплив діоксиду сульфуру на теплотвірну здатність біомаси мікродоростей та ефективність протікання процесів її горіння, як потенційного біопалива.

Теоретична частина. У попередніх роботах авторів [10-12] описані механізми поглинання парникових газів із залученням фотосинтезу та включення їх у цінні біомолекули. Клітини мікродоростей використовують CO_2 як попередники макромолекул, включаючи ліпіди, білки, вуглеводи та пігменти. Для цих мікродоростей характерне явище фотосинтезу. Цей фізико-хімічний процес унікальний у своєму відношенні тим, що збільшує вільну енергію речовини за рахунок універсального джерела енергії – Сонця. Фотосинтез сприяє зменшенню вуглекислого газу в атмосфері. Хлорофілсинтезуючі мікродорості, до прикладу хлорела *Chlorella vulgaris*, поглинають вуглекислий газ та складають його вигляді складних біомолекул – найчастіше вуглеводів. На відміну від наземних рослин вони в десятки разів швидше ростуть та відповідно поглинають на багато більше діоксиду карбону. Крім цього володіють здатністю адаптуватися у край несприятливих умовах [9,10]. Водночас мікродорості не потребують багато місця на відміну від наземних рослин, зокрема дерев. Фактично вони створюють потужну конкуренцію традиційним зеленим насадженням які є потенційними поглиначами вуглекислого газу і можуть рости будь-де, отримуючи штучне світло, воду і діоксид карбону, який поглинають. Водночас самі нейтралізують речовини, які забруднюють воду при їх культивуванні.

Експериментальна частина. Для досліджень були взяті зразки біомаси мікродоростей *Chlorella vulgaris*, одержані внаслідок очищення промислових газових викидів від діоксиду вуглецю в одному випадку та в іншому біомаса отримана внаслідок очищення промислових газових викидів від діоксиду вуглецю з домішками діоксиду сульфуру в межах від 0,0001 мг/мл до 0,004 мг/мл в середовищі культивування. Комплексний термічний аналіз зразків біомаси мікродоростей проводили на дериватографі Q –1500D системи “F. Paulik – J. Paulik – L. Erdey”, під'єднаного до IBM сумісного персонального комп'ютера. Взірці біомаси піддавались дослідженню в динамічних умовах, а саме швидкість нагрівання 10 $^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ в середовищі повітря. Маса наважки кожного досліджуваного зразку становила 100 мг. Як еталонну речовину було взято алюмінію оксид. Комплексний термічний аналіз включав термогравіметрію (TG), диференційну термогравіметрію (DTG) та диференційний термічний аналіз (DTA). Результати комплексного термічного аналізу зразків представлені у вигляді термограм зображено на рисунках 1 і 2, зведених кривих DTG, рисунок 3 та таблиці 1.

На першій стадії термолізу в температурному інтервалі 20 – 175 $^{\circ}\text{C}$ зразки втрачають фізично зв'язану вологу. Цей процес супроводжується появою чіткого ендотермічного ефекту на кривих DTA, з максимумом за температури 101 $^{\circ}\text{C}$. Слід відмітити, що зразок 1 відзначається більшим вмістом адсорбованої води (11,20%), у порівнянні із зразком 2 (10,35%).

На другій стадії термолізу зразки втрачають хімічно зв'язану воду. Цей процес супроводжується незначною втратою маси зразків та відхиленням каналу DTA в область ендотермічних ефектів. У зразку 1 втрата хімічно зв'язаної води (1,78%) спостерігається в області температур 175 – 220 $^{\circ}\text{C}$. Цей процес супроводжується характерним вигином на кривій DTG. Зразок 2 втрачає хімічно зв'язану воду (0,71%) в області температур 166 – 204 $^{\circ}\text{C}$.

Слід відмітити, що зразок 1 характеризується більшим вмістом зв'язаної води.

Таблиця 1

Результати термічного аналізу зразків

Зразок	Стадія	Температурний інтервал, $^{\circ}\text{C}$	Втрата маси, %	Ефект (t_{max})
Зразок 1 Отриманий за присутності CO_2	I	20 - 175	11,20	ендо- (100 $^{\circ}\text{C}$)
	II	175 - 220	1,78	ендо-
	III	220 - 480	50,41	екзо-(354 $^{\circ}\text{C}$)
	IV	480 - 740	33,61	екзо-(564 $^{\circ}\text{C}$)
Зразок 2 Отриманий за присутності CO_2 і SO_2	I	20 - 166	10,35	ендо- (101 $^{\circ}\text{C}$)
	II	166 - 204	0,71	ендо-
	III	204 - 445	51,64	екзо- (354 $^{\circ}\text{C}$)
	IV	445 - 660	35,30	екзо- (525 $^{\circ}\text{C}$)

На третій стадії термолізу, яка для зразка 1 протікає в температурному інтервалі 220 – 480° С, а для зразка 2 в області температур 204 – 445°С, відбуваються активні термоокисні та деструктивні процеси, які завершуються полуменевим горінням летких продуктів розкладу. Про це свідчить інтенсивна втрата маси зразків та поява стрімкого екзотермічного ефекту на кривих DTA, з максимумом за температури 354°С. В цьому ж температурному інтервалі можливе окислення сполук сульфуру, які містяться у зразку 2, до вищих оксидних форм.

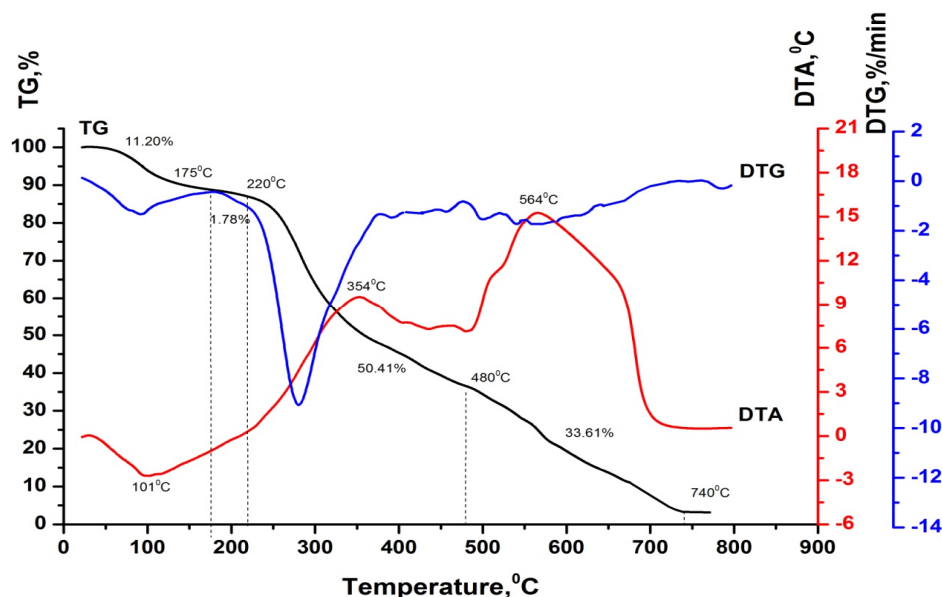


Рис. 1 – Термограма зразку

Слід зазначити, що зразок 2 відзначається нижчою термічною стійкістю, у порівнянні із зразком 1. Термоокисні та деструктивні процеси в цьому зразку протікають за більш низьких температур, вони супроводжуються більш глибоким екстремумом на кривій DTG (рис. 3) та більш стрімким екзотермічним ефектом на кривій DTA.

На четвертій стадії термолізу, яка для зразка 1 протікає в температурному інтервалі 480 – 750°С, а для зразка 2 в області температур 445 – 750°С, відбувається згорання піролітичного залишку біомаси мікроростів. Цьому процесу відповідає значна втрата маси зразків (33,61% - зразок 1, 35,30% - зразок 2) та поява стрімких екзотермічних ефектів на кривих DTA. В цьому ж температурному інтервалі можливе завершення згорання сполук сульфуру, присутнього в зразку 2.

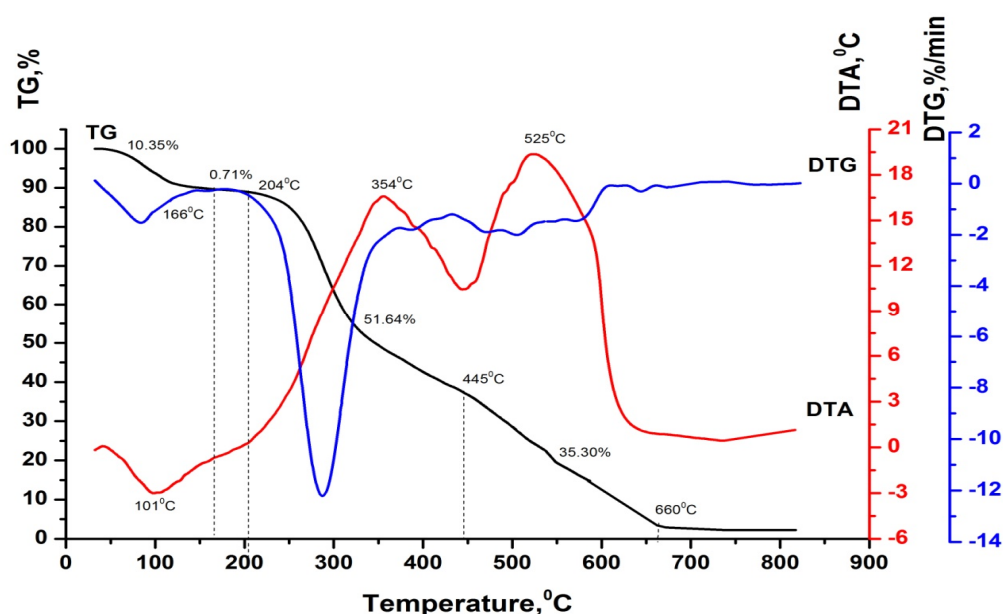


Рис. 2 – Термограма зразка 2

Слід зауважити, що згорання карбонізованого залишку зразка 2 протікає більш інтенсивно, ніж зразка 1. Про це свідчить поява більш стрімких екзотермічних ефектів на кривих DTA зразка 2 та зміщення екстремумів диференційних кривих DTA та DTG в область вищих температур. Максимум екзотермічного ефекту зразка 2 проявляється на кривій DTA за температури 525°C, а зразка 1 – за температури 564°C. Екстремум кривої DTG зразка 2 відповідає температурі 505°C, а зразка 1 – температурі 564°C (рис. 3).

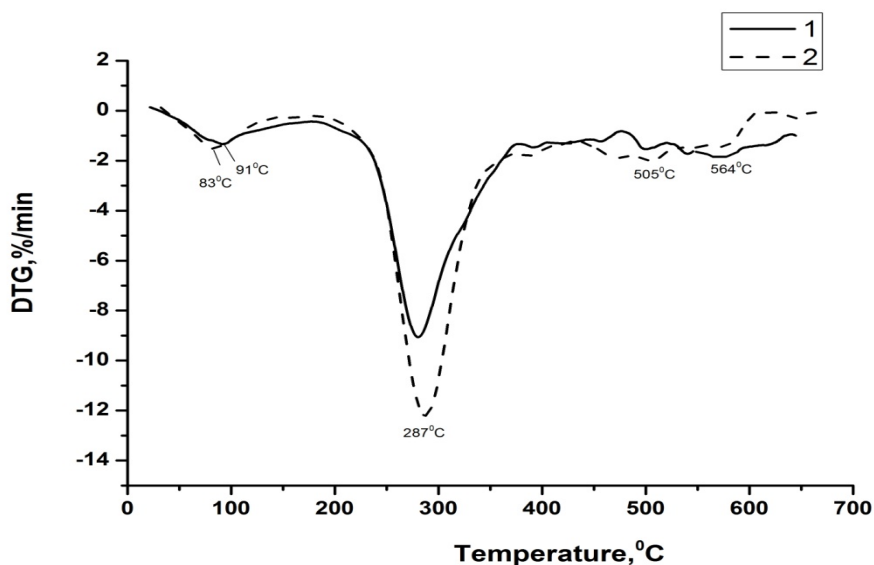


Рис. 3 – Термогравіметричні криві: крива 1 – зразок 1, крива 2 – зразок 2

На рис. 4 наведено порівняння кривих ДТА зразків трьохрічної енергетичної верби *Salix Viminalis* з розміром частинок приблизно рівним 0,5мм та одноклітинних мікроводоростей *Chlorella vulgaris*, культивованих за присутності оксиду сульфуру. Термічний аналіз зразків верби (*Salix Viminalis*) та мікроводоростей проводили за однакових умов

Екзотермічний ефект, який спостерігається на кривій ДТА зразка верби в температурному інтервалі 170 - 430°C відповідає термоокисній деструкції целюлози, яка завершується полум'яним горінням летких продуктів розкладу. Наступний екзотермічний ефект, який проявляється на кривій ДТА в температурному інтервалі 430 - 552 °C, відповідає згорянню карбонізованого залишку зразка.

Слід відмітити, що теплотвірні здатності зразків швидкоростучої трьохрічної верби та одноклітинних мікроводоростей є близькими, однак, характер горіння є дещо відмінним. Полум'яне горіння продуктів деструкції зразка верби протікає більш інтенсивно, ніж зразка мікроводоростей. Про це свідчить поява більш стрімкого екзотермічного ефекту, у порівнянні із екзоефектом зразка мікроводоростей *Chlorella vulgaris*. Проте згорання піролітичного залишку зразка верби (*Salix Viminalis*) супроводжується менш значним виділенням тепла. Цьому процесу відповідає менший екзотермічний ефект на кривій ДТА, який завершується за нижчих температур, у порівнянні із зразком мікроводоростей рисунок 4.

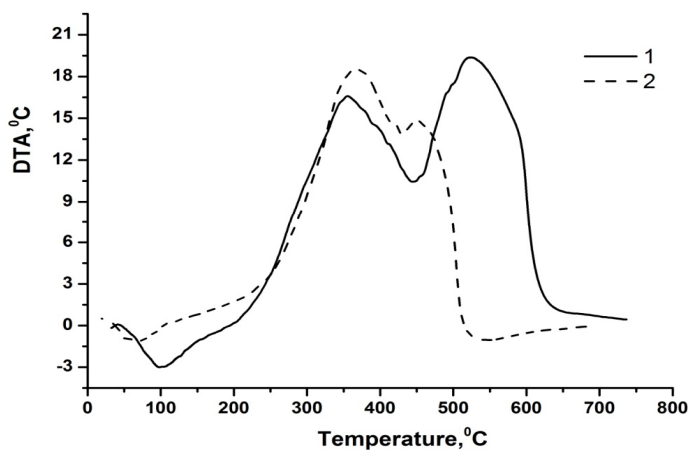


Рис. 4 – Порівняння кривих ДТА зразків: 1- біомаса мікроводоростей *Chlorella vulgaris*; 2- енергетичної верби (*Salix Viminalis*) [15].

Класичним джерелом енергії рослинного походження на даний час також є осика. Це швидкостуче дерево широко розповсюджене на європейській території. Його часто використовують в паливній енергетиці як енергетичну сировину.

На рисунку 5 наведено порівняння кривих ДТА одноклітинних хлорофілсинтезуючих мікроводоростей *Chlorella vulgaris* та зразка стовбурової деревини осики, змішаної в рівних пропорціях з корою осики. Термічний аналіз зразків проводили за однакових умов. Піроліз, який супроводжується різким зниженням ступеня полімеризації целюлози, термоокисна деструкція та горіння продуктів деструкції зразка осики протікає в температурному інтервалі 187 - 373°C. Цьому процесу відповідає значний екзотермічний ефект на кривій ДТА, з максимумом за температури 347°C.

Згорання піролітичного залишку зразка осики, яке супроводжується широким екзоефектом на кривій ДТА, протікає в області температур 373 - 564°C. Слід відмітити, що полуменеве горіння продуктів деструкції зразка осики (*Populus tremula* L.) та згорання його карбонізованого залишку супроводжується меншим виділенням теплоти. Про це свідчить поява менш стрімких екзотермічних ефектів на кривій ДТА зразка швидкостучої осики, у порівнянні із зразком хлорофіл синтезуючих мікроводоростей.

За результатами термічних досліджень можна стверджувати, що зразок біомаси мікроводоростей *Chlorella vulgaris* відзначається більшою теплотвірною здатністю, у порівнянні із зразком осики (*Populus tremula* L.).

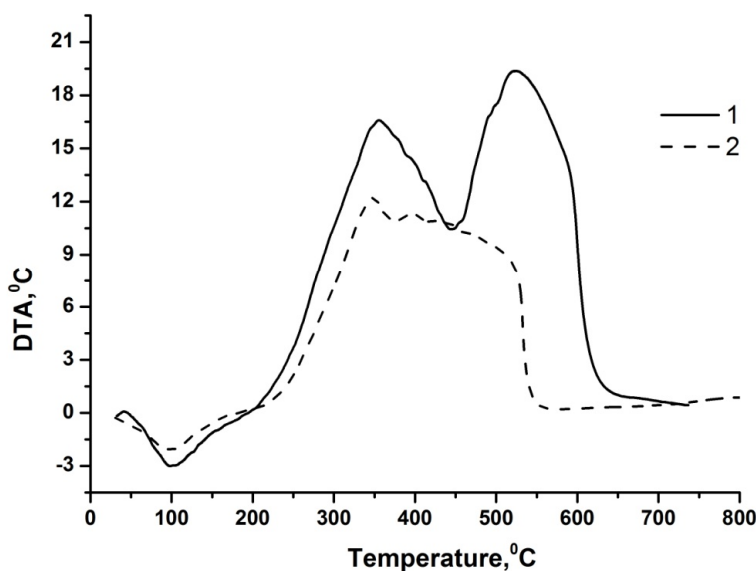


Рис. 5 – Порівняння ДТА зразків: крива – 1, біомаса мікроводоростей (*Chlorella vulgaris*) зразок 2; крива -2 швидкостуча осика (*Populus tremula* L.)

Висновки. За даними комплексного термічного аналізу зразок біомаси мікроводоростей одержаний при культивуванні газовими викидами з діоксидом карбону та вмістом діоксиду сульфуру, зразок 2, має більшу теплотвірну здатність у порівнянні із зразком 1, отриманого при культивуванні мікроводоростей чистим діоксидом карбону. Полуменеве горіння летких продуктів розкладу зразка 2 та згорання його карбонізованого залишку супроводжується більш значним тепловим ефектом у порівнянні із зразком 1, одержаним при культивуванні чистим діоксидом карбону. Присутність сульфуру у зразку 2 підсилює інтенсивність протікання в них деструктивних, термоокисних та гетерогенно-окисних процесів при нагріванні.

Теплотвірна здатність зразку 2 біомаси мікроводоростей перевищує теплотвірну здатність осики (*Populus tremula* L.), яка вважається альтернативним джерелом енергії на теренах України, та є близькою до теплотвірної здатності селективно виведеної енергетичної верби *Salix Viminalis*.

Біомасу мікроводорості *Chlorella vulgaris*, обох зразків можна рекомендувати як сировину для виготовлення біопалива.

References

1. Vasylyshyn R.D. (2013). Energetics of forest ecosystems: main directions and trends of scientific research. *Scientific bulletin of NLTU of Ukraine: coll. science and technology works* –Lviv: RVV NLTU of Ukraine. 23(2), 31-36.
2. Lakyda P.I., Vasylyshyn R.D., Lashchenko A.G., Terentiev A.Yu and oll. *Species of Ukraine: reference book (normative and production edition):* ECO-inform, 192.

3. Geletukha H.G., Zhelezna T.A. (2012). Current state and prospects for the development of bioenergy in Ukraine. Non-traditional energy. *Prom. Heat engineering*. 3, 73-79.
4. Ivakhiv V. (2012). Energy willow as a solution for small cities of Ukraine. *Ukrainian energy industry*. 12.
5. Climate change (in Ukrainian), (2020). Natsionalnyy ekolohichnyy tsentr Ukrainy. Retrieved from: necu.org.ua/climate.
6. María J.Lapponi, Mariana B.Méndez, Jorge A.Trelles, Cintia W.Rivero (2022). Cell immobilization strategies for biotransformations. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 33.
7. Manswama Boro, Ashwani Kumar Verma, Dixita Chettri, Vinod KumarYata, Anil Kumar Verma (2022). Strategies involved in biofuel production from agro-based lignocellulose biomass. *Environmental Technology; Innovation*, 28.
8. Yi An Lim, Meng Nan Chong, Su Chern Foo, I.M.S.K. (2021). Ilankoon. Analysis of direct and indirect quantification methods of CO₂ fixation via microalgae cultivation in photobioreactors: A critical review . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 137.
9. Harun Chowdhury (2019). Third-generation biofuels from microalgae: a review *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 20, 39-44.
10. Dyachok V., Huhlych S., Katysheva V.V., Mandryk S.T. (2021). About the Optimal Ratio Inhibitor and Activators of Carbon Dioxide Sorption Process by Using Chlorophyll-synthesizing Chlorella microalgae *Journal of Ecological Engineering* , 22(5), 26–31
11. Dyachok V., Huhlych S., Katysheva V.V., Mandryk S.T. (2017). Absorption of carbon dioxide from a mixture of air with sulfur dioxide *Scientific works*, 81(1), 59-65. (in Ukrainian).
12. Dyachok V.V., Mandryk S.T., Huhlych S.I., Slyvka M.M. (2020). Study on the impact of activators in the presence of an inhibitor on the dynamics of carbon dioxide absorption by chlorophyll-synthesizing microalgae. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5), 189-196.
13. Chlorella in sewage treatment, (2020). Retrieved from: <https://hlorella.jimdo.com/>. (in Ukrainian)
14. Zolotaryova O.K., Shnyukova Ye.I., Syvash O.O., Mykhaylenko N.F. (2008). *Prospects for the use of microalgae in biotechnology*. In: O.K. Zolotaryovoa (Ed.) Alterpres, 234. (in Ukrainian)
15. Yalchko V., Kochubey V, Hnatyshyn Y., Dzyadevych B. and. Zaikov G. (2015). Investigation of Thermal Power Characteristics of Wood Pulp. The Chemistry and Physics of Engineering Materials – Two Volume Set.: Modern Analytical Methodologies. Apple Academic Press, USA. 1, 171–178.
16. Tsapko Y.V. (2011).The study of kinetic parameters during pyrolysis of fire protected wood by impregnating agents. *Fire safety*, 19, 163 - 169.

THERMAL ANALYSIS OF BIOMASS OF CHLOROPHYLL SYNTHESIZED MICROALGAE *CHLORELLA VULGARIS*

**Dyachok V., Doctor of Engineering Science, Professor,
Kochubei V., Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor;
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine**

Abstract. The paper presents ways to reduce the carbon footprint through the reuse of microalgae biomass as biofuel (related to bio-CCU). Processing of microalgae biomass into biochar is used for carbon sequestration, raw material for the production of thermal energy, as well as activated carbon and adsorption of toxic compounds from polluted air, water and soil. Biofuels are considered carbon neutral because the CO₂ released after they are burned is used by plants and algae for photosynthesis, which leads to carbon dioxide fixation. Obtaining energy by burning carbonized biomass of microalgae is based on the effect of carbon dioxide neutralization, which significantly distinguishes this method from known traditional methods, and does not cause environmental pollution with greenhouse gases. The results of complex thermogravimetric and differential thermal analyzes of the calorific value of biochar based on the biomass of chlorophyll-synthesizing microalgae *Chlorella vulgaris* obtained as a result of the sorption of greenhouse gases formed during the burning of solid, liquid or gaseous fuels. It was established that the biomass of microalgae obtained by absorbing carbon dioxide, a product of fuel combustion with sulfur dioxide impurities, has a greater heat-generating capacity compared to the biomass obtained by absorbing pure carbon dioxide. Combustion of microalgae biomass, which contains sulfur compounds in the internal volume of cells, which are formed as a result of the metabolism of sulfur dioxide, is accompanied by more significant exothermic effects. According to the results of thermal studies, it was established that the heat-generating capacity of such microalgae biomass exceeds the heat-generating capacity of aspen (*Populus tremula*), which is an alternative source of energy in the territory of Ukraine, and is close to the heat-generating capacity of the selectively bred energetic willow (*Salix Viminalis*).

Keywords: thermogravimetric analyses, differential thermal analyses, microalgae *Chlorella vulgaris*, greenhouse gases, alternative fuel.

Список використаної літератури

1. Vasylyshyn R.D. Energetics of forest ecosystems: main directions and trends of scientific research. Scientific bulletin of NLTU of Ukraine: coll. science and technology works –Lviv: RVV NLTU of Ukraine. 2013. 23(2), 31-36.
2. Лакида П.І., Василюшин Р.Д., Лашенко А.Г., Терентьев А.Ю та інші. Нормативи оцінки компонентів надземної фітомаси дерев головних лісотвірних порід України: довідник (нормативно-виробниче видання) – К. : Вид. ЕКО-інформ, 2011. 192.
3. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Сучний стан та перспективи розвитку біоенергетики України. Нетрадиційна енергетика. Пром. Теплотехника. 2012. 3, 73-79.
4. Івахів В. Енергетична верба як рішення для малих міст України. Українська енергетика. 2012. 12.
5. Climate change. Natsionalnyy ekolohichnyy tsentr Ukrainy. 2020. Retrieved from: necu.org.ua/climate.
6. Cell immobilization strategies for biotransformations / Lapponi M. J. et al. // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2022. № 33.
7. Strategies involved in biofuel production from agro-based lignocellulose biomass / Boro M. et al. // Environmental Technology; Innovation. № 28
8. Ilankoon. Analysis of direct and indirect quantification methods of CO₂ fixation via microalgae cultivation in photobioreactors: A critical review. / Yi A. L. et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. № 137.
9. Harun Chowdhury. Third-generation biofuels from microalgae: a review Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2019. 20, 39-44.
10. About the Optimal Ratio Inhibitor and Activators of Carbon Dioxide Sorption Process by Using Chlorophyll-synthesizing Chlorella microalgae / Dyachok V. et al. // Journal of Ecological Engineering. ., No. 5 Vol. 22. P. 26-31.
11. Absorption of carbon dioxide from a mixture of air with sulfur dioxide / Dyachok V. et al. // Scientific Works. 2017. ., No. 1 Vol. 81. P. 59-65.
12. Study on the impact of activators in the presence of an inhibitor on the dynamics of carbon dioxide absorption by chlorophyll-synthesizing microalgae. / Dyachok V. V. et al. // Journal of Ecological Engineering. 2020., No. 5 Vol. 21. P. 189-196.
13. Chlorella in sewage treatment (in Ukrainian), 2020. Retrieved from: <https://hlorella.jimdo.com/>.
14. Prospects for the use of microalgae in biotechnologyIn:, 234 / Zolotaryova O. K. et al. Zolotaryova O.K. Alterpres. 234 p.
15. Investigation of Thermal Power Characteristics of Wood Pulp. / Yalchko V. et al. // The Chemistry and Physics of Engineering Materials. № 1. P. 171-178.
16. Tsapko Y.V. The study of kinetic parameters during pyrolysis of fire protected wood by impregnating agents. Fire safety. 2011.19, 163 - 169.

Отримано в редакцію 05.06.2023
Прийнято до друку 26.09.2023

Received 05.06.2023
Approved 26.09.2023

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЕТАПУ ГІДРОЛІЗУ БІЛКІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ДИТЯЧИХ СУХИХ ГІПОАЛЕРГЕННИХ СУМІШЕЙ

Авдєєва Л.Ю., д.т.н., с.н.с., Декуша Г.В., к.т.н., ст. досл., Макаренко А.А., к.т.н., Козак М.М.
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ

Анотація. В статті наведено результати досліджень двоступеневого ферментативного гідролізу сумішей концентрату білкового із молочної сироватки (КСБ) та ізольованого соєвого білка (ІСБ) для удосконалення технології сухих гіпоалергенних сумішей для харчування дітей першого року життя.

В літературному огляді коротко окреслено основні результати світових досліджень щодо переваг та особливостей ферментативного гідролізу білків та способів їх сушіння на якісні показники готового продукту. Показано залежність функціональних властивостей та молекулярної маси гідролізатів КСБ та ІСБ від режимних параметрів та виду протеаз. Описано переваги та недоліки сушіння протеїнів розпилювальним та сублімаційним способами та доведено доцільність введення певних харчових речовин для зниження гіркої смаку гідролізатів за рахунок інкапсулювання і, відповідно, покращення органолептичних показників кінцевого продукту в сухій формі.

Експериментально досліджено вплив режимних параметрів на ступінь двостадійного гідролізу суміші КСБ та ІСБ (у масових співвідношеннях 1:1 та 2:1 відповідно). На першій стадії протеоліз проводили комплексним препаратом Протамекс впродовж 60 хв, на другій стадії – трипсином впродовж 30 хв. Сумарний ступінь гідролізу зразку суміші КСБ:ІСБ (1:1 відповідно) знаходиться в межах 80%, зразку суміші КСБ : ІСБ (2:1 відповідно) – 70–75%.

На основі отриманих результатів удосконалено технологічний етап гідролізу суміші КСБ та ІСБ, що дозволило знизити його тривалість та енерговитрати. Технологія передбачає наступні основні процеси: двостадійний гідроліз суміші КСБ та ІСБ, гомогенізацію суміші гідролізованих білків та всіх необхідних нутрієнтів в апаратах роторно-пульсаційного типу, сушіння розпилюванням при температурі повітря на вході в сушильну камеру $185 \pm 5^\circ\text{C}$, на виході – $85 \pm 5^\circ\text{C}$ до вмісту сухих речовин $94 \pm 2\%$.

Ключові слова: сироваткові білки, соєві білки, ферментативний гідроліз, розпилювальне сушіння.

Постановка проблеми. Гіпоалергенні адаптовані суміші на основі частково або повністю гідролізованих білків давно зарекомендували себе як ефективний засіб для змішаного або штучного вигодовування дітей грудного і раннього віку з алергією до молочних білків та білків сої. Найчастіше білковий компонент таких сумішей представлений частково або повністю гідролізованими білками молочної сироватки, оскільки вони, як і жіноче молоко, належать до альбумінового типу протеїнів, збалансовані за амінокислотним складом, характеризуються високою біологічною цінністю та легко засвоюються дитячим організмом. До складу сумішей входять також всі інші есенціально необхідні для розвитку дитини нутрієнти, склад і вміст яких намагаються максимально наблизити до жіночого молока.

В Україні найбільш відомі суміші на основі гідролізованих білків – це «Альфаре» («Нестле», Швейцарія), «Пепті-юніор», «Нутрілон гіпоалергенний», «Нутрилон-Пепті ТСЦ» («Нутриція», Нідерланди), «Прегестиміл» («Брістоль-Майерс Сквібб», США), «Frisoper AC» («Friso», Нідерланди), «Humana HA 1 с LC PUFA» («Humana», Нідерланди) та ін.

В Україні діє ряд нормативних документів щодо забезпечення дітей грудного та раннього віку високоякісним та безпечним дитячим харчуванням, в яких регламентуються норми харчування дітей різного віку, їх склад, порядок виробництва, державної санітарно-епідеміологічної експертизи та державної реєстрації, серед яких Закони України «Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів», «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо приведення законодавства України у сфері забезпечення дитячим харчуванням у відповідність з вимогами законодавства Європейського Союзу», наказ Міністерства охорони здоров'я України «Вимоги до безпечності та окремих показників якості дитячого харчування» та ін. Останні є новелою, прийнятою МОЗ України з метою адаптації законодавства України до директив Європейської Комісії 2006/141/ЄС від 22.12.2006 «Про початкове харчування для дітей грудного віку та подальше харчування», 2006/125/ЄС від 05.12.2006 та Директиви Європейського Парламенту та Ради ЄС 2009/39/ЄС від 06.05.2009 «Про харчові продукти, призначені для спеціального споживання».

Однак в Україні виробництво сухих адаптованих гіпоалергенних сумішей відсутнє, тому розвиток вітчизняних харчових технологій у цій галузі є гострою соціальною, науковою і виробничою проблемою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним з основних етапів виробництва гіпоалергенних сумішей є ферментативний гідроліз протеїнів, в результаті якого алергенні властивості білків знижуються або повністю втрачаються. Варіювання технологічних режимів даного процесу та ферментних препаратів дає

широке поле науковцям для встановлення нових результатів, які покращують розуміння особливостей процесу та дозволяють визначити функціональні властивості утворених пептидів, їх дію на організм, а також шляхи енергозбереження при їх виробництві. Крім того, якісні показники сумішей в значній мірі залежать і від способу сушіння. Деякі результати світових досліджень щодо особливостей гідролізу білків та способу сушіння з можливістю їх подальшого використання в дитячому харчуванні, наведено нижче.

В роботі [1] порівнювали три зразки сухих дитячих молочних сумішей, що містили: негідролізовані протеїни (сироваткові білки : казеїни, співвідношення 60 : 40 відповідно), частково гідролізовані казеїни і сироваткові білки та селективно гідролізований трипсином β -лактоглобулін. Перед розпилювальним сушінням (~55% сухих речовин) в'язкість сумішей з селективно гідролізованим β -лактоглобуліном була значно меншою (14,8 мПа·с) за в'язкість сумішей з негідролізованим (48,6 мПа·с) та частково гідролізованим білком (27,6 мПа·с). Змочуваність та температура склування порошків суттєво не відрізнялась. Тому автори рекомендують використовувати саме селективно гідролізований трипсином β -лактоглобулін у сухих сумішах, оскільки це дозволить знизити енерговитрати при розпилювальному сушінні сумішей.

В роботі [2] показано, що в результаті гідролізу β -лактоглобуліну трипсином, утворюються пептидні фрагменти, які здатні інгібувати специфічні ферменти і, таким чином, збільшувати секрецію інсуліну та знижувати вироблення глюкагону, що доводить можливість використання протидіабетичних препаратів на основі сироваткових білків молока.

За даними [3] КСБ оброблений Нейтразою (штам *Bacillus licheniformis*, «Novozymes», Данія) та папаїном можуть збільшити абсорбцію заліза (12,8% порівняно з 3,8 % контролем). Вміст вільних амінокислот в гідролізатах оброблених папаїном, за виключенням тирозину і фенілаланіну, був вищий ніж в гідролізатах оброблених Алкалазою.

Вплив Алкалази та Нейтрази на фізико-хімічні та гелеутворюючі властивості гідролізатів КСБ (ГКСБ), отриманих при температурах 5 і 50 °С досліджено у роботі [4]. Найвищі швидкість та ступінь гідролізу відмічено при гідролізі КСБ Алкалазою при температурі 50 °С. Однак, автори наголошують, що через 4 год гідролізу КСБ Алкалазою (10 % сухих речовин) при температурі 5 °С утворений ГКСБ мав ступінь гідролізу та молекулярно-масовий розподіл подібний тому, що мають ГКСБ отримані при 5 °С і 50 °С Нейтразою. Температура гелеутворення ГКСБ, утворених Алкалазою, була нижчою, ніж у ГКСБ, отриманих під дією Нейтрази. Всі ГКСБ мали нижчі значення в'язкості ніж КСБ. При температурі 50 °С ГКСБ Нейтрази характеризувались нижчою мутністю, ніж ГКСБ Алкалази.

Ефективність гідролізу протеїнів молочної сироватки препаратами фірми «Novozymes» (Данія) досліджено у роботах [5, 6]. Найефективнішою виявилася протеаза R, середню активність розщеплення проявили протеази А та М, а також Нейтраза та Алкалаза, найнижча активність була у Флаворзім 100L. Протеази А, М та Flavourzyme краще розщеплювали білковий субстрат при його більшому розведенні. В [7] показано, що високі антиоксидантні властивості мав ГКСБ утворений Алкалазою та висушений розпилюванням.

З огляду з вищенаведеного можна зробити висновок, що КСБ найкраще піддається гідролізу Алкалазою, а також Протамексом, оскільки до останнього входить і штаб, що міститься в Алкалазі (*Bacillus licheniformis*).

Серед рослинних білків соєві протеїни вирізняються найбільш повноцінним складом незамінних амінокислот і високими функціональними властивостями і тому високоякісні ІСБ та їх гідролізати можуть входити до складу дитячих сумішей.

Авторами [8] визначено, що гідролізати соєвих білків (ГСБ), утворені дією Протамекс мали найвищу розчинність (84 %), емульгуючу активність (95м²/г), піноутворювальну (94 %) та жирутримуючу здатності (4,5 г/г), а також антиоксидантну активність (62 %). Найкращі показники водоутримуючої здатності було отримано у ГСБ Алкалазою. У вихідному соєвому протеїні фракція молекулярною масою 15–17 кДа становить понад 93 %, менше 150 Да – лише 0,03 %. Після гідролізу Алкалазою та Протамексом основна частка ГСБ містила низькомолекулярні пептиди – 150–700 Да.

Хоча ГСБ володіють хорошими фізіологічними та функціональними властивостями, відомо, що для них характерний гіркий присмак. У дослідженні [9] ГСБ утворені Алкалазою мали найвищий показник гіркоти, за нею слідував зразок ГСБ утворений Нейтразою. Найменшу гіркоту відмічено у всіх зразках ГСБ утворених Флаворзімом, тоді як після гідролізу Протамексом та Алкалазою показник гіркоти був у 4 та 16 разів вищим за ГСБ, що були отримані Фаворзімом.

На якість та гіркоту сухих сумішей впливає ряд інших процесів, в тому числі і спосіб їх сушіння, серед яких найбільш досліджені сублімаційний та розпилювальний. У роботі [10] описано спосіб отримання мікрокапсульованого ГКСБ зі зниженим гірким смаком та усунутою гігроскопічністю. Зразки висушували розпилювальним або сублімаційним способами з використанням якості мікрокаплюючого носія КСБ або суміш КСБ та альгінату натрію. Хоча обидва способи сушіння не чинили негативного впливу на імуномодуючу активність ГКСБ у порівнянні з КСБ, а гіркота була значно нижчою, ніж у вихідного некапсульованого ГКСБ. Однак, як показав морфологічний аналіз зразків, при сублімаційному способі сушіння ГКСБ не можуть бути інкапсульованими, як при розпилювальному. Це вказує на те, що сушіння ГКСБ розпилювальним способом з використанням КСБ або суміші КСБ з альгінатом натрію сприяє зменшенню гіркового смаку та гігроскопічності без погіршення імунорегуляторної активності.

Автори [11] доводять доцільність використання ГКСБ (ступінь гідролізу 10 %), що кон'югований з мальтодекстрином (МД) (декстрозний еквівалент 10) при інкапсулюванні пробіотиків *Bifidobacterium animalis* та *Lactobacillus acidophilus* (1:1 відповідно) розпилювальним сушінням при температурах на вході в камеру 200 °С та на виході – 90 °С. Середня кількість пробіотиків до і після розпилювального сушіння становила $10,59^{10}$ КОЕ/мл і $8,98^{10}$ КОЕ/г відповідно, що вказує на хороше збереження їх життєздатності після висушування. Зразки з кон'югованим ГКСБ мали кращу розчинність та змочуваність, що дає підстави їх вважати багатообіцяючим носієм пробіотиків у продуктах.

Іншим способом вирішення проблеми гіркоти і підвищення стабільності ГКСБ є інкапсулювання ГКСБ розпилювальним сушінням з використанням в якості інкапсулянтів МД або суміші МД з β -циклодекстрином. Інкапсульовані ГКСБ мали значно нижчі показники гіркоти, гігроскопічності та більш високу температуру склування. Інкапсулювання не чинило негативного впливу на розчинність зразків ГКСБ [12].

Метою роботи є визначення раціональних параметрів двостадійного ферментативного гідролізу суміші сироватково-соевих білків для підвищення енергозбереження та удосконалення технології сухих гіпоалергенних сумішей з гідролізованим білком для харчування дітей першого року життя.

Матеріали і методи досліджень. ІСБ Supro 1751 («Solae Europe, S.A.», USA) з вмістом білка 90 %, жиру 0,5 %, золи 5,5 %. КСБ WPC 80 («Agri-MarkInc.», USA) з вмістом білка 82,5 %, жиру 5,2 %, золи 2,3 %. Ферментні препарати: Протамекс ("Novozymes", Данія) та трипсин кристалічний («Біофарма», Україна).

Вміст продуктів гідролізу визначали спектрофотометричним методом, що базується на здатності ароматичних амінокислот поглинати ультрафіолетове випромінювання при довжині хвилі $\lambda=280$ нм [13]. Ступінь гідролізу визначали у відсотках по відношенню до загального вмісту протеїнів у зразку.

Результати досліджень. Проведено дослідження щодо визначення раціональних режимних параметрів двостадійного ферментативного гідролізу суміші КСБ та ІСБ для подальшого використання утворених гідролізатів в гіпоалергенних сумішах для харчування дітей першого року життя.

Першу стадію гідролізу сумішей КСБ та ІСБ (з масовими співвідношеннями 1:1 та 2:1 відповідно) вели комплексним ферментним препаратом Протамекс, другу стадію – трипсином.

На рис. 1. наведено залежність ступеня гідролізу розчину сумішей КСБ та ІСБ з масовими концентраціями $C_6=6$ % та $C_6=9$ % та з масовою концентрацією Протамексу $C_{\text{Протамекс}}=2$ % від часу.

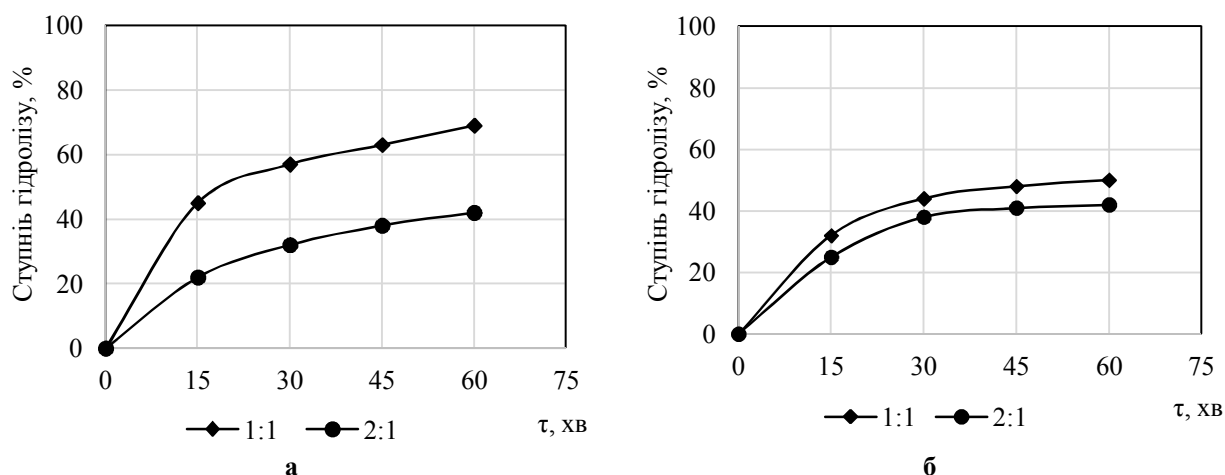


Рис. 1 – Залежність ступеня гідролізу сумішей КСБ та ІСБ при масових співвідношеннях 1:1 та 2:1 відповідно від часу при $C_{\text{Протамекс}}=2\%$: а – $C_6=6\%$, б – $C_6=9\%$

Як видно з рис. 1, ступінь гідролізу суміші білків ІСБ та КСБ у водному розчині з $C_6=6\%$ був вищим у обох зразках і знаходився в межах 40% та 63% (рис. 1а) порівняно із сумішами з $C_6=9\%$ (рис. 1б), в яких ступінь гідролізу в середньому не перевищував 40% та 50%. Однак, хоча гідролізати, утворені при $C_6=6\%$ мали вищий ступінь гідролізу, що обумовлено кращим доступом ферменту до субстрату у водному середовищі, їх виробництво потребує підвищених енерговитрат на випарювання надлишкової вологи в процесі концентрування. Тому наступні дослідження було проведено з $C_6=9\%$.

Збільшивши масову концентрацію ферментного комплексу Протамекс до $C_{\text{Протамекс}}=5\%$ та провівши гідроліз при $C_6=9\%$, $\tau=60$ хв, величина ступеня гідролізу зразків КСБ:ІСБ (2:1 відповідно) в середньому зростає з 38–41% до 57–60%, зразків КСБ:ІСБ (1:1 відповідно) – з 48–50% до 73–75% (рис. 2). Після 60 хв гідролізу зміна у величині ступеня гідролізу обох зразків була незначною, тому подальше ведення процесу є недоцільним. Зазначені умови склали першу стадію гідролізу.

Другу стадію розщеплення суміші протеїнів вели трипсином $C_{\text{трипсин}}=1\%$ впродовж $\tau=30$ хв (рис. 3).

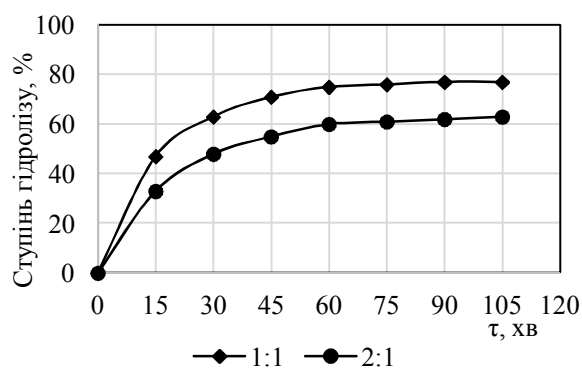


Рис. 2 – Залежність ступеня гідролізу сумішей КСБ та ІСБ (1:1 та 2:1 відповідно) на 1-й стадії Протамексом від часу ($C_0=9\%$, $C_{\text{Протамекс}}=5\%$)

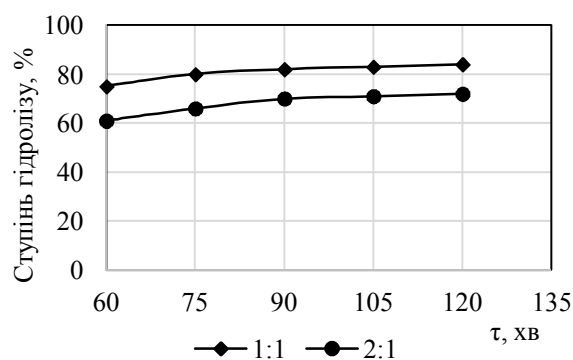


Рис. 3 – Залежність ступеня гідролізу сумішей КСБ та ІСБ (1:1 та 2:1 відповідно) на 2-й стадії трипсином від часу ($C_0=9\%$, $C_{\text{трипсин}}=1\%$)

З рис. 3 можна констатувати, що загальний ступінь гідролізу зразка КСБ:ІСБ (1:1 відповідно) через 90 хв процесу становив 80–82 %, зразка КСБ:ІСБ (2:1 відповідно) – 73–75 %. Після цього часу подальше наростання продуктів гідролізу було незначним.

Інститут технічної теплофізики НАН України має багаторічний позитивний досвід створення та впровадження вітчизняних енергоефективних технологій сумішей з гідролізованими білками тваринного та рослинного походження в сухій формі, в тому числі для дитячого харчування [14, 15]. На основі результатів проведених досліджень гідролізу суміші білків було удосконалено енергоощадну технологію сухих гіпоалергенних сумішей з гідролізованим білком для харчування дітей першого року життя. Основні етапи виробництва сумішей передбачають:

- приготування та гідромеханічну обробку у роторно-пульсаційному апараті (РПА) водного розчину суміші КСБ та ІСБ при масовому співвідношенні 1:1 або 2:1 відповідно, що забезпечує збалансований склад незамінних амінокислот [14];
- проведення послідовного двостадійного процесу гідролізу протеолітичними ферментами (Протамекс, трипсин) із застосуванням раціональних теплотехнологічних режимів [15];
- охолодження до температури 50 °C;
- гомогенізацію в РПА суміші білків, ліпідів, вуглеводів, вітамінів, мінеральних речовин та ін.;
- сушіння отриманої суміші розпилюванням при температурі повітря на вході в сушильну камеру 185±5 °C, на виході – 85±5 °C до вмісту сухих речовин 94±2 %.

За рахунок використання РПА приготування водного розчину білкового субстрату дозволяє зменшити енерговитрати на даний процес та значно збільшити дисперсність, розкрити площу поверхні частинок для активного впливу ферментів, забезпечити високу якість і однорідність отриманої дисперсії, зменшити тривалість впливу фізичних факторів (високого тиску і температури) на білкові речовини у порівнянні з традиційними шнековими відновлювачами. Проведення двостадійного протеолізу забезпечує отримання високого ступеня гідролізу білків, зменшення тривалості ферментативної реакції в декілька разів та покращення смакових властивостей гідролізату за рахунок зниження гіркої присмаку. Гомогенізація готової до сушіння суміші білків з іншими необхідними компонентами в РПА дозволяє отримати однорідну дисперсію високої якості, зменшує тривалість впливу високого тиску і температури на біологічно активні речовини при диспергуванні до декількох секунд зберігаючи біологічну цінність сировини. Сушіння розпилюванням значно скорочує тривалість процесу виробництва сумішей для дитячого харчування з отриманням високих технологічних і смакових властивостей кінцевого продукту.

Висновки. Проведені дослідження дозволили визначити раціональні теплотехнологічні параметри процесу двостадійного ферментативного гідролізу комплексом ферментів Протамекс та трипсином суміші КСБ та ІСБ до ступеня гідролізу не менше 70–75% в залежності від потреб. На основі отриманих результатів нами було запропоновано удосконалення етапу гідролізу, що дозволило знизити його тривалість та енерговитратність у енергозберігаючій технології сухих адаптованих гіпоалергенних сумішей для харчування дітей першого року життя.

References

1. Murphy, E.G., Roos, Y.H., Hogan, S.A., Maher, P.G., Flynn, C.G., Fenelon, M.A. (2015). Physical stability of infant milk formula made with selectively hydrolysed whey proteins. *International Dairy Journal*, 40, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2014.08.012>
2. Agarkova, E.Y., Ryazantseva, K.A. (2020). Anti-Diabetic Activity of Whey Proteins. *Food Processing Techniques and Technology*. 50(2), 306-318. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-306-318>

3. Ou, K., Liu, Y., Zhang, L., Yang, X., Huang, Z., Nout, M.J.R., Liang, J. (2010). Effect of Neutrase, Alcalase, and Papain Hydrolysis of Whey Protein Concentrates on Iron on iron uptake by Caco-2 cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 58(8), 4894-900. <https://doi.org/10.1021/jf100055y>
4. Dermiki, M., FitzGerald, R.J. (2020). Physicochemical and gelling properties of whey protein hydrolysates generated at 5 and 50°C using Alcalase® and Neutrase®, effect of total solids and incubation time. *International Dairy Journal*, 110, 104792. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104792>
5. Petiukh H.P., Romanova, N.A., Harkava, K.M. (2009). Efektyvnist hidrolizu proteiniv molochnoi syrovatky serynovymy proteazamy. *Visnyk NAU*, 39(2), 94-96. <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/28950>
6. Eberhardt, A., López, E.C., Marino, F., Mammarella, E.J., Manzo, R.M., Sihufe, G.A. (2021). Whey protein hydrolysis with microbial proteases: Determination of kinetic parameters and bioactive properties for different reaction conditions. *International Journal of Dairy Technology*, 74(3), 489-504. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12795>
7. Kleekayai, T., O'Neill, A., Clarke, S., Holmes, N., O'Sullivan, B., FitzGerald, R.J. (2022). Contribution of Hydrolysis and Drying Conditions to Whey Protein Hydrolysate Characteristics and In Vitro Antioxidative Properties. *Antioxidants (Basel)*, 11(2), 339. <https://doi.org/10.3390/antiox11020399>
8. Islam, M., Huang, M., Islam, M.S., Fan, B. (2022). Influence of the Degree of Hydrolysis on Functional Properties and Antioxidant Activity of Enzymatic Soybean Protein Hydrolysates. *Molecules*, 27(18), 6110. <https://doi.org/10.3390/molecules27186110>
9. Seo, W.H., Lee, H.G., Baek, H.H. (2008). Evaluation of bitterness in enzymatic hydrolysates of soy protein isolate by taste dilution analysis. *Journal of Food Science*. 73(1), S41-6. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00610.x>
10. Ma, J., Mao, X.-Y., Wang, Q., Yang, S., Zhang, D., Chen, S.-W., Li Y.-H. (2014). Effect of spray drying and freeze drying on the immunomodulatory activity, bitter taste and hygroscopicity of hydrolysate derived from whey protein concentrate. *LWT – Food Science and Technology*, 56(2), 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.019>
11. Minj, S., Anand, S. (2022). Development of a spray-dried conjugated whey protein hydrolysate powder with entrapped probiotics. *Journal of Dairy Science*, 105(3), 2038-2048. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20978>
12. Yang, S., Mao, X.-Y., Li, F.-F., Zhan, D., Leng, X.-J., Ren, F.-Z., Teng G.-X. (2012). The improving effect of spray-drying encapsulation process on the bitter taste and stability of whey protein hydrolysate. *European Food Research and Technology*, 235(1), 91-97. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1735-6>
13. Lazarus, W. (1973). Purification of plant extracts for ion-exchange chromatography of free amino acids, *Journal of Chromatography A*, 87 (1), 169-178
14. Avdieieva, L., Zhukotskyi, E. Dekusha, H. (2019). Influence of technological parameters on the degree of enzymatic hydrolysis of high-protein products. *Ukrainian Food Journal*, 8(4), 828-839
15. Sposib oderzhannia sumishs dlia funktsionalnoho kharchuvannia ditei hrudnoho viku: MPK A23C 9/20, A23C 1/04, A23J 3/08, A23J 3/14, A23J 3/34. a 2020 07406; zaiavl. 20.11.2020

IMPROVEMENT IN STAGE OF PROTEOLYSIS IN THE TECHNOLOGY OF DRY HYPOALLERGENIC FORMULAE FOR INFANT NUTRITION

**Avdieieva L.Y., SciD, s.r.of., Dekusha H.V., PhD, s. res., s.r.of., Makarenko A.A., PhD, Kozak M.M.
Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Sciences, Kyiv**

Abstract. *The article presents the results of studies of two-stage enzymatic hydrolysis of mixtures of whey protein concentrate (WPC) and isolated soy protein (ISP) to improve the technology of dry hypoallergenic formulas for infant nutrition.*

The literature review briefly describes the main results of some world studies on the advantages and features of the enzymatic hydrolysis of proteins and methods of their drying on the quality indicators of the final product. The dependence of functional properties and molecular weight of WPC and ISP hydrolysates on technological parameters and type of proteases is shown. The advantages and disadvantages of drying proteins by spray and freeze-drying methods are described and the expediency of introducing certain nutrients to reduce the bitter taste of hydrolysates due to encapsulation and accordingly improve the organoleptic characteristics of final products in dry form is proved.

The effect of technological parameters on the degree of two-stage hydrolysis of a mixture of WPC and ISP was experimentally studied (in mass ratios of 1:1 and 2:1, respectively). At the first stage, proteolysis was carried out with the complex preparation Protamex for 60 min; at the second stage, with trypsin for 30 min. The total degree of hydrolysis of a mixture of WPC:ISP (1:1, respectively) is within 80 %, a mixture of WPC:ISP (2:1, respectively) is 70–75 %.

The results obtained made it possible to improve the technological stage of the hydrolysis of a mixture of WPC and ISP and, accordingly, to reduce its duration and energy consumption. The technology provides for the following main processes: two-stage hydrolysis of a mixture of WPC and ISP, homogenization of a mixture of hydrolyzed proteins and all necessary nutrients in rotary-pulsation devices, spray drying at an air temperature at the inlet to the drying chamber of $t=185\pm5^{\circ}\text{C}$, at the outlet of $t=\pm5^{\circ}\text{C}$ up to a solids content of $94\pm2\%$.

Key words: whey proteins, soy proteins, proteolysis, spray drying.

Список використаної літератури

1. Murphy E. G., Roos Y. H., Hogan S. A., Maher P. G., Flynn C. G. et al. Physical stability of infant milk formula made with selectively hydrolysed whey proteins // *International Dairy Journal* Vol. 40, 2015, P. 39–46.
2. Agarkova E. Y., Ryazantseva K. A. Anti-Diabetic Activity of Whey Proteins // *Food Processing Techniques and Technology*. 2020., No. 2 Vol. 50. P. 306–318.
3. Ou K., Liu Y., Zhang L., Yang X., Huang Z., Nout M. J. R., Liang J. Effect of Neutrase, Alcalase, and Papain Hydrolysis of Whey Protein Concentrates on Iron on iron uptake by Caco-2 cells // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2010., No. 8 Vol. 58. P. 4894–900.
4. Dermiki M., FitzGerald R. J. Physicochemical and gelling properties of whey protein hydrolysates generated at 5 and 50°C using Alcalase® and Neutrase®, effect of total solids and incubation time // *International Dairy Journal*. 2020., Vol. 110. P. 104792.
5. Петюх Г. П., Романова Н. А., Гаркава К. М. Ефективність гідролізу протеїнів молочної сироватки сериновими протеазами // *Вісник НАУ*. 2009., No. 2 Vol. 39. С. 94–96.
6. Eberhardt A., López E. C., Marino F., Mammarella E. J., Manzo R. M., Sihufe G. A. Whey protein hydrolysis with microbial proteases: Determination of kinetic parameters and bioactive properties for different reaction conditions // *International Journal of Dairy Technology*. 2021., No. 3 Vol. 74. P. 489–504.
7. Kleekayai T., O'Neill A., Clarke S., Holmes N., O'Sullivan B., FitzGerald R. J. Contribution of Hydrolysis and Drying Conditions to Whey Protein Hydrolysate Characteristics and In Vitro Antioxidative Properties // *Antioxidants (Basel)*. 2022., No. 2 Vol. 11. P. 339.
8. Islam M., Huang M., Islam Md. S., Fan B. Influence of the Degree of Hydrolysis on Functional Properties and Antioxidant Activity of Enzymatic Soybean Protein Hydrolysates // *Molecules*. 2022., No. 18 Vol. 27. P. 6110.
9. Seo W. H., Lee H. G., Baek H. H. Evaluation of bitterness in enzymatic hydrolysates of soy protein isolate by taste dilution analysis // *Journal of Food Science*. 2008., No. 1 Vol. 73. P. S41–6.
10. Ma J., Mao X.-Y., Wang Q., Yang S. Effect of spray drying and freeze drying on the immunomodulatory activity, bitter taste and hygroscopicity of hydrolysate derived from whey protein concentrate // *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. 2014., No. 2 Vol. 56. P. 296–302.
11. Minj S., Anand S. Development of a spray-dried conjugated whey protein hydrolysate powder with entrapped probiotics // *Journal of Dairy Science*. 2022., Iss. 3 Vol. 105, P. 2038–2048.
12. Yang S., Mao X.-Y., Li F.-F., Zhan D. The improving effect of spray-drying encapsulation process on the bitter taste and stability of whey protein hydrolysate // *European Food Research and Technology*. 2012., No.1 Vol. 235.
13. Lazarus W. Purification of plant extracts for ion-exchange chromatography of free amino acids // *Journal of Chromatography A*. 1973., No 1 Vol. 87, P. 169–178.
14. Avdieieva L., Zhukotskyi E., Dekusha H. Influence of technological parameters on the degree of enzymatic hydrolysis of high-protein products // *Ukrainian Food Journal*. 2019., No. 4 Vol. 8. P. 828–839.
15. Спосіб одержання суміші для функціонального харчування дітей грудного віку: МПК A23C 9/20, A23C 1/04, A23J 3/08, A23J 3/14, A23J 3/34. а 2020 07406; заявл. 20.11.2020.

Отримано в редакцію 22.06.2023
Прийнято до друку 26.09.2023

Received 22.06.2023
Approved 26.09.2023

ІНТЕНСИВНІСТЬ МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ СУШІННІ КОЛОЇДНИХ РОЗЧИНІВ ТА РІДКИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ

Турчина Т.Я., канд. техн. наук, стар. наук. співр., Малецька К.Д. д-р техн. наук, стар. наук. співр., Авдєєва Л.Ю., д-р. техн. наук, стар. наук. співр., Макаренко А.А., канд. техн. наук
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ.

Анотація. Стаття присвячена аналітичним дослідженням інтенсивності масопереносу при зневодненні одиничних крапель різних за фізико-хімічним складом продуктів, одержаних у рідкій формі з зернової та плодово-овочевої сировини. Колоїдні розчини в дослідженнях представлені розчинами ячмінно-солодового екстракту з вмістом сухих речовин 25 % і 35 %, а колоїдні гетерогенні системи – томатним пюре з вмістом сухих речовин 18 % і томатною пастою – 27 %.

Мета роботи полягала у визначенні впливу двох факторів: температурних режимів сушіння та концентрації сухих речовин на інтенсивність масопереносу при зневодненні колоїдних розчинів та колоїдних гетерогенних систем за експериментальними даними кінетики сушіння одиничних крапель в системі «крапля – парогазове середовище».

Аналітичні дослідження показали, що при сушінні гетерогенних систем більший вплив на інтенсивність масопереносу чинить концентраційний фактор. Показано, як збільшення вмісту сухих речовин до 27% призводить до зменшення інтенсивності масопереносу при сушінні, що викликано значним зниженням дифузійної спроможності гетерогенної системи у більш концентрованій формі.

Встановлено, що температурний фактор чинить більший вплив на інтенсивність масопереносу в колоїдних розчинах, ніж в гетерогенних системах: при $T_n = 180^\circ\text{C}$ інтенсивність процесу на 20 % вища.

Порівняльним аналізом тепломасообмінних характеристик сушіння різних за фізико-хімічним складом рідких продуктів близького вмісту сухих речовин визначено, що для більшої ефективності сушіння колоїдних гетерогенних систем з плодово сировини температурні режими мають бути децю вищі за температурні режими сушіння колоїдних розчинів ЯСЕ. Показано, що інтенсифікації тепломасопереносу при сушінні гетерогенних систем можна досягти зменшенням вмісту сухих речовин, наприклад, до 18 %, як в пюре.

Ключові слова: кінетика сушіння, температура теплоносія, інтенсивність масопереносу, колоїдні розчини, гетерогенні системи.

Постановка проблеми. Виходячи з необхідності одержання цілого ряду нового асортименту харчових продуктів з високою біоактивністю в порошковій формі, більшість з яких представляють собою колоїдні або колоїдні гетерогенні системи, для яких характерною ознакою є низька дифузійна спроможність та інші фізико-хімічні властивості (термопластичність, гігроскопічність), важливим стає питання оптимізації процесів розпилювального сушіння та рентабельності їх виробництва.

У зв'язку з цим необхідна більш детальна інформація щодо кінетики процесів тепломасообміну окремої краплинки (частинки) з високотемпературним теплоносієм та оцінки рівня внутрішнього тепломасопереносу, який протікає з одночасним процесом структуроутворення сухої частинки [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Все більш актуальним стає одержання продуктів оздоровчого та функціонального призначення з натуральної природної сировини у порошковій формі, що вимагає наукового обґрунтування теплотехнологічних режимів розпилювального сушіння для запобігання відкладень в камерах сушильних установок та подовження терміну їх безперервної експлуатації [1-6].

В основі концепції виробництва продуктів оздоровчого і функціонального призначення, розробленої науковою спільнотою провідних країн світу у зв'язку з небезпечним для здоров'я людей забрудненням навколишньої екосистеми, закладено використання виключно натуральної сировини без будь-яких хімічних або синтетичних добавок [6]. Одержані в процесі переробки зернової або плодової сировини рідинні продукти – це колоїдні розчини (екстракти, соки, соєве молоко) або колоїдні гетерогенні (мікрогетерогенні) системи (суспензії, пюре, пасти), процес сушіння яких може ускладнюватись як за рахунок особливостей структурування в одержаній рідкій формі, так і за рахунок таких фізико-хімічних факторів, як кислотність, дисперсність нерозчинних компонентів, в'язкість та термопластичність порошку [1, 6, 8, 9].

Ячмінно-солодовий екстракт, як і плодове пюре або паста, є біополімерами з вище зазначеними властивостями, зокрема, малою дифузійною спроможністю у більш концентрованій формі, через що вони належать до складних об'єктів розпилювального сушіння, схильних до відкладень в камері розпилювальної сушарки [6, 8]. Проте використання їх у складі продуктів оздоровчого і функціонального призначення обумовлене багатим вмістом корисних для здоров'я людини речовин. Так, враховуючи унікальність ячмінно-солодового екстракту, в якому поряд з багатим амінокислотним, білковим, вітамінним і мінеральним складом понад 80% загальної маси сухих речовин складають полісахариди, в т.ч. мальтоза, глюкоза, фруктоза, декстрини та

ін.[5, 8], виробництво його у порошковій формі як самостійного продукту або у поєднанні з білками тваринного або рослинного походження доволі актуальне.

Необхідність у проведенні даних аналітичних досліджень викликана тим, що колоїдні і колоїдні гетерогенні системи на рослинній основі при розпилювальному сушінні зазвичай проявляють схильність до відкладень, обумовлену наявністю речовин низької температури плавлення [5, 6, 8]. Проте, якщо одержання сипкої форми порошків ячмінно- та полісолодових екстрактів в розпилювальних сушарках досягалось охолодженням порошку [6, 8], то одержання порошків з плодової сировини без приведення її до певного ступеня дисперсності і без застосування спеціальних структуруючих і мікрокапсулюючих добавок практично неможливо [6, 8].

Визначення відмінностей при розпилювальному сушінні цих двох видів рідинних продуктів вимагає більш глибокого вивчення механізмів тепломасопереносу при їх зневодненні для інтенсифікації процесу і підвищення якості порошкового продукту.

Мета роботи полягала в проведенні аналітичних досліджень впливу температурних режимів сушіння та вмісту сухих речовин на інтенсивність масопереносу при зневодненні крапель різних за фізико-хімічним складом рідинних матеріалів: колоїдних розчинів ячмінно-солодового екстракту та гетерогенних систем з плодово-овочевої сировини на основі експериментальних даних.

Викладення основних результатів досліджень. Аналітичні дослідження проводились за експериментальними даними з кінетики сушіння крапель різних за фізико-хімічним складом рідинних матеріалів, одержаними в системі «крапля-парагазове середовище» на експериментальному стенді зневоднення у статичних умовах [5, 8]: гетерогенних систем з плодово-овочевої сировини: №1 – томатне пюре з $C_0=18,0\%$, №2 – томатної пасти з $C_0=27,0\%$ (далі по тексту ТП-18 і ТП-27); колоїдних розчинів ячмінно-солодового екстракту, отриманих з концентрату ЯСЕ розведенням водою до C_0 : №3 – 25 %, №4 – 35 % (далі по тексту ЯСЕ-25 і ЯСЕ-35).

В процесі розпилювального зневоднення на мікрокраплинки рідинного матеріалу мають вплив як зовнішні, так внутрішні чинники [1, 5]. Серед зовнішніх чинників ключову роль відіграють *температурні режими сушіння*, а серед внутрішніх – одним з основних вважається *концентраційний фактор*, лімітований в'язкістю рідкого матеріалу. Основною рушійною силою переносу вологи в матеріалі, як відомо [1, 5], є концентраційний градієнт.

У зв'язку з цим, взявши за основу експериментальні дані [6, 8], саме за цими двома чинниками впливу проведемо порівняльний аналіз тепломасообмінних характеристик сушіння крапель різних за фізико-хімічним складом рідинних матеріалів, наведених у таблиці: колоїдних гетерогенних систем з плодової сировини: №1 - ТП-18 (томатне пюре) і №2 - ТП-27(томатна паста); колоїдних розчинів ячмінно-солодового екстракту: №3 – ЯСЕ-25 і №4 - ЯСЕ-35. Процес сушіння крапель цих двох видів рідинних продуктів проводився при температурі теплоносія 160°C та 180°C . Для кращої візуалізації характеру протікання процесу термо- і масограми сушіння крапель ЯСЕ наведені на рис. 1.

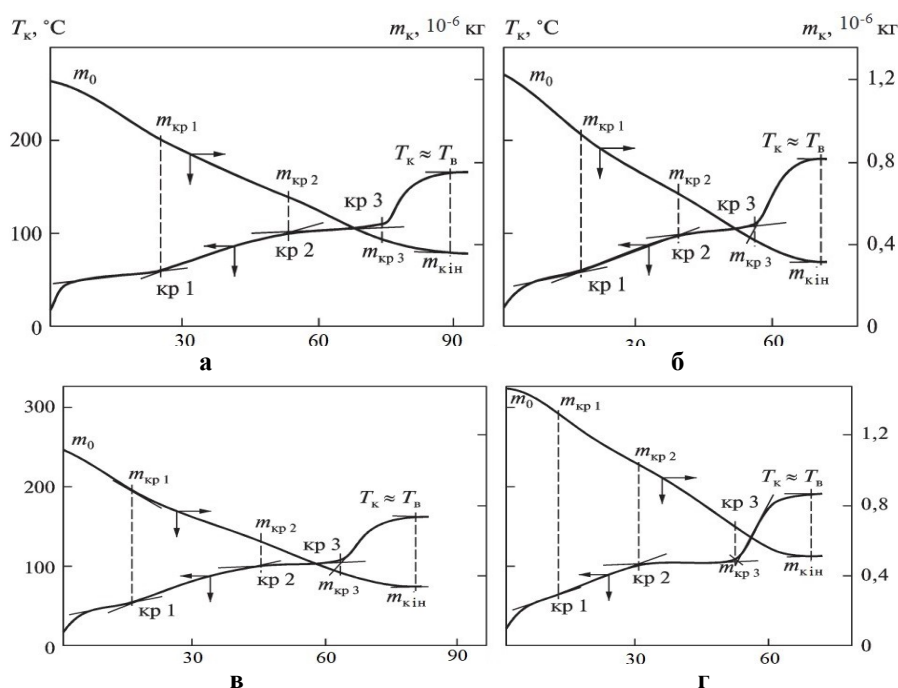


Рис. 1 – Термо- і масограми сушіння одиничних крапель колоїдних розчинів ячмінно-солодового екстракту з вмістом сухих речовин: а, б) $C_0=25\%$; в, г) $C_0=35\%$ при температурі теплоносія: а, в) $T_n=160^\circ\text{C}$; б, г) $T_n=180^\circ\text{C}$

Як видно з термо- і масограм (рис. 1), процес зневоднення крапель колоїдних розчинів ЯСЕ, як і крапель колоїдних гетерогенних систем – томатного пюре (ТП-18) і пасти (ТП-27), протікав у два періоди:

- випарювальному, де волога видалялась з вільної поверхні при температурі «вологого» термометру,
- і сушильному за умов збільшення температури краплі, викликаного формуванням поверхневої оболонки (кірочки) з виділених на її поверхні зародків сухої фази.

Характер термограм сушіння крапель томатних пюре і пасти відрізнявся від термограм сушіння крапель колоїдних розчинів ЯСЕ значно більшою тривалістю випарювального періоду, яка складала $\tau_{кр1}/\tau_{заг} \geq 0,5$, що характерно для колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Для колоїдних розчинів ЯСЕ тривалість випарювального періоду, як видно з термограм (рис. 1) складає $\tau_{кр1}/\tau_{заг} \leq 0,25-0,30$.

Як видно на термограмах (рис. 1) зі збільшенням вмісту сухих речовин і з підвищенням температури теплоносія від 160 °С до 180 °С крапка кр.1, яка поділяє випарювальний і сушильний періоди, зміщується до початку процесу з відповідним зменшенням крапки $m_{кр1}$ на масограмах, що свідчить про збільшення вологовмісту u_{th1} в крапках на момент початку сушильного періоду. За таких умов відбувається подовження сушильного періоду за рахунок збільшення його складових: стадій кіркоутворення (відрізок термограми між критичними крапками кр.1 та кр.2) та кипіння (відрізок термограми між критичними крапками кр.2 та кр.3), викликаного опором дифузійному процесу масопереносу (вологпереносу) з боку утвореної на поверхні крапель оболонки (кірочки) сухої фази. При цьому паропровідними властивостями поверхневої оболонки (кірочки) визначається інтенсивність процесу вологпереносу при зневодненні.

Випарювальний період. Кінетичні залежності інтенсивності масопереносу у випарювальному періоді $(dm_k/d\tau)_{вип} = f(T_n)$ обох видів рідинних матеріалів, одержані за експериментальними даними [5, 8], наведені на рис 2. Як видно з наведених залежностей (рис. 2) вплив концентраційного та температурного факторів на інтенсивність масопереносу у випарювальному періоді проявляється для цих двох видів матеріалів по-різному. Якщо в гетерогенних системах з підвищенням показників C_0 (рис. 2, а) від 18 % (крива 1) до 27 % (крива 2), інтенсивність масопереносу незалежно від температури теплоносія була дещо нижчою (на 8%), то з підвищенням температури від 160 °С до 180 °С для обох продуктів - збільшилась на 15 %.

При зневодненні колоїдних розчинів (рис. 2, б) показники C_0 взагалі не впливали на інтенсивність масопереносу у цьому періоді: залежності 3 і 4 розташовані на графіку впритул один до одного. Проте з підвищенням температури від 160 °С до 180 °С інтенсивність масопереносу незалежно від C_0 збільшилась на 20 %.

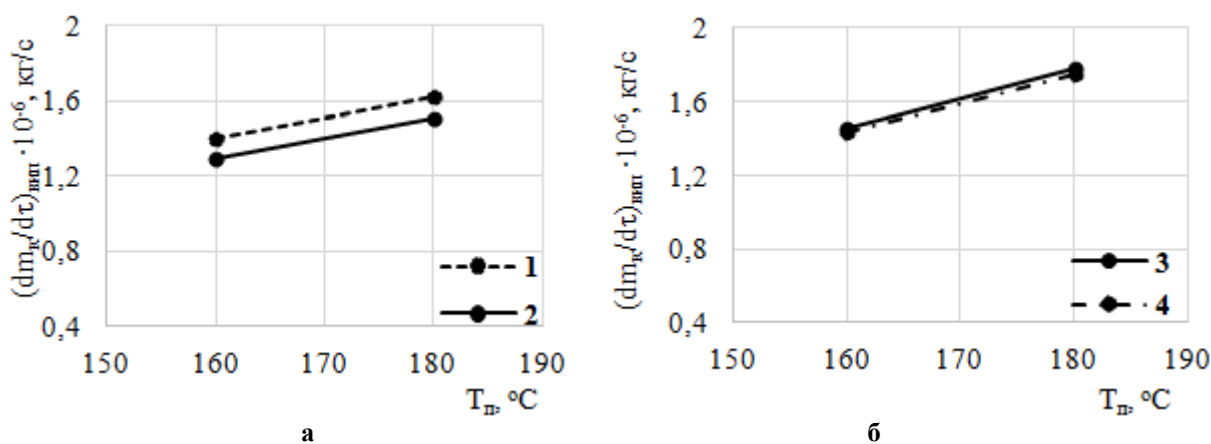


Рис. 2 – Кінетичні залежності інтенсивності масопереносу у випарювальному періоді сушіння крапель: а) гетерогенних систем: 1–ТП-18; 2–ТП-27; б) колоїдних розчинів: 3–ЯСЕ-25; 4–ЯСЕ-35

Порівняння тепломасообмінних характеристик продуктів близького вмісту сухих речовин, але різної природи, а саме: №2 – ТП-27 і №3 – ЯСЕ-25 (рис.2) показало, що при $T_n=160 ^\circ\text{C}$ показники $(dm_k/d\tau)_{вип}$ для ЯСЕ більше співпадають з показниками ТП-18 (крива 1) і дещо вищі за ТП-27 (на 12 %, крива 2). А з підвищенням (до 180 °С) теплового впливу дифузійні властивості колоїдного розчину ЯСЕ-25 (крива 3, рис. 2, б) покращились настільки, що інтенсивність масопереносу досягла значень $1,78 \cdot 10^{-8} \text{ kg/s}$, що на 16 % вище за інтенсивність масопереносу в гетерогенній системі ТП-27 (крива 2, рис. 2, а).

Такий результат можна пояснити меншими значеннями температурного коефіцієнту сушіння $b=dT_k/du$ для гетерогенних систем (табл.), що узгоджується з даними [3, 4, 7] за фактом, що при наявності мікрочастинок клітковини, волокон, оболонок і інших включень (або додаткових поверхонь розділу фаз) знижується теплова дія на термолабільний матеріал при сушці. Як показали розрахунки, при $T_n=160 ^\circ\text{C}$ температурний коефіцієнт сушіння для ТП-27 нижчий за температурний коефіцієнт сушіння ЯСЕ-25 (табл.).

Сушильний період. Динаміку зниження інтенсивності масопереносу в стадіях кіркоутворення та кипіння (складових сушильного періоду) відносно випарювального періоду під впливом температурного та кон-

центраційного факторів одразу встановлюємо при зіставленні тепломасообмінних характеристик $(dm_k/d\tau)_{кр1-кр3}/(dm_k/d\tau)_{кр1}$ (табл.). Згідно цих даних показники C_o мали більший вплив на відносні значення $(dm_k/d\tau)_{кр1-кр3}/(dm_k/d\tau)_{кр1}$ при сушінні саме гетерогенних систем, при цьому для усіх досліджених продуктів незалежно від температури ці величини характеризувались постійністю $(dm_k/d\tau)_{кр1-кр3}/(dm_k/d\tau)_{кр1} = \text{const}$.

За даними таблиці, якщо найбільше зниження інтенсивності масопереносу у сушильному періоді відносно випарювального періоду серед колоїдних розчинів визначено для ЯСЕ-25 (на 29%, №3), то серед гетерогенних систем – для ТП-27 (на 35%, №2), що свідчить про більший вплив концентраційного фактору на дифузійну спроможність даного матеріалу за щадних умов підведення тепла при сушінні завдяки наявності мікро- та наночастинок у складі гетерогенної системи більшого вмісту сухих речовин.

Таблиця 1

Тепломасообмінні характеристики зневоднення крапель гетерогенних систем з плодової сировини та колоїдних розчинів ЯСЕ

$T_n, ^\circ\text{C}$	Гетерогенні системи		Колоїдні розчини	
	№1	№2	№3	№4
	ТП-18	ТП-27	ЯСЕ-25	ЯСЕ-35
$(dm_k/d\tau)_{кр1-кр3}/(dm_k/d\tau)_{кр1}$				
160	0,75	0,65	0,71	0,76
180				
$b = dT_k/du, ^\circ\text{C}/\text{кг}/\text{кг}$				
160	47,2	55,6	63	63
180	-	-	72	72

$(dm_k/d\tau)_{кр1-кр3}$ має температурний фактор: з підвищенням температури від 160°C до 180°C інтенсивність масопереносу у цьому періоді, як і у випарювальному, зростає в середньому на 20%, що обумовлено більшими значеннями температурного коефіцієнту сушіння b ЯСЕ-25 і ЯСЕ-35 (табл.).

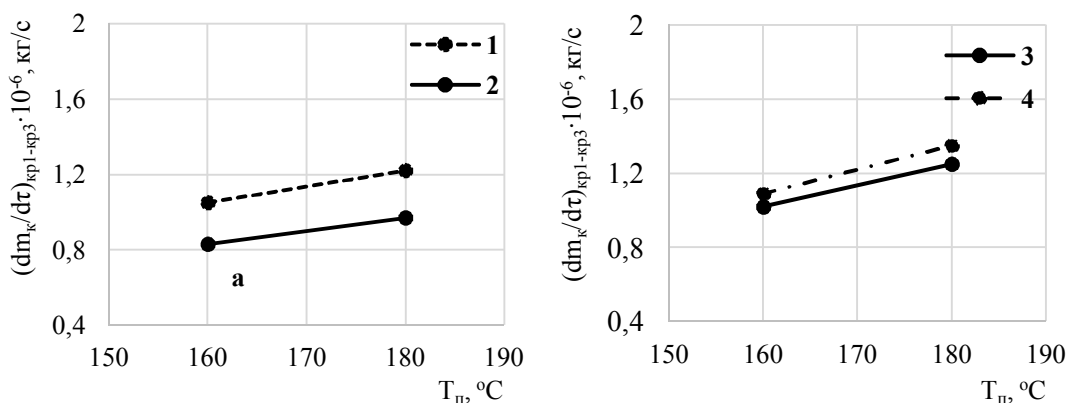


Рис. 3 – Кінетичні залежності інтенсивності масопереносу у стадіях кіркоутворення та кипіння присушні крапель: а) гетерогенних систем: 1 – соку; 2 – пюре; 3 – пасти; б) колоїдних розчинів: 4 – ЯСЕ-25; 5 – ЯСЕ-35, 6 – ЯСЕ-45.

Порівняльний аналіз значень $(dm_k/d\tau)_{кр1-кр3}$ для продуктів різного фізико-хімічного складу і близьких показників C_o : ТМ-27 (крива 2, рис. 3, а) і ЯСЕ-25 (крива 3, рис. 3, б) показав, що завдяки більшій дифузійній спроможності інтенсивність масопереносу в сушильному періоді для крапель ЯСЕ-25 зросла ще більше у порівнянні з випарювальним періодом і в середньому на 20 % перевищила інтенсивність масопереносу в краплях гетерогенної системи (ТМ-27), що обумовлено, як зазначалось вище, більшим температурним коефіцієнтом сушіння при $T_n=160^\circ\text{C}$ і, тим більш при $T_n=180^\circ\text{C}$ (табл.).

Виходячи з кінетичних кривих $(dm_k/d\tau)_{вип} = f(T_n)$ (рис. 2) та $(dm_k/d\tau)_{кр1-кр3} = f(T_n)$ (рис. 3), для зневоднення крапель у випарювальному періоді з інтенсивністю масопереносу $(dm_k/d\tau)_{вип} \approx 1,45-1,5 \cdot 10^{-8} \text{ кг/с}$ та в сушильному періоді з інтенсивністю $(dm_k/d\tau)_{кр1-кр3} \approx 1 \cdot 10^{-8} \text{ кг/с}$ для колоїдного розчину ЯСЕ-25 достатньо буде $T_n=160^\circ\text{C}$ (крива 3, рис. 3, б). Для гетерогенної системи ТМ-27 теплоносій необхідно буде нагріти вже до $T_n=180^\circ\text{C}$ або знизити вміст сухих речовин у рідинній системі, що подається на сушку, до $C_o=18-20\%$, як в ТП-18 (крива 1, рис. 2, а; рис. 3, а), інтенсивність процесу якого значно вище за ТП-27. Тобто сушити методом розпилювання енергетично доцільніше гетерогенну систему ТП-18 завдяки більшій її дифузійній спроможності при меншому вмісті сухих речовин, що обумовило більшу інтенсивність масопереносу при її зневодненні, тим більш при меншому у порівнянні з рештою досліджених продуктів температурному коефіцієнту сушіння b (табл. 1).

Таким чином, проведені аналітичні дослідження показали, що при організації виробництва порошкової форми солодових екстрактів або плодової сировинних матеріалів слід враховувати той факт, що для забезпечення високої якості висушеного продукту температурні параметри сушіння для плодових гетерогенних систем мають бути дещо вищі за температурні параметри сушіння колоїдних розчинів ЯСЕ.

Висновки. Проведений аналіз тепломасообмінних характеристик при зневодненні крапель різних за фізико-хімічним складом рідинних систем показав, що при зневодненні крапель гетерогенних систем більший вплив на інтенсивність масопереносу чинить концентраційний фактор. Встановлено, що зменшення інтенсивності масопереносу при сушінні гетерогенних систем більшого вмісту сухих речовин (ТП-25) викликане значним зниженням їх дифузійної спроможності.

Встановлено, що інтенсивність масопереносу в колоїдних розчинах ЯСЕ перебуває під більшим впливом температурного фактору, ніж в гетерогенних системах: при $T_n=180^\circ\text{C}$ інтенсивність зростає на 20%.

За результатами порівняльного аналізу різних за фізико-хімічним складом рідинних систем близького вмісту сухих речовин встановлено, що для забезпечення високої якості висушеного продукту температурні параметри сушіння для плодових гетерогенних систем мають бути дещо вищі за температурні параметри сушіння колоїдних розчинів ЯСЕ. Встановлено, що інтенсифікації процесів тепломасопереносу при зневодненні плодових гетерогенних систем можна досягти зменшенням концентрації до $20\pm 3\%$.

References

1. Dolinsky, A.A., & Ivanitskiy, G.K. (1984). Optimizatsiya protsessov raspylitel'noy sushki. Kyiv: Naukova dumka.
2. Masters, R. (2003). Reflections on spray drying achievements and challenges. In Proc. of 2nd Nordic Drying Conf. (pp. 8-17). Copenhagen, Denmark.
3. Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. Trends in Food Science & Technology, 63, 91-102.
4. Verma, A., & Singh, S.V. (2015). Spray drying of fruit and vegetable juices--a review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 55(5), 701-719. DOI: 10.1080/10408398.2012.672939
5. Chegini, G.R., & Ghobadian, B. (2007). Spray dryer parameters for fruit juice drying. Retrieved January 2007, from <https://www.researchgate.net/publication/242193527>
6. Dolinsky, A.A., & Maletskaya, K.D. (2015). Raspylitelnaya sushka: v 2 t. T. 2: Teplotekhnologii i oborudovanie dlya polucheniya poroshkovykh materialov. Kyiv: Akadempriodika.
7. Korhonen, H. (2002). Technology options for new nutritional concepts. International Journal of Dairy Technology, 55(2), 79-90.
8. Turchina, T.Ya. (2011). Intensifikatsiya teplovologoperekhodu pri rozpylyuvalnomu sushinni termoplastychnykh materialiv z roslynnoyi syrovyny: dys....kand.tekhn.nauk: 05.14.06. Kyiv.
9. Yemelyanova, N.O., Grechko, N.Ya., Koshova, V.M., & Sukhodol, V.Kh. (1994). Tekhnolohiya solodovykh ekstraktiv, kontsentrativ kvasnoho susla i kvasu. In N.O. Yemelyanovoyi (Ed.), Kyiv: ISDO.
10. Cheng, X.D. (2004). Heat-Mass Transfer and structure formation during drying of single food droplets. Drying Technology, 22(1-2), 179-190.

MASS TRANSFER INTENSITY DURING THE DRYING PROCESS OF COLLOIDAL SOLUTIONS AND LIQUID HETEROGENEOUS SYSTEMS

Turchyna T.Y., Candidate of Sciences, senior researcher, Maletska K.D. Doctor of Sciences, senior researcher, Avdieieva L. Yu, Doctor of Sciences, senior researcher, Makarenko A.A., PhD Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Sciences, Kyiv

Abstract. The article is dedicated to the analytical investigations of mass transfer intensity during the dehydration of individual droplets with different physicochemical composition of products obtained in liquid form from grain and fruit-vegetable raw materials. Colloidal solutions in the study are represented by barley-malt extract solutions with a dry matter content of 25% and 35%, while colloidal heterogeneous systems consist of tomato puree with a dry matter content of 18% and tomato paste with a dry matter content of 27%.

The objective of the study was to determine the influence of two factors, namely drying temperature regimes and dry matter concentration, on the mass transfer intensity during the dehydration of colloidal solutions and colloidal heterogeneous systems based on experimental data of drying kinetics of individual droplets in the "droplet-vapor/gas environment" system.

Analytical investigations revealed that in the drying of heterogeneous systems, the concentration factor has a greater impact on the mass transfer intensity. It was demonstrated that increasing the dry matter content up to 27%

leads to a decrease in the mass transfer intensity during drying, which is attributed to a significant reduction in the diffusion capacity of the more concentrated heterogeneous system.

It has been established that the temperature factor has a greater influence on the mass transfer intensity in colloidal solutions compared to heterogeneous systems. At a drying temperature of 180°C, the process intensity is 20% higher.

A comparative analysis of the heat and mass transfer characteristics of drying various liquid products with similar dry matter contents but different physicochemical compositions revealed that for more effective drying of colloidal heterogeneous systems based on fruit raw materials, the temperature regimes should be slightly higher than those used for drying colloidal solutions of similar composition. It has been shown that intensification of heat and mass transfer during the drying of heterogeneous systems can be achieved by reducing the dry matter content, for example, down to 18% as in the case of puree.

Key words: drying kinetics, coolant temperature, mass transfer intensity, colloidal solutions, heterogeneous systems.

Список використаної літератури

1. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Оптимизация процессов распылительной сушки. Киев : Наукова думка, 1984. 240с.
2. Masters R. Reflections on spray drying achievements and challenges//Proc. of 2nd Nordic Drying Conf., 2003. Copenhagen, Denmark. P. 8-17.
3. Ismail Tontul, Ayhan Topuz. Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science & Technology*, 2017. Vol.63. P. 91-102.
4. Verma A, Singh SV. Spray drying of fruit and vegetable juices--a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2015;55(5):701-19. DOI: 10.1080/10408398.2012.672939
5. G.R. Chegini, Barat Ghobadian. Spray dryer parameters for fruit juice drying. January 2007. <https://www.researchgate.net/publication/242193527>
6. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка.: в 2 т. Т. 2: Теплотехнологии и оборудование для получения порошковых материалов. Киев: Академперіодика, 2015. 390 с.
7. Korhonen H. Technology options for new nutritional concepts / *International journal of Dairy Technology*, 2002. V. 55, № 2. P.79-90.
8. Турчина Т.Я. Інтенсифікація тепловологопереносу при розпилювальному сушінні термопластичних матеріалів з рослинної сировини: дис.... канд.техн.наук: 05.14.06. К., 2011. 245с.
9. Ємельянова Н.О., Гречко Н.Я., Кошова В.М., Суходол В.Х.. Технологія солодових екстрактів, концентратів квасного суслу і квасу / За ред. Н.О. Ємельянової. – Київ : ІСДО, 1994. – 152 с.
10. Xiao Dong Cheng: Heat-Mass Transfer and structure formation during drying of single food droplets. *Drying Technology*. 2004. V.22, Is. 1-2. P. 179-190.

Отримано в редакцію 22.05.2023
Прийнято до друку 16.11.2023

Received 22.05.2023
Approved 16.11.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ГІДРОДИНАМІКИ ПОТОКУ В КАВІТАЦІЙНИХ ЗМІШУВАЧАХ З РІЗНИМИ ТИПАМИ НАСОСІВ

Авдєєва Л.Ю., д-р техн. наук, ст. наук. співр., Макаренко А.А., канд. техн. наук
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація. Кавітаційні явища супроводжуються швидким переходом енергії з однієї форми в іншу, що сприяє виникненню складного багаторівневого впливу на складні гетерогенні дисперсні системи і дозволяє їх застосовувати для інтенсифікації багатьох гідромеханічних процесів. Насоси різних типів є необхідним обладнанням для роботи будь-якого гідродинамічного кавітаційного апарату. Через те, що їх робота відбувається при високих тисках і швидкостях потоку, виникнення ефектів явища кавітації може призвести до негативних наслідків.

В статті представлені результати досліджень деяких показників гідродинаміки потоку в проточних статичних кавітаційних змішувачах із застосуванням динамічного відцентрового і об'ємного шестеренного насосів, а також варіант компонування кавітаційного змішувача двома однотипними відцентровими насосами змонтованими паралельно для прогнозування їх поведінки під час проектування і експлуатації. Загалом для досліджень використовувались три кавітаційні змішувачі із насосами різних типів і змінними кавітаційними реакторами типу сопла Вентурі з діаметрами горловини сопла від 0,004 м до 0,016 м.

Для характеристики гідромеханічних процесів були досліджені витрати розчину в кавітаційних змішувачах різної комплектації, число Рейнольдса і число кавітації від кількості циклів обробки для різних типів насосів. Аналіз одержаних результатів дозволяє стверджувати, про ефективність використання відцентрових насосів, як окремо, так і в системі. Відцентрові насоси дозволяють отримати більш високі значення витрат, швидкості течії потоку і розвинення явища гідродинамічної кавітації, що є позитивним для інтенсифікації гідромеханічних і масообмінних процесів. Проте, для забезпечення їх стабільної роботи необхідно контролювати параметри проведення процесу і обмежити тривалість обробки для того, щоб не вийти за межі нормованих критичних показників. Для характеристики явища гідродинамічної кавітації, зменшення негативних ефектів і збільшення позитивного впливу, крім розрахунку числа кавітації, необхідно також враховувати комплекс гідродинамічних показників, пов'язаних із особливостями конструкції обладнання і властивостями рідини.

Ключові слова: гідродинамічна кавітація, кавітаційні змішувачі, число Рейнольдса, число кавітації, відцентровий насос, об'ємний шестеренний насос, масообмінні процеси.

Основні процеси в хімічній, фармацевтичній і харчовій промисловості пов'язані з обробкою складних багатокомпонентних дисперсних систем із утворенням в результаті розчинів, суспензій, екстрактів, емульсій із заданими фізико-хімічними властивостями. Ці процеси відносяться до енерговитратних. Введена зовнішня енергія витрачається на диспергування однієї з фаз і збільшення площі міжфазної поверхні, перемішування дисперсійного середовища і турбулізацію міжфазної поверхні. Для зниження загальних енерговитрат пропонують використання нових, більш ефективних фізичних, хімічних і ін. методів впливу на дисперсну систему, які дозволяють створити високу питому потужність на одиницю об'єму при зниженні тривалості впливу [1, 2].

Останнім часом, все частіше для інтенсифікації гідромеханічних процесів у складних гетерогенних дисперсних системах дослідники пропонують застосування кавітаційних ефектів. Надзвичайно інтенсивні динамічні ефекти, що виникають в результаті розвитку і схлопування бульбашкових систем при виникненні явища гідродинамічної кавітації можуть призводити до позитивних або небажаних проявів. Неконтрольована дія цього явища може призвести до серйозних збоїв в роботі і навіть руйнування конструкції обладнання. Водночас, раціональне застосування кавітаційних ефектів може вирішити питання інтенсифікації багатьох технологічних процесів в різних сферах виробництва, а тому створення і застосування кавітаційних технологій привертають пильну увагу дослідників. Позитивне застосування кавітаційних ефектів дозволяє провести значну економію енерговитрат, збільшити продуктивність технологічних процесів і отримати високу якість обробки дисперсних систем [2 - 4].

Кавітація - це явище розриву цілісності рідини під впливом розтягуючих напружень і утворення заповнених газом та парою бульбашок або порожнин. Це явище виникає в рідких середовищах внаслідок різкого зниження тиску. При падінні тиску нижче за деяке критичне значення $P_{\text{кав}}$ в окремих точках системи виникають умови для розриву суцільності рідини із послідовним формуванням і еволюцією кавітаційних бульбашок. Їх схлопування призводить до значного динамічного впливу на частинки дисперсної фази. При цьому, акумульована в системі потенційна енергія перетворюється в кінетичну енергію радіального руху ріди-

ни, дискретно розподілену у просторі і часі. При розриві суцільності рідини утворюється і поширюється у формі ударної сферичної хвилі короткотривалий імпульс. Таким чином, кінетична енергія радіального руху рідини перетворюється на механічну енергію кумулятивного мікроструменя з інтенсивним імпульсним впливом на дисперсну частинку. Одночасно із цим відбувається інтенсивне збурювання безперервної фази. Таким чином, кавітаційні явища супроводжуються швидким перетворенням енергії з однієї форми в іншу, а локалізована енергетична дія проявляється у вигляді короткотривалих дискретно розподілених імпульсів високої потужності. Викид кумулятивного мікроструменю відбувається із виникненням імпульсних аномально високих локалізованих тисків, температур, швидкостей і прискорень. Надзвичайно швидка трансформація енергії сприяє суттєвому підвищенню ефективності впливу на складні дисперсні гетерогенні системи [2, 4, 5].

У промисловості найчастіше використовують гідродинамічну кавітацію, яка дає змогу обробляти великі об'єми гетерогенних систем у потоці. Насоси різних типів є необхідним обладнанням для роботи будь-якого гідродинамічного кавітаційного апарату. Різниця тисків, які виникають в зоні місцевих опорів і інтенсивність кавітаційного впливу визначає рівень акумульованої в системі потенційної енергії і залежить від властивостей дисперсних систем і гідродинамічних умов в потоці, обумовлених типами, конструктивними особливостями і геометричними характеристиками місцевих опорів. Від їх роботи залежить виникнення і потужність динамічних впливів в гідродинамічних кавітаційних апаратах, ефективність проходження заданих технологічних процесів в об'ємі і відповідність отриманої гетерогенної системи заданим характеристикам [2, 4, 6, 7].

В технологічних процесах широко використовується різні типи динамічних або об'ємних насосів, які мають забезпечити заданий профіль тиску всієї системи і необхідний гідродинамічний режим роботи технологічного обладнання. В технологічних лініях кавітаційних змішувачів широко використовуються відцентрові і шестеренні насоси, до яких висуваються особливі вимоги через те, що вони використовуються для подачі рідких середовищ і працюють при високих тисках. Посилення можливих кавітаційних ефектів відбувається в закритих зонах робочої камери насосів. В разі різкого зниження тиску в якійсь зоні робочої камери нижче за критичний тиск насиченої пари $P_{\text{кав}}$ відбувається формування, інтенсивне зростання, стиснення і схлопування парових кавітаційних бульбашок із виділенням великої кількості енергії. Розвиток кавітаційних бульбашок в таких зонах може бути викликаний неправильним встановленням насоса і низьким тиском на вході (на стороні всмоктування), роботою на швидкості обертання або швидкості потоку, які перевищують номінальні, підвищенні температури рідини, що транспортується і т.ін. [8, 9]

Структура гідродинамічного потоку в середині відцентрового насоса є складною через наявність обертального робочого колеса та його взаємодії зі спіральним корпусом. Стабільна робота насосу забезпечується в такому режимі, коли тиск у всіх точках його внутрішньої порожнини вищим за тиск насичених парів рідини, що переміщається, при цій температурі. При умові, коли тиск рідини падає нижче тиску її насиченої пари виникають потенційно шкідливі ефекти явища кавітації. У відцентрових насосах велике падіння тиску спостерігається у всмоктуючому трубопроводі робочого колеса і його підвищення всередині лопаток. У об'ємних насосах, при певних умовах роботи, тиск рідини падає при подачі рідини у насосну камеру в області зачеплення двох шестерень і знову зростає при виході з робочої камери. Утворення кавітаційних бульбашок призводить до зменшення продуктивності насосу, а їх схлопування - до збільшення вібрації, шуму, підвищення температури рідини, виникнення ерозії, пошкодження конструктивних елементів насосу. Непостійні умови, пов'язані з кавітацією можуть вплинути на споживання електроенергії. В разі виникнення кавітаційних процесів витрати електроенергії можуть коливались і бути вищими для досягнення заданої пропускної здатності насосу [2, 9, 10].

Наявність таких зон неодноразово підтверджувалась рядом досліджень, однак до теперішнього часу відсутні результати, які дозволяють описати особливості гідродинамічних процесів в насосах різних типів і конструкцій при їх роботі у складі кавітаційного змішувача. Для уникнення збоїв в роботі обладнання важливо підібрати насос до рідини, системи та застосування, що потребує проведення додаткових досліджень. Для цього необхідно виконати багатофакторний аналіз впливу кожної ділянки технологічної лінії.

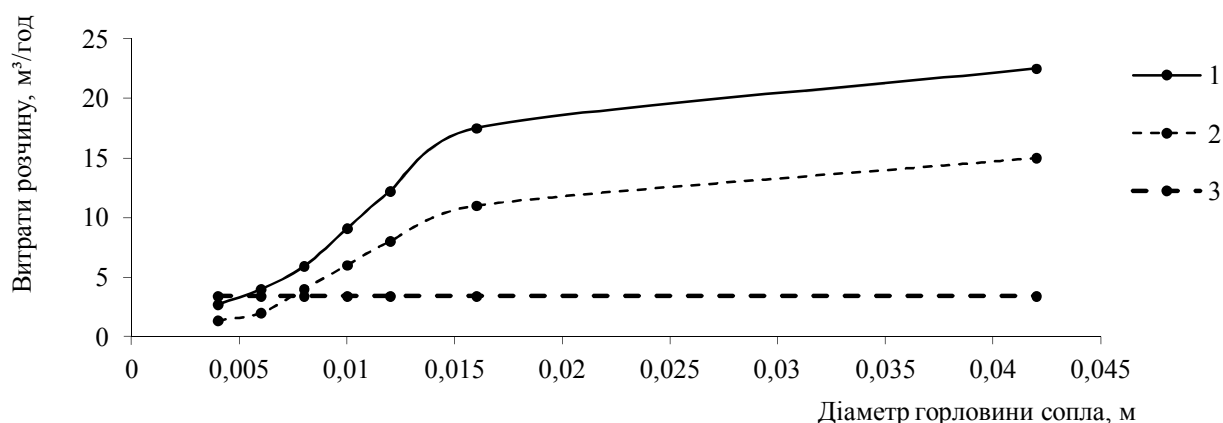
Метою роботи було дослідження деяких показників гідродинаміки потоку в проточних статичних кавітаційних змішувачах із застосуванням динамічного відцентрового і об'ємного шестеренного насосів для прогнозування їх поведінки під час проектування і експлуатації.

Для проведення досліджень був створений експериментальний стенд, який дозволяє вимірювати і регулювати гідродинамічні умови обробки складних гетерогенних систем у процесах екстракції, диспергування, гомогенізації, розчинення і змішування. Стенд змонтований на пересувній платформі з металевою опорною рамою і складається з пульту управління, змінних насосів із запірною арматурою, змінних кавітаційних реакторів типу сопла Вентурі з діаметрами горловини сопла від 0,004 м до 0,016 м, манометрів, витратоміра, термометра з виносним датчиком і циліндричної приймальної ємності [2].

Для проведення досліджень в лінію горизонтально вбудовувались насоси - гідродинамічний відцентровий або об'ємний шестеренний з зовнішнім евольвентним зачепленням однакової потужності. Було також запропоновано варіант компонування кавітаційного змішувача із двома однотипними відцентровими насосами змонтованими паралельно. Загалом для досліджень використовувались три кавітаційні змішувачі

із змінними кавітаційними реакторами типу сопла Вентурі з різними діаметрами горловини сопла. За їх допомогою на робочій ділянці експериментального стенду створювався потік ньютонівських рідин певної швидкості і тиску, які регулювались. В дослідженнях використовувалась свіжовідібрана відфільтрована водопровідна вода.

Виникнення і розвиток гідродинамічної кавітації при роботі насосу виникає локально при зниженні тиску до або нижче тиску насичених парів і викликано зміною гідродинамічного руху рідини в каналі трубопроводу. Тиск рідини може зменшуватись через збільшення гравітаційної або кінетичної енергії рідини. Збільшення гравітаційної енергії відбувається при збільшенні напору рідини через збільшення висоти труби. Збільшення кавітаційної енергії може відбуватись через різке зменшення поперечного перерізу каналів потоку. Гідравлічний рух рідини характеризується витратами і швидкістю потоку, які не завжди відповідають заявленим паспортним даним через різні умови експлуатації або виникнення таких явищ, як кавітація. В значній мірі витрати пов'язані з напірними характеристиками (зовнішнього навантаження) і залежать від тиску на виході з насоса. Але значення витрат рідини можуть зменшуватись через локальне зниження місцевого тиску на вході в насоси, що також може призвести до кавітації. Результати експериментального визначення цих показників для відцентрового і шестеренного насосів наведені на рис.1 і 2.



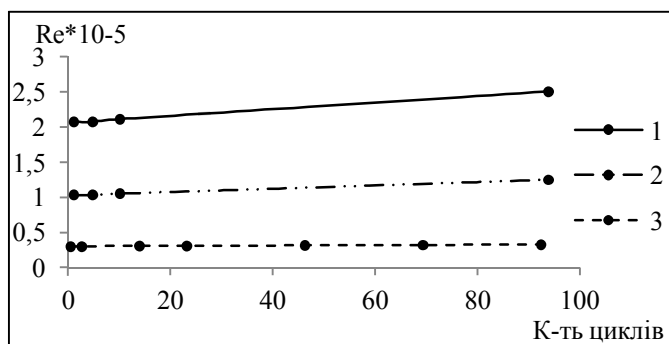
1 – система динамічних відцентрових насосів; 2 – динамічний відцентровий; 3 – об'ємний шестеренний

Рис.1 – Залежність витрат розчину від діаметра сопла кавітаційного реактора для різних типів насосів

Отримані результати свідчать (рис.1), що для відцентрового насосу зі збільшенням діаметра горловини сопла і зменшенням площі місцевого опору потоку у трубі, витрати розчину збільшуються. Спостерігається майже лінійна залежність між збільшенням діаметру горловини сопла і витратами розчину, яка дещо порушується для змішувачів з кавітаційними реакторами з горловиною сопла від 0,004 м до 0,01 м. Значення витрат рідини є дещо меншими за показники які прогнозуються. Більш вираженою така залежність є для гідродинамічного кавітаційного змішувача із застосуванням системи з двома відцентровими насосами. Значення витрат рідини можуть зменшуватись через різку локальну зміну місцевого тиску, що викликаний зміною поперечного перерізу каналів, що призводить до виникнення кавітаційного кластеру і деякого заглушення потоку. Найбільші значення витрат спостерігаються при відсутності місцевого опору у вигляді кавітаційного реактора. При паралельній роботі двох відцентрових насосів відмічається збільшення значень витрат рідини, але сумарна подача двох паралельних насосів не дорівнює сумарній подачі цих насосів, а у всіх випадках є меншою при їх окремій роботі, що підтверджується даними літератури [10]. Для об'ємного шестеренного насосу рідина подається з прийнятною ємністю переривчасто, однаковими окремими порціями, які витісняються із зазначеного об'єму силовими елементами таким чином, щоб потік на вході, за допомогою міцного і герметичного контакту зубів шестерень між собою, був постійно і дуже герметично роз'єднаний із потоком на виході. Таким чином, витрати розчину залишаються постійними в усіх випадках.

Серед показників, які впливають на інтенсивність виникнення кавітаційних ефектів в потоці є швидкість руху потоку. При значному зростанні швидкості збільшується вірогідність виникнення розрідження потоку через збільшенні різниці тисків при проходженні потоку через місцевий опір, тому явище кавітації характерно для великих швидкостей. Для напірних потоків в трубах швидкість рідини впливає на характер руху потоку і визначається числом Рейнольдса (Re).

Результати експериментального визначення і розрахунку числа Re для відцентрового і шестеренного насосів без використання гідродинамічних кавітаційних реакторів наведені на рис.2.



1 – система динамічних відцентрових насосів; 2 – динамічний відцентровий; 3 – об'ємний шестеренний
Рис.2 – Залежність числа Рейнольдса від кількості циклів обробки для різних типів насосів

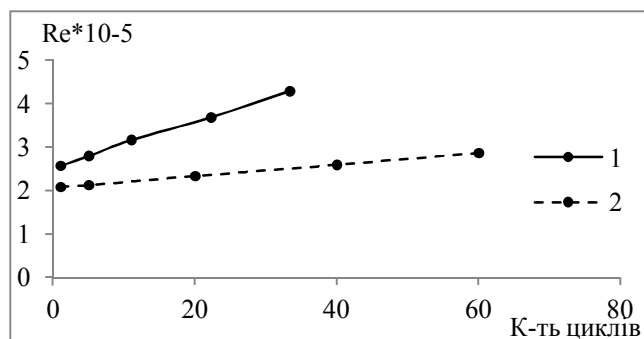
відцентрового насосу число Re збільшується майже на 70 %, а для системи з двох таких насосів – в 6,6 рази. Високі швидкості течії в динамічних відцентрових насосах потенційно (при наявності інших умов) можуть призводити до виникнення в закритих зонах кавітаційних ефектів і порушення роботи. Так, робота впродовж 90 циклів як одного, так і системи гідродинамічних насосів призводить до незначного збільшення числа Re , що можна пояснити деяким незначним підвищенням температури рідини і зниженням в'язкості в процесі роботи, що викликано особливостями руху в насосі цього типу. Така поведінка насосу непрямо може свідчити про відсутність ефектів, викликаних гідродинамічною кавітацією. Тривала робота об'ємного шестеренного насосу не призводила до зміни значень числа Re . Із результатів, представлених на рис. 2 можна зробити висновок про доцільність використання системи з двох відцентрових насосів у складі кавітаційного змішувача для інтенсифікації масообмінних технологічних процесів, пов'язаних з диспергуванням і гомогенізацією.

Результати досліджень зміни характеру руху рідини зміни значень числа Re в кавітаційних змішувачах з використанням місцевого опору у вигляді кавітаційних реакторів з різним діаметром горловини сопла і різних типів насосів наведені рис.3. на прикладі реактора з горловиною сопла 6 мм.

Результати показали високі швидкості течії потоку для обох конструкцій кавітаційних змішувачів, але в різній мірі. Вже після першого циклу оброблення рідини в кавітаційному змішувачі з соплом із діаметром горловини 0,006 м із системою динамічних відцентрових насосів значення числа Re дорівнює $2,6 \cdot 10^5$, що є характерним для розвинутого турбулентного руху.

В результаті оброблення рідини в кавітаційному змішувачі із шестеренним насосом швидкість течії потоку зростає не настільки інтенсивно, значення числа Re зростають з $2,08 \cdot 10^5$ до $2,3 \cdot 10^5$ після 20 циклів, коли рух потоку у змішувачі з початкової стадії досягає значень стадії розвинутої турбулізації потоку.

На нашу думку, кавітаційний характер руху виникає для потоку в обох конструкціях кавітаційних змішувачів внаслідок раптової зміни геометрії течії у вигляді встановленої трубки Вентурі із горловиною сопла 0,006 м, коли площа перерізу потоку струменя різко зменшується на 85 % до мінімальної. Такий висновок був зроблений через отримання в результаті експерименту високих швидкостей руху і підвищення температури рідини в результаті обробки на $26,4^\circ\text{C}$ для системи відцентрових насосів і на 15°C для шестеренного насосу.



1 – система динамічних відцентрових насосів;
2 – об'ємний шестеренний
Рис.3 – Залежність числа Рейнольдса від кількості циклів обробки для кавітаційного змішувача з використанням реактора з горловиною сопла 6 мм і різних типів насосів.

Опосередковано, про наявність гідродинамічної кавітації в потоці рідини можуть свідчити високі значення числа Re . Однак, питання величини критичного значення числа Рейнольдса, коли виникає нестійкість турбулентного руху і його перехід в кавітаційний режим в результаті утворення бульбашок в зонах високого тиску і турбулентних коливань і досі не одержало свого остаточного вирішення. Величина числа Рейнольдса при якому виникає первинна кавітація залежить від багатьох умов, в т.ч. умов входу потоку в трубу, шорсткості її стінок і ін. чинників. Дані, представлені на рис.2 свідчать про значне збільшення числа Re для динамічного відцентрового насоса, порівняно до шестеренного. Так, для динамічного

відцентрового насосу число Re збільшується майже на 70 %, а для системи з двох таких насосів – в 6,6 рази. Високі швидкості течії в динамічних відцентрових насосах потенційно (при наявності інших умов) можуть призводити до виникнення в закритих зонах кавітаційних ефектів і порушення роботи. Так, робота впродовж 90 циклів як одного, так і системи гідродинамічних насосів призводить до незначного збільшення числа Re , що можна пояснити деяким незначним підвищенням температури рідини і зниженням в'язкості в процесі роботи, що викликано особливостями руху в насосі цього типу. Така поведінка насосу непрямо може свідчити про відсутність ефектів, викликаних гідродинамічною кавітацією. Тривала робота об'ємного шестеренного насосу не призводила до зміни значень числа Re . Із результатів, представлених на рис. 2 можна зробити висновок про доцільність використання системи з двох відцентрових насосів у складі кавітаційного змішувача для інтенсифікації масообмінних технологічних процесів, пов'язаних з диспергуванням і гомогенізацією.

Результати досліджень зміни характеру руху рідини зміни значень числа Re в кавітаційних змішувачах з використанням місцевого опору у вигляді кавітаційних реакторів з різним діаметром горловини сопла і різних типів насосів наведені рис.3. на прикладі реактора з горловиною сопла 6 мм.

Результати показали високі швидкості течії потоку для обох конструкцій кавітаційних змішувачів, але в різній мірі. Вже після першого циклу оброблення рідини в кавітаційному змішувачі з соплом із діаметром горловини 0,006 м із системою динамічних відцентрових насосів значення числа Re дорівнює $2,6 \cdot 10^5$, що є характерним для розвинутого турбулентного руху.

В результаті оброблення рідини в кавітаційному змішувачі із шестеренним насосом швидкість течії потоку зростає не настільки інтенсивно, значення числа Re зростають з $2,08 \cdot 10^5$ до $2,3 \cdot 10^5$ після 20 циклів, коли рух потоку у змішувачі з початкової стадії досягає значень стадії розвинутої турбулізації потоку.

На нашу думку, кавітаційний характер руху виникає для потоку в обох конструкціях кавітаційних змішувачів внаслідок раптової зміни геометрії течії у вигляді встановленої трубки Вентурі із горловиною сопла 0,006 м, коли площа перерізу потоку струменя різко зменшується на 85 % до мінімальної. Такий висновок був зроблений через отримання в результаті експерименту високих швидкостей руху і підвищення температури рідини в результаті обробки на $26,4^\circ\text{C}$ для системи відцентрових насосів і на 15°C для шестеренного насосу.

Як відомо, для циліндричних, конічних насадок, а також труб Вентурі зміна геометрії руху призводить до різкого перепаду тисків, зростання частки утвореної газопарової фази, зростання зони кавітації і підвищення температури внаслідок швидкого колапсу кавітаційних бульбашок і виникнення інших ефектів. Таким чином, в результаті обробки рідини в обох експериментальних кавітаційних змішувачах утворюються умови для виникнення і еволюції кавітаційних бульбашок і пов'язаними кавітаційними ефектами, що в свою чергу дозволить покращити умови диспергування.

Аналіз результатів, наведених на рис.2 і 3 дозволяє стверджувати, що ефективність використання відцентрових насосів, як окремо, так і в системі, є вищою для отримання висо-

ких значень швидкості течії потоку і виникнення явища гідродинамічної кавітації для інтенсифікації масообмінних процесів, порівняно до шестеренного насосу. Проте, для забезпечення стабільної роботи цих насосів у комплектації кавітаційного змішувача необхідно контролювати параметри проведення процесу і обмежити тривалість обробки для того, щоб не вийти за межі нормованих критичних показників.

Момент виникнення і інтенсивність явища кавітації можуть змінюватися від багатьох факторів: геометрії течії, швидкості, умов зміни тиску та температури потоку, властивостей рідини, кількості розчиненого газу та ін. В якості параметра для характеристики явища кавітації, яке виникає при проходженні потоку рідини через кавітаційну систему використовувались значення числа кавітації, що є мірою просторової густини енергії. Для різних процесів і різних геометрій кавітаційних камер початкове число кавітації і методи його визначення можуть бути різними, немає стандартного набору параметрів, які використовуються для розрахунку числа кавітації [2, 4, 10]. В дослідженнях для розрахунку кавітаційного числа користувались формулою:

$$\chi = \frac{p - p_{\text{кав}}}{1/2 \rho \cdot v^2},$$

де p – тиск перед соплом, Па; $p_{\text{кав}}$ – тиск насиченої пари, при якому виникає кавітація, Па; ρ – густина рідини, кг/м³; v – швидкість течії в горловині сопла, м/с.

З результатів багатьох досліджень відомо, що вплив кавітаційних ефектів відсутній повністю або незначний при значеннях чисел кавітації $\chi > 2$, а найбільша інтенсивність впливу виникає при значеннях чисел кавітації $\chi < 1$. Проте, дуже низькі робочі числа кавітації можуть призвести до суперкавітації і утворення хмари пари при відсутності колапсу кавітаційних бульбашок [3-5, 10]. На рис.4 наведені результати розрахунку кавітаційного числа χ в залежності від діаметру горловини реактора кавітаційних змішувачів для системи динамічних відцентрових насосів і шестеренного насосу.

Наведені результати (рис.4) свідчать про те, що найбільший вплив на виникнення явища кавітації має діаметр горловини сопла. Зі збільшенням розміру прохідного діаметру кавітаційного реактора, тиск перед соплом зменшується, а кавітаційне число відповідно збільшується для обох комплектацій насосів в кавітаційних змішувачах.

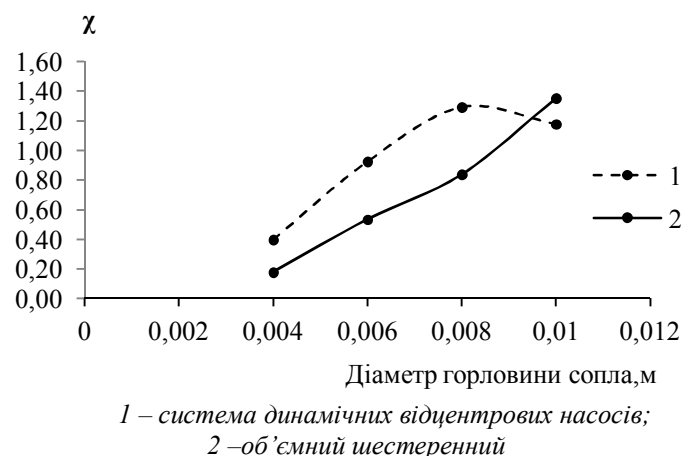


Рис.4 – Залежність кавітаційного числа χ від діаметру горловини сопла для кавітаційними змішувачами з насосами різних типів

В проведених експериментах найменші значення чисел кавітації χ спостерігаються при діаметрі горловини сопла 0,004 м: для системи відцентрових насосів – 0,4 і для шестеренного – 0,18. Це свідчить про високий ступінь розвитку ефектів гідродинамічної кавітації, маленький діаметр утворених кавітаційних бульбашок і можливість отримання високої дисперсності утвореної системи за рахунок дії кумулятивних мікроструменів. Проте, внаслідок виникнення двофазного потоку рідини, який утворюється при гідродинамічній кавітації, така комплектація змішувача характеризується низькими витратами розчину, значною тривалістю і енерговитратами процес обробки. При високих швидкостях течії, які для дослідних кавітаційних змішувачів характерні для діаметрів горловини сопла 0,012 і більше три-

валість кавітаційного впливу може бути недостатньою для утворення бульбашок і отримання необхідного рівня інтенсивності обробки. У випадку, коли тривалість перебування частинки в зоні зниженого тиску, ймовірність масового виникнення і повного розвитку кавітаційних бульбашок є вищою. Для зменшення негативних ефектів і збільшення позитивного впливу виникнення явища гідродинамічної кавітації необхідно провести вибір раціональних умов проведення процесу і враховувати комплекс гідродинамічних показників.

Висновки. Дослідження показали більш високу ефективність використання відцентрових насосів, як окремо, так і в системі, порівняно до шестеренного насосу. Відцентрові насоси дозволяють отримати більш високі значення витрат, швидкості течії потоку і розвинення явища гідродинамічної кавітації, що є позитивним для інтенсифікації технологічних процесів. Проте, для забезпечення надійної роботи цих насосів у комплектації кавітаційного змішувача необхідно контролювати параметри проведення процесу і обмежити тривалість обробки, щоб не вийти за межі нормованих критичних показників.

Аналіз результатів показав, що розрахунок числа кавітації є недостатньою характеристикою для прогнозування виникнення та розвитку кавітації в потоці рідини кавітаційних змішувачів різної комплектації. Для зменшення негативних ефектів і збільшення позитивного впливу виникнення явища гідродинамічної кавітації необхідно враховувати комплекс гідродинамічних показників, пов'язаних із особливостями конструкції

обладнання і властивостей рідини. Це дозволить вибрати раціональні умови для проведення інтенсифікації багатьох гідромеханічних і масообмінних процесів при забезпеченні значної економії енерговитрат і отриманні високої якості обробки.

References

1. Paul Stevenson, W. (2017). Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. John Wiley & Sons.
2. Dolinskii A.A., Avdeeva L.Yu., Makarenko A.A. (2020) Cavitation technologies for the production of nanopreparations. Kyiv: Nauk. Dumka.
3. Asaithambi, N, Singha, P, Dwivedi, M, Singh, SK. (2019) Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: A review. J Food Process Eng. 42:e13144. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13144>
4. Ivanytskii G.K., Stepaniuk A.R. (2021) Processes and equipment of deep processing of organic raw materials: lecture notes [Electronic resource]: study guide for students.
5. Brennen, C. (2013). Cavitation and Bubble Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>
6. Avdeeva, L., Zhukotskyi, E., & Makarenko, A. (2019). Doslidzhennia kavitatsiinykh effektiv v nasosakh riznykh typiv. Scientific Works, 83(1), 74-79. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1421>.
7. Březina, M. (2018). Cavitation and Bubble Dynamics in Pumps and Turbomachines. Springer.
8. Rakibuzzaman, M., Kim, K. & Suh, S. (2018). Numerical and experimental investigation of cavitation flows in a multistage centrifugal pump. JMech SciTechnol 32, 1071–1078 <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0209-6>
9. G. Mousmoulis, N. Karlsen-Davies, G. Aggidis, I. Anagnostopoulos, D. Papantonis, (2019) Experimental analysis of cavitation in a centrifugal pump using acoustic emission, vibration measurements and flow visualization, European Journal of Mechanics - B/Fluids, Vol. 75, P. 300-311, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.10.015>.
10. Ferrari A. (2017) Fluid dynamics of acoustic and hydrodynamic cavitation in hydraulic power systems Proc. R. Soc. A.473: 20160345 <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0345>

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS IN CAVITATION MIXERS WITH DIFFERENT TYPES OF PUMPS

**Avdieieva L.Yu., Dr. Eng. Sci., Senior Research Associate, Makarenko A.A., Cand. Eng. Sci.
Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Sciences, Kyiv**

Abstract. Cavitation phenomena are accompanied by rapid energy conversion from one form to another, which leads to complex multi-level effects on complex heterogeneous dispersive systems and enables their application for the intensification of various hydromechanical processes. Pumps of different types are essential equipment for any hydrodynamic cavitation apparatus. However, due to their operation at high pressures and flow velocities, the occurrence of cavitation effects can have negative consequences.

This article presents the research results of certain hydrodynamics indicators of flow in flow-through static cavitation mixers using dynamic centrifugal and volumetric gear pumps, as well as the arrangement variant of a cavitation mixer with two identical centrifugal pumps mounted in parallel to predict their behavior during design and operation. In total, three cavitation mixers with pumps of different types and variable cavitation reactors of the Venturi nozzle type with throat diameters ranging from 0.004m to 0.016m were used for the research.

To characterize the hydromechanical processes, the flow rates of the solution in cavitation mixers of different configurations, Reynolds number, and cavitation number as a function of the processing cycles for different types of pumps were investigated. The analysis of the obtained results allows us to assert that the use of centrifugal pumps, both individually and in a system, is effective. Centrifugal pumps allow for higher flow rates, flow velocities, and development of the hydrodynamic cavitation phenomenon, which is beneficial for intensifying hydromechanical and mass transfer processes. However, to ensure their stable operation, it is necessary to control the process parameters and limit the processing duration to stay within the specified critical limits. To characterize the hydrodynamic cavitation phenomenon, reduce negative effects, and increase positive impact, in addition to cavitation number calculation, it is also necessary to consider a complex of hydrodynamic indicators related to the equipment's design features and fluid properties.

Key words: hydrodynamic cavitation, cavitation mixers, Reynolds number, cavitation number, centrifugal pump, volumetric gear pump, mass transfer processes.

Список використаної літератури

1. Paul Stevenson, W. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. John Wiley & Sons. 2017, 1448p.
2. Долінський А.А., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А. Кавітаційні технології для виробництва нанопрепаратів. Київ: Наук. Думка. 2020. 112 с.

3. Asaithambi, N, Singha, P, Dwivedi, M, Singh, SK. Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: A review. *J Food Process Eng.* 2019; 42:e13144. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13144>
4. Іваницький Г.К., Степанюк А.Р. Процеси та обладнання глибокої переробки органічної сировини: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 292 с.
5. Brennen, C. *Cavitation and Bubble Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press. 2013 249 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>
6. Авдеева, Л., Жукотський, Е., & Макаренко, А. Дослідження кавітаційних ефектів в насосах різних типів. *Scientific Works*, 2019 83(1), 74-79. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1421>
7. Březina, M. *Cavitation and Bubble Dynamics in Pumps and Turbomachines*. Springer. 2018 481 p
8. Rakibuzzaman, M., Kim, K. & Suh, SH. Numerical and experimental investigation of cavitation flows in a multistage centrifugal pump. *J Mech Sci Technol* 2018, 32, 1071–1078 <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0209-6>
9. G. Mousmoulis, N. Karlsen-Davies, G. Aggidis, I. Anagnostopoulos, D. Papantonis, Experimental analysis of cavitation in a centrifugal pump using acoustic emission, vibration measurements and flow visualization, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Vol. 75, 2019, P. 300-311, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.10.015>.
10. Ferrari A. Fluid dynamics of acoustic and hydrodynamic cavitation in hydraulic power systems *Proc. R. Soc.* 2017, A.473: 20160345 <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0345>

Отримано в редакцію 27.05.2023
Прийнято до друку 26.11.2023

Received 27.05.2023
Approved 26.11.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІНІВ ПРИДАТНОСТІ ДО СПОЖИВАННЯ ПЛОДІВ ГЛОДУ ПІСЛЯ ТЕРМОРАДІАЦІЙНО-КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ

Дубковецький І.В., канд. техн. наук, доцент¹, Тарасенко Т. В., канд. техн. наук, доцент²,
Бадах В. М., канд. техн. наук, доцент²

¹Національний університет харчових технологій, м. Київ

²Національний авіаційний університет, м. Київ

Анотація. На сьогодні найефективнішим способом зневоднення харчових продуктів для консервування є сушка. Таким чином, головним завданням процесу сушіння є досягнення найвищої якості при мінімальному споживанні енергії. У даній роботі представлено дослідження кінетики сушіння глоду Алмаатинського при одночасному терморадіаційному і конвективному енергопідведенні. В роботі висвітлені питання знаходження раціонального співвідношення між кількістю витраченої теплоти від зовнішнього конвективного калорифера і терморадіаційних генераторів. Розглянуто зміни якості сушених продуктів переробки глоду під час зберігання. Зберігання різних сортів глоду здійснювалось у двох видах поліетилентерафталатових пакетів та картонно-поліетиленових коробках в повітряному середовищі. В картонно-поліетиленовій тарі при зберіганні інтенсивніше відбувались втрати каротину ніж в поліетилентерафталатових пакетах, зокрема після року зберігання глоду Алмаатинський зниження відбулось на 60 і 47 % відповідно. Згідно досліджень, аналогічно як і для каротину після року зберігання втрати аскорбінової кислоти для глоду Алмаатинський становили 48% в поліетилентерафталатових пакетах і 70% в картонно-поліетиленовій тарі. Проведені дослідження показали, що висушені терморадіаційно-конвективним енергопідведенням плоди глоду при зберіганні втрачають вміст Р-активних речовин в його хімічному складі за рахунок ферментативних процесів окиснення та гідролізу високомолекулярних речовин. Найвищу якісну оцінку отримали зразки глоду висушені терморадіаційно-конвективним енергопідведенням, що зберігалися в поліетилентерафталатових пакетах з ламінованою поверхнею. Деяко нижчі органолептичні показники якості у зразків глоду були після зберігання в картонно-поліетиленових коробках, що є наслідком нещільності прилягання плодів в картонно-поліетиленових коробках та присутності доступу повітря.

Ключові слова: глід, терморадіаційно-конвективне сушіння, зберігання, поліетилентерафталатові пакети, картонно-поліетиленова тара, аскорбінова кислота, каротин, поліфеноли.

Глід – рідкісна і цінна лікарська сировина, його заготовляють восени, внаслідок чого виникають проблеми з переробкою, ефективним зберіганням та транспортуванням. Цю проблему можна вирішити, якщо висушити свіжозібрані плоди. Сушені продукти мають багато переваг перед свіжими завдяки тривалому зберіганню. У зв'язку з цим все більшої актуальності набуває питання наукового обґрунтування методів переробки плодів глоду та раціональних технологічних режимів збереження поживних речовин у кінцевому продукті.

Метою даної роботи є розроблення технологічного процесу для виробництва сухого глоду за допомогою різних методів енергопідведення і їх комбінації.

Недоліком терморадіаційного сушіння є те, що енергія інфрачервоного випромінювання не нагріває повітря в камері сушарки, а в основному поглинається поверхнею висушуваного матеріалу. Повітря в камері не достатньо прогріте і відносна вологість залишається високою і має низький потенціал насичення. Нагрів навколишнього середовища при терморадіаційному сушінні відбувається за рахунок тепловіддачі від поверхні продукту. Втрачена теплота повинна бути компенсована додатковим опроміненням продукту, що призводить до розтріскування поверхні, утворення деформації, погіршення структури та зовнішнього вигляду. Підведення до камери конвективної теплоти необхідне для забезпечення низької відносної вологості повітря в камері, а одночасний підвід в імпульсному режимі енергії інфрачервоного випромінювання забезпечить ефективний прогрів поверхні продукту.

Зрілі плоди Алмаатинського глоду очищали від кісточок та поміщали в один шар на спеціальну металеву сітку товщиною 8 мм і здійснювали терморадіаційно-конвекційне сушіння [1]. Сушіння здійснювали шляхом опромінювання генераторами із довжиною хвиль 1,3...3,0 мкм зверху і знизу в різних пропорціях конвекції та терморадіації. Величина опромінення радіаційних генераторів варіювалась в межах $E=2...8$ кВт/м², а тепло що подавалось конвекцією потужністю 1...2 кВт. Відстань від глоду до опромінювачів складала 14...16 см, а швидкість руху повітря в примежовому шарі продукту становила 5,5 м/с.

Згідно експериментальних даних терморадіаційно-конвективного сушіння глоду Алмаатинського побудовано узагальнені криві сушіння (рис. 1) і швидкості сушіння згідно зміни пропорцій потужностей конвективного нагрівача і радіаційних випромінювачів.

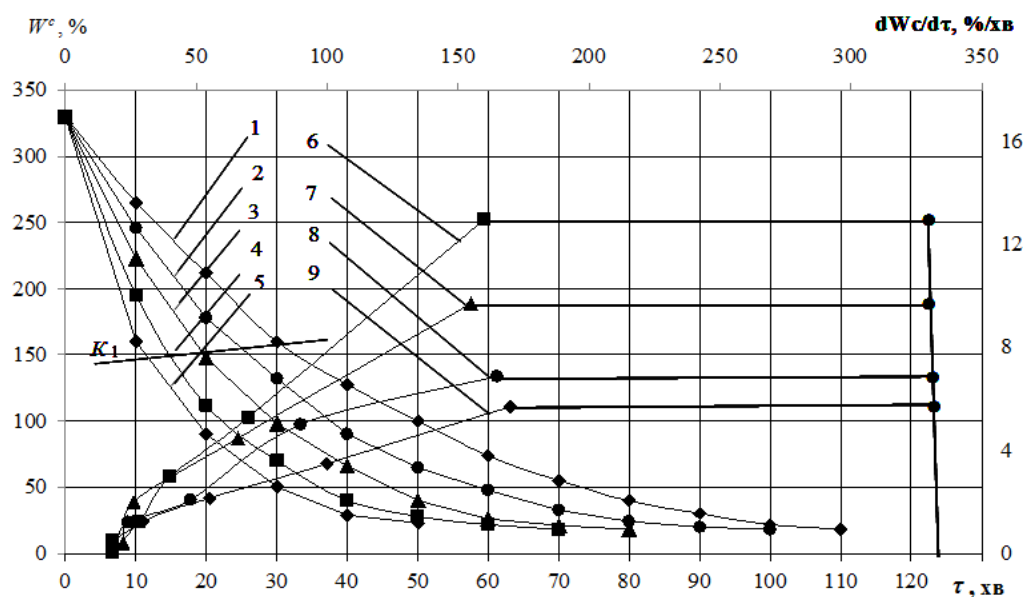


Рис. 1 – Кінетика терморадіаційно-конвективного сушіння і швидкостей сушіння глуду Алмаатинського згідно відношень потужностей конвективного нагрівача і радіаційних випромінювачів: 1, 9 –1:1; 2, 8 –1:1,5; 3, 7 –1:2,0; 4, 8 –1:2,5; 5 – 1:3

В процесі узагальнення даних періодів сушіння глуду Алмаатинський, вивели рівняння зміни вологовмісту від тривалості зневоднення та зміни пропорцій потужностей зовнішнього конвективного підігрівача і потужності опромінення:

Перший період сушіння:

$$W^c = (-5,4 \cdot (K/T) \tau + 0,9) \tau + 1,4 (K/T) + 328 \text{ при } R^2 = 0,91;$$

Другий період сушіння:

$$W^c = 390 (K/T)^{-0,46} e^{\tau (0,01(K/T) + 0,016)} \text{ при } R^2 = 0,94,$$

де W^c – вологовміст глуду, %; τ – тривалість, хв; K/T – відношення пропорцій потужностей конвективного підігрівача та радіаційних випромінювачів з діапазоном довжин хвиль 0,75...1,5 мкм; R^2 – коефіцієнт кореляції.

Обробка дослідних результатів швидкостей сушіння $dW^c/d\tau$ (рис 1.) спостерігається в першому періоді при відношеннях потужностей конвективного підігрівача та радіаційних випромінювачів від 1:1 до 1:2,5 зростання швидкості сушіння для глуду Алмаатинський від 5,7 до 13 %/хв.

Проаналізувавши другий період сушіння глуду Алмаатинський, вивели для всіх співвідношень рівняння впливу вологовмісту W^c глуду та відстані від опромінювачів до глуду на зміну швидкості сушіння $dW/d\tau$.

$$dW^c/d\tau = (2,16(K/T) + 0,061) \ln W^c - 6,52(K/T) + 0,073 \text{ при } R^2 = 0,96.$$

Провівши терморадіаційно-конвективне сушіння знаходили вплив відношення потужностей конвективного підігрівача та радіаційних випромінювачів на зміну органолептики та хімічного складу глуду Алмаатинського. Біологічна цінність висушеного глуду Алмаатинського багато в чому залежить від вмісту вітамінів, особливо, аскорбінової кислоти, β -каротину і поліфенольних сполук. Вміст вітамінів в сухому глуді наведений в таблиці 1.

Таблиця 1

Вплив відношення потужностей конвективного підігрівача та радіаційних випромінювачів на хімічний склад сухого глуду

Відношення потужностей конвективного підігрівача та радіаційних випромінювачів	Тривалість сушіння глуду, хв.	На сухий залишок				
		%		мг/100 г		
		вміст пектину	титровані кислоти	аскорбінова кислота	поліфенольні сполуки	β-каротин
Глід Алмаатинський						
1:1	120	10,3	3,2	22,7	1420	12,9
1:1,5	100	10,7	3,4	25,3	1465	12,8
1:2	80	10,5	3,5	25,2	1400	13,2
1:2,5	70	9,5	3,2	23,6	1380	12,5
1:3	60	7,9	2,3	17,9	1250	12,0

З рис. 2 спостерігається, що збільшення енергії випромінювання в співвідношенні конвективної і термо-радіаційної теплоти призводить до зменшення енергії на 1 кг сухого глоду з 7,7 до 5 кВт год/ кг сухого глоду.

В сухого глоду Алмаатинський при відношенні потужності конвективного підігрівача та радіаційних випромінювачів 1:1,5...1:2 спостерігались найвищі органолептичні і фізико-хімічні (кількість аскорбінової кислоти, β -каротину та поліфенольних сполук) складові і діапазон даного відношення доцільно застосовувати при сушінні глоду.

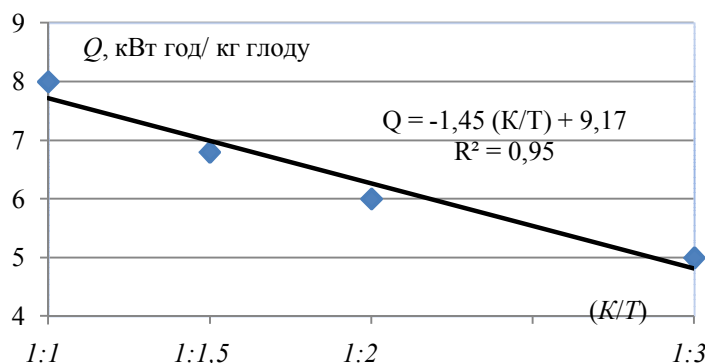


Рис.2 – Вплив відношення потужностей конвективного нагрівача і термо-радіаційних генераторів на зміну витрат енергії сушіння глоду

Зовнішній вигляд глоду Алмаатинського після термо-радіаційно-конвективного сушіння при різних співвідношеннях потужностей зовнішнього конвективного нагрівача та термо-радіаційних генераторів зображено на рис. 3.

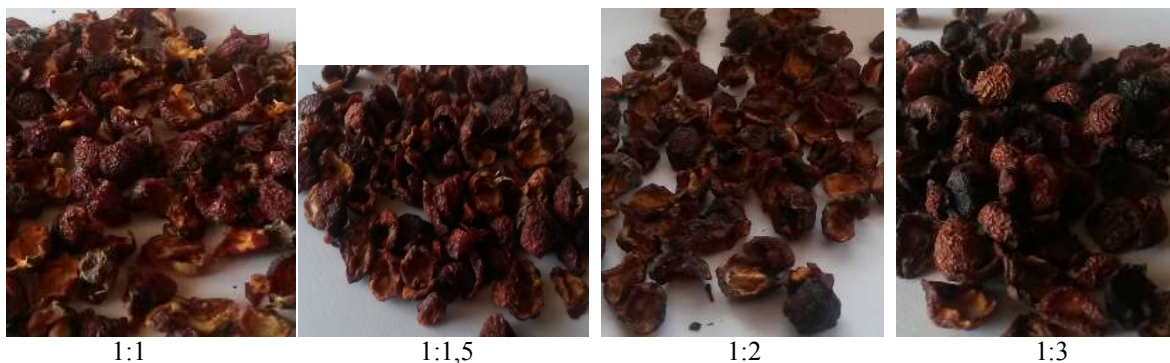


Рис. 3 – Зовнішній вигляд глоду Алмаатинського після термо-радіаційно-конвективного сушіння при різних співвідношеннях потужностей зовнішнього конвективного нагрівача та термо-радіаційних генераторів

Після сушіння плоди глоду Алмаатинський [2], які мають найвищу біологічну цінність, висушені термо-радіаційно-конвективним методом енергопідведення за температури сушильного агенту 80°C закладали на зберігання. Сушений глід фасували в поліетилентерафталатові герметично закриті пакети з повітряним середовищем і картонно-поліетиленові коробки (типу Тетра-пак) з щільністю 140–180 г/м². Маса бруто глоду в двох видах тари становила 100 г. Вимірювання харчової цінності плодів глоду в дослідженні для знаходження раціональних термінів зберігання проводили в інтервалі через кожні три місяці протягом року. Дослідження проводили без доступу світла з температурою повітря 16...18°C та відносної вологості 65–75%. Зміну якісних характеристик закладеної на зберігання продукції визначали органолептично. У всіх зразках спостерігалось повне збереження натурального смаку та значної частини аромату від свіжих плодів глоду. При зберіганні відбувалась значна втрата кольору з його зміною від темно-червоного аж до бордово-коричневого в зв'язку з цукроамінними перетвореннями і реакціями окиснення поліфенольних сполук що є у глоді, та руйнуванням вітаміну С, що був інгібітором протікання небажаних реакцій.

Якість сушених плодів глоду не відрізнялась протягом трьох – шести місяців зберігання в обох матеріалах упаковок і мала ідентичний вигляд. При зберіганні дев'ять – дванадцять місяців спостерігалось значне потемніння плодів та незначне їх усування. Термо-радіаційно-конвективне сушіння викликало зміни в біохімічному складі глоду і встановлено, що основна втрата поживних речовин плоду відбувається при низькотемпературному зневодненні внаслідок більшої тривалості процесу сушіння.

Біологічна цінність висушених термо-радіаційно-конвективним енергопідведенням плодів глоду обумовлюється наявністю у них вітамінів. Згідно з досліджень, вміст каротину у висушених плодах глоду знижу-

вався в залежності від тривалості зберігання (рис. 4). В картонно-поліетиленовій тарі при зберіганні інтенсивніше відбувались втрати каротину ніж в поліетилентерафталатових пакетах, зокрема після трьох місяців зберігання глodu Алмаатинський зниження відбулось в середньому на 9 і 6 % відповідно. Після шести місяців в картонно-поліетиленовій тарі на 43%, а в в поліетилентерафталатових пакетах на 35%, після року зберігання відповідно на 60 і 47 %. Неістотне зменшення каротину в процесі нетривалого (до 3 міс.) зберігання пояснюється тим, що більшість провітаміну А все ще знаходиться в зв'язаній формі, що зменшує швидкість окиснювальних реакцій, та спричиняє незначні його втрати [3].

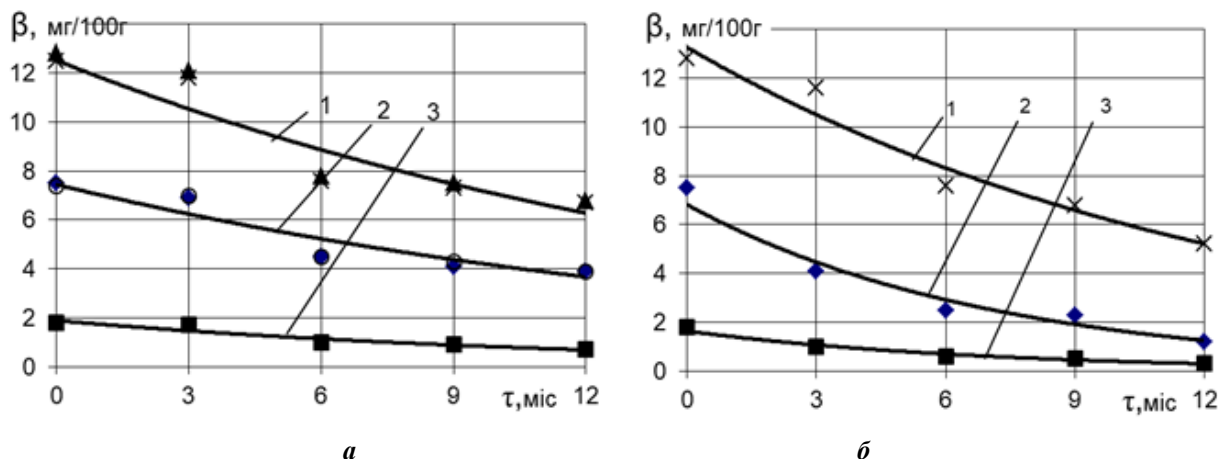


Рис. 4 – Вплив терміну зберігання плодів глodu в поліетилентерафталатових пакетах (рис. а) і в картонно-поліетиленових коробках (рис. б) висушених терморадіаційно-конвективним енергопідведенням на зміну вмісту каротину, мг/100 г: 1 – глід Алмаатинський; 2 – глід Шаміль; 3 – глід Людмил

Апроксимуючи дослідних даних вмісту каротину в різних сортах плодів глodu під час зберігання показані в табл. 2.

Таблиця 2

Експоненціальні рівняння впливу терміну зберігання плодів глodu висушених терморадіаційно-конвективним енергопідведенням на зміну вмісту аскорбінової кислоти

Сорт глodu	Зберігання в поліетилентерафталатових пакетах	Зберігання в картонно-поліетиленових коробках
Алмаатинський	$\beta = 12,5 e^{-0,06 \tau}$, $R^2 = 0,87$	$\beta = 13,3 e^{-0,08 \tau}$, $R^2 = 0,96$
Шаміль	$\beta = 7,5 e^{-0,06 \tau}$, $R^2 = 0,88$;	$\beta = 6,8 e^{-0,14 \tau}$, $R^2 = 0,95$;
Людмил	$\beta = 1,9 e^{-0,08 \tau}$, $R^2 = 0,87$	$\beta = 1,63 e^{-0,14 \tau}$, $R^2 = 0,95$

τ – тривалість зберігання, міс; β – вміст каротину в глodu, мг/100 г.

На рівні з каротином, якість висушеного глodu оцінюється наявністю в ньому аскорбінової кислоти. Зміна вмісту аскорбінової кислоти під час зберігання слугує тест-показником якості сушеного глodu [4, 5] показана на рис. 5.

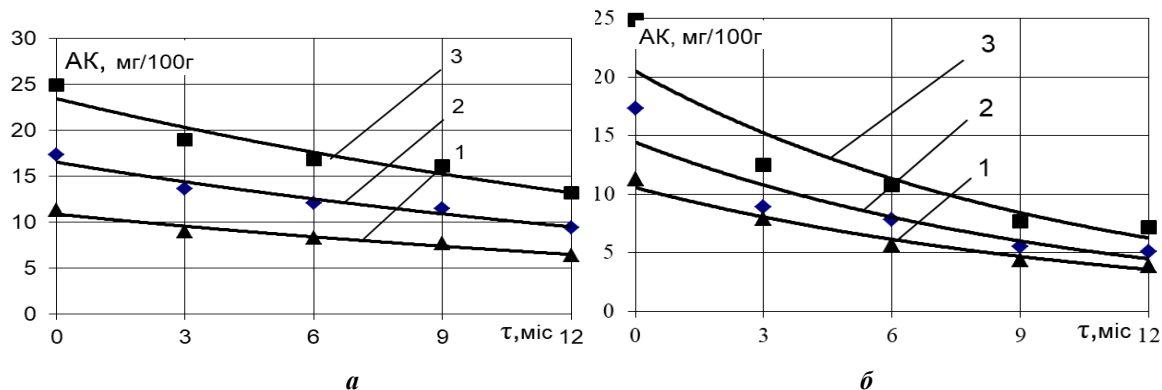


Рис. 5 – Вплив терміну зберігання плодів глodu в поліетилентерафталатових пакетах (рис. а) і в картонно-поліетиленових коробках (рис. б) висушених терморадіаційно-конвективним енергопідведенням на зміну вмісту аскорбінової кислоти, мг/100 г: 1 – глід Алмаатинський; 2 – глід Шаміль; 3 – глід Людмил

Пакуванню на зберігання підлягали плоди з найвищим вмістом аскорбінової кислоти після терморадіаційно-конвективного сушіння. Згідно з досліджень втрати аскорбінової кислоти при зберіганні проходять досить інтенсивно після року зберігання. Процес зменшення аскорбінової кислоти глодом пояснюється окисненням аскорбінової кислоти до дегідроаскорбінової, а згодом і до фізіологічно інертних форм – 2,3 дикетоглуконової кислоти.

Згідно досліджень, аналогічно каротину для аскорбінової кислоти до трьох місяців зберігання втрати проходили менш інтенсивно і для глоду Алмаатинський становили 20% в поліетилентерафталатових пакетах і 32% в картонно-поліетиленовій тарі. Після року зберігання втрати становили відповідно – 43% та 63%. Для глоду Людмил втрати аскорбінової кислоти за 3 місяці в поліетилентерафталатових пакетах становили 24% в картонно-поліетиленовій тарі – 50%, а після року зберігання – 48% і 70% відповідно.

Апроксимуючи дослідні дані, одержали експоненціальні рівняння впливу терміну зберігання плодів глоду висушених терморадіаційно-конвективним енергопідведенням на зміну вмісту аскорбінової кислоти табл. 3.

Таблиця 3

Експоненціальні рівняння впливу терміну зберігання плодів глоду висушених терморадіаційно-конвективним енергопідведенням на зміну вмісту аскорбінової кислоти

Сорт глоду	Зберігання в поліетилентерафталатових пакетах	Зберігання у картонно-поліетиленових коробках
Людмил	$AK = 23,5e^{-0,05\tau}$, $R^2 = 0,93$	$AK = 23,5e^{-0,05\tau}$, $R^2 = 0,93$
Шаміль	$AK = 16,6e^{-0,046\tau}$, $R^2 = 0,94$	$AK = 16,6e^{-0,046\tau}$, $R^2 = 0,94$
Алмаатинський	$AK = 10,9e^{-0,04\tau}$, $R^2 = 0,95$	$AK = 10,9e^{-0,04\tau}$, $R^2 = 0,95$

де АК – вміст аскорбінової кислоти в плодах глоду, висушених терморадіаційно-конвективним енергопідведенням, мг/100 г.

В наступній серії дослідів проводили дослідження зміни загальної кількості поліфенольних сполук в глоді під час зберігання протягом року (рис. 6.). Найменші втрати поліфенольних сполук простежувались в перші три місяці зберігання в усіх сортах глоду становили 4% в поліетилентерафталатових пакетах і 9 % в картонно-поліетиленовій тарі. Після року зберігання становили відповідно 60 % в поліетилентерафталатових пакетах і 82 % в картонно-поліетиленовій тарі, що пояснюється процесами окиснення глоду при зберіганні.

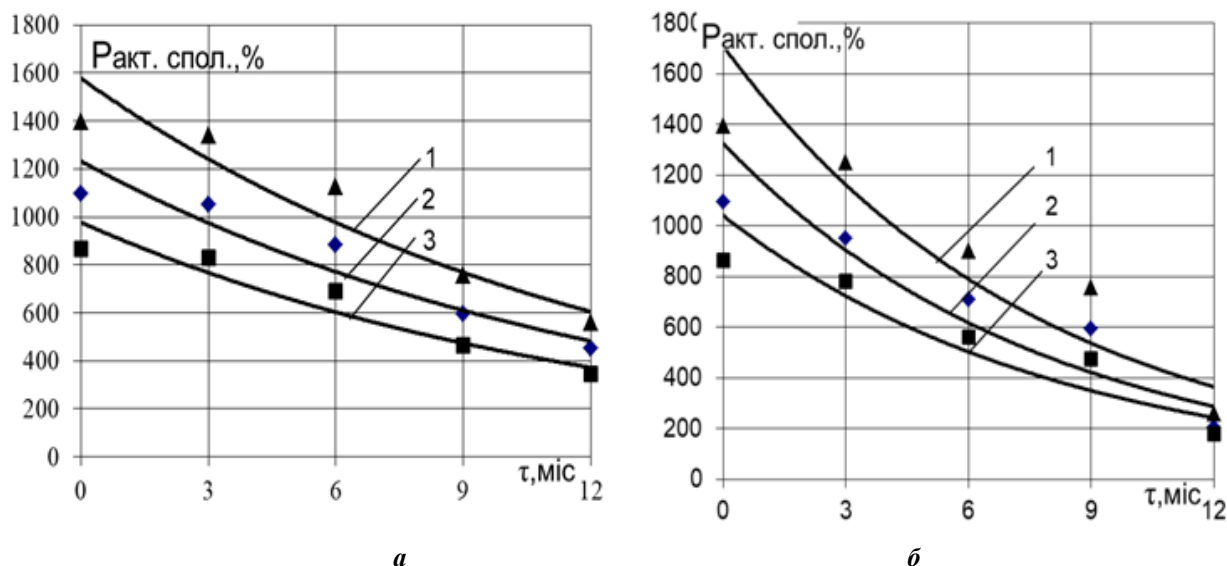


Рис. 6 – Вплив терміну зберігання плодів глоду в поліетилентерафталатових пакетах (а) і в картонно-поліетиленових коробках (б) висушених терморадіаційно-конвективним енергопідведенням на зміну загальної кількості поліфенолів, %: 1 – глід Алмаатинський; 2 – глід Шаміль; 3 – Людмил

Апроксимуючи дослідні дані, одержали експоненціальні рівняння впливу терміну зберігання плодів глоду висушених терморадіаційно-конвективним енергопідведенням на зміну загальної кількості поліфенолів табл. 4:

Таблиця 4

**Експоненціальні рівняння впливу терміну зберігання плодів глоду висушених
терморадіаційно-конвективним енергопідведенням на зміну вмісту аскорбінової кислоти**

Сорт глоду	Зберігання в поліетилентерафталатових пакетах	Зберігання картонно-поліетиленових коробках
Алмаатинський	$P_{\text{ак. спол.}} = 1557 e^{-0,08 \tau}$, $R^2 = 0,92$	$P_{\text{ак. спол.}} = 1711 e^{-0,13 \tau}$, $R^2 = 0,83$
Шаміль	$P_{\text{ак. спол.}} = 1233 e^{-0,08 \tau}$, $R^2 = 0,92$	$P_{\text{ак. спол.}} = 1326 e^{-0,127 \tau}$, $R^2 = 0,83$
Людмил	$P_{\text{ак. спол.}} = 977 e^{-0,08 \tau}$, $R^2 = 0,92$	$P_{\text{ак. спол.}} = 1041 e^{-0,12 \tau}$, $R^2 = 0,85$

де $P_{\text{ак. спол.}}$ – кількість поліфенолів у плодах глоду.

Згідно результатів досліджень встановлено, що незалежно від тривалості зберігання плодів простежувалося зниження вмісту каротину, аскорбінової кислоти і поліфенольних сполук в глоді.

Експериментальні дослідження показують, що зберігання сухих плодів глоду як у поліетилентерафталатових пакетах, так і в картонно-поліетиленових коробках, сприяє деструкції аскорбінових кислот в глоді. Причому при зберіганні в картонно-поліетиленових коробках втрати вітаміну С більші, ніж під час зберігання в поліетилентерафталатових пакетах. Найвищі показники збереженості аскорбінової кислоти в глоду Алмаатинського в поліетилентерафталатових пакетах, що пояснюється ламінованою поверхнею з прошарком алюмінію упаковки, що не дає вітаміну С руйнуватися під дією променів. Певні втрати аскорбінової кислоти в сортах Шаміль і Людмил пояснюються процесами окиснення заліза, який міститься в зразках глоду, та процесами відновлення дегідроаскорбінових кислот.

Встановлено, що висушені терморадіаційно-конвективним енергопідведенням плоди глоду при зберіганні втрачають вміст Р-активних речовин в його хімічному складі. Дані зміни поліфенольних сполук є наслідком ферментативних процесів окиснення та гідролізу високомолекулярних речовин при зберіганні глоду до олігомерів і полімерів.

Найвищу якісну оцінку отримали зразки висушені терморадіаційно-конвективним енергопідведенням, що зберігалися в поліетилентерафталатових пакетах з ламінованою поверхнею. Дещо нижчі органолептичні показники якості зразків глоду були після зберігання в картонно-поліетиленових коробках. Зниження якості є наслідком нещільності прилягання плодів в картонно-поліетиленових коробках та присутності значної кількості початкового доступу повітря. Нагрівання продукту, що має в своєму складі гексози призводить до утворення оксиметилфурфуролу, та пентоз–фурфуролу. Згідно наших досліджень, в плодах глоду, що зневоднювалися різними способами при зберіганні не спостерігалось утворення оксиметилфурфуролу та фурфуролу. Це пояснюється відсутністю в плодах глоду гексози та пентози, які в парі з амінокислотами могли б утворити в плодах глоду оксиметилфурфуролу. Візуальні перевірка встановила, що в сортах глоду Шаміль та Алмаатинський через пів року зберігання з'являлися коричневі відтінки, та в дев'ять місяців зразки набували світло-коричневого забарвлення, і до 12 місяців зберігання ставали темнішими. Плоди глоду Людмил через пів року зберігання не втрачали жовте забарвлення, та через рік в них проявлявся незначний світло-коричневий відтінок.

Висновки. Згідно з проведеними дослідженнями встановлено, що найкращі органолептичні (зовнішній вигляд) та фізико-хімічні показники простежувалися в сухого глоду Алмаатинський при взаємній дії конвективного підігрівача та радіаційних випромінювачів при співвідношенні впливу 1:1,5...1:2 і діапазон даного відношення доцільно застосовувати при сушінні глоду.

Рациональний термін зберігання (до дев'яти місяців) сушених плодів терморадіаційно-конвективним енергопідведенням з використанням поліетилентерафталатових пакетах з ламінованою поверхнею. Зразки після зберігання за рахунок відсутності світла та повітря відзначалися дещо кращою якістю в порівнянні із глодом, що зберігалися в картонно-поліетиленових коробках. Не зважаючи на це, всі зразки глоду незалежно від сорту та термінів зберігання, залишалися джерелами аскорбінової кислоти, каротину та поліфенольних сполук. Дані результати показників якісного складу зразків вказують на високу біологічну цінність і ефективність застосування терморадіаційно-конвективного сушіння для використання глоду в харчовій промисловості.

References

- Dubkovetskyi I.V., Malezhyk I.F., Strelchenko L.V., Burlaka T.V. (2021) Patent of Ukraine, 121826: Convective-thermal-radiation drying plant State Patent Office of Ukraine, Bulletin
- Dubkovetskyi I.V., Malezhyk I.F., Yevchuk Y.V., Study of the process of convective drying of hawthorn // Scientific journal "Food Industry" - 2012. - №12. - pp. 42-47.
- Strelchenko L., Dubkovetskyi I., Marinin A., Pasichnyi V. (2021). Patent of Ukraine, 136356: Method for storing apple snacks. State Patent Office of Ukraine, Bulletin 15.
- Dubkovetskyi I.V., Malezhyk I.F., Yevchuk Y.V., (2012). Study of biologically active substances during convective, conductive and microwave dehydration of hawthorn varieties *Scientific works*, 41, 87-92.
- Ryazanova O.A., Tretyakova Y.V. (2005). Biochemical composition of hawthorn berries growing in the Kemerovo region. *Storage and processing of agricultural raw materials*, 6, 56.

STUDY OF THE SHELF LIFE OF HAWTHORN FRUITS AFTER THERMALRADIATION-CONVECTIVE DRYING

Dubkovetsky I.V., Ph.D., Associate Professor ¹, Taras Tarasenko,

Valery Badakh Ph.D., Associate Professor ²

¹National University of Food Technologies, Kyiv

²National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Abstract. Today, the most effective way of dehydrating food products for canning is drying. Thus, the main task of the drying process is to achieve the highest quality with minimal energy consumption. This paper presents a study of the drying kinetics of Almaty hawthorn with simultaneous thermoradiative and convective energy supply. The work highlights the issue of finding a rational ratio between the amount of heat expended from an external convective heater and thermal radiation generators. Changes in the quality of dried hawthorn products during storage are considered. Storage of different varieties of hawthorn was carried out in two types of polyethylene terephthalate bags and cardboard-polyethylene boxes in an air environment. In cardboard and polyethylene containers, carotene losses occurred more intensively during storage than in polyethylene terephthalate bags, in particular, after a year of storage of hawthorn Almaatynsky, the decrease occurred by 60 and 47%, respectively. According to research, similar to carotene in ascorbic acid, after a year of storage, the loss of ascorbic acid for hawthorn Alma-Ata was 48% in polyethylene terephthalate bags and 70% in cardboard and polyethylene containers. The studies have shown that hawthorn fruits dried by thermal-radiation-convective energy supply lose the content of P-active substances in their chemical composition during storage due to enzymatic processes of oxidation and hydrolysis of high molecular weight substances during hawthorn storage. The highest qualitative assessment was obtained for hawthorn samples dried by thermal-radiation-convective energy supply, stored in polyethylene terephthalate bags with a laminated surface. The organoleptic quality indicators of hawthorn samples were somewhat lower after storage in cardboard and polyethylene boxes, which is a consequence of the loose fit of the fruit in cardboard and polyethylene boxes and the presence of air access.

Keywords: hawthorn, thermalradiation-convective drying, storage, polyethylene terephthalate bags, cardboard and polyethylene packaging, ascorbic acid, carotene, polyphenols.

Список використаної літератури

1. Дубковецький І. В., Малєжик І. Ф., Стрельченко Л. В., Бурлака Т. В. (2021) Патент України, 121826: Конвективно-терморадіаційна сушильна установка Державне патентне відомство України, Бюлетень
2. Дубковецький І.В., Малєжик І. Ф., Євчук Я. В., Дослідження процесу конвективного сушіння глоду // Науковий журнал «Харчова промисловість» – 2012. – №12. – ст. 42- 47
3. Стрельченко Л., Дубковецький І., Маринін А., Пасічний В. (2021). Патент України, 136356: Спосіб зберігання яблучних снєків. Державне патентне відомство України, Бюлетень 15
4. Дубковецький І.В., Малєжик І. Ф., Євчук Я. В., Дослідження біологічно активних речовин при конвективному, кондуктивному і мікрохвильовому зневодненні сортів глоду // Наукові праці ОНАХТ –2012. – вип. 41. – ст. 87-92
5. Рязанова О.А. Биохимический состав ягод боярышника, произрастающего в Кемеровской области / О.А. Рязанова, Ю.В. Третьякова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2005. – №6. – С. 56

Отримано в редакцію 11.06.2023

Прийнято до друку 26.11.2023

Received 11.06.2023

Approved 26.11.2023

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ

Заврічко С.С., аспірант,

Кобзар О.В., аспірант,

Осадчук П. І., д.т.н., доцент

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Стаття присвячена проблемі оптимізації енергоефективного обладнання в екстракційних апаратах для виробництва соняшникової олії. Дослідження зосереджено на пошуку методів та технологій, які сприяють зниженню енергоспоживання та покращенню продуктивності в процесі екстракції. Застосування запропонованих методів та технологій може призвести до зниження споживання енергії, підвищення продуктивності та поліпшення якості виробництва соняшникової олії.

Аналіз сучасного стану показав, що оптимізація енергоефективного обладнання може виявитись важливим кроком у покращенні продуктивності та енергетичної ефективності виробництва соняшникової олії. Використання енергоефективних електродвигунів, оптимізація режимів роботи та впровадження теплообмінників є лише деякими з запропонованих методів оптимізації.

Оптимізація енергоефективного обладнання в екстракційних апаратах соняшникової олії може привести до зниження споживання енергії та витрат, підвищення ефективності процесу та покращення сталості виробництва. Застосування цих методів може бути корисним для підприємств у забезпеченні сталого розвитку та досягненні конкурентоспроможності на ринку соняшникової олії.

Стаття має практичну цінність та великий потенціал для виробників соняшникової олії та інших зацікавлених сторін у досягненні позитивних результатів. Запропоновані методи та рекомендації можуть бути використані для впровадження енергоефективного обладнання та покращення процесу екстракції, сприяючи зниженню витрат та покращенню сталості виробництва соняшникової олії.

Ключові слова: екстракція, енергоефективне обладнання, соняшникова олія.

Вступ. Сучасний промисловий сектор стикається зі значними викликами щодо оптимізації енергоефективності та ефективного управління електромеханічним обладнанням. В умовах постійного зростання енергетичних витрат і обмежених ресурсів, прискорення розвитку технологій є невід'ємною складовою для досягнення сталого промислового зростання. Одним з ключових аспектів є розробка ефективних методів оптимізації енергоефективного обладнання та систем автоматизованого керування, зокрема в контексті екстракційних апаратів.

Екстракційні апарати використовуються в різних промислових галузях, таких як хімічна, нафтова, фармацевтична та харчова промисловість, для вилучення цінних речовин з сировини або виробничих потоків. Проте, великі енергетичні витрати, неефективне використання ресурсів та недостатня автоматизація призводять до зростання витрат і погіршують конкурентоспроможність підприємств.

Метою роботи є розгляд та розробка методів оптимізації енергоефективного обладнання та системи автоматизованого керування електромеханічним обладнанням та розподілу завантаження екстракційних апаратів. Наше дослідження спрямоване на виявлення шляхів поліпшення продуктивності, зменшення витрат енергії та оптимізації розподілу завантаження екстракційних апаратів з використанням новітніх технологій автоматизованого керування.

Огляд попередніх досліджень показує, що вже були проведені дослідження щодо енергоефективності в промисловості, але досить обмежено досліджено аспекти, пов'язані з екстракційними апаратами. Тому наша робота заповнює цю прогалину, розглядаючи оптимізацію системи електромеханічного обладнання та розподілу завантаження екстракційних апаратів з урахуванням вимог енергоефективності та автоматизованого керування.

Результати дослідження можуть мати значний вплив на промисловість, сприяючи зменшенню споживання енергії, підвищенню продуктивності та зниженню виробничих витрат. Крім того, вони відкривають нові можливості для впровадження інноваційних підходів у секторі екстракційної промисловості.

У статті ми пояснюємо нашу методологію, окреслюємо результати експериментів та проводимо детальний аналіз, щоб продемонструвати ефективність запропонованих методів оптимізації. Окреслимо перспективи подальших досліджень та потенційні напрямки вдосконалення систем енергоефективного обладнання та автоматизованого керування екстракційними апаратами.

Опис системи електромеханічного обладнання та екстракційних апаратів.

Екстрактор складається із роликового конвеєра, встановленого на горизонтальній прямокутній рамі. Основним елементом апарату є перфорована стрічка, по якій рухається матеріал, що обробляється. Свіжий розчинник розпорошується через форсунку на сході матеріалу зі стрічки. Міцелла, що утворюється, збирається в збірник і насосом направляється на наступний ділянку, де процес повторюється [1].

Система електромеханічного обладнання та екстракційних апаратів є ключовим елементом виробництва соняшникової олії. Вона включає в себе ряд компонентів, що взаємодіють для забезпечення ефективного процесу екстракції та виробництва олії з насіння соняшнику.

Електромеханічне обладнання: Система електромеханічного обладнання включає в себе електродвигуни, насоси, приводи та інші механізми, які забезпечують рух та функціонування екстракційного апарату. Вони відповідають за подачу сировини, перемішування розчинника та витяжки, створення вакууму для запобігання витоку розчинника з екстрактора, а також рух розчинників через систему [4].

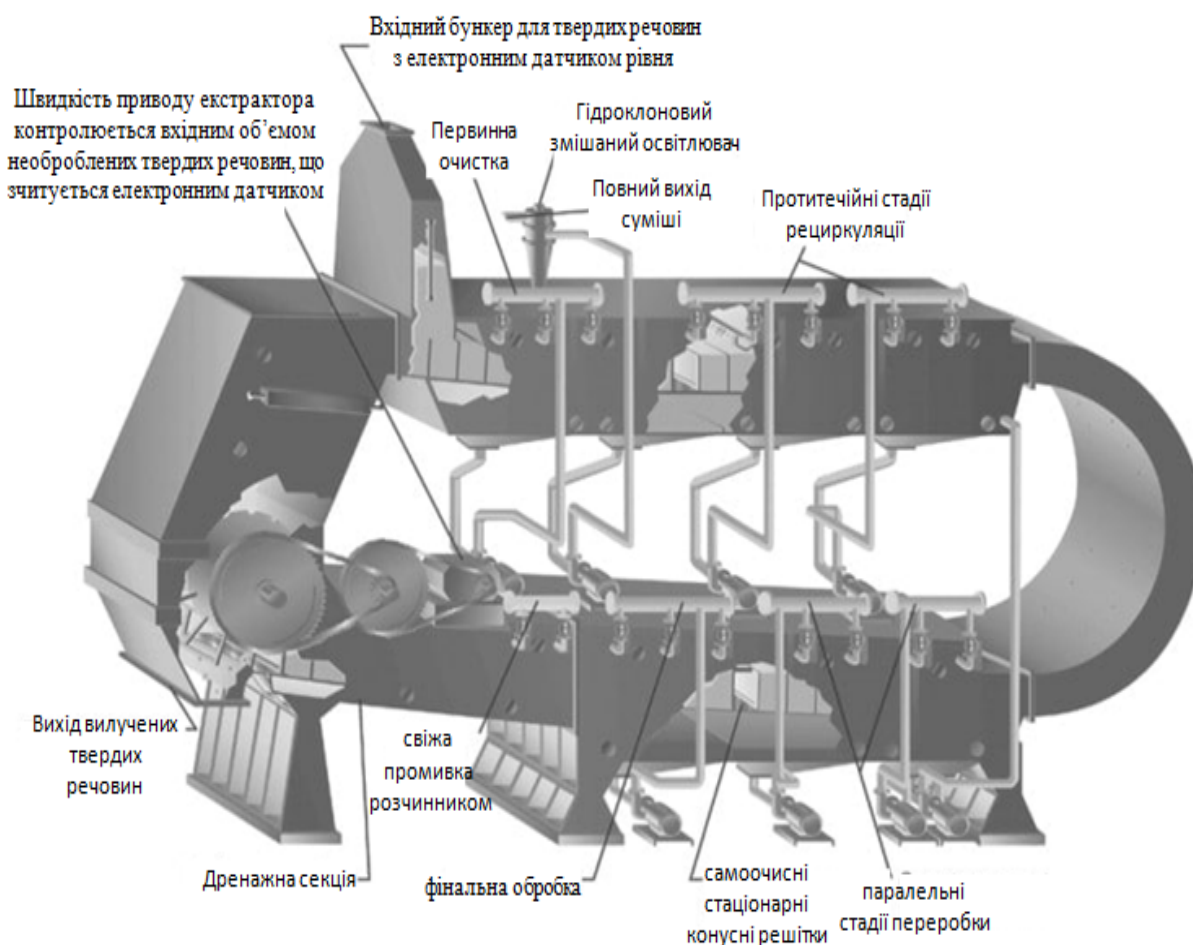


Рис.1 – Екстрактор фірми Де Смет 600 [2]

Екстракційний процес: Головним елементом системи є екстракційний апарат. Він складається з резервуара для витяжки та механізму для змішування насіння з розчинником. Екстракційний процес полягає в розчиненні олії з насіння у розчиннику.

В екстракторі використовується головний електропривод потужністю 30 кВт/год, дренажні насоси загальною потужністю 15 кВт/год, а також живильник потужністю 1.5 кВт/год. Що і є основною цілю оптимізації[5].

Аналіз енергетичних проблем та можливих вдосконалень.

Виявлено ряд енергетичних проблем у виробництві соняшникової олії. В основному проблеми виявляються в таких ланках процесу як енергетичні витрати на КПД двигуна. Використання не вірно підібраних електродвигунів може призводити до зайвих енергетичних втрат у системі. Низький КПД може бути зумовлений зносом обладнання, старінням компонентів або неефективним керуванням електродвигунами. Екстракційна установка вимагає безперервної подачі [5]:

- Добре підготовлених бобів або насіння у формі пелюстки, макухової крупки, звичайних гранул чи гра-

нул після експандера.

- Насиченої сухої пари під необхідним тиском
- Електроенергії
- Охолоджувальної води для конденсаторів необхідної температури
- Стисненого повітря для пневматичних регулювальних пристроїв під необхідним тиском

Енергетичні витрати в дренажних насосах і в живильнику. Неєфективність цих систем може привести до додаткових енергетичних витрат, особливо якщо вони працюють постійно або в незадовільних умовах.

Недостатня ефективність розподілу завантаження. Нерівномірний розподіл завантаження між різними етапами процесу може знизити загальну ефективність системи та спричинити недосяжність максимальної продуктивності.

Недостатня автоматизація процесу. Відсутність автоматизованих систем управління може призводити до недоцільного використання ресурсів та зайвих енергетичних витрат через неконтрольований режим роботи обладнання.

Втрати енергії в процесі екстракції та очищення олії. Недосконалість технологічних процесів екстракції та очищення може призводити до невиправданого споживання енергії і збільшення витрат на переробку сировини.

Можливі вдосконалення: Оптимізація енергетичного управління. Застосування ефективних технологій керування електродвигунами, які дозволяють автоматично регулювати їхню потужність залежно від потреб системи.

Впровадження енергоефективних насосів та живильників. Використання енергоефективних насосів і систем живлення може допомогти знизити енергетичні витрати на цих ланках.

Автоматизація процесу. Впровадження систем автоматизації та контролю дозволить оптимізувати роботу обладнання, забезпечити надійність процесів та ефективніше використовувати енергію.

Покращення технологій екстракції та очищення: Вдосконалення технологічних процесів може допомогти знизити втрати енергії та збільшити виходи корисних продуктів.

Використання відновлювальних джерел енергії. Застосування сонячних панелей або вітряних турбін може забезпечити часткове живлення системи за рахунок зеленої енергії.

Постійний моніторинг та аналіз. Встановлення систем моніторингу енергоспоживання дозволить виявляти проблеми та шукати можливості для їх вирішення в реальному часі.

Цей аналіз може послужити основою для розробки стратегії покращення енергетичної ефективності у виробництві соняшникової олії. Для успішного вдосконалення необхідно враховувати специфіку підприємства, фінансові можливості підприємства.

Недостатня ефективність розподілу завантаження також впливає на енергетичну ефективність та продуктивність системи. Наприклад, підвищена завантаженість деяких екстракційних апаратів може призводити до нерівномірного розподілу завантаження та зниження продуктивності.

Гіпотеза. Використовуючи нове програмне забезпечення, спеціально розроблене для контролера S7-1500 екстракційного апарата на FBD (діаграми функціональних блоків), ми передбачаємо зниження часу затримки подачі продукту та збільшення продуктивності екстрактора. Впровадження цього програмного забезпечення дозволить оптимізувати роботу екстракційних апаратів та покращити енергоефективність процесу отримання соняшникової олії. Передбачається, що використання нової технології дозволить ефективніше контролювати та регулювати параметри екстракції такі, як: швидкість екстракційної стрічки, висота розподільного завантаження і т.д. , що сприятиме зниженню витрат енергії та оптимізації виробничого процесу в цілому.

Використання енергоефективного обладнання для отримання соняшникової олії може знизити енергетичні витрати та покращити продуктивність системи.

Оптимізація режиму роботи обладнання може включати в себе застосування регулювання швидкості двигуна, що дозволяє зменшити споживання електроенергії при низьких навантаженнях. Також можна використовувати системи управління навантаженням, що дозволяють оптимально розподіляти навантаження між різними апаратами та забезпечувати максимальну продуктивність.

Покращення автоматизації процесу може включати в себе застосування автоматичних систем контролю та управління, що дозволяють забезпечити стабільне функціонування обладнання та зменшити втрати електроенергії. Також можна використовувати системи моніторингу та діагностики, що дозволяють своєчасно виявляти несправності та запобігати їх виникненню [3].

У цьому контексті, головною метою є зниження енергетичних витрат та покращення продуктивності системи через застосування ефективних методик управління обладнанням. Це може допомогти покращити конкурентоспроможність підприємства та забезпечити сталий розвиток.

Зниження енергетичних витрат при отриманні соняшникової олії є важливим з кількох причин. По-перше, це допомагає знизити виробничі витрати та покращити конкурентоспроможність підприємства. Зменшення енергетичних витрат може допомогти знизити вартість продукції та зробити її більш доступною для споживачів.

По-друге, це сприяє збереженню природних ресурсів та зменшенню викидів парникових газів. Використання енергоефективного обладнання та оптимізація процесу можуть допомогти зменшити споживання електроенергії та інших ресурсів, що призводить до зменшення викидів парникових газів та забруднення навколишнього середовища.

По-третє, це допомагає покращити енергетичну безпеку країни та забезпечити сталий розвиток. Зменшення енергетичних витрат може допомогти зменшити залежність країни від імпорту енергоносіїв та покращити енергетичну безпеку. Крім того, це сприяє сталому розвитку, оскільки допомагає зберегти природні ресурси для майбутніх поколінь.

Таким чином, зниження енергетичних витрат при отриманні соняшникової олії є важливим для покращення конкурентоспроможності підприємства, збереження природних ресурсів, зменшення викидів парникових газів, покращення енергетичної безпеки країни та забезпечення сталого розвитку.

Методи оптимізації енергоефективного обладнання та системи керування.

Методи оптимізації енергоефективного обладнання та системи керування в процесі виробництва соняшникової олії включають в себе широкий спектр підходів. Ці методи орієнтовані на досягнення максимальної ефективності енергоспоживання та оптимізацію виробничих процесів. Деякі з таких методів включають [1]:

- Використання ефективних електродвигунів: Встановлення електродвигунів з високим коефіцієнтом корисної дії може допомогти знизити втрати енергії на термічне випромінювання та інші негативні явища, а також заміна контролера на більш новий (наприклад S7-1500), перегляд оптимального вибору електродвигунів для 10-ти дренажних насосів та 1-им вакуумним насосом з їхніми частотними перетворювачами (Приклад Danfoss-FC051P) тощо. Це все може сприяти зниженню споживання енергії та покращенню продуктивності.

- Впровадження систем моніторингу та управління енергетикою: Підключення кожного елемента в технологічній лінії по системі Ethernet та Profibus до ПК-серверу для моніторингу енергоспоживання та станом процесу, що дозволяє збирати та аналізувати дані про використання енергії для виявлення можливих проблем і витрат та вживати заходів для їх усунення.

- Оптимізація режимів роботи обладнання: Аналіз технологічних параметрів, таких як рівень загрузки, тиск від насосів (8 бар) та швидкість стрічки, може допомогти виявити оптимальні режими роботи екстракційного апарату. Визначення енергоефективного режиму роботи для екстрактора і системи керування дозволяє досягти ефективного використання енергії та зниження надмірного споживання (підбір налаштовувальних параметрів частотних перетворювачів Приклад: Danfoss FC-051P з параметрами P157, P101.1, P110.1, P110.2).

- Технічне обслуговування та регулярна перевірка: Регулярне обслуговування та перевірка обладнання дозволяють виявляти можливі несправності та витрати енергії, що допомагає підтримувати високу ефективність та уникнути непередбачених витрат.

- Використання нових матеріалів: Застосування нових теплоізоляційних та теплопровідних матеріалів може забезпечити ефективну ізоляцію обладнання, що зменшить втрати тепла та сприятиме економії енергії.

Ці методи сприяють досягненню більшої енергоефективності та сталого розвитку виробництва соняшникової олії, забезпечуючи зменшення енергоспоживання, зниження витрат та збереження ресурсів, а також зменшення впливу на довкілля.

Висновки. Оптимізація енергоефективного обладнання в екстракційних апаратах соняшникової олії має великий потенціал для досягнення позитивних результатів. Аналіз сучасного стану екстракційних апаратів та їх енергетичної ефективності виявив низку факторів, які суттєво впливають на енергоспоживання. Розгляд технологічних параметрів та процесів показав, що деякі аспекти можуть бути оптимізовані для досягнення більшої продуктивності та менших витрат енергії. Один із основних напрямків оптимізації полягає у використанні сучасного обладнання та програмного забезпечення для контролю та регулювання процесів у екстракційних апаратах. Ця інноваційна практика може відкрити шлях до ефективнішого використання ресурсів та досягнення більшої продуктивності в даному виробничому процесі.

Застосування запропонованих методів оптимізації необхідно розглядати як крок у напрямку сталого розвитку та збереження енергетичних ресурсів. Поєднання інноваційних технологій, програмного забезпечення та ефективних методів керування дозволяє досягти більшої точності, прогнозованості та оптимізації робочих параметрів, що, в свою чергу, призводить до зниження затрат, енергоспоживання та відходів.

References

1. Popov M.O. (2013) The undertakings of the olive-fatty galley *Bulletin of the Nat. tech. un-tu "KhPI" : sb. Sciences. etc. Theme. vip. : Technical progress and efficiency of virobnitstva.*, 67 (1040). 148-152.
2. https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-continuous-belt-extractor-Desmet-Ballestra-Zaventem-Belgium_fig2_304070586
3. Tsigankov D. E. (2021). Establishment of a wasteless technology for the processing of dormouse cake with a method of increasing the yield of the finished product: Master. diploma work, Dnipro,.114.

4. Good B.V. (2020). The production of soy oil by direct extraction at the plant for the production of 558 tons of soy for production: bachelor. Diploma work. Kyiv, 52.
5. Instructions for operation "extraction plant Desmet continuous operation". EAI Eastern Agro Investments Ltd Nicosia, Cyprus, 66.

ENERGY-EFFICIENT USE OF EQUIPMENT FOR SUNFLOWER OIL PRODUCTION

Zavrichko S.S., postgraduate,

Kobzar O.V., postgraduate,

Osadchuk P. I., doctor of technical sciences, associate professor

Odessa National University of Technology

Abstract. The article is devoted to the problem of optimization of energy-efficient equipment in extraction apparatuses for the production of sunflower oil. Research is focused on finding methods and technologies that help reduce energy consumption and improve productivity in the extraction process. The application of the proposed methods and technologies can lead to a decrease in energy consumption, an increase in productivity and an improvement in the quality of sunflower oil production.

Analysis of the current state has shown that optimization of energy-efficient equipment can be an important step in improving the productivity and energy efficiency of sunflower oil production. The use of efficient electric motors, optimization of operating modes and introduction of heat exchangers are only some of the proposed optimization methods.

Optimizing energy-efficient equipment in sunflower oil extraction machines can lead to reduced energy consumption and costs, increased process efficiency, and improved production sustainability. The application of these methods can be useful for enterprises in ensuring sustainable development and achieving competitiveness in the sunflower oil market.

The article has practical value and great potential for sunflower oil producers and other stakeholders interested in achieving positive results. The proposed methods and recommendations can be used to introduce energy-efficient equipment and improve the extraction process, helping to reduce costs and improve the sustainability of sunflower oil production.

Keywords: extraction, energy-efficient equipment, sunflower oil.

Список використаної літератури

1. Попов М. О. Оцінка і напрямки підвищення ефективності використанні енергоресурсів на підприємствах олійно-жирової галузі / М. О. Попов // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Технічний прогрес і ефективність виробництва. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2013. – № 67 (1040). – С. 148-152.
2. Rainer Mosenthin, Ulrike Messerschmidt, Nadja Sauer, Patrick Carré Effect of the desolventizing/toasting process on chemical composition and protein quality of rapeseed meal: https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-continuous-belt-extractor-Desmet-Ballestra-Zaventem-Belgium_fig2_304070586
3. Циганков Д. Є. Обґрунтування безвідходної технології переробки макухи соняшника з отриманням олії з метою збільшення виходу готового продукту : магістер. дипломна робота : 181, Харчові технології / Циганков Дмитро Євгенійович ; наук. керівник Чурсінов Ю. О. ; Дніпровський держ. аграрно-екон. ун-т, Інженерно-технологічний ф-т, Каф. технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції. – Дніпро, 2021. – 114 с.
4. Гуд Б.В. Виробництво соєвої олії шляхом прямої екстракції у цеху потужністю 558 т насіння сої за добу : бакалавр. Дипломна робота : -Київ, 2020 р. – 52с.
5. Інструкція з експлуатації «екстракційна установка Десмет неперивної дії». EAI Eastern Agro Investments Ltd NICOSIA, CYPRUS. 66ст.

Отримано в редакцію 14.06.2023

Прийнято до друку 26.11.2023

Received 14.06.2023

Approved 26.11.2023

PERFORMANCE OF HEAT PUMP BASED ON COMPOSITE ADSORBENT 'SILICA GEL – CRYSTALLINE HYDRATE'

Belyanovskaya E.A., PhD, docent, Sukhyy K.M., SciD, Prof., Serhiienko Ya.O, postgraduate student, Sukhyy M.K, student, Sukha I.V., PhD, docent
State Higher Education Institution «Ukrainian State University of Chemical Engineering»,
Dnipro, Ukraine

Abstract. Performance of an adsorptive heat pump has been studied. The factors affecting the efficiency of its work have been analyzed. Operating parameters and efficiency of adsorptive heat pumps and adsorptive heat storage devices have been compared. An algorithm of calculating the basic operating characteristics of an adsorption heat pump in heat supply systems has been proposed. It involves calculating the mass transfer coefficient, final absolute humidity of the air flow passed through adsorbent layer, the water uptake or adsorption and the useful heat of adsorption and heat of condensation, determination of heat inputs for the operation of the device such as heating the adsorbent, case of the device, hydraulic circuit, the water in the tank and adsorbed water, heat of desorption and heat of evaporation, estimation the coefficient of energy performance. The evaluation criteria of the efficiency of adsorptive heat pumps and heat storage devices have been compared. It is shown that the operating parameters of the adsorptive heat pump and the adsorptive thermal energy storage device based on composite adsorbents 'silica gel – sodium sulfate' and 'silica gel – sodium acetate' are the same, i.e. airflow rate $0.08 - 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ and initial absolute humidity of airflow $0.03 - 0.04 \text{ kg/m}^3$, which are corresponded with maximal efficiency of the device. The temperature of the humid air flow directed to the adsorbent layer is suggested to be set at $20 - 40^\circ\text{C}$. The measures to increase the efficiency of the adsorptive heat pump are proposed. It is shown that ultrasonic air humidification allows to increase the coefficient of energy performance by almost 2 times compared to steam humidification. The obtained results can be used for developing energy-efficient heating systems of residential premises.

Key words: adsorptive heat pump, adsorptive heat energy conversion, coefficient of energy performance, composite adsorbent, adsorption.

Introduction. Shortening of primary fuels and rising energy prices along with air pollution and global warming makes it necessary to use all available energy resources. Promising devices are heat pumps, that is, heat transformers, in which working fluids transfer heat from a lower temperature level to a higher one during the implementation of the reverse thermodynamic cycle [1]. The most common compression (air and steam) heat pumps, based on the gradual compression and expansion of the working fluid, consume quite a lot of electrical energy during operation.

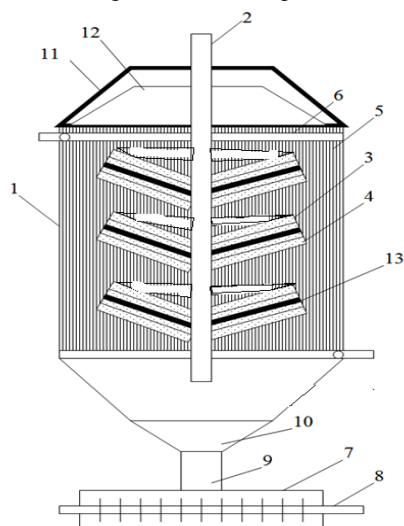
More promising are adsorption heat pumps based on adsorption of vapor by solid substances (adsorbents), which, unlike absorptive heat pumps, are insensitive to gravity and do not require significant expenditure of electrical energy for operation and allow using low-potential heat energy [2, 3].

However, implementing of such units into convenient heating system requires a model which allows to estimate efficiency of adsorptive device according to all phases of operation. Generally, mathematical models of adsorptive devices are focused on only one phase of operating, i.e. adsorption. Moreover, efficiency of operating is estimated by only this phase [4, 5].

However, operating cycle of adsorptive heat conversion device involves the next stages: adsorption of work fluid with adsorbent or discharge and heating the adsorbent to regeneration temperature and desorption or charge, then adsorbent is cooled down to the temperatures when adsorption begins. Discharge can be accompanied by evaporation of the work fluid.

The present work is devoted to estimation of the performance of adsorptive heat pump. To achieve this aim, the next tasks are set:

- to determine basic factors affecting the coefficient of energy performance;
- to reveal correlation of the coefficient of energy performance and operating mode of adsorptive heat pump;
- to state the basic requirements to performance of open-mode adsorptive heat storage units.



1 – adsorption-desorption type reactor; 2 – hydraulic circuit; 3 – fins; 4 – adsorbent; 5 – capacitor; 6 – cylindrical rings; 7 – evaporator; 8 – heater; 9 – a narrowing throat; 10 – distribution nozzle; 11 – cover; 12 – plate for condensate collection; 13 – fins

Fig. 1 – Adsorptive heat pump

Experimental. The present work is devoted to operating parameters of adsorptive heat pump. Design of its laboratory prototype is given in Fig. 1. This device contains a cylindrical adsorption-desorption type reactor 1, in the center of which is located a hydraulic circuit 2 with fins 3, which are equipped with additional jumpers, in which the sorbent 4, condenser 5, cylindrical rings 6 and evaporator 7 in the form of a cylindrical tank are placed heater 8, connected to the reactor by a narrowed throat 9. A distribution nozzle is installed in the throat 10. The lid covers the reactor from above 11. A plate for collecting condensate is installed under the lid 12. Fins 3 are mounted on welded pins 13 of the hydraulic circuit 2, which are made in the form of spirals, which are welded at an angle of 45° to the horizon [6].

The operation of the adsorption heat pump is carried out in two stages. Operational mode of heat storage unit involves two alternating phases of adsorption or discharge and charge or regeneration of the adsorptive medium. As working fluid or adsorbate water is used. During adsorption, the distribution nozzle 10 is open and through it, water vapor is uniformly supplied from the evaporator 7 due to the heat coming from the heater 8, into the adsorption-desorption type reactor 1 and absorbed by the adsorbent granules 4.

Another option for supplying moisture to the adsorbent layer is the ultrasonic humidification of the air flow, which

requires somewhat lower electrical energy consumption compared to steam humidification. Absorption of water by the adsorbent layer, that is, adsorption is an exothermic process. The heat that is released is transferred from the pellet to the pellet and to the grid, and from it to the coolant in the hydraulic circuit, and is used for the needs of the consumer.

At the second stage, the distribution nozzle 10 is closed. The heat from an external heat source, for which you can use a solar collector or a resistive heating element, is transferred through a hydraulic circuit to the one-sided finned mesh and adsorbent granules. At the same time, desorption of water vapor occurs, which condenses on the inner surface of the reactor, radial-vertical ribs and cylindrical rings with the release of condensation heat, in which a cooling coolant circulates, for example, water, which, being heated, is supplied to the consumer or reheated directly in the hydraulic circuit, then used for sorbent regeneration.

The plate for collecting condensate distributes the condensed water vapor so that it does not fall on the composite material, but flows down the walls of the case into the evaporator. Condensate flows down the radial-vertical ribs and wall of the adsorber into the evaporator through the narrowed throat.

The efficiency of adsorption heat pumps is evaluated by the thermal energy conversion coefficient COP, which is equal to the ratio of the heat supplied to the consumer with a higher temperature to the heat consumed at the same time. COP can be calculated by two methods [6]:

1) as the ratio of the useful heat, which is equal to the sum of the heat of adsorption and the heat of condensation of the adsorbate, to the sum of the desorption heat and the external heat supplied to the adsorbent during its heating to the regeneration temperature (COP_h^c);

2) as the ratio of useful heat to the heat supplied by the solar collector (COP_h^n) (op-

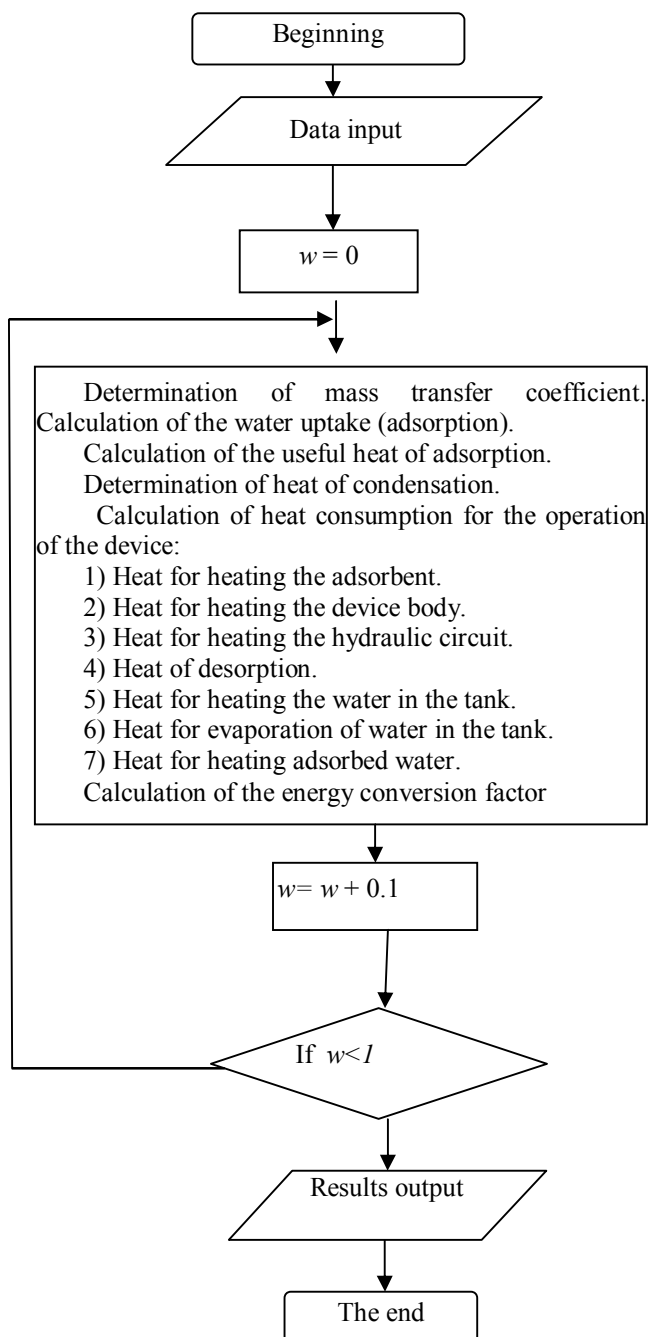


Fig. 2 – Control-flow chart of the adsorption heat pump calculation algorithm

erational).

Taking into account the stages of operation of the adsorption heat pump, a calculation algorithm for evaluating the efficiency of the adsorption heat pump is proposed. The stages of its operation are similar to a heat accumulator [6, 7]. The key differences are:

- 1) in the continuous operation of the adsorption heat pump, while a pause between the stages of discharge and charge is possible for the heat accumulator;
- 2) using the heat of condensation of the adsorbate.

In this regard, an algorithm for calculating the main operating characteristics of an adsorption heat pump is proposed, which is shown in Fig. 2.

The procedure for calculating the operating characteristics of an adsorption heat pump is similar to the calculation of an adsorption heat storage device [6]. As a criteria of energy efficiency coefficient of energy performance for heating is used:

$$COP_h = \frac{Q_{cor}}{Q_{suppl}} \quad (1)$$

where Q_{cor} is a useful heat which given to consumers, kJ, Q_{suppl} is heat inputs for operating the adsorptive device, kJ.

The useful heat is calculated as the sum of the heat of adsorption and the heat of condensation of the adsorbate, that is, water:

$$Q_{cor} = M_{ads} \cdot \Delta H_{ads} + M_{H_2O} \cdot \Delta H_{cond} \quad (2)$$

where M_{ads} is the adsorbent mass, kg, ΔH_{ads} is considered as heat of adsorption, kJ/kg, M_{H_2O} is mass of water, kg, ΔH_{cond} is heat of condensation, kJ/kg.

Heat of adsorption is calculated as [6]

$$\Delta H_{ads} = \Delta h \cdot A \cdot (1000/\mu_{H_2O}) \quad (3)$$

where Δh is heat of adsorption of 1 mole of water, kJ/mole, A is adsorption or water uptake, kg/kg, μ_{H_2O} is molar mass of water, kJ/kg.

Adsorption is calculated according with [6]

$$A = (C_0 - C) \cdot V_{air} / M_{ads} \quad (4)$$

where C_0 and C are the initial and concentration of water in the air after passing through the adsorbent layer, kg/m³, V_{air} is air volume which passed through adsorbent layer, M_{ads} is adsorbent layer, kg.

When coefficient of energy performance of cycle COP_h^c determined, heat inputs for operating the device are calculated as the sum of heat for heating the adsorbent, the device case, hydraulic circuit, water in the tank and adsorbed water, evaporation of water in the tank and desorption.

Another criterion for evaluating the efficiency of an adsorption heat pump, similar to adsorption refrigeration solar installations, is the net efficiency coefficient, which is equal to:

$$COP_h^n = \frac{Q_{ads} + Q_{cond}}{Q_{col}} \quad (5)$$

where COP_h^n is the coefficient of energy performance; Q_{ads} refers to the heat of adsorption, kJ; Q_{cond} is the heat of condensation, kJ; Q_{col} is the heat supplied by the solar collector.

Results and discussion. The effect of flow rate and absolute air humidity on the coefficient of heat energy performance of an adsorption heat pump is almost identical to the efficiency factor of an adsorption heat storage device (Fig. 3). The maximum values of COP_h^c correspond to the air flow rate of 0.08 – 0.1 m³/s and the absolute air humidity of 0.03 – 0.04 kg/m³ at the entrance to the adsorbent layer [7]. When the heat of condensation is discharged to the environment, the coefficient of energy performance is almost identical to the similar values for adsorption heat accumulators (Fig. 3a) and is more than two times less compared to the value of the coefficient of energy performance when using the heat of condensation (Fig. 3b).

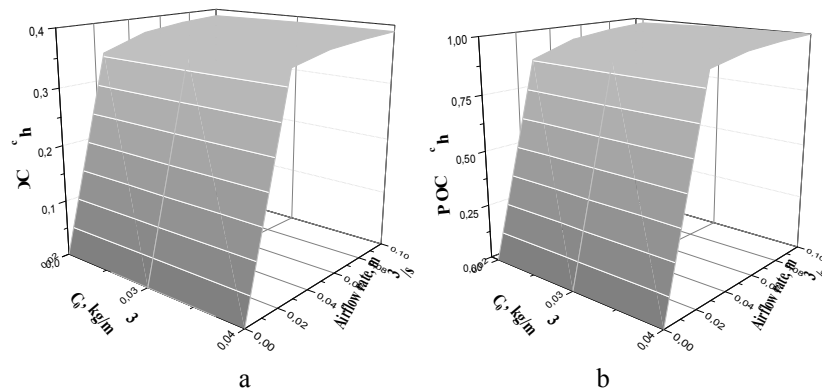


Fig. 3 – Dependence of the coefficient of energy performance for an adsorption heat pump without utilization of condensation heat (a) and with utilization of condensation heat (b) during steam humidification of the air supplied through the adsorbent layer

An increase in the temperature of the flow of moist air practically does not affect the value of the thermal energy conversion coefficient (Fig. 4), since the key factor in this case is the amount of evaporated water for air humidification, the growth of which, i.e., an increase in absolute humidity and air flow, which is supplied to the layer adsorbent, contributes to the increase of adsorption, and therefore, the heat of adsorption and the heat of condensation.

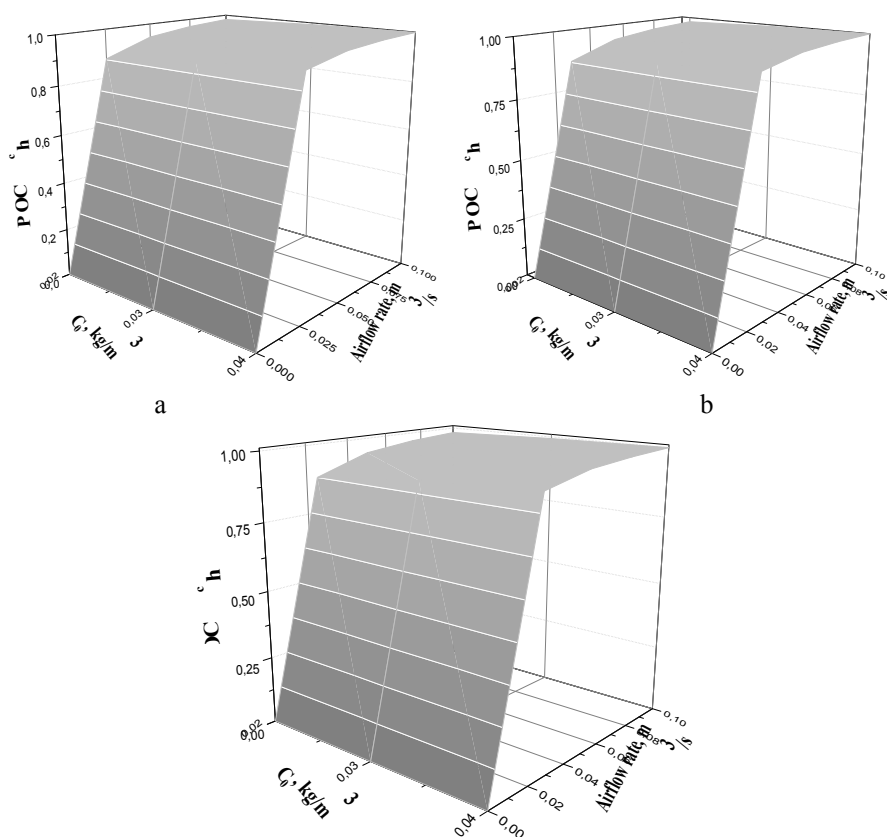


Fig. 4 – The influence of the operating parameters of the adsorption heat pump on the coefficient of heat energy conversion during steam humidification. Temperature of humid air flow, °C: 20 (a), 30 (b) and 40 (c)

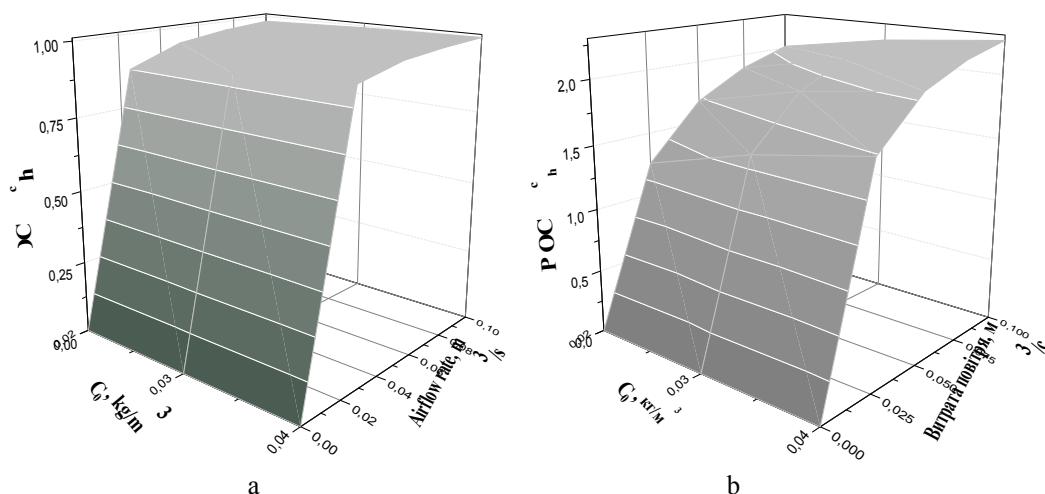


Fig. 5 – Coefficients of energy performance of adsorptive heat pump based on 'silica gel sodium sulfate' when steam humidification (a) and ultrasonic humidification (b) of airflow used

The calculation results are given in Table. It is noted that COP_h^c and COP_h^n of adsorption heat pumps based on both composite sorbents have practically the same value. This is due to the lower regeneration temperature of the composite 'silica gel – sodium acetate' (60°C) compared to 'silica gel – sodium sulfate' (90 °C).

Table 1

Coefficient of energy performance of adsorptive heat pump when ultrasonic humidification of air flow used

Month	Total average solar radiation flow (kW-h/m ²)	«silica gel – Na ₂ SO ₄ »		«silica gel – CH ₃ COONa»	
		COP _h ^c	COP _h ⁿ	COP _h ^c	COP _h ⁿ
May	5.99	2.084	1.130	2.021	1.189
June	5.86	2.084	1.133	2.021	1.193
July	6.06	2.084	1.128	2.021	1.187
August	5.66	2.084	1.137	2.021	1.200
September	4.41	2.084	1.176	2.021	1.257

A slight decrease in COP_h^c when using the composite 'silica gel – CH₃COONa' is a consequence of lower adsorption capacity compared to 'silica gel – Na₂SO₄'. Higher values of COP_hⁿ when composite 'silica gel – CH₃COONa' used are due to its lower regeneration temperature.

Conclusions. Operating parameters of the adsorptive heat pump are studied. The main factors affecting the efficiency of its work were analyzed. The processes of operation of adsorption heat pumps and adsorption accumulators of thermal energy are compared. An algorithm for calculating the basic operating characteristics of an adsorption heat pump in heat supply systems was proposed. The criteria for evaluating the efficiency of adsorption heat pumps and heat storage devices are compared. The parameters of the operating modes of the adsorption heat pump and the adsorption storage device are shown to be the same - air consumption 0.08 - 0.1 m³/s and absolute air humidity 0.03 - 0.04 kg/m³, which allow the operation process to be carried out most efficiently. The temperature of the flow of moist air directed to the adsorbent layer can be maintained at 20-40°C.

The effectiveness of the main measures to increase the efficiency of the adsorption heat pump is compared. The use of ultrasonic air humidification is shown to make it possible to increase the coefficient of adsorption conversion of thermal energy by almost 2 times compared to steam humidification.

This work was partially supported by Ministry of Education and Science of Ukraine (grant number 0119U002243).

References

- Costa V.A.F., Dias, J.M.S. (2023). On the best coefficient of performance and specific heating or cooling power combination for adsorption refrigerators and heat pumps. *International Journal of Refrigeration*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.04.009>
- Dias, J.M.S. Costa, V.A.F., (2022). Modelling and analysis of a complete adsorption heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 213, 118782
- Dai, B., Zhao, P., Liu, S., Su, M., Zhong, D., Qian, J., Hu, X., Hao, Y. (2020). Assessment of heat pump with carbon dioxide/low-global warming potential working fluid mixture for drying process: Energy and emissions saving potential. *Energy Conversion and Management*, 222, 113225. doi:10.1016/j.enconman.2020.1132
- Michel, B., Neveu, P., Mazet, N. (2014). Comparison of closed and open thermochemical processes, for long-term thermal energy storage applications. *Energy*, 72, 702 – 716. doi:10.1016/j.energy.2014.05.097.
- Gaeini, M., Zondag, H.A., Rindt, C.C.M. (2016). Effect of kinetics on the thermal performance of a sorption heat storage reactor. *Appl. Therm. Eng.*, 102, 520 – 531
- Sukhyi, K.M., Belyanovskaya E.A., Sukhyi M.P. (2020). *Technology Development for Adsorptive Heat Energy Converters: Emerging Research and Opportunities*. San Francisco: IGI-GLOBAL, USA, 328 pp. DOI: 10.4018/978-1-7998-4432-7
- Belyanovskaya, E., Lytovchenko, R., Sukhyi, K., Serhiienko, Y., Sukhyi, M., Sukha, I. (2021). Thermal conditions of adsorptive heat storage device operating in open-mode for heating inflowing air. *Scientific Works*, 85(1), 15 – 19.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ НА ОСНОВІ КОМПОЗИТНОГО АДСОРБЕНТУ «СИЛКАГЕЛЬ – КРИСТАЛОГІДРАТ»

Беляновська О.А., канд. техн. наук, доцент, Сухий К.М., д-р техн. наук, професор,
Сергієнко Я.О., аспірант, Сухий М.К., студент, Суха І.В., канд. техн. наук, доцент
Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет»,
м. Дніпро

Анотація. Досліджено процеси експлуатації адсорбційного теплового насоса. Проаналізовано фактори, що впливають на ефективність його роботи. Проведено порівняння параметрів роботи та

ефективності адсорбційних теплових насосів і адсорбційних теплоаккумуляторів. Запропоновано алгоритм розрахунку основних робочих характеристик адсорбційного теплового насоса в системах теплопостачання. Він включає в себе розрахунок коефіцієнта масопередачі, кінцевої абсолютної вологості повітряного потоку, що проходить через шар адсорбенту, поглинання або адсорбції води та корисної теплоти адсорбції та теплоти конденсації, визначення теплових витрат для роботи пристрою, зокрема, нагрівання адсорбенту, корпусу приладу, гідравлічний контур, вода в резервуарі та адсорбована вода, теплота десорбції та теплота випаровування, оцінка коефіцієнта перетворення теплової енергії. Порівняно критерії оцінки ефективності адсорбційних теплових насосів і теплоаккумуляторів. Показано, що робочі параметри адсорбційного теплового насоса та адсорбційного накопичувача теплової енергії на основі композиційних адсорбентів «силікагель – натрію сульфат» та «силікагель – натрію ацетат» однакові, тобто витрата повітря $0,08 - 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ і початкова абсолютна вологість повітряного потоку $0,03 - 0,04 \text{ кг}/\text{м}^3$, що відповідає максимальному коефіцієнту перетворення енергії пристрою. Температуру потоку вологого повітря, спрямованого на шар адсорбенту, рекомендується встановлювати на рівні $20 - 40^\circ\text{C}$. Запропоновано заходи щодо підвищення ефективності адсорбційного теплового насоса. Показано, що ультразвукове зволоження повітря дозволяє збільшити коефіцієнт перетворення енергії майже в 2 рази порівняно з паровим зволоженням. Отримані результати можуть бути використані для розробки енергоефективних систем опалення житлових приміщень.

Ключові слова: адсорбційний тепловий насос, адсорбційна трансформація теплової енергії, тепловий коефіцієнт, композитний адсорбент, адсорбція.

Список використаної літератури

1. Costa V.A.F. On the best coefficient of performance and specific heating or cooling power combination for adsorption refrigerators and heat pumps [Text] / V.A.F. Costa, J.M.S. Dias // International Journal of Refrigeration. – 2023. – doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.04.009>
2. Dias, J.M.S. Modelling and analysis of a complete adsorption heat pump system [Text] / J.M.S. Dias, V.A.F. Costa // Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 213. – P. 118782
3. Dai, B. Assessment of heat pump with carbon dioxide/low-global warming potential working fluid mixture for drying process: Energy and emissions saving potential [Text] / B. Dai, P. Zhao, S. Liu, M. Su, D. Zhong, J. Qian, X. Hu, Y. Hao // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 222. – P. 113225. doi:10.1016/j.enconman.2020.113225
4. Michel, B. Comparison of closed and open thermochemical processes, for long-term thermal energy storage applications [Text] / B. Michel, P. Neveu, N. Mazet // Energy. – 2014. – Vol. 72. – P. 702 – 716. 10.1016/j.energy.2014.05.097.
5. Gaeini, M. Effect of kinetics on the thermal performance of a sorption heat storage reactor [Text] / M. Gaeini, H.A. Zondag, C.C.M. Rindt // Appl. Therm. Eng. – 2016. – Vol. 102. – P. 520 – 531
6. Sukhyi, K.M. Technology Development for Adsorptive Heat Energy Converters: Emerging Research and Opportunities [Text] / K.M. Sukhyi, E.A. Belyanovskaya, M.P. Sukhyi. – San Francisco: IGI-GLOBAL, USA, 2020. – 328 pp. DOI: 10.4018/978-1-7998-4432-7
7. Belyanovskaya, E. Thermal conditions of adsorptive heat storage device operating in open-mode for heating inflowing air [Text] / E. Belyanovskaya, R. Lytovchenko, K. Sukhyi, Y. Serhiienko, M. Sukhyi, I. Sukha // Scientific Works. – 2021. – Vol 85, № 1. – P. 15 – 19.

Отримано в редакцію 21.06.2023

Прийнято до друку 26.11.2023

Received 21.06.2023

Approved 26.11.2023

РОЗРОБКА ШТАМПУ ДЛЯ ЦІЛЬНОТЯГНУТОЇ ЖЕРСТЯНОЇ БАНКИ №6

Всеволодов О.М., к.т.н. доц., Фарофонов В.С., бакалавр
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. В статті розглянуті питання, що стосуються виготовлення жерстяних банок для фасування в них харчових продуктів. Надана коротка класифікація застосованих видів і типів жерстяних банок. Описані способи виготовлення збірних та суцільнотягнутих жерстяних банок для консервної промисловості. Розглянуто переваги та недоліки виробництва збірних і суцільнотягнутих жерстяних банок. Пояснені причини зменшення виготовлення збірних жерстяних банок через присутність в припої свинцю. В статті визначено переваги використання і виготовлення суцільнотягнутих металевих банок перед збірними. Також наведені недоліки суцільнотягнутих банок. З метою розробки інструменту для виготовлення суцільнотягнутих банок були визначені зусилля для вирубування заготовки, зусилля витяжки для циліндричної банки, сила, необхідна для притиску жерсті під час штампування банки та коефіцієнт витяжки. Крім того розраховано: діаметр заготовки, найбільш ефективний вид розкрою листової жерсті фігурним скролом. Розроблений рельєф денця суцільнотягнутої банки №6. Наведено креслення загального виду розробленого інструмента – штампа для виготовлення суцільнотягнутої жерстяної банки №6. Представлений в статті інструмент виготовлений по робочим кресленням на підприємстві «Мрія» і експлуатується на цьому ж підприємстві. З наведених в статті матеріалів доведено переваги використання інструменту для виготовлення суцільнотягнутих банок перед збірними тридетальними жерстяними банками за рахунок досягнення гарантованої герметичності суцільного корпусу, зменшення відходів білої жерсті, виключення з технологічного процесу присутності свинцю, який негативно впливає на консервовані продукти та в кінцевому підсумку на здоров'я людини. Стаття завершується висновками та списком використаної літератури.

Ключові слова: жерсть, інструмент, суцільнотягнута банка, тридетальна банка, коефіцієнт витяжки, притиск, напруження, витяжка, рельєф, скрол.

Металева тара, яка застосовується на багатьох підприємствах харчової галузі, в залежності від призначення та висунутих вимог випускається різних конструкцій, форм і розмірів. По розмірам тара розділяється на дрібну і крупну.

По способу виготовлення металеві банки для харчових продуктів розділяються на збірні, які складаються з трьох частин (корпус, денце та кришка) і цільні які складаються з корпусу та кришки. Виробництво збірних банок скорочується тому, що при паянні повздовжнього шва корпусу використовується свинець.

Свинець, який застосовується в якості компонента припою для тридетальних жерстяних банок, є небезпечним та небезпечним. На сьогодні їстівна сировина – таким чином і продукти харчування, питна вода та взагалі зовнішнє середовище забруднено свинцем. На забруднення навколишнього середовища впливають двигуни автовок, вантажівок в які додаються компоненти з присадкою $(C_2H_5)_4Pb$ – тетраетилсвинця - масляниста безбарвна летюча токсична рідина, що легко випаровується навіть при температурі 0 °С, розчиняється у багатьох органічних розчинниках (ефір, спирт, бензол, бензин тощо), а також у жирах. Встановлено, що в середньому кількість свинцю, який потрапляє в організм людини з продуктами, становить до 300 мкг в день, з повітря - до 90 мкг. Основним шляхом потрапляння свинцю в організм людини є тридетальна жерстяна, яка виготовлена методом паяння свинцевим припоєм. З'ясовано, що п'ята частина свинцю потрапляє в організм людини з консервованої продукції, до 14 % з припою, а до 7 % – з продукту. Тому в останній час жерстянобаночні підприємства при виробництві своєї продукції застосовують метод зварювання корпусів, або виготовлення цільнотягнутих банок. Обидва способи дозволяють виключити потрапляння свинця в організм людини.

Суцільні банки, які складаються з корпусу і кришки, відрізняються від збірної відсутністю повздовжнього шва і нижнього закривального шва. Цільні банки більш надійні в відношенні герметичності але можливості виготовлення їх обмежуються висотою банки, яка співмірна з їх діаметром. В даний час створені високопродуктивні лінії для виготовлення цільних циліндричних банок – одночасно штампуються по п'ять штук з широкої стрічки і процеси холодного штампування комбінуються з операцією протягування.

Таке комбінування дозволяє зменшити товщину стінки корпусу збільшуючи при цьому висоту банки. Витрати жерсті на виробництво таких банок не більше, а в деяких випадках менше ніж для збірних банок такої ж висоти. Цільні банки висотою, яка дорівнює або навіть більше діаметра банки отримують за допомогою телескопічних штампів.

По формі суцільні банки виготовляють циліндричними, конічними та фігурними (прямокутні, овальні, еліптичні). Еліптичні банки в наслідок відносної складності технології їх виробництва і порівняно невеликої

продуктивності застосовуються для фасування дорогих м'ясних та рибних консервів. При цьому ціна тари складає 5...10 % від загальної ціни консервів.

Циліндричні суцільні банки виготовляють шляхом глибокого витягування тонкого металу (жерсті або алюмінію), який володіє необхідними механічними характеристиками. Для цього використовують преса зі спеціальним інструментом – штампом, який складається з нижньої нерухомої та верхньої рухомої частин.

При використанні способу глибокої витяжки з притиском матеріалу (рис. 1), крім пуансона 2 і матриці 1, застосовують ще притискне кільце 3, зване також «складкоутримувачем». При притиску фланця банки заготовки до матриці матеріал не може утворювати складок (зморшок, гофрів), а переміщується під тиском пуансона в радіальному напрямі. Зусилля притиску q_n забезпечує одержання гладкої поверхні витягнутої банки. Якщо бляшанку перед штампуванням лакувати, то на внутрішній шар лаки травмується. Тому лакують після штамповки. Нанесення лакового покриття на більш вищі бляшані банки слід проводити після глибокої витяжки. Оптимальною силою притиску заготовки вважають ту мінімальну силу, яка достатня для усунення утворення складок на відштампованих виробках.

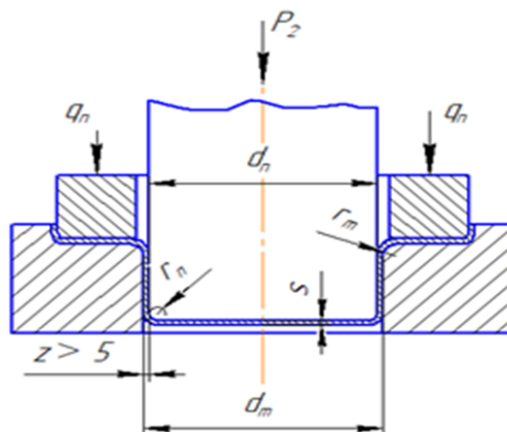
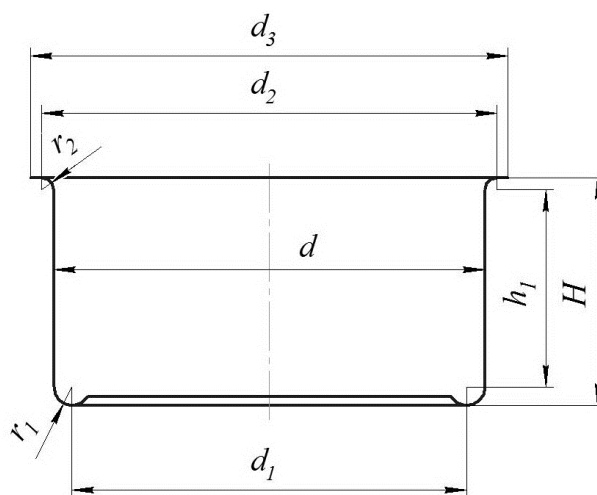


Рис.1 – Витяжка з прижимом

Оскільки при витягуванні банок відбувається пластична деформація жерсті, яка супроводжується зменшенням об'ємів металу і розтягуванням олов'яного (для білої жерсті) і лакового покриття для інших видів жерсті, то в конструкції банки для зниження деформацій треба робити більш плавні радіуси r_1 (2,5...3 мм) заокруглень у денця банки (рис. 2).



d – внутрішній діаметр банки, мм; r_1 – внутрішній радіус сполучення денця і стінки банки, мм;
 s – товщина жерсті, з якої виготовлена банка, мм; d_1 – умовний діаметр плоскої частини денця банки, мм;
 r_2 – зовнішній радіус закруглення фланця банки, мм; h_1 – висота циліндричної частини банки, мм;
 d_2 – зовнішній діаметр фланців банки, мм; d_3 – діаметр фланців з припуском, мм;
 H – загальна висота банки.

Рис. 2 – Суцільна жерстяна банка

За одну операцію витяжки можна отримати відносно неглибокі порожні деталі. При цьому глибина витяжки обмежується можливістю перенапруження і руйнування металу в місті сполучення стінки и денця.

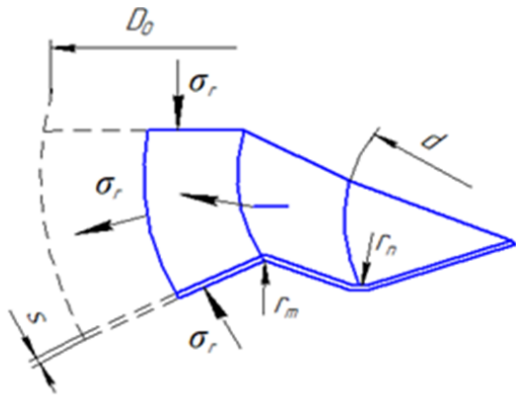


Рис. 3 – Схема напружень, що виникають під час витяжки

На рис. 3 показаний сектор циліндричні банки в процесі витяжки. Банка з внутрішнім діаметром і штампується з плоскої заготовки діаметром D .

При її витяжці має місце складна деформація металу. Перед втягуванням металу в матрицю відбувається одночасне його стискання з утворенням тангенційної напруги σ_t та радіальне розтягування під дією радіальної напруги σ_r . У стінці порожнього циліндра виникають напруги, що розтягують. P_2 , які більше напруг σ_r на фланці. У денці циліндра діаметром d деформації та напруги мають значно меншу величину.

Крім того встановлено, що в процесі штампування пористість олов'яного покриття білої жерсті збільшується в декілька разів і відповідно корозійна стійкість таких банок знижується. Тому

банки проходять операцію лакування після штампування.

В процесі витяжки відбувається зміцнення матеріалу, що дозволяє використовувати більш тонку жерсть.

Суцільні банки являють собою вироби, в яких корпус і дно виготовлені з однієї деталі. Такі банки мають низку переваг:

- не треба паяти поздовжній шов, завдяки чому економляться флокс, флюс і припій;
- не потрібно контролювати герметичність порожньої тари;
- на одному і тому самому устаткуванні можна виготовити як циліндричні, так і фігурні банки;
- удвічі скорочуються витрати ущільнювальних матеріалів;
- собівартість штампованих банок нижча, ніж паяних чи зварних.

Однак штамповані банки мають деякі недоліки:

- у процесі витягування частково руйнується покриття жерсті, тому потрібно додатково робити двостороннє лакування для забезпечення належної корозійної стійкості;

- висота банок не перевищує половини діаметра, що обмежує галузь їх застосування;

- до білої жерсті, з якої виготовляють банки, висуваються більш високі вимоги.

- Є різні способи виготовлення суцільних банок, але основним технологічним процесом при цьому є витяжка.

Співвідношення між основними напруженнями металу в процесі витяжки можна усвідомити, користуючись рис. 3.

Зусилля витяжки, прикладене до пуансону:

$$P_2 = p_2 \cdot \pi \cdot (d + s) \cdot s \quad (1)$$

де p_2 — напруги, що розтягують, Н/мм²;

d — діаметр пуансона або внутрішній діаметр циліндра, мм;

s — товщина матеріала, мм.

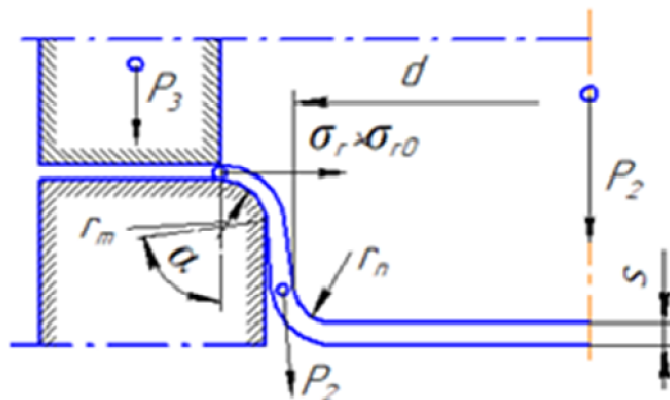


Рис. 3 – До розрахунку напружень витяжки

Напруги під час витяжки залежать від ступеня деформації матеріалу, що вимірюється зміною розмірів заготовки:

$$\sigma = \frac{D_0 - d}{D_0} = 1 - \frac{d}{D_0} \quad (2)$$

або від відношення діаметрів, званого коефіцієнтом витяжки:

$$m = \frac{d}{D_0} \quad (3)$$

Консервні банки переважно штампують одну за операцію витяжки. Корисно відзначити, що для жерсті при штампуванні в одну операцію граничний коефіцієнт витяжки «*m*» не може бути меншим за 0,5; що обмежує висоту штампованих банок.

Діаметр заготовки для банки №6 визначають виходячи з рівності поверхонь заготовки і банки, що витягується, з урахуванням припуску на обрізку фланця. Ширина припуску $\Delta d = 2...4$ мм. Найбільш простим способом розрахунку є підсумовування поверхонь простих геометричних елементів, з яких складається банка.

В цьому випадку діаметр заготовки (в м) визначають з такого виразу:

$$D_{заг.} = \sqrt{\sum F \cdot \frac{4}{\pi}} \quad (4)$$

Отриманий діаметр заготовки $D_{заг.} = 163$ мм.

Розраховані наступні величини: зусилля (в Н) для вирубування заготовки: $P_1 = 40843,2$ Н;

зусилля витяжки для циліндричної банки: $P_2 = 27417,2$ Н;

сила (в Н), необхідна для притиску жерсті під час штампування: $P_3 = 36456,7$ Н;

коефіцієнт витяжки: $m = 0,514$.

На рис. 5 показаний розроблений і виготовлений на підприємстві «Мрія» м. Одеса інструмент (штамп) для цільнотягнутої жерстяної банки №6 за одну операцію витяжки.

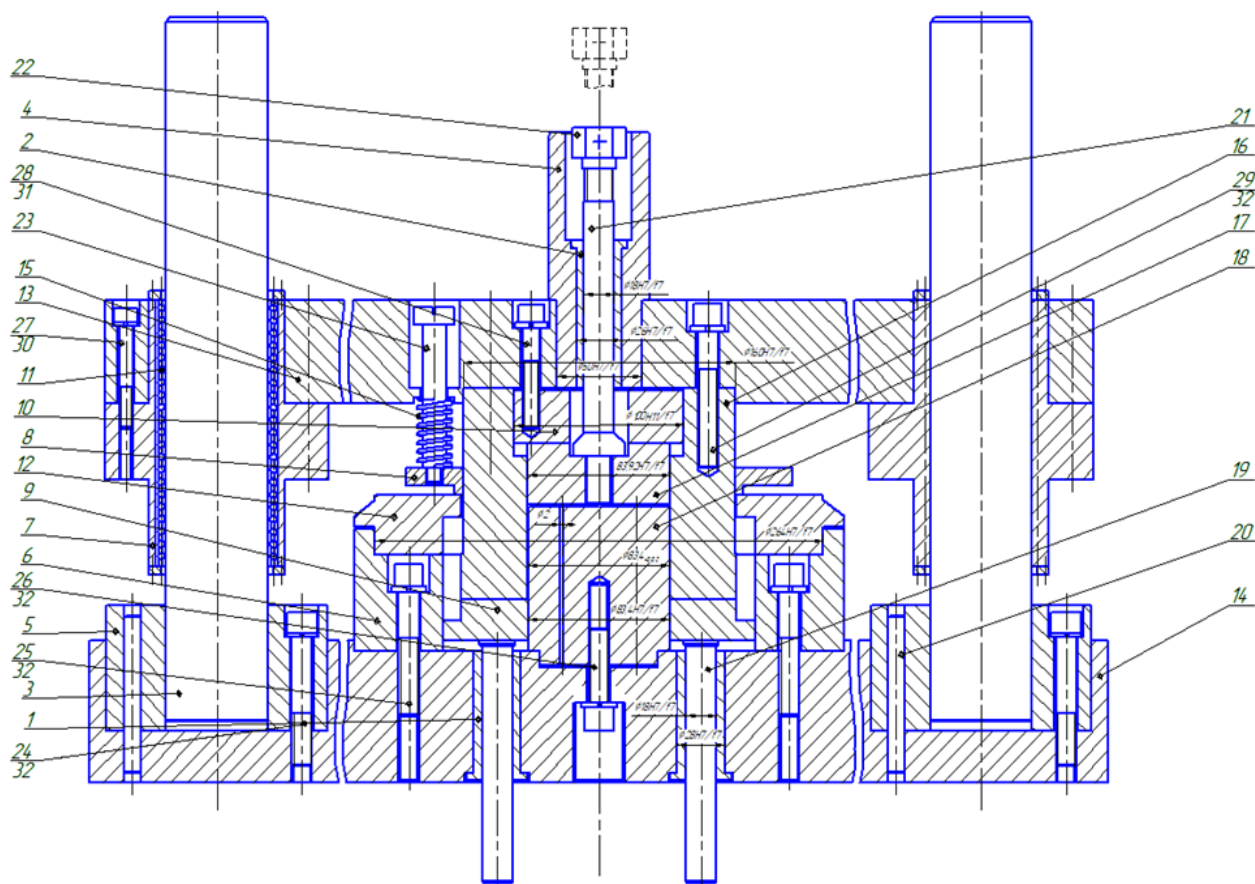


Рис. 5 – Інструмент для цільнотягнутої жерстяної банки №6 за одну операцію витяжки

Розроблено рельєф денця суцільнотягнутої банки №6 (Рис. 6).

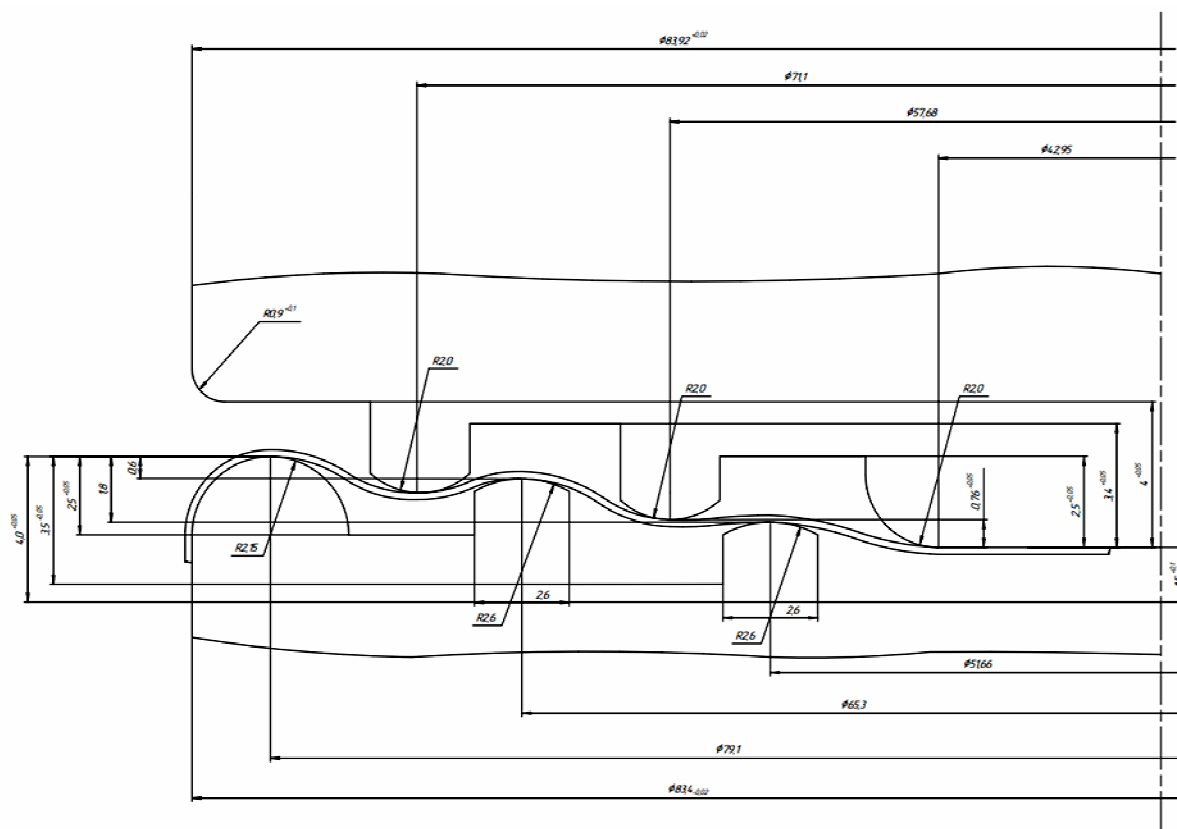


Рис.6 – Рельєф банки №6

Визначено яким чином розташувати заготовки на листі жерсті, з найбільшим коефіцієнтом ефективності (Рис.7).

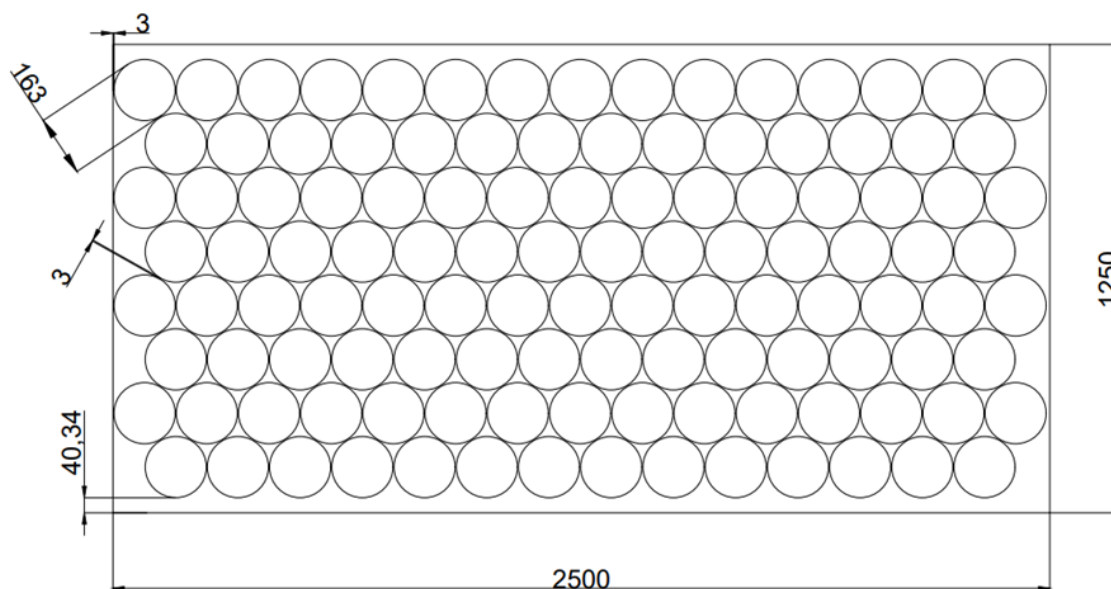


Рис. 7 – Розміщення заготовок на листі жерсті фігурним скролом

Найбільшу вигоду дає використання фігурного скролу. Тому його використання є найбільш оптимальним рішенням. Коефіцієнт ефективного використання площі листа жерсті $K_{ef} = 0,78$.

Таким чином можна зробити наступні висновки переваги дводетальних банок перед тридетальними:

- гарантована герметичність корпусу банки;
- зменшуються витрати білої жерсті;

- з технологічного процесу виключене паяння корпусів та присутність свинцю, який негативно впливає на консервовані продукти і в підсумку на здоров'я людини;
- удвічі скорочуються витрати ущільнювальних матеріалів;
- собівартість штампованих банок нижча, ніж паяних чи зварних.

До недоліків дводетальних банок можна віднести обмеження по висоті банки так як більш висока банка потребує більшого діаметра заготовки для штампування. Для жерсті при штампуванні в одну операцію граничний коефіцієнт витяжки «m» не може бути меншим за 0,5; саме це і обмежує висоту штампованих банок.

Цей недолік можна виключити, якщо використовувати при штампуванні більш пластичний матеріал, наприклад, алюміній.

References

1. Uhryn Ya.M., Khvedchyn Yu.I., Rehei I.I. (2011). *Osnovy pakovalnoi spravy. Metaleva tara [The basics of packaging. Metal container]*, Lviv: Ukrainiska akad. Drukarstva. (in Ukrainian)
2. Syrokhman I. V., Zavhorodnia V. M. (2017). *Tovarovnavstvo pakovalnykh materialiv i tary: pidruch [Commodity science of packaging materials and containers: textbook]*. K.: TsNL. (in Ukrainian)
3. Sokolenko A. I., Kostyuk V. S., Vasylykivskiy K. V. et al. (2013). *Fizyko-khimichni vlastyvoli pakovalnykh materialiv [Physico-chemical properties of packaging materials]* Kyiv: Condor. (in Ukrainian)

DEVELOPMENT OF A STAMP FOR A CONTINUOUS TIN CAN NO. 6

Vsevolodov O.M., PhD, docent, Farofontov V.S., student
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. The article deals with issues related to the manufacture of tin cans for packing food products in them. A brief classification of applied types and types of tin cans is given. The methods of manufacturing prefabricated and solid-drawn tin cans for the canning industry are described. The advantages and disadvantages of the production of prefabricated and continuous tin cans are considered. Explained the reasons for the decrease in the production of prefabricated tin cans due to the presence of lead in the solder. The article defines the advantages of using and manufacturing continuous metal cans over prefabricated ones. Disadvantages of continuous cans are also given. In order to develop a tool for the production of solid-drawn cans, the forces for cutting out the blank, the pulling force for a cylindrical can, the force required to press the tin during can stamping and the pulling factor were determined. In addition, the following are calculated: the diameter of the workpiece, the most effective type of sheet metal cutting with a curved scroll. The relief of the bottom of the continuous can No. 6 has been developed. The drawing of the general type of the developed tool - a stamp for the production of continuous drawn tin can No. 6 is given. The tool presented in the article was manufactured according to working drawings at the Mriya enterprise and is operated at the same enterprise. From the materials presented in the article, the advantages of using a tool for the production of solid-drawn cans over prefabricated three-piece tin cans due to the achievement of guaranteed tightness of the solid body, reduction of white tin waste, exclusion of the presence of lead from the technological process, which has a negative effect on the canned product and ultimately on health I am a person. The article ends with conclusions and a list of used literature.

Keywords: tin, tool, continuously drawn can, three-part can, extraction coefficient, pressure, tension, extrusion, relief, scroll.

Список використаної літератури

1. Основи пакувальної справи. Металева тара [Текст] / Я.М. Угрин, Ю.Й. Хведчин, І.І. Рєгей. — Львів: Українська акад. друкарства, 2011. — 117с.
2. Сирохман І. В. Товарознавство пакувальних матеріалів і тари: підруч. [Текст] / І. В. Сирохман, В. М. Завгородня. — К.: ЦНЛ, 2017. — 614 с
3. Фізико-хімічні властивості пакувальних матеріалів [Текст] : підручник / А. І. Соколенко, В. С. Костюк, К. В. Васильківський та ін. ; за ред. А. І. Соколенка; Нац. ун-т харч. технологій. — Київ : Кондор, 2013. — 402 с.

Отримано в редакцію 22.06.2023
Прийнято до друку 26.11.2023

Received 22.06.2023
Approved 26.11.2023

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В МЕМБРАНАХ ВАКУУМНИХ ЗАКУПОРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ

Ватренко О. В., д.т.н., професор
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. В статті наводиться аналіз станів рівноваги мембран закупорювальних засобів для консервної тари зі скла шляхом дослідження енергетичних перетворень, які забезпечують контроль глибини вакууму в тарі в заданому режимі обробки продукції.

Об'єктом досліджень є скляна упаковка. Предметом досліджень є металеві мембрани. Для визначення геометричних параметрів мембран використовувались інструментальні методи. Наявні форми рівноваги мембран досліджувались шляхом математичного моделювання енергетичним та обчислювальним методами.

Зі зміною зовнішнього навантаження мембрана може змінювати стан стійкої рівноваги. В результаті досліджень встановлено, що після переходу у стан втрати стійкості відповідний прогин мембрани більший як у три рази менше її початкового прогину. Отже деформація втрати стійкості мембрани не призводить до симетричної деформації її робочого конуса. Встановлені параметри прогину сприяють виконанню мембраною функції контролю глибини вакууму в тарі та узгоджуються зі встановленим протидіючим тиском в автоклаві під час термічної обробки продукції.

Потенціальна енергія мембрани відображена сумою енергій внутрішніх та зовнішніх локальних впливів. В результаті розв'язання загального рівняння енергії мембрани отримано розрахункове рівняння потенціальної енергії мембрани

Виконана перевірка адекватності отриманого рівняння роботі реальної мембрани консервної тари під дією навантаження. Перевірка здійснювалася шляхом підставлення отриманого експериментальним шляхом значення додаткового прогину після втрати стійкості у розрахункове рівняння потенціальної енергії мембрани. Зіставлення розрахункової величини тиску втрати стійкості мембран з заявленою виробником кришок показали їхню близькість. Деякі відмінності заявленого значення тиску втрати стійкості від розрахункового пояснюються різною твердістю жерсті для виготовлення кришок.

Отримано розрахункове рівняння повної енергії мембрани. Встановлено, що отримане рівняння є адекватним роботі реальних мембран консервної тари.

Ключові слова: стійкість, прогин, енергія, пластина, тиск, рівновага.

Вступ. Сучасні закупорювальні засоби для скляної тари різних систем закупорювання містять мембрани, які мають малий початковий прогин, і залежно від положення прогину - втягнутого всередину або опуклого – сигналізують про вакуум в незаповненому об'ємі тари або його відсутність і, отже, про її герметичність [1].

Кришки виготовляють із жерсті різної товщини та твердості, тобто. різного енергетичного рівня [2]. Це залежить від об'єму скляної тари та особливостей теплової обробки. У сучасній науці існує кілька методів розрахунку тонких пластин. Вони представлені у роботах [3, 4]. Автори дають розрахунок переважно тонких плоских пластин під дією різних видів навантаження. Однак тонкі пластини з початковим прогином проти дії навантаження, що вивчаються у цій роботі, у зазначених роботах не розглядаються.

Широко відомий та ефективно використовується енергетичний метод розрахунку тонких пластин, представлений багатьма авторами [5, 6, 7]. У статті [8] використовується енергетичний метод для вирішення завдання місцевого згинання тонкостінної циліндричної сталеві труби з еластичним наповненням під дією концентричного осьового навантаження. Завдання розрахунку тонких пластин з початковим прогином проти дії навантаження у цих роботах не відображено.

У роботі Вольміра А. [9] наводиться розрахунок гнучких оболонок, закріплених у різний спосіб при різних, щодо початкового прогину, напрямках дії навантаження. Однак представлена вона у загальному вигляді і не має завершеної розрахункової наукової бази, яка описує та пояснює роботу мембран, у тому числі з урахуванням енергетичної складової матеріалу.

У роботі [10] загальне формулювання Лагранжа для гнучких пластин розглядається методом кінцевих елементів для пластин з великим переміщенням та обертанням. Круглі пластини з малим переміщенням, досліджувані у даній роботі, розглянуті не були.

Щодо металеві упаковки було виконано дослідження роботи мембран вакуумних кришок. У роботі [1] отримано рівняння взаємозв'язку тиску, геометричних параметрів та товщини мембрани. У роботі [11] проведено дослідження стану металевих кришок з мембранами для консервної скляної тари протягом зберігання та обробки упакованої продукції. На базі отриманого розрахункового рівняння було розроблено комп'ю-

терну програму для побудови залежності «тиск – прогин». В залежності від зміни товщини жерсті та прогину мембран побудовані їхні графічні деформаційні характеристики [11]. Однак, зміна повної енергії мембрани в процесі деформування, і насамперед у положеннях рівноваги, не досліджена та потребує вивчення. Внаслідок чого виникають певні труднощі щодо надійності роботи пружної пластини та її проектування.

Мета роботи полягає в тому, щоб описати зміну енергії круглої пластини з початковим прогином, що зумовлює стабільну роботу мембран у заданому режимі.

Завдання роботи.

1. Розв'язати рівняння локальних енергетичних впливів на мембрану в процесі її роботи та отримати розрахункове рівняння повної енергії системи мембрани.

2. Експериментально визначити додатковий прогин мембрани у робочому положенні.

3. Виконати перевірку адекватності одержаного рівняння роботі реальної мембрани металевих кришок для скляної тари.

Матеріали та методи.

Матеріали, що досліджуються. Для експериментальних досліджень використовувалися кришки з «контрольною кнопкою» системи «Твіст-офф» [2] діаметром 82 мм виробництва німецької фірми Silgan White sar, які використовуються на консервних підприємствах країн ЄС та України. Конструктивно мембрани спроектовані для роботи у режимі контрольованої втрати стійкості, рис. 1а. Мембрани мають опорний конус зовнішнім діаметром D_3 , робочий конус зовнішнім діаметром D_2 і пласку ділянку діаметром D_1 . Вони втрачають стійкість внаслідок виникнення вакууму в тарі, що тягне за собою перепад тиску на полі кришки. Будемо називати цей перепад тиску – тиском.

Втративши стійкість мембрана переходить у інший стан стійкої рівноваги, рис. 1б. Значення критичних тисків втрати стійкості та відновлення форми, які складають робочий діапазон функціонування мембран консервної тари, загалом відомі та надаються деякими фірмами-виробниками кришок.

Відповідно, об'єктом дослідження є скляна упаковка із вакуумними кришками. Предметом дослідження – гнучкі мембрани металевих кришок.

Експериментально визначався додатковий прогин центру мембрани у стані втрат стійкості.

Підготовка експериментальних зразків. Підготовка зразків упаковки відбувалася у виробничих умовах. Кришки подавалися в паровакуумну машину для закупорювання, де ними в робочому режимі закупорювались скляні банки з продукцією. Потім продукція охолоджувалась до кімнатної температури для створення вакууму у незаповненому обсязі тари, після чого дослідний зразок був готовий до експерименту.



а) мембрана у ненавантаженому стані; б) мембрана у стані втрати стійкості

Рис. 1 – Поле кришки

Порядок проведення досліджень. Енергетичні можливості круглої мембрани пов'язані з формою її поперечного перерізу. В аналітичному дослідженні форм стану рівноваги мембран дотримуватимемося розрахункової схеми, в якій робочий конус мембрани зашпелений по контуру з вільним зміщенням радіальним точкам контуру, оскільки вона найбільш близька до реальності (рис. 2). Мембрана має початковий прогин $f_{нч}$.

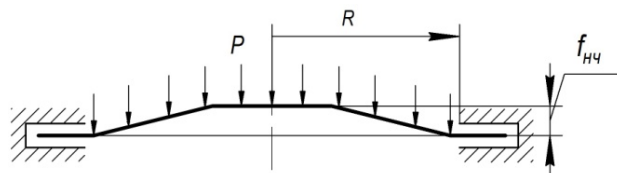


Рис. 2 – Схема закріплення: мембрана у ненавантаженому стані

Вимірювання додаткового прогину центру мембрани у стані втрати стійкості мало таку послідовність дій.

1. Після охолодження продукції, закупорена банка ставилася на контрольну плиту індикаторного приладу, прилад налаштовувався для підготовки до вимірів (див. п. 1-3 нижче).

2. За допомогою гострого шила в полі кришки (не на мембрані) проколювався отвір. Тиск у тарі порівнювався з атмосферним і мембрана стрибкоподібно поверталася до початкового стану рівноваги. При цьому стрілка індикатора відхилялася від нульового положення. Покази індикатора записувалися.

3. Додатковий прогин центру мембрани в стані втрати стійкості f , що відраховується від площини контуру закріплення, рис. 3, визначали як різницю між показаннями індикатора та початковим прогином центру мембрани.

Можливим прогином контуру закріплення мембрани від дії вакууму в тарі нехтували через його незначність у порівнянні з робочим ходом центру мембрани.

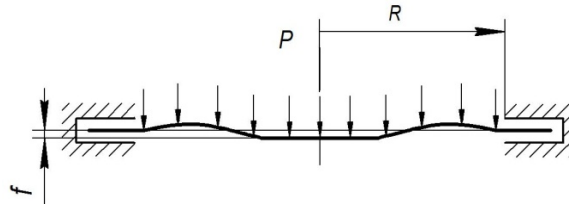


Рис. 3 – Схема закріплення: мембрана у стані втрати стійкості

Опис методів, установок. Додатковий прогин та товщина жерсті мембрани визначалися інструментальними методами на реальній скляній упаковці з кришкою.

Вимір прогину здійснювалося за допомогою індикаторного пристрою рис. 4. Пристрій складається зі штатива для вимірювальних головок 1, закріпленого на горизонтальній контрольній плиті 2 з отворами для упорів, індикатора годинного типу 3, з похибкою 0,01 мм, і двох фіксуючих упорів 4.

Підготовка приладу до вимірювань мала таку послідовність дій.

1. Дослідний зразок ставили дном на контрольну плиту, піднімали вимірювальний шток індикатора, заводили зразок під вимірювальну головку.

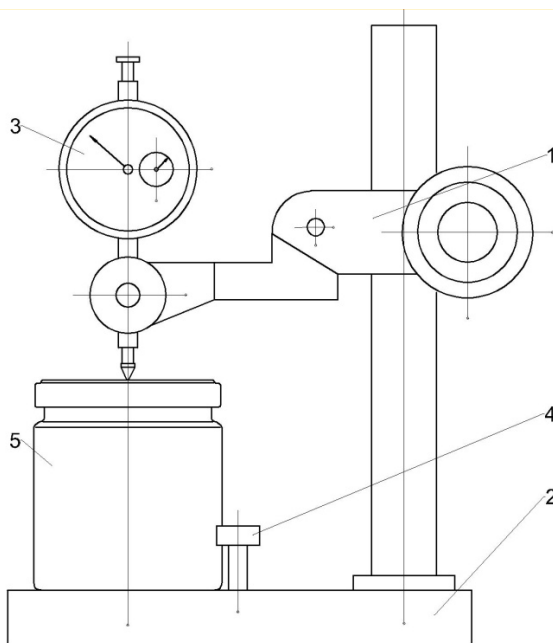
2. Наконечник індикатора приводили в контакт з центром плоскої ділянки мембрани і фіксували розташування тари за допомогою двох фіксуючих упорів, попередньо встановивши їх у відповідні для даних розмірів корпусу тари отвори контрольної плити.

3. Клему затискання індикатора на штативі відпускали, поєднували вимірювальний наконечник індикатора до контакту з центром мембрани кришки так, щоб стрілка на його малій шкалі відхилялася від нуля на ціле число міліметрів, але не менше величини двох початкових прогинів мембрани. Встановлювали індикатор у нульову позначку та фіксували його розташування на штативі.

Оскільки дослідний зразок складається з декількох деталей (банка, кришка, прокладка ущільнювача кришки), які мають власний допуск на висоту, то кожен зразок матиме власну висоту.

Досить сказати, що лише допуск на висоту скляної тари може коливатися в межах 1-3 мм. Тому для кожного вимірювання дослідного зразка слід виконувати індивідуальну підготовку приладу за п. 3.

Опрацювання результатів досліджень. В експерименті використовувалася мембрана параметрами $f_{нч}=0,25$ мм; товщина жерсті $\delta=0,18$ мм; радіус контуру закріплення мембрани $R=12$ мм, виготовлена з маловуглецевої сталі. Результати вимірів показали, що в стані втрати стійкості додатковий



1 – штатив, 2 – контрольна плита, 3 – індикатор годинного типу, 4 – фіксуючі упори, 5 – дослідний зразок.

Рис. 4 – Індикаторний пристрій

прогин центру мембрани склав $f=0,07$ мм, що значно менше початкового прогину центру мембрани $f_{нч}=0,25$ мм, рис. 3. Тобто втрата стійкості не призводить до симетричної деформації робочого конуса мембрани.

Результати та обговорення. Виведення розрахункового рівняння повної енергії системи мембрани. Вихідні рівняння для розрахунку енергії системи використовуємо з теорії пластин та оболонок. Повна енергія мембрани представлена подібно до визначення енергії у випадку вісесиметричного вигину круглої пластинки [9]

$$E_n = E_c + E_\delta - W, \quad (1)$$

де E_c – енергія напружень у серединній поверхні мембрани,

$$E_c = \frac{E\delta}{2} \int_0^R \left[\left(\frac{d^2\Phi}{dr^2} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{d\Phi}{dr} \right)^2 - \frac{2\mu}{r} \frac{d\Phi}{dr} \frac{d^2\Phi}{dr^2} \right] 2\pi r dr; \quad (2)$$

E_ϵ – енергія вигину,

$$E_\epsilon = \frac{D}{2} \int_0^R \left[\left(\frac{d^2 \omega}{dr^2} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{d\omega}{dr} \right)^2 + \frac{2\mu}{r} \frac{d\omega}{dr} \frac{d^2 \omega}{dr^2} \right] 2\pi r dr; \quad (3)$$

W – робота зовнішнього навантаження,

$$W = \int_0^R P \omega 2\pi r dr = 2\pi P \int_0^R \omega r dr, \quad (4)$$

де δ – товщина жерсті;

R – радіус закріплення мембрани по контуру;

E – модуль нормальної пружності жерсті;

r – поточний радіус мембрани;

μ – коефіцієнт Пуассона жерсті;

Φ – функція напруження;

$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ – циліндрична жорсткість мембрани;

ω – додатковий поточний прогин мембрани;

P – тиск (навантаження) на мембрану.

Запишемо вираз для $\frac{d\Phi}{dr}$ [9]

$$\frac{d\Phi}{dr} = \frac{Ef^2}{6R} \left(3\frac{r}{R} - 6\frac{r^3}{R^3} + 4\frac{r^5}{R^5} - \frac{r^7}{R^7} \right). \quad (5)$$

Введемо безрозмірний поточний радіус $r_1 = \frac{r}{R}$, тоді $dr = \frac{dr}{R}$; $\frac{d\Phi}{dr} = \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dr_1}$; $\frac{d^2\Phi}{dr^2} = \frac{1}{R^2} \frac{d^2\Phi}{dr_1^2}$.

Після підстановки цих позначень в (5) отримаємо

$$\frac{d\Phi}{dr_1} = \frac{Ef^2}{6} (3r_1 - 6r_1^3 + 4r_1^5 - r_1^7). \quad (6)$$

Відповідно

$$\frac{d^2\Phi}{dr_1^2} = \frac{Ef^2}{6} (3 - 18r_1^2 + 20r_1^4 - 7r_1^6). \quad (7)$$

Запишемо (2) для безрозмірного поточного радіусу r_1 , враховуючи, що за $r=0 \rightarrow r_1 \rightarrow 0$, а за $r=R \rightarrow r_1=1$, та після перетворень отримаємо

$$E_\epsilon = \frac{\pi E^3 f^4 \delta}{36R^2} \int_0^1 \left[r_1 \left(\frac{dR}{dr_1} \right)^2 + \frac{1}{r_1} R^2(r_1) - 2\mu R(r_1) \frac{dR}{dr_1} \right] dr_1. \quad (8)$$

Позначимо інтегральну частину рівняння (8)

$$I_1 = \int_0^1 \left[r_1 \left(\frac{dR}{dr_1} \right)^2 + \frac{1}{r_1} R^2(r_1) - 2\mu R(r_1) \frac{dR}{dr_1} \right] dr_1.$$

Тоді рівняння енергії напружень у серединній поверхні мембрани

$$E_\epsilon = \frac{\pi E^3 f^4 \delta}{36R^2} I_1. \quad (9)$$

Розглянемо рівняння (3) енергії вигину E_ϵ .

У разі пружної деформації пластини, наближений вираз для додаткових прогинів відповідає рішенням аналогічного завдання у випадку пластини малого прогину,

$$\omega = f \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^2. \quad (10)$$

Запишемо (10) для безрозмірного поточного радіусу r_1

$$\omega = f (1 - r_1^2)^2 = f (1 - 2r_1^2 + r_1^4), \quad (11)$$

$$\frac{d\omega}{dr_1} = 4f r_1 (r_1^2 - 1). \quad (12)$$

Запишемо (3) для безрозмірного поточного радіусу r_1 , враховуючи, що за $r=0 \rightarrow r_1 \rightarrow 0$, а за $r=R \rightarrow r_1=1$, та після перетворень отримаємо

$$E_s = \frac{16f^2\pi D}{R^2} \int_0^1 \left[r_1 \left(\frac{dW_1}{dr_1} \right)^2 + \frac{1}{r_{1r}} W_1^2(r_1) + 2\mu W_1(r_1) \frac{dW_1}{dr_1} \right] dr_1. \quad (13)$$

Позначимо інтегральну частину рівняння (13)

$$I_2 = \int_0^1 \left[r_1 \left(\frac{dW_1}{dr_1} \right)^2 + \frac{1}{r_{1r}} W_1^2(r_1) + 2\mu W_1(r_1) \frac{dW_1}{dr_1} \right] dr_1.$$

Тоді рівняння енергії вигину

$$E_s = \frac{16f^2\pi D}{R^2} I_2. \quad (14)$$

Розглянемо рівняння (4) роботи зовнішнього навантаження W .

Запишемо (4) для безрозмірного поточного радіуса r_1 , враховуючи, що при $r=0 \rightarrow r_1 \rightarrow 0$, а при $r=R \rightarrow r_1=1$, і після підстановки (11) і перетворень

$$W = 2\pi P f R^2 \int_0^1 (r_1 - 2r_1^3 + r_1^5) dr_1. \quad (15)$$

Тоді після інтегрування рівняння роботи зовнішнього навантаження

$$W = \frac{\pi P f R^2}{3}. \quad (16)$$

Після підстановки (9), (14) і (16) рівняння (1)

$$E_n = \frac{\pi E^3 f^4 \delta}{36 R^2} I_1 + \frac{16 f^2 \pi D}{R^2} I_2 - \frac{\pi P f R^2}{3}. \quad (17)$$

Введемо безрозмірний додатковий прогин центру мембрани $\zeta = \frac{f}{\delta}$ та безрозмірний тиск (навантаження)

$P^* = \frac{P R^4}{\delta^4 E}$. Після підстановки цих позначень у (17) і перетворень отримаємо

$$E_n = \frac{\pi}{R^2} \left[E \delta^5 \frac{\zeta^4}{36} I_1 + 16 \delta^2 D \zeta^2 I_2 - E \delta^5 \frac{\zeta P^*}{3} \right]. \quad (18)$$

Визначаємо інтеграли I_1 та I_2 . Коефіцієнт Пуассон для сталі $\mu=0,35$.

Інтегруючи I_1 отримуємо

$$I_1 = 48,8167 + 1,7047 + 1,4 = 51,9214.$$

Інтегруючи I_2 отримуємо

$$I_2 = 0,5 + 0,1667 + 0 = 0,6667.$$

Введемо безрозмірну повну енергію

$$E_n^* = \frac{E_n R^2}{E \delta^5}. \quad (19)$$

Після підстановки (18) у (19) та розрахунку отримуємо

$$E_n^* = 1,4423 \zeta^4 + 1,013 \zeta^2 - 0,3333 P^* \zeta. \quad (20)$$

Зведемо рівняння (20) до форми рівняння рівноваги, продиференціюємо його по $d\zeta$ і прирівняємо до 0. В результаті отримаємо

$$\zeta^3 + 0,3512 \zeta - 0,0578 P^* = 0. \quad (21)$$

Аналіз та перевірка коректності отриманого рівняння рівноваги. Підставивши експериментально отримане значення f після втрати стійкості в рівняння рівноваги (21), можна отримати відповідну величину критичного тиску.

При значенні $f=0,07$ мм відповідний безрозмірний прогин складе $\zeta=0,39$. Виразивши з (21) P^* отримаємо

$$P^* = \frac{\zeta^3 + 0,3512 \zeta}{0,0578},$$

звідки, для даного випадку, отримуємо $P_1^* = 3,3958$. Відповідно P_1 знаходимо з

$$P = \frac{P^* \delta^4 E}{R^4},$$

звідки, для випадку, що розглядається, отримуємо $P_1 = 0,0326 \cdot 10^6$ Па.

Отримана в результаті розрахунку величина P_1 близька до величини тиску втрати стійкості мембран $P_1=0,03$ МПа, що наводиться виробником кришок [12]. На відхилення розрахункової величини тиску P_1 від експериментальної може впливати ступінь твердості жерсті, з якої виготовлена кришка з мембраною.

Після втрати стійкості мембрана переходить в положення стійкої рівноваги. Результати вимірювання показали, що в стані втрати стійкості додатковий прогин центру мембрани $f=0,07$ мм значно менше початкового прогину центру мембрани $f_{nc}=0,25$ мм, рис. 3. Отже деформація втрати стійкості мембрани не призводить до симетричної деформації її робочого конуса.

Встановлені параметри прогину сприяють виконанню мембраною функції контролю глибини вакууму в тарі та узгоджуються зі встановленим протидіючим тиском в автоклаві під час термічної обробки продукції. Небезпечним значенням P_l прийнято вважати більше 0,07 МПа. Тоді під час стерилізації (етап витримки або початку охолодження) може статися порушення функціонування контрольної кнопки, пов'язане з переходом пружної деформації металу пластичну.

Ступінь твердості жерсті збільшують для підвищення її жорсткості. Шляхом підвищення жорсткості компенсують зниження міцності жерсті, що неминуче виникає у разі зниження товщини сталевих прокату. У діапазоні товщини жерсті, що використовується для кришок, діапазон зміни твердості постійний і вузький.

Висновки.

1. Рівняння (21), отримане в результаті розв'язання рівнянь окремих енергетичних впливів, є розрахунковим рівнянням, що характеризує і представляє енергетичні перетворення в тілі мембрани.
2. Експериментально визначено, що додатковий прогин мембрани в робочому положенні значно менше її початкового прогину.
3. Наведений розрахунок показує адекватність отриманого розрахункового рівняння роботі реальної металевієї пластини з початковим прогином, у разі дії навантаження проти початкового прогину, зокрема для мембран металевих кришок скляної консервної тари.
4. Отримала розвиток розрахункова модель контрольованої втрати стійкості круглої пружної пластини.

References

1. Vatenko O.V. (2014). Membrany kryshok konservnoi sklianoi tary (obgruntuvannya yikh roboty) [Membranes of lids of canned glass containers (reasoning for their operation)]. *Packaging*, 6, 26-29.
2. Schiester S. (2018), A new twist, *Compact steel*, 01, 22.
3. Ugural A. (2018). *Plates and shells: theory and analysis, fourth edition*, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis group
4. Szilard R. (2004). *Theories and application of plate analysis: Classical, Numerical and Engineering Methods*, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken.
5. Reddy J. (2007). *Theory and analysis of elastic plates and shells, second edition*, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis group
6. Ventsel E., Krauthammer T. (2001). *Thin plates and shells: Theory, analysis and applications*, New York, Basel: Marcel Dekker, Inc.
7. Ugural A., Fenster S. (2012). *Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity* (5th ed.). NJ: Prentice-hall, Upper Saddle River.
8. Bradford M., Roufegarinejad A., Vrcelj Z. (2006). Elastic buckling of thin-walled circular tubes containing an elastic infill, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 6 (4), 457–474.
9. Vol'mir, A.S. (1956). *Gibkiye plastinki i obolochki* [Flexible plates and shells]. M.: Izd-vo tekhniko-teoreticheskoy lit.
10. Frank Pai P. (2007) Total-Lagrangian Formulation and Finite-Element Analysis of Highly Flexible Plates and Shells. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 12 (2), 213-250
11. Ватренко О.В. (2015). Modeliuvannya roboty membran vakuumnykh kryshok: prohyn [Modeling the operation of vacuum lid membranes: deflection]. *Scientific Works*, 48, 150-154.
12. Rukovodstvo po obrabotke kryshek Twist-off [Instructions for processing Twist-off caps] (2006). Hannover: Silgan White Cap

ENERGY TRANSFORMATIONS IN THE MEMBRANES OF VACUUM SEALING MEANS

Vatrenko O. V., SciD, professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. This article exposes an analysis of the membranes' equilibrium states at sealing means for glass made canning containers through the study of energy transformations that provide control of the vacuum depth in the container under a given product processing mode.

This research object is glass container packaging. The metal membranes are subject of this research. Instrumental methods were used to determine the membranes' geometric parameters. Existing forms of membrane'

equilibrium were studied by means of mathematical modeling using energy and computational methods.

While the external load changing, the membrane can change its state of stable equilibrium. As a result of study carried out, it was established that after the transition to the state of stability loss, the corresponding deflection of the membrane is more than three times less than its initial deflection. Therefore, the deformation at the loss of membrane stability never leads to a symmetrical deformation of its working cone. The set parameters of deflection contribute to the membrane's function of controlling the vacuum depth in the container and are consistent with the set opposing pressure in the autoclave during the canned products heat treatment.

The membrane potential energy is reflected by the sum of the internal and external local influences' energies. At the issue of solving the general membrane energy equation, there was obtained the calculation equation of the membrane potential energy.

The obtained equation adequacy to the operation of a real membrane at a canned food container under the action of load was verified. The result verification was carried out by substituting the experimentally obtained value of the additional deflection after the stability loss into the membrane potential energy calculation equation. A comparison of the estimated value of the pressure of the membranes stability loss with the value declared by the container lids manufacturer showed their closeness. Some difference between the declared value of the stability loss pressure and the calculated one is explained by the different hardness of tin used for making lids.

The calculated equation of the membrane total energy was obtained. It is established that this resulting equation is adequate for the operation of real canning container membranes.

Key words: stability, energy, plate, deflection, pressure, equilibrium.

Список використаної літератури

1. Ватренко О. В. Мембрани кришок консервної скляної тари (обґрунтування їх роботи) // Упаковка. 2014. № 6. С. 26-29.
2. Szilard R. A new twist // Compact steel. 2018. № 01. P. 22.
3. Ugural A., Plates and shells: theory and analysis, fourth edition, CRC Press, Taylor & Francis group, London, New York. 2018.
4. Szilard R., Theories and application of plate analysis: Classical, Numerical and Engineering Methods, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken .2004.
5. Reddy J., Theory and analysis of elastic plates and shells, second edition, CRC Press, Taylor & Francis group, London, New York. 2007.
6. Ventsel E., Krauthammer T., Thin plates and shells: Theory, analysis and applications, Marcel Dekker, Inc., New York, Basel. 2001.
7. Ugural A., Fenster S., Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity, 5th ed. Prentice-hall, Upper Saddle River, NJ. 2012.
8. Bradford M., Roufegarinejad A., Vrcelj Z., Elastic buckling of thin-walled circular tubes containing an elastic infill, // International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2006. Vol. 6, No. 4, pp. 457–474.
9. Вольмир, А.С. Гибкие пластинки и оболочки / А.С. Вольмир. – М.: Изд-во технико-теоретической лит., 1956. – 419с
10. Frank Pai P. (April 2007) Total-Lagrangian Formulation and Finite-Element Analysis of Highly Flexible Plates and Shells. Mathematics and Mechanics of Solids, vol. 12, no. 2, pp. 213-250.
11. Ватренко О.В. Моделювання роботи мембран вакуумних кришок: прогин, товщина / О.В. Ватренко // Наук. праці ОНАХТ. – 2015. – Вип. 48. – С. 150-154.
12. Руководство по обработке крышек Твист-офф / Silgan White Cap, 2006, Hannover.

Отримано в редакцію 21.06.2023

Прийнято до друку 27.11.2023

Received 21.06.2023

Approved 27.11.2023

ІННОВАЦІЙ КОМБІКОРМОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ХХІ СТОЛІТТЯ

Єгоров Б.В., д-р техн. наук, професор, Макаринська А.В., д-р техн. наук, доцент,
Турпурова Т.М., канд. техн. наук, доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Тваринництво є ключовою галуззю у забезпеченні населення якісними харчовими продуктами тваринного походження, тим самим забезпечує національну продовольчу безпеку країни, та стратегічно важливою галуззю у загальній структурі сільськогосподарського виробництва, на яке припадає близько 20% загального виробництва. Згідно зі статистичними даними, щорічне споживання м'яса та м'ясопродуктів на одну людину за останні 15 років становило близько 55 кг, що на 25 кг менше від прийнятної норми (80 кг).

Україна має сприятливі умови для вирощування сільськогосподарських тварин та птиці. При організації виробничо-технологічного ланцюга виробництва продукції тваринництва, особливу увагу слід приділяти етапу виробництва комбікормів – максимально ефективно використовувати сировину, ретельно її переробляти, розширювати асортимент і покращувати якість продукції тваринництва для забезпечення продовольчої безпеки країни.

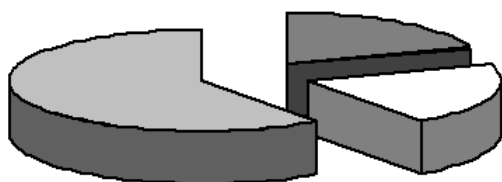
Наведено структуру формування ефективності виробництва продукції тваринництва та показано, що на ефективність виробництва тваринницької продукції понад 60 % усіх витрат впливає якість годівлі сільськогосподарських тварин: рівень організації технології, повноцінна годівля тварин, якість та безпечність сировини. Проблема виробництва якісної та безпечної тваринницької продукції вирішується шляхом впровадження інноваційних технологій, серед яких, насамперед, технології виробництва високоякісної комбікормової продукції. В основу цих технологій покладено досвід та знання багатьох вчених, фундаторів комбікормової галузі. В представленій роботі наведені матеріали щодо фундаторів комбікормової галузі, які внесли значний вклад в становлення та розвиток комбікормової промисловості.

Проведено скринінг розроблених та впроваджених інноваційних технологій виробництва комбікормів, які відіграють значну роль у підвищенні ефективності виробництва та якості продукції. Наукова школа «Наукові основи та енергозберігаючі технології виробництва комбікормової продукції» під керівництвом професора Єгорова Б.В. створює можливості поєднання теорії та практики, новітніх наукових розробок, які мають вагомий внесок у підвищення конкурентоспроможності комбікормової галузі. Проаналізовано тенденції багатосторонньої діяльності наукової школи – видавництво підручників, навчальних посібників, науково-практичного журналу «Зернові продукти і комбікорми», проведення Міжнародної школи кормів, виїзних семінарів на підприємства галузі дозволяє здійснювати підготовку та підвищення кваліфікації професорсько-викладацького складу та інженерних кадрів.

Ключові слова: безпека, якість, фундатори комбікормової галузі, інновації, технології, розробки, комбікормова продукція.

Постановка проблеми.

Питання продовольчої безпеки завжди посідають важливе місце в загальній національній безпеці, оскільки саме від продовольчої безпеки залежить соціальна та економічна стабільність країни.



- генетичний потенціал
- умови утримання
- якість годівлі тварин

Рис. 1 – Фактори, які впливають на ефективність виробництва тваринницької продукції та продуктивність сільськогосподарських тварин

В сучасному контексті соціально-економічного розвитку агропромислового комплексу України комбікормова галузь займає особливе місце. Виробництво комбікормів є проміжною ланкою у виробничому ланцюжку: постачальники сировини (фермерські господарства, сільськогосподарські підприємства) – переробники (комбікормові заводи) – споживачі (тваринницькі та птахівничі комплекси).

Комбікормова галузь відіграє ключову роль у забезпеченні населення якісними та безпечними продуктами тваринного походження, ефективність виробництва яких та продуктивність сільськогосподарських тварин залежить від комплексу факторів: якість годівлі тварин, генетичний поте-

нціал та умови утримання (рис.1). На ефективність виробництва тваринницької продукції (рис. 2) в значній мірі впливає якість годівлі сільськогосподарських тварин:

- рівень організації технології;
- повноцінна годівля тварин – оптимальне співвідношення компонентів в рецептурі, що залежить від виду, віку, типу годівлі, продуктивності, живої маси тварин та ін.;
- безпечність сировини – не здійснює шкідливий вплив на здоров'я тварин, не містить мікотоксинів, важких металів та інших речовин, небезпечних поєднань чи перевищення граничних допустимих показників вмісту речовин у готовому продукті;
- якість сировини – виробництво рецептів для годівлі сільськогосподарських тварин, збалансованих за всіма поживними та біологічно активними речовинами.

Якісна годівля сільськогосподарських тварин забезпечує не тільки їх здоров'я та одержання якісної та безпечної продукції тваринництва (молоко, м'ясо, яйця), але й рентабельне сільське господарство.

Виклад основного матеріалу.

Сьогодні в Україні проблема виробництва якісної та безпечної продукції тваринництва вирішується, насамперед, шляхом впровадження інноваційних технологій, серед яких технології виробництва високоякісної комбікормової продукції. В основу цих технологій покладено досвід та знання багатьох вчених, фундаторів комбікормової галузі.

У червні 2023 року виповнилося 130 років від дня народження одного з видатних вчених Одеського національного технологічного університету, який стояв біля витоків його організації та становлення у напрямку підготовки кадрів для комбікормової промисловості – Павла Геннадійовича Демидова.



**Демидов П.Г.,
д.т.н., професор**

Демидов П.Г. – учень професора К.А. Богомаза, доктор технічних наук, професор, заступник директора з навчальної та наукової роботи (1944-1950).

У повоєнні роки в країні гостро відчувалася нестача інженерних кадрів. Для підготовки кваліфікованих фахівців комбікормової галузі 6 вересня 1948 року була створена перша в країні кафедра «Комбікормового виробництва», яку очолив к.т.н., доцент Павло Геннадійович Демидов, один з найдосвідченіших співробітників інституту. [1]

Так розпочиналася історія школи і підготовки інженерних кадрів для комбікормової промисловості в нашому закладі.

Фахівці відзначають велику науково-дослідну діяльність П.Г. Демидова. Багато його розробок були пріоритетними у своїй галузі. Це, наприклад, роботи, пов'язані з дослідженням процесу кондиціонування зерна, визначенням граничних швидкостей та коефіцієнтів парусності часток для зернобобових культур, що використовуються в комбікормовому виробництві. Автор п'яти оригінальних приладів для дослідження зерна та борошна, які використовувалися в наукових і навчальних цілях. [1]



**Егоров Б.В.,
д.т.н., професор**

Як керівник кафедри Павло Геннадійович забезпечував необхідний рівень наукової роботи співробітників. Під його керівництвом виконувалися роботи, що досі мають практичне значення. Наприклад, була розроблена та впроваджена у виробництво робота з волого-теплової обробки деяких круп'яних культур, що мала велике народногосподарське значення.

Значною подією в науково-педагогічній діяльності П.Г. Демидова був вихід з друку в 1968 р. підготовленого ним першого підручника з Технології комбікормового виробництва [2], а згодом доповнене видання ще одного підручника. [3]

У 1975 р. було відкрито факультет «Технології комбікормових і біохімічних виробництв» в Одеському технологічному інституті харчової промисловості ім. М.В. Ломоносова, а також відновлено випускову кафедру «Технології комбікормових і гідролізних виробництв». Доцент І.К. Чайка був одночасно обраний завідувачем кафедри та першим деканом нового факультету. [1]



**Чайка І.К.,
к.т.н., доцент**

На кафедрі були створені дві спеціалізовані лабораторії. У 1982 році під керівництвом та особистою участю доцента І.К. Чайки було розроблено та проведено випробування автоматизованої комбікормової установки, а саме стендового тренажера, на якому студенти набували навичок керування технологічними процесами виробництва комбікормів, аспіранти здійснювали виробництво дослідних партій різноманітних видів комбікормової продукції. Крім цього, було відкрито лабораторію визначення якості комбікормів, оснащену новітнім лабораторним обладнанням, на якому проводили технічні, фізико-хімічні, мікробіологічні аналізи сировини і готової продукції.



З 1975 до 1984 р. за потреб промисловості, інтереси наукової школи були розширені та направлені як на удосконалення і розробку нових технологій, запровадження технологій поглибленої теплової обробки при виробництві комбікормів, так і напряму «Хімічна технологія деревини». За цей період часу школа підготувала та випустила 863 інженера-технолога та дала поштовх потужній науковій школі нашого університету.

У різні періоди функціонування кафедри і паралельно наукової школи очолювали: доценти І.К. Чайка (1975-1976, 1978-1988, 1990-1991), К.І. Шмат (1976-1977), А.О. Кочетова (1977-1978), О.Є. Воєцька (2014-2015), В.П. Федоряка (2017-2020), професори А.П. Левицький (1988-1990), Б.В. Єгоров (1991-2014), доцент А.В. Макарянська (2016-2017р., з 2020 р. по теперішній час). [1]

З 1991 до 2014 р. кафедру очолював д.т.н., професор Б.В. Єгоров, саме в цей час активно почалася співпраця з підприємствами та впровадження наукових результатів у виробництво, залучання інвестицій за рахунок інновацій, спонсорування розробок та налагодження міжнародних зв'язків з профільними закладами вищої освіти, науковими центрами та підприємствами.

Наукова школа «Наукові основи та енергозберігаючі технології виробництва комбікормової продукції» під керівництвом професора Єгорова Б.В. має значний потенціал, адже розроблено та впроваджено ряд технологій:

- Технологія поглибленої теплової обробки комбікормів;
- Технологія переробки вологої сировини (харчової, м'ясної, консервної промисловості);
- Порційні технології виробництва комбікормів і преміксів;
- Технологія переробки побічних продуктів консервної промисловості у виробництві комбікормової продукції;
- Технологія виробництва комбікормів для риб;
- Технологія виробництва спеціальних комбікормів для домашніх тварин (собак і кішок);
- Технологія виробництва білково-вітамінно-мінеральної добавки для собак з хондопротекторними властивостями;
- Технологія виробництва універсального комплексного преміксу;
- Високоєфективні програми годівлі сільськогосподарських тварин і птиці;
- Технологія підвищення кормової цінності зерна;
- Технологія виробництва кормової добавки з побічних продуктів виробництва рослинної олії;
- Технології виробництва функціональних харчових і кормових добавок для оптимізації ліпідного обміну, формування жирнокислотного профілю продукції тваринництва і птахівництва.

Розроблені технології підтверджуються авторськими свідоцтвами, патентами України на винаходи та патентами України на корисні моделі.

Технологія поглибленої теплової обробки комбікормів.

Розроблено технології поглибленої теплової обробки зерна та комбікормів, що дозволяє підвищити кормову цінність зерна та комбікормів шляхом збільшення доступності поживних речовин, руйнування антипоживних токсичних речовин, покращення смакових властивостей та зменшення загальної кількості мікроорганізмів, що покращує якість готової продукції. Термічну обробку комбікорму здійснюють для зниження питомих енерговитрат на гранулювання, підвищення продуктивності прес-гранулятора, надання гранулам відповідної міцності, а також підвищення виходу крупки, яку отримують шляхом подрібнення гранул. Технології волого-теплової обробки впроваджені у кормо- та круповиробництві України, країнах Балтії, Молдові, Казахстані (А.с. 1118334 СССР). [4-5]

Технологія переробки вологої сировини (харчової, м'ясної, консервної промисловості).

Дана технологія передбачає виробництво добавки шляхом збагачення зернової суміші рідким концентратом лізину, виробництво кормових добавок для сільськогосподарських тварин і птиці, що містить сировину рослинного походження (фруктові і овочеві вичавки), відходи птахівництва, а саме яєчну масу без шкаралупи некондиційних яєць, відходи м'ясокомбінатів. Теоретично та експериментально обґрунтовано доцільність збагачення білками тваринного походження зернової сировини, поживна та енергетична цінності якої значно знизилася через порушення агротехнології. Технологічний спосіб збагачення зернової сировини білками тваринного походження передбачає отримання попередньої високооднорідної суміші подрібненого зерна кукурудзи разом з яєчною масою без шкаралупи некондиційних курячих яєць та подальшого екструджування (Пат. на корисну модель 64222 Україна, Пат. на корисну модель 145327 Україна). [6-9]

Порційні технології виробництва комбікормів і преміксів.

Розроблено порційні технології виробництва комбікормів та преміксів для балансування раціонів сільськогосподарських тварин і птиці за біологічно активними речовинами, наприклад вітамінами та мікроелементами, тощо. Запропонований спосіб підготовки комплексного наповнювача при виробництві комплексних преміксів стабілізує склад наповнювача, усуває розшарування, спричинене самосортуванням під час переміщення, транспортування та зберігання, та забезпечує оптимальні умови одержання високооднорідного комплексного преміксу, який застосовують при виробництві комбікормів вирівняного гранулометричного складу та бінарних комбікормів. Запропонований спосіб виробництва комплексних наповнювачів для комплексних преміксів реалізовано на промислових підприємствах із використанням серійного технологіч-

ного обладнання (Пат. на корисну модель 145328 Україна, Пат. на корисну модель 145328 Україна, Пат. на корисну модель 26172 Україна). [10-13]

Технологія переробки побічних продуктів консервної промисловості у виробництві комбікормової продукції.

Конярство є перспективною галуззю тваринництва, яка все більше завойовує такі сфери, як спорт, розваги, активний відпочинок, відновлення здоров'я людини, виробництво унікальних продуктів харчування, а також коні відіграють важливу роль у господарській діяльності людей. Продуктивність, стан здоров'я та відтворні функції коней залежать від повноцінної годівлі, а саме наявності різноманітних кормів, які містять всі необхідні поживні речовини. Кормова добавка розроблена з відходів переробки фруктів і овочів, зокрема, переробки яблук на сік. Відходи з переробки яблук швидко псуються та підлягають утилізації, однак містять поживні та біологічно активні речовини та дозволяють здешевити комбікорми. Кормова добавка пройшла успішні випробування в промислових умовах на базі філії «Одеський іподром» ДП «Конярство України» (Пат. на корисну модель 106174 Україна). [14]

Технологія виробництва комбікормів для риб.

Риба та рибні продукти є одними із стратегічно важливих продуктів харчування, які відіграють важливу роль у біологічно повноцінному білковому харчуванні населення. Розведення форелі є важливим напрямком прісноводного рибництва в Україні та обсяги вирощування неухильно зростають. Риба є цінним продуктом харчування, який містить повноцінний білок, макро- та мікрокомпоненти, засвоюється організмом людини у будь-якому віці. На сьогоднішній день на українському ринку за обсягами продажів комбікормів для форелі лідирують іноземні компанії: Aqua, Aller, Biomar та інші. Розвиток технології виготовлення вітчизняних комбікормів для форелі дозволить розвивати туристичний і спортивний бізнес, розширити асортимент продукції, зменшити залежність форелевого господарства від закордонних виробників. (Пат. на корисну модель 88488 Україна). [15-16]

Технологія виробництва спеціальних комбікормів для домашніх тварин (собак і кішок).

Ринок комбікормів для домашніх тварин один із самих динамічних та прибуткових ринків кормів провідних країн світу і України. Оскільки частка комбікормів вітчизняного виробництва не перевищує 5% від загального обсягу реалізації, впровадження сучасних технологій виробництва конкурентоспроможних комбікормів створює великий економічний потенціал. Спосіб виробництва вологих комбікормів для домашніх тварин дозволяє підвищити цінність корму шляхом екструдування суміші зернових компонентів з жировою композицією та бланшованими овочами (Декларац. пат. на корисну модель 14123 Україна, Декларац. пат. на корисну модель 11935 Україна, Пат. на корисну модель 48241 Україна). [17-18]

Технологія виробництва білково-вітамінно-мінеральної добавки для собак з хондопротекторними властивостями.

Домашні тварини дуже чутливі до дисбалансу та змін у раціоні, що може проявляти ознаки недорозвитку кісток та м'язів, а також загострення генетичних та хронічних захворювань. Найбільш поширеним генетичним захворюванням, яке може виникнути в результаті травми у молодих собак великих порід, є дисплазія тазостегнового суглоба. Ознаками даного захворювання є шкутильгання різного ступеня та неправильний розвиток кістяка. Розроблена кормова добавка для собак різного віку та фізіологічного стану, що забезпечує високу кормову цінність, проявляє хондопротекторну, протизапальну, протиалергічну і гепатопротекторну дію, сприяє укріпленню зв'язок, м'язів і суглобів собак (Пат. на винахід 117319 Україна). Зоотехнічна оцінка проводилася в кінологічних клубах м.Одеси та м.Київ на різних породах собак (Голден ретривер, середньоазіатська вівчарка, американський бульдог та ін.). В результаті застосування БВМД в раціоні собак усіх дослідних груп покращило фізіологічний стан, покриття шкіри та шерсті, добрі показники росту, візуально ідеальний розвиток кінцівок і хребта, суглобів і м'язів, виявлено ефективність. [19-20]

Технологія виробництва універсального комплексного преміксу.

При утриманні сільськогосподарських тварин необхідно використовувати комбікорми, які згідно норм та вимог годівлі збалансовані за всіма поживними та біологічно активними речовинами. Тварини, які утримуються в закритих приміщеннях, потребують використання додаткових преміксів або спеціальних добавок для підтримки здоров'я та підвищення ефективності годівлі. Крім того, на сьогоднішній день високопродуктивні породи тварин та птиці утримуються як у промислових умовах, так і в фермерських господарствах, які вимогливі до умов утримання та раціонів годівлі за вмістом поживних речовин через можливі стреси. Введення в раціон біологічно активних речовин є одним із шляхів попередження та зменшення негативних наслідків стресу в інтенсивному технологічному ланцюгу утримання сільськогосподарської птиці. В умовах стресу сільськогосподарська птиця має підвищену потребу в певних поживних і біологічно активних речовинах для боротьби з негативними факторами. Проте в умовах стресу спостерігається закономірність зменшення споживання корму та виникнення дефіциту поживних та біологічно активних речовин. В умовах дефіциту білкової сировини розроблено технологію виробництва високоякісної комбікормової продукції із застосуванням сучасних форм препаратів біологічно активних речовин. Універсальний комплексний премікс має багато переваг, оскільки його можна успішно використовувати як в умовах невеликих приватних господарств, так і на промислових підприємствах при виробництві комбікормів. (Пат. на винахід 118507 Україна). [21-22]

Високоєфективні програми годівлі сільськогосподарських тварин і птиці.

Розроблено програми годівлі сільськогосподарських тварин і птиці, які впроваджені на господарствах у Одеській та Кіровоградській області. Особливостями програм є використання від 5 до 8 рецептів на весь період відгодівлі, зменшення витрат комбікормів, скорочення терміну відгодівлі для птиці з 60 днів до 38-42 днів, свиней з 8 до 7 місяців. [23-24]

Технологія підвищення кормової цінності зерна.

Введення високобілкових кормів – м'ясо-кісткового, рибного борошна, молочних продуктів і відходів переробки молока, кормових і гідролізних дріжджів, дозволяє балансувати раціони сільськогосподарських тварин за вмістом протеїну. У нашій країні зазначені високопротеїнові корми виробляються в недостатній кількості. Імпортна високобілкова сировина дороговарісна та впливає на ціну готової продукції. Завданням комбікормової промисловості є повноцінне забезпечення тварин протеїном та пошук шляхів підвищення кормової цінності зернової сировини. Широко використовуються такі способи – вологотеплова обробка та обробка ферментними препаратами, які підвищують ефективність використання протеїну зернової сировини. Дріжджування – це єдиний спосіб, який підвищує вміст протеїну в зернової сировини та покращує амінокислотний склад. Незважаючи на те, що цей спосіб відомий давно, великої популярності він не набув через необхідність сушити кінцевий продукт високої вологості. Сучасні технології екструзії зерна дозволяють впроваджувати високоєфективні способи підвищення кормової цінності зерна шляхом дріжджування, особливо виробництво комбікормової продукції для молодняка сільськогосподарських тварин. Запропоновано рішення проблеми білкового дефіциту в годівлі сільськогосподарських тварин за рахунок підвищення кормової цінності зерна шляхом його дріжджування та екструджування суміші дріжджованого та необробленого зерна пшениці (Пат. на корисну модель 32234 Україна, Пат. на корисну модель 39718 Україна, Пат. на корисну модель 40160 Україна). [25-28]

Технологія виробництва кормової добавки з побічних продуктів виробництва рослинної олії.

Скринінг показав, що до 2022 року Україна була лідером на світовому ринку з виробництва та експорту соняшникової олії. Вирощування соняшнику завжди було прибутковим, а продукти його переробки складовими харчових і кормових білкових ресурсів, конкурентоспроможними на внутрішньому та світовому ринках. Дефіцит білкових компонентів у виробництві комбікормів для сільськогосподарських тварин та птиці є серйозною проблемою для галузі сільськогосподарського виробництва. Недостатня кількість білка може суттєво впливати на ефективність кормів, розвиток та здоров'я тварин, а також на відповідність отриманої продукції стандартам якості. Під час виробництва рослинної олії олійно-переробні підприємства отримують значну кількість побічних продуктів, а саме макухи та шроту, які є білковими кормами для годівлі сільськогосподарських тварин. Розроблена технологія виробництва високобілкової кормової добавки, яка забезпечує протеїнові та енергетичні потреби тварин, може стати ефективним рішенням для компенсації недостатньої кількості білка в раціонах тварин і птиці (Пат. на корисну модель 138937 Україна). Така добавка може покращити якість і склад раціонів, що безпосередньо впливає на ефективність їхнього зростання та розвитку. Крім того, можливість виробництва цієї добавки на діючому олійно-переробному підприємстві в цеху гранулювання шроту може сприяти оптимізації виробничих процесів та ефективному використанню побічних продуктів виробництва рослинної олії. Кормова добавка забезпечує протеїнові та енергетичні потреби сільськогосподарських тварин та птиці. [29-31]

Технології виробництва функціональних харчових і кормових добавок для оптимізації ліпідного обміну, формування жирнокислотного профілю продукції тваринництва і птахівництва.

Технологія виробництва функціональних харчових і кормових добавок для формування та корекції мікробіому тварин і птиці передбачала розробку поліфункціональних антидисбіотичних засобів "лізоцим-форте", "Леквин", які також регулюють обмін і засвоєння жирів. Розроблено технологію високоолеїнової соняшникової олії "Оливка", яка не поступається за якістю оливковій олії та містить олеїнової кислоти не менше 75 % і насичених жирних кислот менше 10 %. [32-34] Розроблені технології підтверджуються авторськими свідоцтвами, патентами на винаходи та патентами на корисні моделі.

Впроваджені реальні проекти реконструкції і технічного переоснащення в галузі волого-теплової обробки зернової сировини та розробка нових технологій виробництва преміксів та комбікормів відкриває шлях до покращення продуктивності та якості продукції, підвищення конкурентоспроможності підприємства, удосконалення технологій виробництва та впровадження новітніх підходів у галузі комбікормів. Наприклад, досягнення птахофабрики у введенні нового високопродуктивного кросу курей-несучок "Hi-Line" та досягнення продуктивності на рівні понад 330 яєць від однієї несучки.

Будівництво одного з найсучасніших комбікормових заводів в Україні у 2008 році під науковим керівництвом Б.В. Єгорова та співробітників кафедри у місті Роздільна Одеської області є значущим кроком у розвитку галузі сільського господарства. Використання обладнання провідних світових виробників може забезпечити високу якість та ефективність виробництва комбікормів. Такі модернізовані заводи можуть відігравати ключову роль у виробництві якісних комбікормів, забезпечуючи тваринам оптимальний раціон та сприяючи підвищенню продуктивності тваринництва в регіоні та всій країні. Це також підкреслює важливість науково-дослідницької роботи та впровадження передових технологій для підтримки розвитку сільського господарства.

Технологія виробництва кормових сумішей з відходів зернопереробних підприємств в Кіровоградському, Прилуцькому комбінатах хлібопродуктів та на 12 комбікормових заводах Узбекистану є значущим кроком у використанні ресурсів та зменшенні відходів в промисловому виробництві.

Інноваційні технології також представлені в наукових публікаціях:

— у 2000 р. видано навчальний посібник «Технологія виробництва преміксів» під загальною редакцією Б.В. Єгорова [35], а в 2007 р. вийшов у світ підручник «Технологія виробництва преміксів» [11];

— 2001 р. – засновано видавництво науково-виробничого журналу «Зернові продукти і комбікорми» [36];

— 2004 р. – розроблено інтелектуальний комп'ютерний тренажер на основі технології дозування та змішування компонентів преміксів і комбікормів, який отримав Золоту нагороду на виставці «Високі технології у вищій освіті» Hi-Tech 2004 Міністерства освіти і науки України;

— 2006 р.– прийнято участь у розробці державного стандарту ДСТУ 4482: 2005 «Премікси. Технічні умови», який з 1 жовтня 2006 р затверджено і введено в дію;

— 2011 р. – Видавництво підручника «Технологія виробництва комбікормів» [10];

— 2013 р. – Видавництво підручника «Контроль якості та безпеки продукції зернопереробної галузі (комбікормова галузь)» [38]. 18 травня

— 2017 року набрав чинності Закон України «Про державний контроль за дотриманням законодавства про харчові продукти, корми, побічні продукти тваринного походження, здоров'я та благополуччя тварин», в основу якого покладено два законопроекти «Про корми» і «Про безпечність та гігієну кормів», в розробці яких проф. Б.В. Єгоров брав активну участь.

Створення Міжнародної школи кормів у 2014 році було важливим кроком для об'єднання та обміну знаннями та досвідом в галузі виробництва комбікормів та годівлі тварин, а саме підвищення рівня експертизи та навичок фахівців у сфері комбікормів, що сприяє покращенню якості продукції та оптимізації процесів виробництва.

Наукова школа під керівництвом професора Єгорова Б.В. продовжує активну навчальну та наукову роботу з напряду удосконалення і розробки енергозберігаючих технологій виробництва комбікормової продукції, в також підготовки висококваліфікованих інженерних та наукових кадрів (рис. 3).

Висновки. В представлений роботі наведені матеріали щодо фундаторів комбікормової галузі України, які внесли значний вклад в становлення та розвиток комбікормової промисловості.

Наукова школа "Наукові основи та енергозберігаючі технології виробництва комбікормової продукції" під керівництвом професора Єгорова Б.В. має значний внесок у розвиток інноваційних технологій у виробництві комбікормів. Проведено скринінг розроблених та впроваджених у виробництво інноваційних технологій виробництва комбікормової продукції.

Проаналізовано тенденції багатосторонньої діяльності наукової школи – видавництво підручників, навчальних посібників, науково-виробничого журналу «Зернові продукти і комбікорми», проведення практичних тренінгів Міжнародної школи кормів, виїзних семінарів на підприємства галузі дозволяє здійснювати підготовку та підвищення кваліфікації професорсько-викладацького складу та інженерних кадрів.

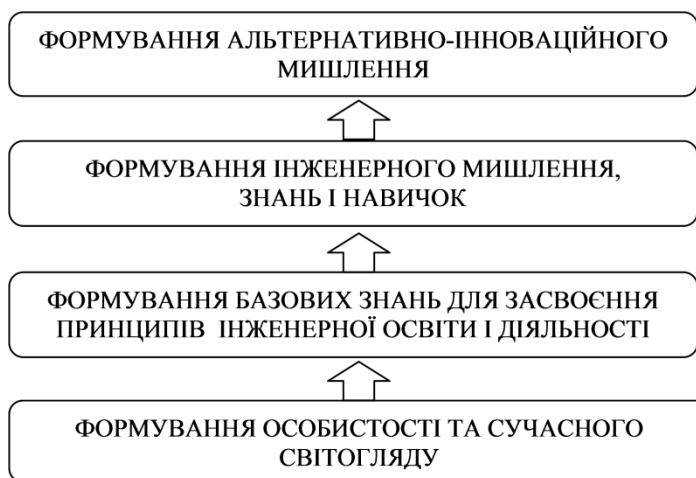


Рис. 3 – Філософія підготовки інженерних і наукових кадрів

References

1. Kananykhina, O.M., Solovey, A.O., Bilyavska, N.P., Melnykova, V.P. (2017). Odeska natsionalna akademiya kharchovykh tekhnolohiy, Odesa: Chornomor'ya, 2017, 288.
2. Demydov, P.H. (1968). Tekhnolohyya kombykormovoho proyzvodstva, Kolos, 224.
3. Demydov, P.H. (1975). Tekhnolohyya kombykormovoho proyzvodstva, Kolos, 327.
4. Ehorov, B.V. (1985). Razrabotka tekhnolohyy vlahoteplovoy obrabotky soy: avtoref.dys. ... kand.tekhn.nauk: 05.18.02 – tekhnolohyya zernovykh, bobovykh, krupyanykh produktov y kombykormov: zashchyta 24.05.1985 / Ehorov Bohdan Vyktorovych; nauch. ruk. Y.K. Chayka; OTYPP ym M.V. Lomonosova, Odessa, 24.
5. Chayka, Y.V., Ehorov B.V., Lyvytskyy A.P. (1982). Vlyyanye tekhnolohycheskykh sposobov obrabotky na sodержanye ynhybytorov trypsyna v semenakh soy, *Proteolytycheskiye fermenty y ykh ynhybytory v semenakh zernovykh y zernobobovykh kultur: sb.tr./VS·HY*, Odessa, 73–76.

6. Vorona, N.V. (2015). Udoskonalennya tekhnolohiyi vyrobnytstva kombikormiv dlya molodnyaka sil's'kohospo-dars'koyi ptytsi: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.18.02 "Tekhnolohiya zernovykh, bobovykh, krupyanykh produktiv i kombikormiv, oliynykh i lubyanykh kultur"/ Vorona Nina Vyacheslavivna; nauk.ker. B.V. Yehorov; Odesa: ONAKHT, 20.
7. Ehorov, B.V. Vorona, N.V. (2010). Yspol'zovanye nekondytsyonnykh kurynykh yayts pry proyzvodstve kormovykh dobavok y kombykormov, Zernovi produkty i kombikormy, 3, 43–45.
8. Ehorov, B.V. Tsyundyk, A.H., Orekhova V.H. (2015). Perspektyvy pererabotky y yspolzovanyya yablochnykh vyzhymok, Zernovi produkty i kombikormy, 3(59), 38–43.
9. Ehorov B.V., Malaky Y.S. (2015). Rozrobka tekhnolohiyi vyhotovlennya tomatnoyi kormovoyi dobavky dlya sil's'kohospodars'koyi ptytsi, Zernovi produkty i kombikormy, 1(57), 35–40.
10. Yehorov, B.V. (2011). Tekhnolohiya vyrobnytstva kombikormiv, Odesa: Druk. dim, 448.
11. Yehorov, B.V. Shapovalenko O.I., Makarynska A.V. (2007). Tekhnolohiya vyrobnytstva premiksiv, Kyiv: Tsentr uchb.l-ry, 288.
12. Makarynska, A.V. (2021). Naukovo-tekhnichni osnovy udoskonalennya tekhnolohiyi zbahachennya kombikormiv biolohichno aktyvnymy rehovynamy: avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk: spets. 05.18.02 "Tekhnolohiya zernovykh, bobovykh, krupyanykh produktiv i kombikormiv, oliynykh i lubyanykh kultur: zakhyshchena 21.04.21/ Makarynska Alla Vasylivna; nauk. konsultant B.V. Yehorov; Odesa: ONAKHT, 50.
13. Basiurkina, N., Yegorov, B., Makarynska, A. (2020). Assessment of the needs and economic efficiency of premixes, protein and vitamin sup-plements and compound feeds in Ukraine, Grain Products and Mixed Fodder's, 20, 4(80), 38–46. DOI <https://doi.org/10.15673/gpmf.v20i4.2033>
14. Tsyundyk, O.H. (2016). Udoskonalennya tekhnolohiyi vyrobnytstva kombikormiv dlya koney: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: spets. 05.18.02 "Tekhnolohiya zernovykh, bobovykh, krupyanykh produktiv i kombikormiv, oliynykh i lubyanykh kultur"/ Tsyundyk Oleksandr Hryhorovych; nauk.ker. B.V. Yehorov; Odesa: ONAKHT, 20.
15. Yehorov, B.V., Fihurska, L.V. (2011). Stan ta perspektyvy rozvytku forelivnytstva u rybovodnykh hospodarstvakh Ukrayiny, Zernovi produkty i kombikormy, 2, 37–39.
16. Yehorov, B.V., Fihurs'ka, L.V. (2010). Porivnyalnyy analiz prohram hodivli foreli, Zernovi produkty i kombikormy, 2, 46–49.
17. Yehorov, B.V., Mardar, M.P., Bordun, T.V. (2004). Problemy vyrobnytstva volohykh kombikormiv dlya domashnikh tvaryn v Ukrayini, Naukovi praci ODAKHT, Odesa, 27, 31–33.
18. Yehorov, B.V., Bordun T.V.(2010). Biolohichna otsinka volohykh kombikormiv dlya domashnikh tvaryn, Naukovi praci ONAKHT, Odesa, 38, 1. 19–22.
19. Makarynska, A.V. (2017). «Mobikan» - bilkovo-vitaminna dobavka dlya domashnikh tvaryn, Zernovi produkty i kombikormy, 17, 3(67), 38–44.
20. Makarynska, A.V., Levytskyi, A.P., Dubovenko, I.Ye. (2018). Biolohichna ta zootekhnichna otsinka bvm dlya domashnikh tvaryn (sobak), Zernovi produkty i kombikormy, 1, 32–37. DOI <https://doi.org/10.15673/gpmf.v18i1.891>
21. Yehorov B.V., Makarynska, A.V., Vorona N.V. (2017). Naukovo-praktychne obgruntuvannya universalnoho kompleksnoho zbahachuvacha dlya silskohospodarskoyi ptytsi, Zbirnyk tez dopovidey 77 naukovoyi konferentsiyi vykladachiv akademiyi, Odessa, ONAKHT, 4–6.
22. Yehorov, B.V. Makarynska, A.V., Vorona, N.V. (2017). Otsinka zootekhnichnoyi efektyvnosti vykorystannya universalnoho kompleksnoho premixu dlya silskohospodarskoyi ptytsi, Zernovi produkty i kombikormy, 17, 2, 34–38. DOI <https://doi.org/10.15673/gpmf.v17i2.528>
23. Yehorov, B.V., Hontsa, N.V. (2009). Analiz suchasnykh prohram hodivli molodnyaka kureynesuchok, Zernovi produkty i kombikormy, 4, 49–51.
24. Yehorov, B.V., Makarynska, A.V., Hontsa, N.V. (2010). Udoskonalennya prohram hodivli – osnova vyrobnytstva vysokoyakisnykh kombikormiv dlya kurey-nesuchok, Zernovi produkty i kombikormy, 4, 30–37.
25. Yehorov, B.V., Davydenko, T.M. (2008). Vdoskonalennya pidhotovky kontsentrovanykh kormiv pry vyrobnytstvi povnotsinnykh kombikormiv dlya silskohospodarskykh tvaryn, Kormy i kormovyrvo: mizhvidom. temat. nauk. zb. In-tu kormiv UAAN, Vinnytsya, 135–140.
26. Davydenko, T.M. (2009). Udoskonalennya tekhnolohiyi pidhotovky zernovoyi syrovyny pry vyrobnytstvi kombikormiv: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.18.01 / T.M. Davydenko, Odesa, 21.
27. Yehorov, B.V., Davydenko, T.M. (2010). Tekhnolohichnyy sposib pidvyshchennya kormovoyi tsinnosti zerna shlyakhom drizhdzhuvannya ta ekstruduvannya, ONAKHT, Odesa, 38, 1, 4–9.
28. Yehorov, B.V., Kananykhina, O.M., Davydenko, T.M. (2008). Biotekhnolohichni zasoby zbahachennya kontsentrovanykh kormiv mikrobiolohichnym bilkom, Zernovi produkty i kombikormy, 2, 27–30.
29. Yegorov, B., Turpurova, T., Sharabaeva, E., Bondar, Y. (2019). Prospects of using by-products of sunflower oil production in compound feed industry, Journal of Food Science Technology Ukraine, 13, 106–113. doi: 10.15673/fst.v13i1.1337

30. Iegorov, B., Kananykhina, O., Turpurova, T. (2022). Development of production technology of high-protein feed additive from byproducts of sunflower oil production, *Journal of Grain Products and Mixed Fodder's*, 22, 2(86), 17-23. DOI <https://doi.org/10.15673/gpmf.v22i2.2442>
31. Yegorov, B., Kananykhina, O., Turpurova, T. (2022). Assessment of high-protein quality feed additives from by-products manufacture of sunflower oil, *Journal of Grain Products and Mixed Fodder's*, 22, 3(87), 20-24. DOI <https://doi.org/10.15673/gpmf.v22i3.2458>
32. Levyts'kyy, A.P., Lapinska, A.P., Selivanska, I.A., Hulavskyy, V.T., Khodakov, I.V., Myronov, V.S. (2012). Lizotsym yak kormova dobavka, *Journal Zernovi produkty i kombikormy*, 2, 45-47.
33. Levyts'kyy, A.P., Lapinska, A.P. (2009). Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnytstva vitaminnoyi kormovoyi dobavky «LEKAVIT», *Journal Zernovi produkty i kombikormy*, 4, 29-33.
34. Levyts'kyy, A.P., Lapinska, A.P., Khodakov, I.V. (2017). Vplyv riznykh roslynnykh oliy na zhyrnokyslotnyy sklad lipidiv pechinky shchuriv, *Zbirnyk tez dopovidey 77 naukovoyi konferentsiyi vykladachiv akademiyi*, Odessa, ONAKHT, 13-14.
35. Ehorov, B.V., Sherstobytov, V.V., Shapovalenko, O.Y., Kochetova, A.A., Chayka, Y.K., Kuznetsov, M.V., Lavrov, E.M. (2000). *Tekhnolohyya proyzvodstva premyslov*, Kyev: TEA, 184.
36. *Journal of Zernovi produkty i kombikormy*, <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/gpmf>
37. Yehorov, B.V., Kochetova, A.O., Velichko, T.O., Khorenzhyy, N.V., Suslo, V.V., Islamov, V.A., Turpurova, T.M. (2013). Kontrol yakosti ta bezpeky produktsiyi zernopererobnoyi haluzi (kombikormova haluz), Kherson: OLDIPLYUS, 446.

INNOVATIONS OF FEED TECHNOLOGIES OF THE XXI CENTURY

**Iegorov B., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Makarynska A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Turpurova T., PhD, Associate Professor
Odesa National University of Technology, Odessa**

Abstract. *Animal husbandry is a key industry in providing the population with quality food products of animal origin, thereby ensuring the country's national food security, and a strategically important industry in the overall structure of agricultural production, which accounts for about 20% of total production. According to statistical data, the annual consumption of meat and meat products per person over the past 15 years was about 55 kg, which is 25 kg less than the acceptable norm (80 kg).*

Ukraine has favorable conditions for raising agricultural animals and poultry. When organizing the production and technological chain of production of livestock products, special attention should be paid to the stage of production of compound feed - to use raw materials as efficiently as possible, carefully process them, expand the range and improve the quality of livestock products to ensure food security of the country.

The structure of the formation of the efficiency of the production of animal husbandry products is given and it is shown that the efficiency of the production of animal husbandry products is more than 60% of all expenses influenced by the quality of feeding of agricultural animals: the level of organization of technology; complete feeding of animals, quality and safety of raw materials. The problem of production of high-quality and safe livestock products is solved by introducing innovative technologies, including technologies for the production of high-quality compound feed products. These technologies are based on the experience and knowledge of many scientists, the founders of the compound feed industry. The presented work contains materials on the founders of the compound feed industry, who made a significant contribution to the establishment and development of the compound feed industry.

The screening of the developed and implemented innovative technologies for the production of compound feed, which play a significant role in increasing production efficiency and product quality, was carried out. Scientific school "Scientific foundations and energy-saving technologies of compound feed production" under the leadership of Professor B.V. Egorov. creates opportunities to combine theory and practice, the latest scientific developments, which have a significant contribution to increasing the competitiveness of the compound feed industry. The trends of the scientific school's multifaceted activities have been analyzed - the publication of textbooks, study guides, the scientific and practical magazine "Grain Products and Compound Feeds", the holding of the International School of Fodder, field seminars at the enterprises of the industry allows for the training and improvement of the qualifications of professors and teaching staff and engineering personnel.

Keywords: safety, quality, founders of the compound feed industry, innovations, technologies, developments, compound feed products.

Отримано в редакцію 26.06.2023
Прийнято до друку 27.11.2023

Received 26.06.2023
Approved 27.11.2023

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕКСТРАГУВАННЯ ЕФІРНИХ ОЛІЙ У МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ

Коваленко О.А., д.с.х.н., доцент², Славинський Р.Л., аспірант¹,
Федосов Я. С., аспірант², Славинська В.О., інженер¹,
Аль-Хамад І.М. ¹, аспірант

¹ Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

² Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна

Анотація. Тенденції зростання світового ринку ефірних олій та попит на натуральні речовини є драйверами поширення використання ефірних олій в різноманітних галузях народного господарства. Існує багато методів отримання ефірних олій, у статті описані і порівняні традиційні та інноваційні методи, які уповільнюють ризик втрати основних термолабільних компонентів рослинної сировини, зберігають якість, зменшують час екстракції, діють екологічно безпечно та збільшують відсоток виходу ефірних олій. У зв'язку з тим, що традиційні методи отримання ефірних олій мають багато недоліків основний з яких — це термостабільність ефірних олій за високих температур існує необхідність у інноваційних методах, які зменшать вплив цих факторів.

В статті приведені експериментальні данні дослідів на різних зразках квітів лаванди та гісопу сорту «Маркіз». Проілюстрован експериментальний стенд для проведення екстракції ефірної олії з лаванди та гісопу за допомогою інноваційного методу — мікрохвильової дистиляції парою.

Цей процес є поєднанням традиційних технологій, а саме, парової дистиляції та інноваційної технології, мікрохвильового нагріву. Нагрівання мікрохвилями допомогло ініціювати та створити передачу маси та тепла в середині рослинних матриць назовні, що призвело до значного скорочення часу екстракції, за допомогою впливу механодифузії. На підставі аналізу методів та на основі експериментальних даних робимо висновок про те, що електродинамічні системи мають значні перспективи у широкому використанні. Тому, ставиться завдання залучити їх до процесів отримання екстрактів ефірних олій. Проведено дослідження кінетики екстракції та вплив гідромодуля на процес екстрагування. Визначено, що циклічне екстрагування вилучає більше цільових компонентів, ніж одноразове.

Вплив гідромодуля на інтенсивність масоперенесення характеризує науково-технічне протиріччя між факторами підвищення значення рушійної сили та концентрацією екстракту. Розглянуто вплив схеми обробки на інтенсивність масоперенесення на прикладі гісопу сорту «Маркіз». Отримані результати є базою для організації енергоефективних режимів екстрагування із квітів лаванди та гісопу.

Ключові слова: мікрохвильова парова дистиляція, добування ефірної олії з лаванди та ісопу, інноваційні методи

Вступ. Світовий ринок ефірних олій у 2020 році оцінювався майже в 11 млрд. доларів США, і, за прогнозами, до 2030 року він досягне майже 25 млрд. доларів США, а середньорічний темп зростання складе 8% з 2021 по 2030 рік [1]. Зростаючий попит на натуральні речовини в продуктах харчування та напоях, а також в індустрії парфумерії та засобів особистої гігієни спонукало виробників використовувати ефірні олії у косметичній, парфумерній, харчовій галузях. Існує безліч різних способів одержання ефірної олії. Перевага віддається щадним способам, так як ароматні олії термолабільні і легко випаровуються. Основні методи, які використовують для отримання ефірних олій з рослинної сировини є: дистиляція парою; пресування (механічний метод); екстракція (леткими та нелеткими розчинниками).

Аналіз проблематики та останніх досліджень. Залежно від характеру сировини та основних властивостей олій для їх вилучення застосовують той чи інший спосіб, що дозволяє отримати найбільший вихід та найкращу якість.

Один з недоліків традиційних методів пов'язаний з термолабільністю ефірних олій. Компоненти ефірних олій зазнають хімічних змін (гідроліз, окислення) завдяки дії високої температури, тому якість витягнутих ефірних олій може знижуватися та також залежить від тривалості протікання процесу. Оскільки економіка, конкурентоспроможність, екологічність, енергоефективність і висока якість стають ключовими драйверами сучасного промислового виробництва, розвитку необхідних технологій екстракції олій, а класичні методи отримання ефірних олій не можуть цього забезпечити, то необхідно впровадження інноваційних технологій. Порівнюємо традиційні та інноваційні методи екстракції ефірних олій і проілюструємо це (табл.1) [2].

Таблиця 1

Порівняння традиційних та інноваційних методів екстракції ефірних олій

Традиційні методи	Інноваційні методи
Низька ефективність	Висока ефективність
Низька якість	Висока якість
Великий час екстракції	Малий час екстракції
Низька енергоефективність	Висока енергоефективність
Великі виброси CO ₂	Низькі виброси CO ₂

Інноваційні/нетрадиційні методи є "зеленими" за своєю суттю. Для подолання обмежень традиційних методів були запропоновані різні інноваційні методи екстракції (табл. 2). Вони менш трудомісткі, екологічно чисті, підвищують вихід та якість ефірних олій за рахунок меншого використання розчинників та енергії, а також допомагають уникнути використання токсичних хімікатів. Традиційна технологія передбачає передачу теплової енергії за допомогою механізмів теплопровідності та конвекції, що в кінцевому підсумку може спричинити коливання температурного градієнта всередині продукту. Тому було розроблено кілька нових методів нагрівання, які містять більшу ефективність.

Таблиця 2

Інноваційні та традиційні методи екстракції ефірних олій

Традиційні методи	Інноваційні методи
Гідродистиляція	Надкритична екстракція рідини
Дистиляція паром	Докритична рідинна екстракція
Екстракція	Мікрохвильова дистиляція паром
Прессування	Мікрохвильова екстракція без розчинника
Анфлераж	Мікрохвильова гідродифузія та гравітація
Мацерація	Ультрозвукова гідродистиляція
Екстракція методом Сокслета	Дистиляція з омичним нагріванням
	Дистиляція з використанням сонячної енергії

Розглянемо переваги та проблеми інноваційних технологій.

Надкритична рідинна екстракція. Надкритична рідинна екстракція - це складний метод виділення одного компонента із суміші з використанням надкритичної рідини як екстрагуючого розчинника, що складається з газів або рідин. Їх розчинювальна здатність контролюється температурою та/або тиском. Однак цей метод використовується для виділення тих хімічних класів летких олій, які не можна видобувати методом парової дистиляції. Найбільш часто використовуваним розчинником є діоксид вуглецю (CO₂) з кількох практичних причин, таких як низький критичний тиск (73,8 бар) і температура (31°C), незаймистість, відсутність корозії, безпека, дешевизна і доступність у високій чистоті. Використовуючи зниження тиску, його можна легко виділити з рослинного матеріалу. Недоліком є те, що CO₂ неполярний, тому він не може екстрагувати полярні аналіти але може використовуватися як надкритична рідина з такими співрозчинниками, як диметиловий ефір, етан, етиленетанол, фреони, метанол, закис азоту, пропан, етилен тощо. Додаткові переваги цього методу включають забезпечення високоякісного асортименту виділених компонентів з покращеними біологічними та функціональними властивостями порівняно з іншими продуктами, отриманими за допомогою методу гідродистиляції. Цей метод є екологічно чистим, оскільки нетоксичні розчинники, що використовуються в процесі екстракції, не залишають шкідливих залишків. Розчинник для екстракції може бути швидко виділений з екстракту через його високу летючість. Компоненти з високою температурою кипіння легко екстрагуються при низьких температурах, які вважаються придатними для термолабільних компонентів. Основним обмеженням цього методу є складність системи, що збільшує вартість обладнання. Іншим недоліком є те, що підвищений тиск вимагає більш значних початкових капітальних витрат.

Докритична екстракція рідини. Докритична екстракція рідини має місце, коли рідина досягає тиску, більшого за P_c (критичний тиск), але меншого за T_c (критичну температуру). Цей стан називається докритичним. Розчинниками, що використовуються для екстракції ефірних олій у цьому процесі, є H₂O і CO₂. Докритичний стан рідини має кілька переваг: знижена густина, менша в'язкість і краща дифузія в газорідному середовищі. Оскільки ця процедура екстракції виконується при помірній робочій температурі, вона вважається найкращою альтернативною стратегією для термолабільних компонентів. Переваги цього методу полягають у тому, що він простий, менш трудомісткий, економічно ефективний та екологічно чистий. Він є потужною альтернативою методу екстракції ефірних олій, оскільки дозволяє швидко виділити ефірну олію. Основним недоліком цього методу екстракції є те, що він вимагає високого тиску для підтримання розчинника в докритичному стані, що збільшує операційні витрати.

Екстракція за допомогою ультразвуку. Метод екстракції за допомогою ультразвуку дозволяє високо-селективно і швидко відокремлювати леткі олії від рослинного матеріалу. Принцип цього методу полягає в тому, що він розвиває кавітацію деяких крихлих бульбашок в системі розчинника завдяки проходженню потоку ультразвукових хвиль, які зазвичай дозволяють отримати більш значний відсоток системи розчинника в рослинному матеріалі, що збільшує площу поверхні. Рослинну сировину занурюють у воду або інший розчинник (наприклад, метанол або етанол) і піддають ультразвуковій обробці. Цей метод передбачає вилучення компонентів ефірної олії з листя, насіння та квітів. Факторами, які суттєво впливають на відсотковий вихід та якість ефірних олій, є частота ультразвуку, тривалість ультразвукової обробки, час занурення, температура екстракції, робочий цикл ультразвуку, особливості та розмір рослинних матеріалів. Цей метод є вигідним для термочутливих комбінацій завдяки середній температурі та економії енергії. Це підходящий метод екстракції для отримання високоцінних летючих олій. Ефективність екстракції може бути підвищена за допомогою цього методу, який може спричинити руйнування клітинних стінок рослин і покращення масопереносу за рахунок утворення ефекту кавітаційного булькання. Недоліками цього методу є низька чистота, низька ефективність і тривалість процесу [3].

Дистиляція з омичним нагріванням води. Дистиляція води з омичним нагріванням - це революційний процес для виділення ефірних олій, який використовує омичний нагрів і вимагає меншої потужності (на мл. рідини). Контроль гомогенності обробки вимагає максимально точних вхідних даних для моделювання. Швидкість нагрівання пропорційна квадрату напруженості електричного поля і провідності середовища. Цей метод використовується для швидкого виділення різних летких олій. Омичне нагрівання є дуже енерго-ефективною і безпечною технологією. Вона забезпечує швидке і відносно однорідне нагрівання. Якість ефірних олій, отриманих за допомогою цього методу, є високою. Основним недоліком омичного нагрівання є висока вартість, корозія електродів і необхідність постійного очищення [3].

Сонячна дистиляція. Розроблено нову технологію для підвищення ефективності процесу дистиляції шляхом використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячне світло. Цей метод використовує приблизно однакову кількість теплової енергії на одиницю ваги рослинного матеріалу. Для сонячної дистиляції використовуються стаціонарний ресивер Шеффлера, конденсатор, фокус-концентратор, олійний сепаратор, перегінний куб та інші компоненти. Кількість енергії, доступної для процесу дистиляції, визначається інтенсивністю сонячного випромінювання та тепловою і оптичною ефективністю сонячної дистиляції. Це недорогий метод вилучення ефірних олій з лікарських рослин. Ефірні олії з різних рослинних джерел екстрагуються за допомогою системи сонячної дистиляції, таких як листя евкالیпта, листя м'яти, бутони гвоздики, насіння фенхелю, базилік, лаванда, ммин, кардамон, апельсин, лимон, розмарин, цитрусові, цимбопогон тощо [3].

До революційних методів вилучення ефірних олій можна віднести електродинамічні технології.

Мікрохвильова дистиляція паром. Цей підхід працює шляхом зміни полярності води, а потім нагрівання її мікрохвилями. Електромагнітна енергія перетворюється на мікрохвильову енергію, яка безпосередньо генерується через молекулярну взаємодію між ароматичними рослинами (матеріалами) та електромагнітним полем. Хімічне представлення системи полягає в наступному - перенесення відбувається в одному напрямку, тобто з внутрішніх клітин назовні. Фактори, що впливають на ефективність цього методу включають: час, температуру, фізико-хімічні властивості екстрагованих сполук, діелектричні властивості суміші зразків і тип розчинника. Цей метод використовується в промисловості, і є відмінним універсальним засібом отримання ефірних олій з широкого спектру рослинних матеріалів у відповідних умовах, який демонструє швидку екстракцію при низькій витраті розчинника. Екологічно чистий метод завдяки меншим викидам вуглекислого газу в атмосферу, також забезпечує захист термолабільних сполук, а його ефективність базується на діелектричній проникності рослинного матеріалу і води відповідно [2].

Кинетичне дослідження показує, що мікрохвильова дистиляція з паром з вигодою у часі екстракції до 75 % дає ефірну олію з кращою антиоксидантною активністю, що підкреслює значний потенціал як природної антиоксидантної добавки [3]. Існує лише один недолік: мікрохвильова обробка може призвести до змін у стереохімії сполук і може перетворювати їх з одного ізомеру в інший [3].

Мікрохвильова екстракція без розчинника. Мікрохвильова екстракція без розчинників — це комбінація мікрохвильового нагрівання та сухої дистиляції, що виконується при атмосферному тиску без додавання розчинника чи води. Виділення і концентрування летких сполук здійснюють в одну стадію. Метод дає ефірну олію з більшою кількістю більш цінних сполук, насичених киснем, і дозволяє істотно заощадити витрати з точки зору часу, енергії та рослинного матеріалу. Цей метод є екологічно чистою технологією і виглядає як хороша альтернатива для вилучення ефірних олій з ароматичних рослин. Втрати деяких летких сполук, низька ефективність екстракції, деградація ненасичених або складноефірних сполук через термічні або гідролітичні ефекти та залишки токсичного розчинника в екстракті можуть спостерігатися за допомогою цих методів екстракції. Ці недоліки призвели до розгляду використання нової «зеленої» техніки в екстракції ефірної олії, яка зазвичай використовує менше розчинника та енергії [3].

Метод мікрохвильової дистиляції без розчинника. Заснований на відносно простому принципі, цей метод передбачає розміщення рослинного матеріалу в мікрохвильовому реакторі без будь-якого додавання розчинника або води. Внутрішнє нагрівання води в рослинному матеріалі розтягує рослинні клітини та при-

зводить до розриву залоз і олійних вмістилищ. Таким чином, цей процес звільняє ефірну олію, яка випаровується водою на місці рослинного матеріалу. Система охолодження поза мікрохвильовою піччю постійно конденсує дистилат [3].

Мікрохвильова гідродифузія та гравітація. Мікрохвильова гідродифузія та гравітація є одним з нових екологічно чистих методів видобутку летких олій. Ця технологія використовує мікрохвилі та земне тяжіння для збору та вилучення летких олій, які гідродифундують з внутрішніх клітин до зовнішніх частин рослинного матеріалу. Зазвичай екстракцію проводять при атмосферному тиску без додавання розчинника. Цей метод використовується для швидкого виділення летких поліекстрактів. Перевагою цього методу є те, що він економічний, вимагає менше енергії, є високоєфективним і не потребує розчинника/води. Час екстракції вимірюється хвилинами порівняно з гідродистиляцією, яка займає години [4].

Розглянуті роботи [2-3] визначають технічні ідеї інновацій залучення мікрохвильових технологій до процесів отримання ефірних олій, наукові принципи та практичні рекомендації відсутні. Наразі, активно проводяться дослідження використання мікрохвильових технологій в харчових та фармацевтичних виробництвах. Так, в [4] досліджено структурні та фізико-хімічні властивості прежелатинізованого кукурудзяного крохмалю, підданого мікрохвильовій обробці, та їх вплив на вивільнення лікарського засобу з таблеток. В [5] проведено кінетичне моделювання конвективного та мікрохвильового сушіння картопляних відходів та їх вплив на вміст антиоксидантів. Завдання доцільності попередньої обробки у мікрохвильовому полі квітів шафрану із оцінкою якості готового продукту вирішувалось в роботі [6]. Розробка «зеленого» інноваційного пілотного проекту напівпромислового масштабу в поєднанні мікрохвильове нагрівання та відцентрова сила для вилучення ефірних олій та фенольні сполуки з апельсинової кірки проводилося у [7]. Розглядався метод вакуумної мікрохвильової екстракції як технологія екоіндустрії, досліджено кінетику, ефективність та вплив на біоактивність сполук [8].

Висока ефективність електродинамічних технологій обґрунтована в роботі [9]. Новим підходом до проведення процесу екстрагування є ініціювання гібридного процесу [10] для організації ефекту механодифузії [11]. По суті, це адресна доставка енергії до нанорозмірних структур сировини [12]. Наведено аналіз енергетичних характеристик електродинамічного обладнання [13], кінетиці взаємодії вологого матеріалу із мікрохвильовим полем [14], ефективності обладнання при утилізації відходів кавового виробництва [13, 15], при переробці шипшини [15]. Характеристики електродинамічних апаратів наведено на сайті [16].

Головний висновок аналізу в тому, що електродинамічні технології мають значні перспективи. Тому, ставиться задача залучити їх до процесів отримання екстрактів ефірних олій.

Різні ефірні олії можуть використовуватися як натуральні харчові добавки і видобуваються з різних рослин. Багато дослідників довели ефективність інновацій у традиційних методах вилучення летких олій з різних рослинних матеріалів. Створення, вдосконалення та розширення цих досягнень від лабораторних до пілотних та промислових масштабів потребує моделювання експериментальних даних. Мета науковців-дослідників у двадцять першому столітті - стимулювати розвиток традиційних процесів екстракції ефірних олій, які підвищують вихід і якість летких олій для ароматерапії та фармацевтичного застосування. З іншого боку, інноваційні підходи, включаючи мікрохвильову, ультразвукову, омичну екстракцію та екстракцію за допомогою сонячної енергії, можна поєднувати з традиційними методами екстракції для ефективного виробництва ефірних олій. Подальші дослідження необхідні для пошуку ефірних олій з новими біологічними властивостями або функціональними можливостями.

Обговорення результатів експериментальних досліджень. Експериментальне моделювання проводилось на стенді (рис. 1)

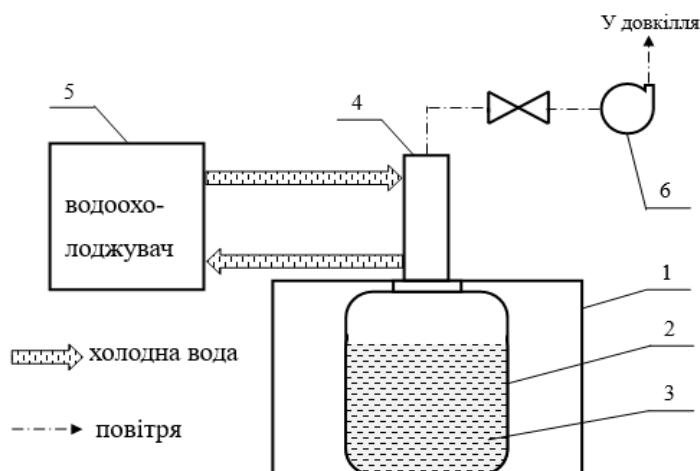


Рис 1 – Схема експериментального стенду

В основі стенду резонаторна камера 1, в якій розташовано радіо прозора ємність 2 із сировиною 3. Паровий простір ємності 2 виходить до зворотного холодильнику 4, в якому циркулює холодна вода із водоохолоджувача 5. Вакуум у системі забезпечується вакуум-насосом 6 та контролюється манометром. Відбір проб із екстракту 3 проводиться спеціальним пристроєм через 5...10 хвилин. Концентрація екстракту визначається рефрактометром HI 96801 HANNA INSTRUMENTS та за даними оптичної щільності по Carl Zeiss Jena spectrophotometer SPEKOL. Потужність електромагнітного поля регулюється, витрати електричної енергії контролюються енергоміром Feron TM55. Температура екстракту визначається дистанційно тепловізором FLIR TG167.

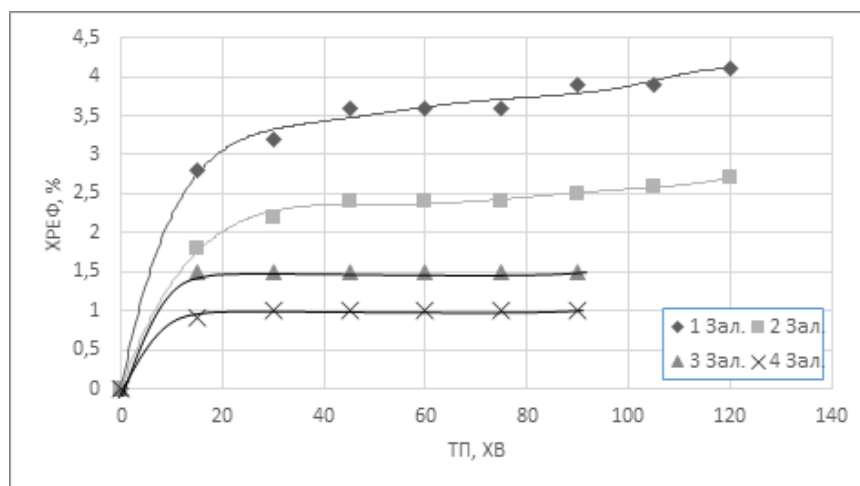
Проведено дослідження кінетики екстрагування квітів лаванди на об'ємному вакуумному мікрохвильовому екстракторі (рис.1). Визначена кінетики виснаження сировини для ряду заливів за режимами (табл.3).

Таблиця 3

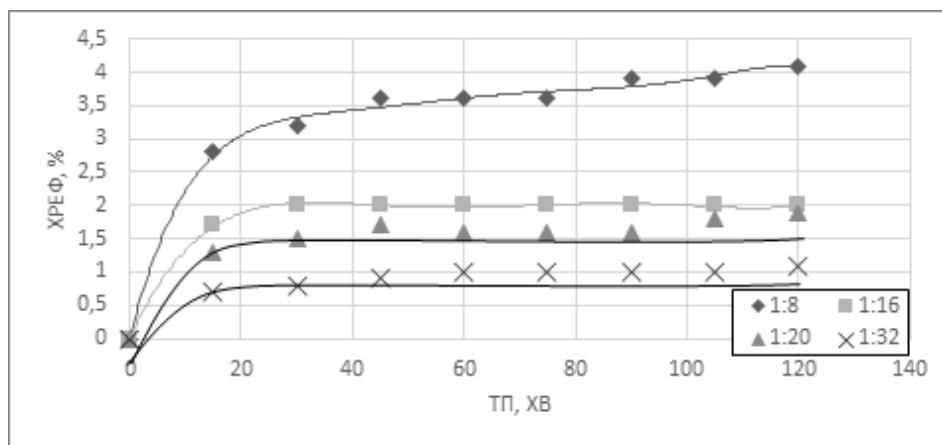
Режим дослідів із кінетики виснаження квітів лаванди

Маса квітів, Мс, г	Маса води, Ме, г	Тиск Р, кПа	Температура, t, C°	Час, τ, хв	Потужність, N, Вт	Гідромодуль, n
80	640	100	98 - 100	120	630	1:8

Результати дослідів представлено на рис. 2.

**Рис. 2 – Кінетика виснаження квітів лаванди**

Друга серія дослідів мала завдання визначити вплив гідромодулю на кінетики екстрагування. Досліджувались гідромодулі: «1:8», «1:16», «1:20», «1:32». Всі інші параметрами не відрізнялися від даних (табл.3).

**Рис. 3 – Вплив гідромодулю на кінетику екстрагування квітів лаванди**

Наступна серія дослідів проведена на різних зразках гісопу (табл.4). Маса сировини складала 150 г, а маса екстрагенту (води) – 1200г. Потужність, тиск та температура підтримувалась як у табл.3.

Таблиця 4

Характеристика об'єктів досліджень, гісопу марки Маркіз

Варіант	Характеристика	Хк, °brix
1	Синій, (Біочар + Граундфікс)	1,35
2	Синій, (Біочар)	1,6
3	Синій, (Граундфікс)	1,3
4	Синій, контроль	1,5
5	Рожевий, (Біочар + Граундфікс)	1,4
6	Рожевий, (Біочар)	1,56
7	Рожевий, (Граундфікс)	1,5
8	Рожевий, контроль	1,7
9	Білий, (Біочар + Граундфікс)	1,55

Результати досліджень кінетичних залежностей наведено на рис. 4.

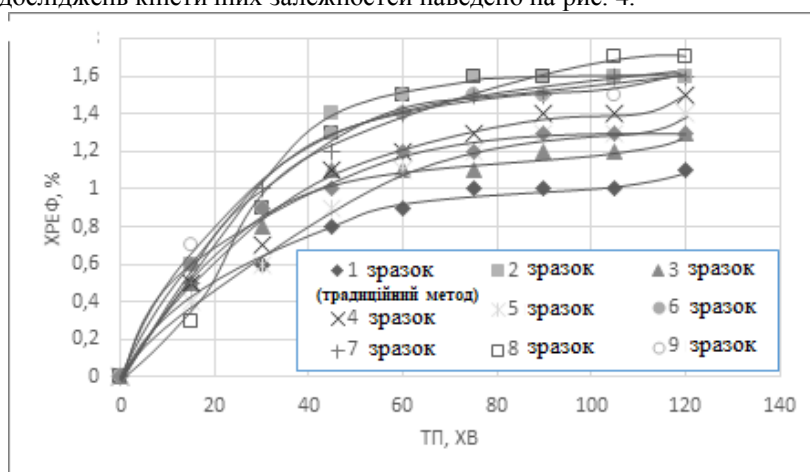


Рис. 4 – Дослідження кінетики екстрагування гісопу

Значення кінцевих концентрацій (Хк) зразків після екстрагування на протязі 120 хвилин наведено в табл. 4. Добре впливає на інтенсивність масоперенесення Біочар. Так, у всіх зразках наявність Біочару позитивно впливало на значення Хк, (рис.4). Вплив електромагнітного поля визначено на зразку №1. Нижня крива на рис.4 ілюструє кінетику екстрагування за традиційною технологією. Видно, що інтенсивність процесу екстрагування в електромагнітному полі зростає у 1,5 разів.

За об'ємом виконаних експериментальних досліджень зроблено наступні висновки.

Висновки. При екстрагуванні з квітів лаванди основний час масоперенесення триває 30...40 хвилин при першому циклі, та 20 хвилин при наступних циклах повторного екстрагування (рис.2). При цьому, циклічне екстрагування вилучає більше цільових компонентів, ніж одноразове. Визначено вплив гідромодуля на інтенсивність масоперенесення (рис.3), що характеризує науково-технічне протиріччя між факторами підвищення значення рушійної сили та концентрацією екстракту. Отримані результати (рис.2, 3) є базою для організації енергоефективних режимів екстрагування із квітів лаванди.

Визначено експериментальним шляхом, що схема обробки зразків гісопу сорту «Маркіз» суттєво впливають на кінетику екстрагування (рис.4). Концентрація екстрактів відрізняється у 1,5 разів. Для рекомендації доцільних режимів екстрагування потрібні комплексні дослідження по виходу із екстрактів безпосередньо ефірних олій.

References

1. Trade statistics for international business development monthly, quarterly and yearly trade data. Import & export values, volumes, growth rates, market shares, etc (n.d.) Retrieved from: <http://www.trademap.org/>
2. Naima Sahraoui, Chahrazed Bouteckedjiret. (2023). Innovative methods for extraction of essential oils from medicinal plants *International Journal of Secondary Metabolite* 10(2), 190-230, DOI:10.21448/ijsm.1121860.
3. Naima Sahraoui, Chahrazed Bouteckedjiret. (2015). Innovative Process of Essential Oil Extraction: Steam Distillation Assisted by Microwave, *Progress in Clean Energy*, 1, 831-841 DOI:10.1007/978-3-319-16709-1_61.
4. Yuyu Zheng, Ruixiang Liu, Xiaohui Hou, Hanyu Wu, Dengke Yin, Ye Yang. (2023). Structural and physicochemical properties of microwave-processing pregelatinized maize starch, and its influence on drug release from tablets. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 84, 104452 DOI:10.1016/j.jddst.2023.104452
5. Fatiha Brahmi, Inmaculada Mateos-Aparicio, Khokha Mouhoubi, Sara Guemouni, Tassadit Sahki, Farid

- Dahmoune, Ferroudja Belmehdi, Chafiaa Bessai, Khodir Madani, Lila Boulekbache-Makhlouf (2023). Kinetic Modeling of Convective and Microwave Drying of Potat Peels and Their Effects on Antioxidant Content and Capacity. *Antioxidants*, 12, 638. DOI:10.3390/antiox12030638.
6. Ana Álvarez, Sara Terreros, María J. Cocero and Rafael B. Mato. (2021). Microwave Pretreatment for the Extraction of Anthocyanins from Saffron Flowers: Assessment of Product Quality, *Antioxidants*, 10, 1054. DOI:10.3390/antiox10071054.
 7. Alice Angoy, Christian Ginies, Pascale Goupy, Isabelle Bornard, Pascal Ginisty, Alain Sommier, Marc Valat, Farid Chemat (2020). Development of a green innovative semi-industrial scale pilot combined microwave heating and centrifugal force to extract essential oils and phenolic compounds from orange peels *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 61, 102338.
 8. Abdul Hameed, Abid Aslam Maan, Akmal Nazir, Usman Amin, Muhammad Kashif Iqbal Khan, Muhammad Usman Khan, Mohammad Ali Shariati, Maksim Rebezov, José M. Lorenzo. (2023). Microwave - Vacuum Extraction Technique as a Green and Clean Label Technology: Kinetics, Efficiency Analysis, and Effect on Bioactive Compounds *Food Analytical Methods*, 16, 525–540 DOI:10.1007/s12161-022-02437-6
 9. Burdo O.G., Trishyn F.A., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V. (2021). Electrodynamics Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 57 (3), 330-344 <https://doi.org/10.3103/s1068375521030030>.
 10. Burdo O.G., Levitsky A.P., Trishyn F.A., Terziev S.G., Sirotyuk I.V., Burdo A.K., Lapinska A.P., Molchanov M.Yu. (2023). Electrodynamics Technologies in the Eco-industry of Food and Pharmaceutical Production *Problemele Energeticii Regionale* 2 (58) DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-11>.
 11. Burdo O. G. (2021). Role of Food Energy Technologies in Solving Global Mankind Problems *Problemele Energeticii Regionale*, 3 (51) DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.09>.
 12. Burdo O.G., Zykov A. V., Terziev S. G., Ruzhitskaya N.V. (2016). Nanotechnological Innovation in Food Industry *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 6 (3), 144-150.
 13. Burdo O., Bezbakh I., Zykov A., Terziev S., Gavrilov A., Sirotyuk I., Mazurenko I., Yunbo Li. (2020). Development of power-efficient and environmentally safe coffee product technologies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 11(103), 6-14.
 14. Burdo O. G., Bandura V. N., & Levtrinskaya Y. O. (2018). Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(2), 210-218.
 15. Burdo O.G., Sirotyuk I.V., Alhury U., Levtrinska J.O. (2016). Microwave Energy as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polyextract Formation *Problemele Energeticii Regionale*, 1 (36) DOI:10.5281/zenodo.1217259
 16. Nahofood: Tekhnolohii adresnoi dostavky enerhii i nanoenerhotekhnolohii Retrieved at <http://nanofood.com.ua>

EXPERIMENTAL SIMULATION OF ESSENTIAL OIL EXTRACTION PROCESSES IN MICROWAVE FIELD

Kovalenko O.O. ², SciD, Associate Professor, Slavinsky R.L. ¹, graduate student, Fedosov Y. S., graduate student, Slavinska V.O. ¹, engineer, Al-Hamad I.M. ¹, graduate student

¹ Odessa National Technological University, Odesa, Ukraine

² Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The growth trends of the global market of essential oils and the demand for natural substances are the drivers of the spread of the use of essential oils in various sectors of the national economy. There are many methods of obtaining essential oils, the article describes and compares traditional and innovative methods that slow down the risk of losing the main thermolabile components of plant raw materials, preserve quality, reduce the extraction time, act environmentally safe and increase the percentage of essential oils yield.

Due to the fact that traditional methods of obtaining essential oils have many disadvantages, the main one of which is the thermal stability of essential oils at high temperatures, there is a need for innovative methods that will reduce the influence of these factors.

The article presents experimental data of experiments on different samples of lavender flowers and hyssop of the "Marquis" variety. An experimental stand for extracting essential oil from lavender and hyssop using an innovative method — microwave steam distillation — is illustrated.

This process is a combination of traditional technologies, namely, steam distillation and innovative technology, microwave heating. Microwave heating helped initiate and create mass and heat transfer from within the plant matrices to the outside, resulting in a significant reduction in extraction time, with influence of mechano-diffusion. Based on the analysis of the methods and on the basis of experimental data, we conclude that electrodynamics systems have significant prospects for widespread use. Therefore, the task is to involve them in the processes of obtaining extracts of essential oils. The extraction kinetics and the influence of the hydromodule on the extraction process were studied.

Cyclic extraction was found to extract more target components than single extraction.

The influence of the hydromodule on the intensity of mass transfer characterizes the scientific and technical contradiction between the factors of increasing the value of the driving force and the concentration of the extract. The influence of the processing scheme on the intensity of mass transfer was considered using the example of "Marquis" type hyssop. The obtained results are the basis for the organization of energy-efficient modes of extraction from lavender and hyssop flowers.

Keywords: microwave steam distillation, extracting essential oil from lavender and hyssop, innovative methods

Список використаної літератури

1. <http://www.trademap.org/> - сайт «Trade statistics for international business development monthly, quarterly and yearly trade data. Import & export values, volumes, growth rates, market shares, etc.»
2. Naima Sahraoui, Chahrazed Boutekedjiret. 2023. Innovative methods for extraction of essential oils from medicinal plants International Journal of Secondary Metabolite 10(2):190-230, June 2023. DOI:10.21448/ijsm.1121860.
3. Naima Sahraoui, Chahrazed Boutekedjiret. Innovative Process of Essential Oil Extraction: Steam Distillation Assisted by Microwave, Progress in Clean Energy 2015., Volume 1 (pp.831-841), August. DOI:10.1007/978-3-319-16709-1_61.
4. Yuyu Zheng, Ruixiang Liu, Xiaohui Hou, Hanyu Wu, Dengke Yin, Ye Yang. Structural and physico chemical properties of microwave-processing pregelatinized maize starch, and its influence on drug release from tablets// Journal of Drug Delivery Science and Technology 2023., Volume 84, June, 104452 DOI:10.1016/j.jddst.2023.104452
5. Fatiha Brahmi,, Inmaculada Mateos-Aparicio, Khokha Mouhoubi, Sara Guemouni, Tassadit Sahki, Farid Dahmoune, Ferroudja Belmehdi, Chafiaa Bessai, Khodir Madani, Lila Boulekbache-Makhlouf Kinetic Modeling of Convective and Microwave Drying of Potat Peels and Their Effects on Antioxidant Content and Capacity // Antioxidants, 2023., 12, 638. DOI:10.3390/antiox12030638.
6. Ana Álvarez, Sara Terreros, María J. Cocero and Rafael B. Mato. Microwave Pretreatment for the Extraction of Anthocyanins from Saffron Flowers: Assessment of Product Quality // Antioxidants 2021., 10, 1054. DOI:10.3390/antiox10071054.
7. Alice Angoy, Christian Ginies, Pascale Goupy, Isabelle Bornard, Pascal Ginisty, Alain Sommier, Marc Valat, Farid Chemat. Development of a green innovative semi-industrial scale pilot combined microwave heating and centrifugal force to extract essential oils and phenolic compounds from orange peels // Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2020., 61.102338.
8. Abdul Hameed, Abid Aslam Maan, Akmal Nazir, Usman Amin, Muhammad Kashif Iqbal Khan, Muhammad Usman Khan, Mohammad Ali Shariati, Maksim Rebezov, José M. Lorenzo. (2023). Microwave - Vacuum Extraction Technique as a Green and Clean Label Technology: Kinetics, Efficiency Analysis, and Effect on Bioactive Compounds // Food Analytical Methods 16:525–540 DOI:10.1007/s12161-022-02437-6
9. О.Г. Бурдо, Ф.А. Трішин, С.Г. Терзієв, А.В. Гаврилов, І.В. Сиротюк (2021). Електродинамічні процеси як ефективне вирішення проблем харчової промисловості // Surface Engineering and Applied Electrochemistry 57 (3), 330-344 <https://doi.org/10.3103/s1068375521030030>.
10. Бурдо О.Г., Левицький А.П., Трішин Ф.А., Терзієв С.Г., Сиротюк І.В., Бурдо А.К., Лапінська А.П., Молчанов М.Ю. (2023). Електродинамічні технології в еко-індустрії харчової та фармацевтичної промисловості // Problemele Energeticii Regionale 2 (58) DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-11>.
11. Бурдо О.Г. (2021). Роль харчових енергетичних технологій у вирішенні глобальних проблем людства // Problemele Energeticii Regionale 3 (51) DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.09>.
12. Нанотехнологічні інновації в харчовій промисловості [Текст] / О.Г. Бурдо, А. В. Зиков, С.Г. Терзієв, Н.В. Ружицька (2016). International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). Vol. 6 - Issue 3 - P. 144-150.
13. О. Бурдо, І. Безбах, А. Зиков, С. Терзієв, А. Гаврилов, І. Сиротюк, І. Мазуренко, Юнбо Лі. Розробка енергоефективних та екологічно безпечних технологій харчових продуктів. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020., 11(103), 6-14.
14. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2018., No. 2 Vol. 54. P. 210-218.
15. Бурдо О.Г., Сиротюк І.В., Альгурі У., Левтринська Ю.О.. Мікрохвильова енергія як фактор інтенсифікації тепло масообміну та утворення полі екстракту // Problemele Energeticii Regionale, 2016. 1 (36) DOI:10.5281/zenodo.1217259
16. <http://nanofood.com.ua> – сайт Технології адресної доставки енергії і наноенерготехнології.

Отримано в редакцію 17.06.2023

Прийнято до друку 27.11.2023

Received 17.06.2023

Approved 27.11.2023

ОДЕРЖАННЯ РОСЛИННИХ ОЛІЙ МОДИФІКОВАНОГО СКЛАДУ

Бурдо О.Г., д.т.н., професор, Ружицька Н.В., к.т.н, асистент, Левицький А.П., д.б.н, професор, Лапінська А.П., к.т.н., доцент, Запорожець Д.О., аспірант, Гуліваті В.Г., магістр
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. В даній роботі розглядаються шляхи одержання олій контрольованого складу для харчової, парфумерно-косметичної та фармацевтичної промисловості. Бажаний склад олій залежить від галузі їхнього застосування, так в якості дієтичних добавок перевага надається оліям з високим вмістом поліненасичених жирних кислот, вітамінів та антиоксидантів, особливо сквалену. В той час для олій які використовуються для смаження та піддаються термічній обробці, вміст ПНЖК та інших сполук, які мають багато подвійних зв'язків, рекомендується зменшувати.

Пропонується модифікація складу природних рослинних олій із застосуванням низькотемпературних технологій фракціонування, та мікрохвильового екстрагування. Проаналізовано жирнокислотний склад об'єктів дослідження – амарантової та соняшникової олії. Припускається що низькотемпературна кристалізація окремих фракцій амарантової олії дозволить одержати продукти з підвищеним вмістом сквалену, без суттєвого впливу на окиснення ненасичених жирних кислот. Також припускається, що технології адресної доставки енергії дозволять збільшити вихід олії з відходів олійного виробництва.

Шляхом низькотемпературного фракціонування одержано зразки олії амаранту різного жирнокислотного складу, а також продукти з підвищеним вмістом сквалену. Одержано хроматограми жирнокислотного складу одержаних продуктів.

В результаті екстрагування соняшникової макухи із реалізацією принципів адресної доставки енергії до мікроструктур сировини у періодичному мікрохвильовому та об'ємно вакуумному екстракторах, одержано зразки олії непридатного для соняшника жирнокислотного складу.

Ключові слова: сквален, фракціонування олій, кристалізація, адресна доставка енергії, мікрохвильове екстрагування

Вступ. У харчових, фармацевтичних та парфумерно-косметичних виробництвах постійно виникає потреба в оліях певних фізичних властивостей та жирнокислотного складу [1]. Це можуть бути як тверді масла з підвищеним вмістом насичених кислот (жири для смаження, замінники масла-какао, жири для виробництва кондитерських глазурей, кремів), так і рідкі олії з підвищеною біологічною цінністю – джерела полі ненасичених жирних кислот, вітаміну Е, сквалену.

Традиційні шляхи одержання олій та жирів заданого складу: переестерифікація, гідрування, фракціонування. Переестерифікація та гідрування використовуються у виробництві маргаринів, кондитерських жирів, замінників какао-масла. Такі технології передбачають хімічну модифікацію тригліцеридів жирних кислот, внаслідок чого утворюється певний відсоток шкідливих для здоров'я людини транс-ізомерів [1].

Фракціонування – технологія, яка не передбачає хімічних перетворень жирів, відбувається за температур, трохи вищих за температуру плавлення складових вихідної сировини. На сьогоднішній день фракціонування широко використовується у переробці пальмової олії [1].

Крім того, для одержання олій заданого жирнокислотного складу використовують методи генетики та селекції – виведення сортів олійних культур з підвищеним, або зниженим вмістом цільових жирних кислот та інших компонентів. Саме з виведених в результаті селекції сортів соняшника одержують олію з високим вмістом олеїнової кислоти [2].

Ще одним шляхом одержання олій заданого жирнокислотного складу може бути відповідна організація процесу екстрагування, за якої у екстракт переходить більше (або менше) цільового компонента. Таким чином модифікація складу олії відбувається одночасно з її вилученням.

Об'єкти досліджень та обладнання. Досліджувались зразки олії амаранту, одержаної холодним пресуванням, ацетонові екстракти олії амаранту, макуха соняшника, спиртові екстракти олії соняшника. Низькотемпературне фракціонування олій та екстрактів проводилось у холодильних камерах та кріоконцентраторі. Екстрагування олії з макухи соняшника проводилось у мікрохвильовій камері та мікрохвильовому об'ємно-вакуумному екстракторі.

Одержання високоскваленової олії амаранту. Сквален – тритерпен, що містить шість подвійних зв'язків і міститься у неомілюваній фракції олії [3]. Сквален є обов'язковою складовою шкіри людини, приймає участь у біосинтезі холестерину у вітавін D, а також є антиоксидантом, має протипухлинну та онкопротекторну дію, підвищує стійкість організму до різномісних вірусів, бактеріальних і грибкових інфекцій та впливу йонізуючого випромінювання [4]. Перелік основних джерел сквалену наведено у табл. 1 [3].

Таблиця 1

Порівняння природних джерел сквалену

Джерело	Вміст сквалену
Оливкова олія	0,5 %
Олії фундука та арахісу	0,03%
Олія печінки акули	40...86 %
Дистиляти після дезодорації оливкової олії	10...30 %
Дистиляти після дезодорації соєвої олії	1,8...3,5 %
Дистиляти після дезодорації жирних кислот пальмової олії	0,2...1,3 %
Олія амаранту	3...10 %

Від добування сквалену з печінки акул відмовляються внаслідок загрози зникнення відповідних видів [3]. З етичних та екологічних міркувань рослинним джерелам сквалену надається перевага. Олія амаранту є найбагатшим відомим рослинним джерелом сквалену.

Для одержання олії амаранту з підвищеним вмістом сквалену пропонується застосувати низькотемпературне фракціонування. Внаслідок різниці температур кристалізації тригліцеридів різного жирнокислотного складу, можливе розділення олії на фракції. Такий процес потребує використання спеціального холодильного обладнання.

В рамках досліджень було проведено фракціонування олії амаранту у двох температурних режимах: -13°C та $+2^{\circ}\text{C}$. Значення температур зумовлені характеристиками обладнання. Олію амаранту нерафіновану першого холодного пресування перед фракціонуванням змішували з ацетоном у співвідношенні 1:1, оскільки використання розчинника значно інтенсифікує процес кристалізації, та дозволяє отримувати фракції з більш вузьким діапазоном характеристик [5]. Схему фракціонування наведено на рис. 1. Вміст жирних кислот вказано у відношенні до кількості триацилгліцеридів, вміст сквалену – у відношенні до всіх сухих речовин продукту.

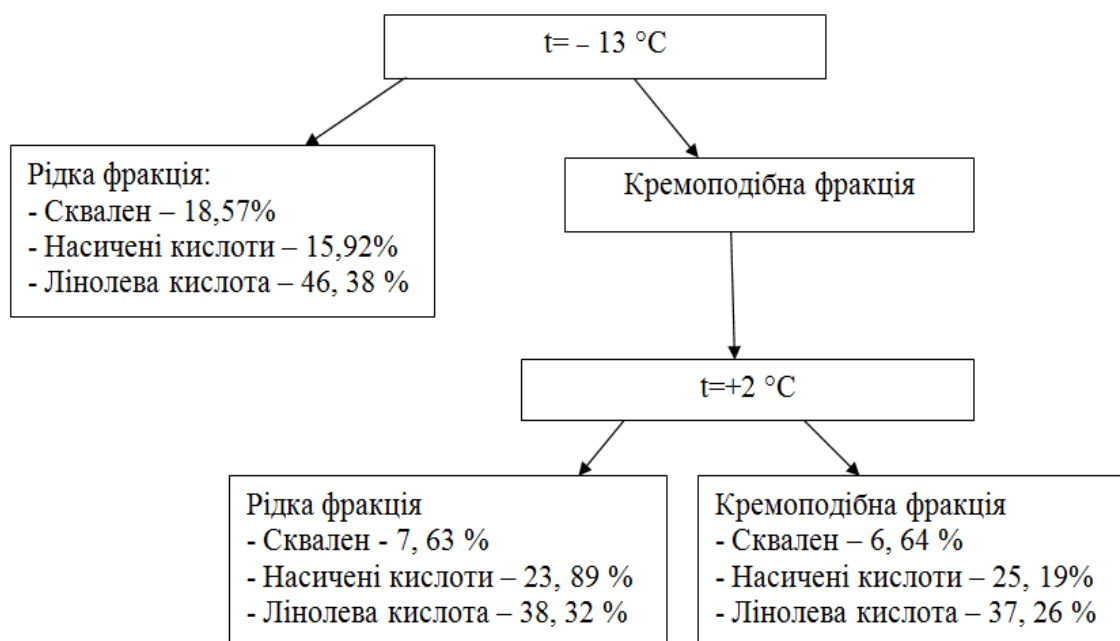


Рис. 1 – Схема низькотемпературного фракціонування олії амаранту

Температура плавлення сквалену - -75°C [6], лінолевої кислоти $-12...-6,9^{\circ}$ [7-8], ліноленової - $-16,5...-11^{\circ}$ [9-10]. Варто зазначити, що жирні кислоти знаходяться в олії у складі тригліцеридів, тому температури плавлення олій та окремих фракцій відрізняються від температур плавлення окремих жирних кислот. Таким чином, для визначення температури кристалізації цільової фракції необхідне подальше експериментальне моделювання.

В результаті фракціонування одержано три продукти з різним жирнокислотним складом та вмістом сквалену. Сквален зосереджується у легкоплавкій фракції, разом із лінолевою кислотою. Склад легкоплавкої фракції, яка залишається у рідкому стані при -13°C наведено на рис. 2.

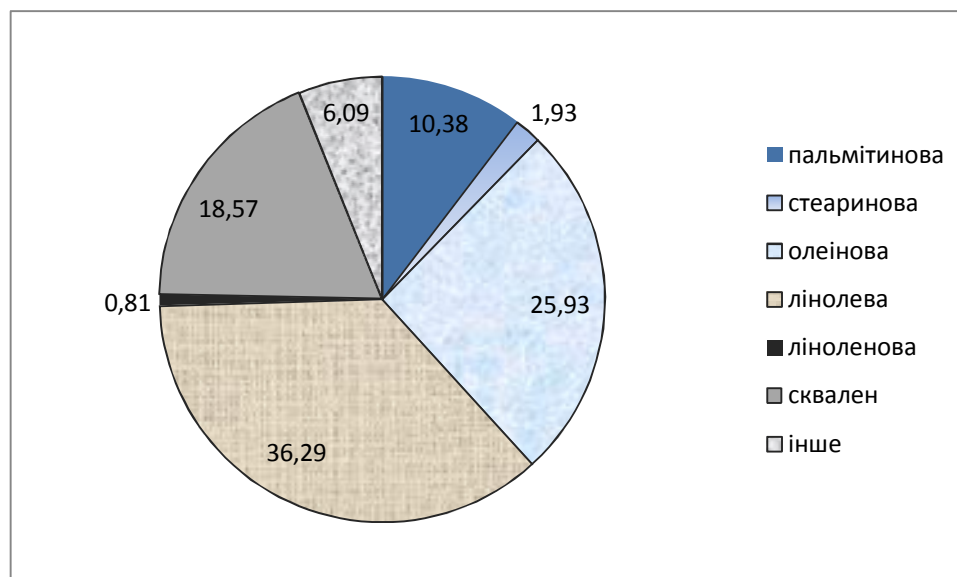


Рис. 2 – Склад легкоплавкої фракції олії амаранту.

Встановлено, що у легкоплавкій фракції частка сквалену значно перевищує його частку в природній олії. Також одержаний продукт характеризується відносно високим вмістом олеїнової та лінолевої кислот. Одержано продукт, вміст сквалену в якому перевищує 18 %.

Хроматограму високоскваленової олії амаранту наведено на рис. 3.

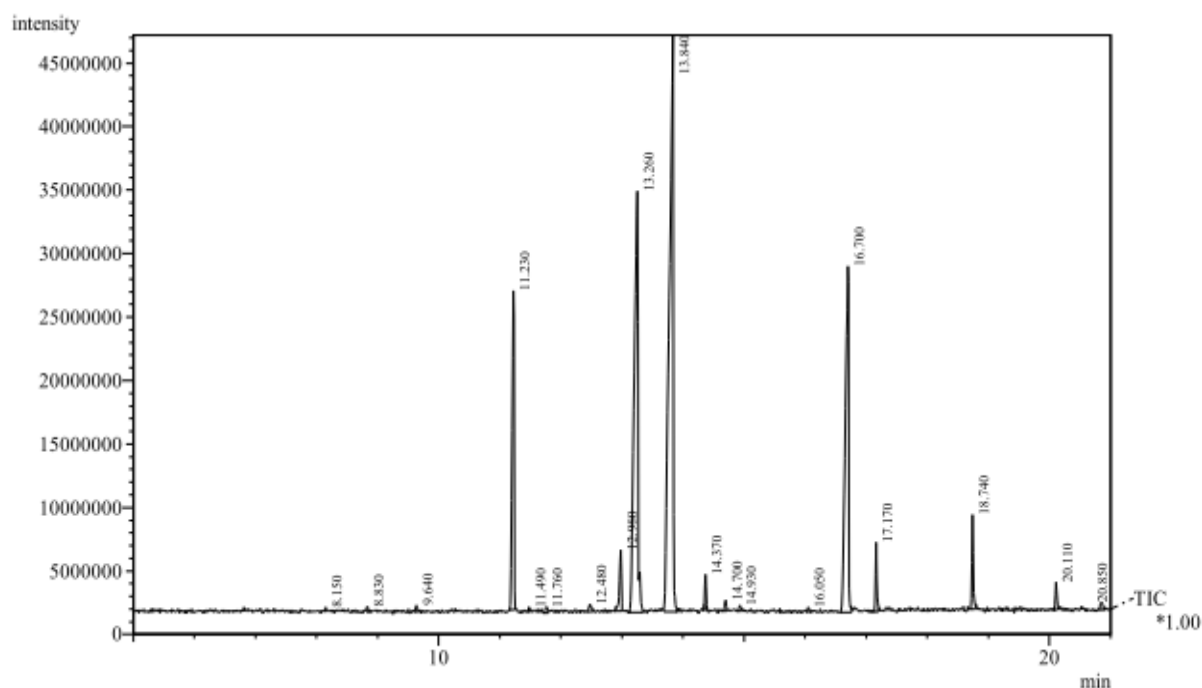


Рис. 3 – Хроматограма легкоплавкої фракції олії амаранту

Для подальшого концентрування сквалену в олійних продуктах пропонується проводити фракціонування за температур, нижчих за -13°C .

Одержання високопальмітинової соняшникової олії. Досліди проводились з макухою соняшника, одержаною після пресування. В якості екстрагента використано спирт етиловий – екологічно безпечний, відновлюваний екстрагент. Розчинність олій в етанолі обмежена, крім того, разом з жиророзчинними сполуками, у екстракт потрапляють спироторозчинні компоненти, пігменти. Колір екстракту більш темний. Після охолодження частина вилучених ліпідів переходить у стан емульсії, і може бути відокремлена осадженням.

Жирнокислотний склад соняшникової олії, одержаної з макухи шляхом екстрагування в умовах адресної доставки енергії наведено на рис. 4

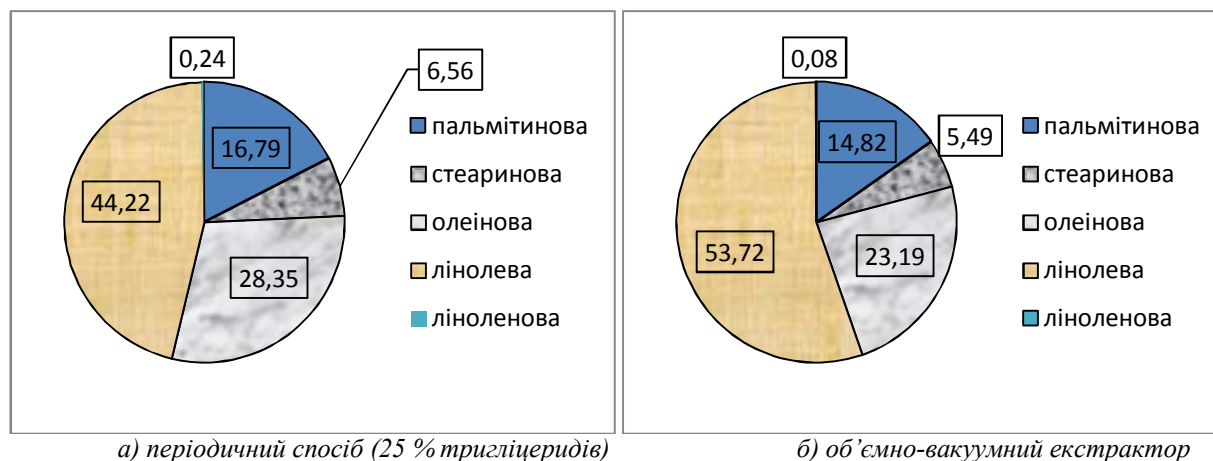


Рис. 4 – Склад соняшникової олії, одержаної з макухи соняшника

Зразки олій було отримано за двома технологіями. Перша технологія передбачала періодичне ступінчасте екстрагування за атмосферного тиску у мікрохвильовій камері до виснаження твердої фази. Після відгонки екстрагенту в одержаному продукті вміст тригліцеридів складав 25%, що вказує на вилучення спиртом восків та інших сполук. В той же час у складі одержаної олії відмічено непритаманний соняшниковій олії вміст пальмітинової кислоти. За жирнокислотним складом одержаний продукт наближається до олії амаранту.

Другий зразок було одержано у експериментальному об'ємно-вакуумному екстракторі, в якому реалізується принцип адресної доставки енергії до капілярних структур сировини. Вміст тигліцеридів у одержаному продукті складав близько 40 %, що вказує на більшу ефективність застосування адресної доставки енергії у поєднанні з вакуумом. Проте одержаний екстракт також потребує відокремлення восків та інших сполук, які вилучає етанол.

Розглянута технологія дозволяє також знизити температуру процесу, та зменшити окиснення жирних кислот. В одержаному продукті також встановлено підвищений вміст пальмітинової кислоти, непритаманний для соняшника. Для соняшникової олії притаманний вміст пальмітинової кислоти в межах 2,5...7 % [11], в той час як у одержаних зразках її вміст складав 14...16,7 %. Вміст пальмітинової кислоти змінюється в залежності від режиму обробки макухи. Так олія, вилучена за періодичним способом при температурі кипіння екстрагенту містить більший відсоток пальмітинової кислоти, ніж одержана у об'ємно вакуумному екстракторі.

Пальмітинова олія є насиченою, тому не має високої біологічної цінності, проте внаслідок відсутності подвійних зв'язків менше окислюється при зберіганні та термічній обробці, тому в оліях для смаження доцільно збільшувати її вміст, та зменшувати вміст лінолевої кислоти.

Припускається, що внаслідок адресної доставки енергії до капілярних структур макухи соняшника, та руйнування капілярів внаслідок механодифузії, в екстракт переходять ліпіди, які при традиційних технологіях екстрагування не вивільняються з клітин та капілярів. Причому, режим мікрохвильової обробки впливає на склад екстракту.

Висновки. Таким чином для одержання олій з підвищеним вмістом біологічно активних речовин, таких як сквален пропонується застосування кріотехнологій, а саме низькотемпературного фракціонування, яке дозволяє регулювати вміст таких складових, як сквален, у кінцевому продукті.

Організація адресної доставки енергії до капілярних структур олійної сировини дозволяє вилучити більшу кількість ліпідів, ніж традиційні технології, та дозволяє отримати олії з модифікованим жирнокислотним складом.

Обидва способи передбачають протікання процесів за низьких температур (температури кристалізації олій при фракціонуванні, та температури до 40...50 °C при вакуумному екстрагуванні), що дозволяє уникнути суттєвих хімічних перетворень тригліцеридів та знижує степінь окиснення ненасичених жирних кислот.

References

1. Radziievska I.H., Melnyk O.P., Halenko O.O. (2018). Tekhnolohiia dvostadiinoho fraktsionuvannia palmovoi olii dlia vyrobnytstva zaminnykiv kakao-masla [Technology of two-stage fractionation of palm oil for the production of substitutes for cocoa butter] *Nauka innov.*, 14(1), 40—49
2. Ocheretna A.V., Frolova N.E. (2020). Prospects of use of high-oled sunflower oils in functional food products *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University". Series: Technical Sciences*, 31 (70),2, (2), 129 – 135.

3. Nasirpour-Tabrizi, P., Azadmard-Damirchi, S., Hesari, J., & Piravi-Vanak, Z. (2020). Amaranth Seed Oil Composition. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.91381 (Nasirpour-Tabrizi P, Azadmard-Damirchi S, Hesari J, Piravi-Vanak Z. Amaranth Seed Oil Composition [Internet]. Nutritional Value of Amaranth. IntechOpen. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.91381>)
4. Kishchenko V.A., Levchuk I.V., Oseiko M.I., Holubets O.V., Lytvynenko O.A. (2013). Vyznachennia skvalenu – unikalnoho fitosterynu lipidiv metodom hazoridynnoi khromatohrafii [Determination of squalene - a unique phytosterol of lipids by gas-liquid chromatography], Visnyk NTU «KhPI», (985), 138 – 142
5. Petik P. F., Demydov I. M., Papchenko V. Yu., Kuznetsova L. M. (2013). Doslidzhennia vplyvu kilkosti etanolu na temperaturu plavlennia otrymanykh fraksii palmovoi olii [Study of the influence of the amount of ethanol on the melting point of the obtained fractions of palm oil], *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 3(6). 33-35
6. Bradley, Jean-Claude; Lang, Andrew; Williams, Antony (2014). Jean-Claude Bradley Double Plus Good (Highly Curated and Validated) Melting Point Dataset. figshare. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1031638.v1>
7. William M. Haynes (2016). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (97th ed.). Boca Raton: CRC Press., 3–338.
8. Record of CAS RN 60-33-3 in the GESTIS Substance Database of the Institute for Occupational Safety and Health Available at <https://gestis.dguv.de/data?name=014230&lang=en>
9. National Center for Biotechnology Information (2023). PubChem Compound Summary for CID 5280934, Linolenic Acid. Retrieved November 28, 2023 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Linolenic-Acid>.
10. National Center for Biotechnology Information (2023). PubChem Compound Summary for CID 5280934, Linolenic Acid. Retrieved November 28, 2023 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Linolenic-Acid>.
11. Kristina O. Belinska Research of the chemical composition of boney oil and development of buckets based on it *Journal of Chemistry and Technologies*, 2021, 29(1), 65-76

OBTAINING VEGETABLE OILS OF MODIFIED COMPOSITION

Burdo O.G., SciD, professor, Ruzhytska N.V., PhD, Levytskyi A.P., SciD, professor, Lapinska A.P., PhD, docent, Zaporozhets D.O., graduate student, Hulivati V.G., student
Odessa National Technological University, Odessa, Ukraine

Abstract. In current paper the ways of obtaining oils of controlled composition for the food, perfumery, cosmetic and pharmaceutical industries are considered. The suitable composition of oils depends on the field of their application, for example for dietary supplements, preference is given to oils with a high content of polyunsaturated fatty acids, vitamins and antioxidants, especially squalene. Meanwhile, for oils used for frying and other heat treatment, the content of PUFAs and other compounds with many double bonds is recommended to be reduced.

It is proposed to modify the composition of natural vegetable oils using low-temperature fractionation technologies and microwave extraction. The fatty acid compositions of the research objects - amaranth and sunflower oils were analyzed. It is assumed that low-temperature crystallization of certain fractions of amaranth oil will allow to obtain products with an increased content of squalene, without a significant effect on the oxidation of unsaturated fatty acids. It is also assumed that targeted energy delivery technologies will allow to increase the output of oil from oil production waste.

By means of low-temperature fractionation, samples of amaranth oil with different fatty acid composition, as well as products with an increased content of squalene, were obtained. The chromatograms of the fatty acid composition of the obtained products were obtained.

As a result of the extraction of sunflower cake with the implementation of the principles of targeted delivery of energy to the microstructures of raw materials in periodic microwave and volumetric vacuum extractors, samples of oil with a fatty acid composition unusual for sunflower were obtained.

Key words: squalene, oil fractionation, crystallization, targeted energy delivery, microwave extraction

Список використаної літератури

1. Радзівєвська І. Г., Мельник О. П., Галенко О. О. Технологія двостадійного фракціонування пальмової олії для виробництва заміників какао-масла // Наука та інновації . 2018., вип. 1 Т. 14. С. 40-49.
2. Очеретна А. В., Фролова Н. Е. Перспективи використання високо олійних сортів олії соняшника у продуктах функціональної дії для оздоровчого харчування // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2020., вип. 2 Т. 31. С. 129-135.

3. Nutritional Value of Amaranth / Nasirpour-tabrizi P. et al. . London: IntechOpen, 2020. 176 p.
4. Визначення сквалєну – унікального фітостерину ліпідів методом газорідинної хроматографії / Кіщенко В. А. та ін. // Вісник НТУ "ХПІ". 2013. № 11. С. 138-142.
5. Петик П. Ф. Дослідження впливу кількості етанолу на температуру плавлення отриманих фракцій пальмової олії / П. Ф. Петик, И. М. Демидов, В. Ю. Папченко, Л. М. Кузнецова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2013. - № 3(6). - С. 33-35. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpt_2013_3_6_10.
6. Melting Point Dataset: [Веб-сайт]. 2014. URL: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1031638.v1> (дата звернення: 01.06.2023).
7. Haynes W. M. Handbook of Chemistry and Physics . Boca Raton: CRC Press, 2016. 338 p.
8. Record of CAS RN 60-33-3 in the GESTIS Substance Database of the Institute for Occupational Safety and Health Available at <https://gestis.dguv.de/data?name=014230&lang=en>
9. National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 5280934, Linolenic Acid. Retrieved November 28, 2023 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Linolenic-Acid>.
10. National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 5280934, Linolenic Acid. Retrieved November 28, 2023 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Linolenic-Acid>.
11. Belinska K. O. Research of the chemical composition of boney oil and development of buckets based on it // Journal of Chemistry and Technologies. 2021., No. 1 Vol. 29. P. 65-76.

Отримано в редакцію 29.06.2023
Прийнято до друку 28.11.2023

Received 29.06.2023
Approved 28.11.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ РЕОЛОГІЧНОЇ СИРОВИНИ В ІЧ ПОЛІ

Кравченко О.Ю., аспірант, Терзієв С.Г., д.т.н., доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Харчові виробництва досить часто характеризуються наявністю відходів харчової сировини, частка яких може досягати 2/3 загального об'єму початкової сировини. Зазвичай цінність таких відходів достатньо висока, тому питання про їх утилізацію із дотриманням принципів ресурсо- та енергоефективності є досить актуальним. Запропоновано залучити технології зневоднення для отримання з харчових відходів нових видів продуктів або інгредієнтів для використання на харчових виробництвах. Однак серед труднощів організації такого процесу є реологічна структура відходів, що суттєво може завадити виходу вологи. З урахуванням фізичних особливостей сировини було запропоновано джерело енергії інфрачервоного діапазону. Проведено критичний аналіз результатів зневоднення харчової сировини в умовах дії ІЧ поля. Визначено перспективність даного напрямку, незважаючи на наявні недоліки представлених конструкцій сушарок, головною серед яких є періодичний режим роботи. Запропоновано конструкцію стрічкової сушильної установки з ІЧ випромінювачами, що забезпечить зневоднення харчової сировини в потоці. В ході аналітичного моделювання представлено параметричну та фізичну моделі процесу сушіння в ІЧ полі. На їх основі методом теорії подібності була отримана неявна модель розрахунку стрічкових ІЧ сушарок. В результаті експериментального моделювання визначено вплив товщини шару на кінетику зневоднення реологічної сировини. В якості об'єктів досліджень були обрані відходи сокового виробництва, а саме овочеві та фруктові вичавки. На основі побудованих термограм можна стверджувати про низьке термічне навантаження на термолабільні компоненти, оскільки температура процесу не перевищувала 50°C. Отримані лінії сушіння свідчать про постійну швидкість вологовидалення аж до 30% вологи в продукті.

Ключові слова: сушіння, зневоднення, харчові реологічні системи, інфрачервоне поле, аналітичне та експериментальне моделювання.

Вступ. Сучасні проблеми розвитку харчових виробництв мають вирішуватись на принципах екоіндустрії та енергоефективності. Тому, інноваційні технології повинні забезпечити зниження втрат сировинних та енергетичних ресурсів й зменшити навантаження на довкілля. В першу чергу треба вирішити завдання утилізації відходів харчової сировини, які часто складають до двох третин від початкового об'єму. При цьому, часто це дорога сировина, а комерційна вартість вилучення залишкових компонентів у відходах іноді перевищує й сам готовий продукт. Але традиційне обладнання не в змозі вирішити такі проблеми із-за складних реологічних властивостей цих відходів.

В роботі поставлено завдання розробити методи зневоднення реологічної сировини – відходів консервних, олійних та харчоконцентратних виробництв. Їх відходи – вичавки, шлами, макухи – це вологі, реологічні системи, які створюють суттєві екологічні проблеми. Метою роботи є створення енергоефективного обладнання для зневоднення відходів із їх складними реологічними особливостями.

На першому етапі було поставлено завдання експериментально визначити ефективність сушіння макухи в результаті виробництва овочевих та фруктових соків. Інноваційним підходом в дослідженнях стало використання електромагнітних джерел енергії ІЧ діапазону. Дослідження проведено в лабораторії «Харчові нанотехнології» на експериментальному стенді, основними вузлами якого були: камера з ІЧ генератором, касета з сировиною, яка підвішувалась до ваг. Основні результати досліджень в сушарках камерного типу наведено в роботі авторів [1].

На другому етапі вирішувалось завдання розробки обладнання для зневоднення реологічних харчових систем на стрічкових установках із ІЧ джерелами енергії. Послідовно проведено аналіз параметричної, фізичної та математичної моделей. Ускладнення стосується фактору руху стрічки, який враховується відповідним дифузійним числом Стантона. Результати аналітичного аналізу визначили чіткі завдання експериментальних досліджень.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми. Використання інфрачервоного випромінювання в процесах зневоднення харчової сировини широко досліджується науковою спільнотою. Наявність великої кількості робіт, присвячених сушінню в умовах ІЧ поля, свідчить про серйозні перспективи такої технології у вирішенні проблем ресурсо- та енергоефективності.

Так, у 2021 році вченими Університету Цзянсу (Китай) був досліджений процес сушіння слайсів джекфруту як в умовах самостійної дії ІЧ поля, так і в комбінації з ультразвуком [2]. В результаті було визначено, що при підведеній потужності ІЧ поля 900, 1200 та 1500 Вт температура зразків сягала 58,6, 74,2 та 91,1°C відповідно. При цьому залучення ультразвуку призводило до збільшення температури зразків в середньому

на 5°C. Тривалість процесу сушіння до постійного значення маси зразків становила від 1,5 (1500 Вт) до 6 (900 Вт) годин.

В тому ж році у Хенанському університеті науки і технологій (Китай) був проведений порівняльний аналіз конвективної (КС), ІЧ сушарок та ІЧ сушарки псевдозріженого шару сировини [3]. В якості об'єкту досліджень був обраний арахіс. Експериментальні дослідження показали, що ІЧ сушіння у псевдозріженому шарі у порівнянні з КС та ІЧ дозволяє скоротити час сушіння на 40% та 33%, а питомі енерговитрати на 66% та 32% відповідно.

Про перспективи ІЧ джерел в сушінні говориться і в критичному огляді технологій зневоднення овочів та коренеплодів, що був проведений у 2023 році спільними зусиллями вчених Норвезького інституту досліджень продовольства, рибальства та аквакультури та Преторійського університету (Південна Африка) [4]. Разом з ІЧ полем розглядаються також сонячне, мікрохвильове (МХ) та радіочастотне (РЧ) джерела енергії.

В цьому ж році на базі Університету Урмії проводилися дослід з висушування пелюстків шафрану конвективним методом та в умовах ІЧ поля [5]. Температурний діапазон процесу сушіння коливався в межах 40–60°C. У 2022 році в Тегеранському університеті були проведені дослід з комбінованого впливу таких технологій [6].

Науковцями Китайського сільськогосподарського університету, Університету Нового Південного Уельсу (Австралія) та Пекінського університету технологій та бізнесу у 2022 році також досліджувався процес зневоднення у конвективній сушарці з ІЧ джерелами енергії [7]. В якості сировини виступали квіти хризантеми, що мають високу лікарську та естетичну цінність, початкова вологість яких становила близько 75%. Квіти висушувалися до вологості близько 10%. Температура процесу коливалася в межах 55–75°C.

В результаті аналізу літературних джерел було виявлено широкий інтерес до визначення можливостей ІЧ поля при вирішенні проблем зневоднення харчової сировини. Однак запропоновані конструкції сушильного обладнання передбачають роботу лише в періодичному режимі. При організації безперервної роботи ІЧ сушарок важливо враховувати фактор руху сировини, який значно ускладнює процес сушіння. Особливо це стосується реологічних харчових систем.

Метою даної роботи є дослідження кінетики зневоднення харчової сировини реологічної структури на базі стрічкової сушарки з ІЧ модулями враховуючи досвід лабораторії «Харчові нанотехнології» [8–10].

Постановка задачі моделювання. Особливістю електромагнітного підведення енергії є те, що максимальні значення і температури, і вмісту вологи розташовані всередині продукту. Ця відмінність від традиційних (конвективних та кондуктивних) способів підведення енергії дозволяє суттєво знизити витрати енергії на зневоднення [8]. Рівень енергетичних витрат залежить від узгодження параметрів електромагнітного поля, структури продукту, швидкості його переміщення та параметрів повітряного середовища. Ключовий вплив має схема ініціювання потоку вологи продукту при максимальних значеннях рушійної сили процесу вологоперенесення. Параметрична модель стрічкової сушарки з ІЧ модулями має вигляд (рис. 1).

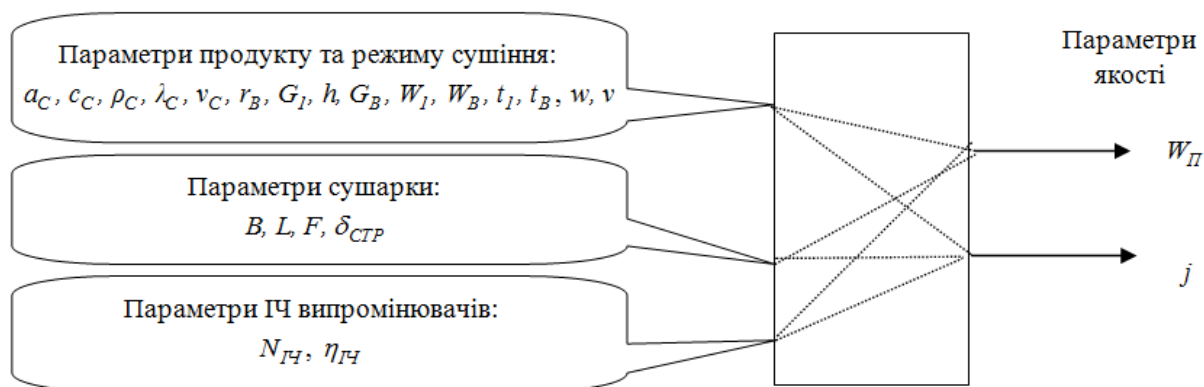


Рис. 1 – Параметрична модель стрічкової сушарки

Параметрами якості виступають вологовміст готового продукту W_P і питомі енерговитрати на зневоднення j , Дж/кг. Основними вхідними параметрами сировини є: його витрати G_1 , кг/с, вологовміст W_1 , температурна t_1 , теплофізичні властивості сировини ($a_c, c_c, \rho_c, \lambda_c, v_c, r_B$). Потік повітря, що проходить послідовно через камери сушарки, характеризується його витратою G_B , вмістом вологи W_B , швидкістю v і температурою t_B . Ключовими характеристиками сушарки є конструктивні параметри стрічки: її ширина B , довжина L , товщина $\delta_{СТР}$, швидкість переміщення w та площа поверхні F . В якості енергетичних параметрів сушарки виступають потужність ($N_{ІЧ}$) та ККД ($\eta_{ІЧ}$) інфрачервоних випромінювачів.

Математична модель зневоднення в ІЧ полі. Постановкою завдання моделювання є фізична схема сушарки з ІЧ генераторами енергії (рис. 2).

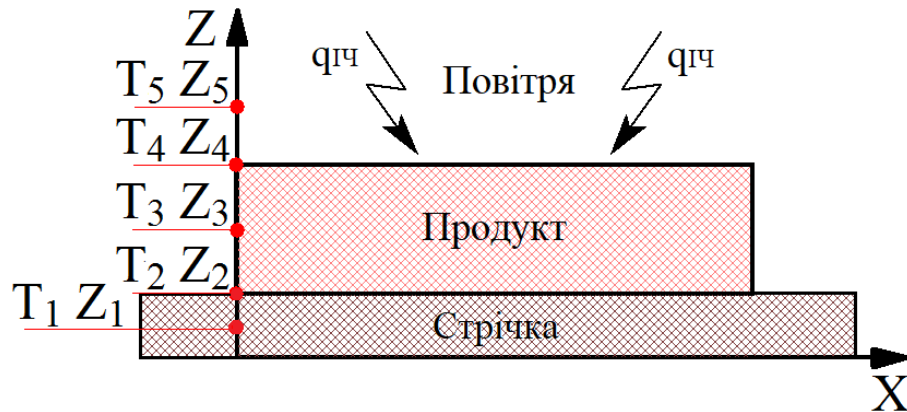


Рис. 2 – Фізична модель зневоднення

Нестационарна модель тепломасоперенесення формується у двовимірному представленні відносно осей Z та X . Представимо систему рівнянь, яка описує процеси, що протікають.

1) За умов $Z > Z_4$ (об'єм повітря):

Рівняння Нав'є – Стокса:

$$\rho_g \cdot \omega_g \cdot \left(\frac{\partial \omega_g}{\partial x} + \frac{\partial \omega_g}{\partial z} \right) = \rho_g \cdot g - \frac{\partial P_g}{\partial x} - \frac{\partial P_g}{\partial z} + \mu_g \cdot \left(\frac{\partial^2 \omega_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_g}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 t_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_g}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c_g \rho_g} \quad (2)$$

За рахунок того, що внутрішні джерела тепловиділення у повітрі відсутні, значення складової $\frac{q_v}{c_g \rho_g}$ зводиться до нуля:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 t_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_g}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Рівняння суцільності:

$$\frac{1}{\rho_g} \cdot \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \omega_g}{\partial y} + \frac{\partial \omega_g}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

За умов $Z = Z_4$ (межа контакту фаз «повітря – сировина»):

Тут діють електромагнітні джерела енергії за граничних умов II роду:

До об'єму сировини, за умов $Z_2 < Z < Z_4$:

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_{ГЧ}}{c_c \rho_c} \right] \quad (5)$$

Рівняння Фіка:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial W}{\partial z} v_z \quad (6)$$

При зворотному русі стрічка має контакт із повітрям, ($Z = Z_1$):

Рівняння Нав'є – Стокса:

$$\rho_g \cdot \omega_g \cdot \left(\frac{\partial \omega_g}{\partial x} + \frac{\partial \omega_g}{\partial z} \right) = \rho_g \cdot g - \frac{\partial P_g}{\partial x} - \frac{\partial P_g}{\partial z} + \mu_g \cdot \left(\frac{\partial^2 \omega_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_g}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_g \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right] \quad (8)$$

Рівняння суцільності:

$$\frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial \omega_s}{\partial y} + \frac{\partial \omega_s}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

Система рівнянь (1–9) описує нестационарне двовимірне поле температур і вологовмісту продукту, як по товщині шару, так і по розташуванню на стрічці. Умови на границях середовища, продукту та стрічки представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Зведення граничних умов моделі сушіння

Координата на рис. 2	Тип ГУ	Модель ГУ
$Z = Z_4$ (межа продукту та середовища)	III роду	$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_B}{\lambda_{II}}(t_{II} - t_B)$ (10)
$Z_2 < Z < Z_4$ (об'єм продукту)	II роду	$q_v = q_{IЧ} = const$ (11)
$Z = Z_2$ (межа продукту та стрічки)	IV роду	$\lambda_{II} \frac{\partial t}{\partial n} \Big _{cm1} = \lambda_{СТР} \frac{\partial t}{\partial n} \Big _{cm2}$ (12)
$Z = Z_1$ (межа стрічки та середовища)	III роду	$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_B}{\lambda_{СТР}}(t_{СТР} - t_B)$ (13)

Система рівнянь (10–13) представляє собою нестационарну модель, що поєднує теплоаеродинамічні процеси та процеси масоперенесення.

Наразі отриману математичну модель аналітично розв'язати неможливо. Виходячи з цього пропонується спростити її з використанням методу аналізу розмірностей. У попередній роботі [1] була отримана модель для процесу ІЧ сушіння у нерухомому шарі. При моделюванні процесу зневоднення в режимі безперервної роботи необхідно враховувати фактор руху сировини. На основі параметричної моделі (рис. 1) та з використанням методу теорії подібності була отримана модель:

$$St_\theta = A \cdot (Pe)^m \cdot (Bu)^p \cdot (Ff)^k \quad (14)$$

що враховує фактор руху за рахунок використання дифузійного числа Стантона:

$$St_\theta = \frac{\beta_e}{w} \quad (15)$$

де, β_e – ефективний коефіцієнт дифузії, м/с;

w – швидкість руху сировини, м/с.

Числа подібності Pe , Bu та фактор форми Ff аналогічні тим, що представлені у попередній роботі [1].

Основні результати досліджень.

Згідно параметричної моделі (рис. 1) послідовно вивчався вплив потужності поля, товщина шару, тип сировини на кінетику зневоднення макухи.

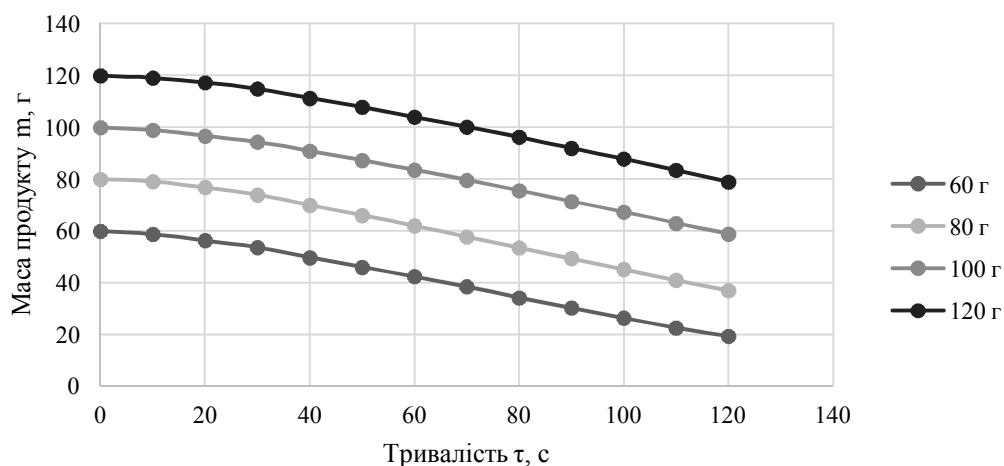


Рис. 3 – Кінетика зневоднення яблучних вичавків

Швидкість стрічки дорівнювала 0,018 м/с. Після виходу касет із камери сушіння їх маса визначалась за допомогою ваг, а температура – пірометром. За результатами (рис. 3) розраховувались лінії швидкості сушіння (рис. 4).

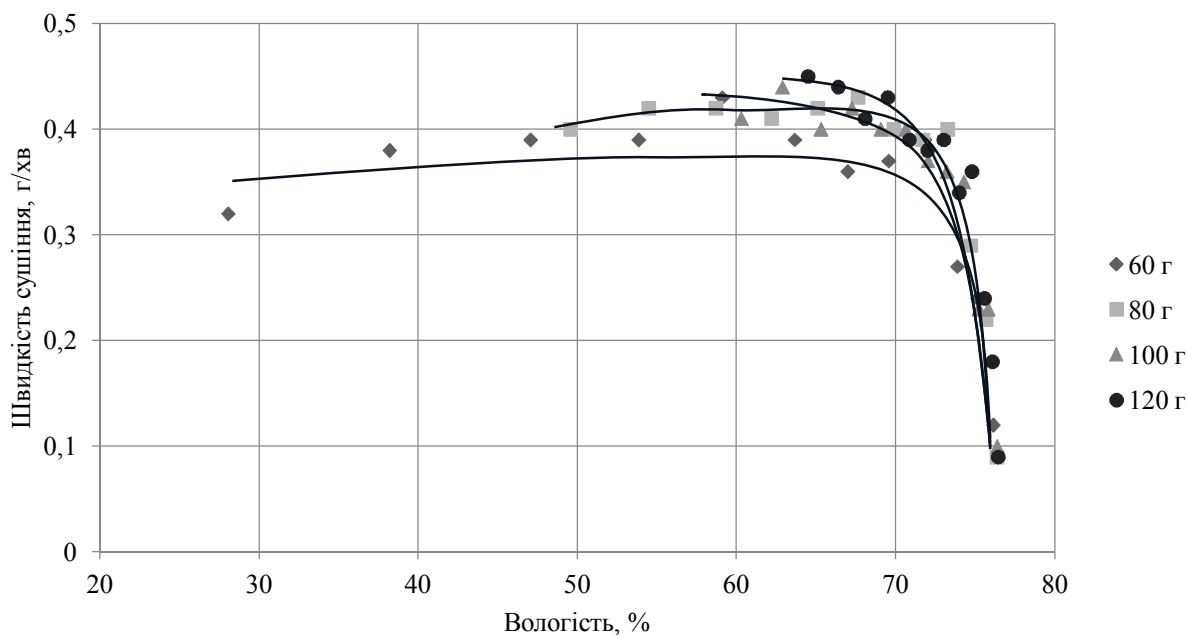


Рис. 4 – Залежність швидкості зневоднення яблучних вичавків від вологості

Виходячи із результатів отриманої залежності (рис. 4) можна стверджувати, що швидкість зневоднення аж до 30% вологості сировини є відносно сталою, що підкреслює перспективність використання ІЧ випромінювання в задачах дегідратації харчової сировини.

Температура сировини на протязі всього процесу не перевищувала 50°C (рис. 5).

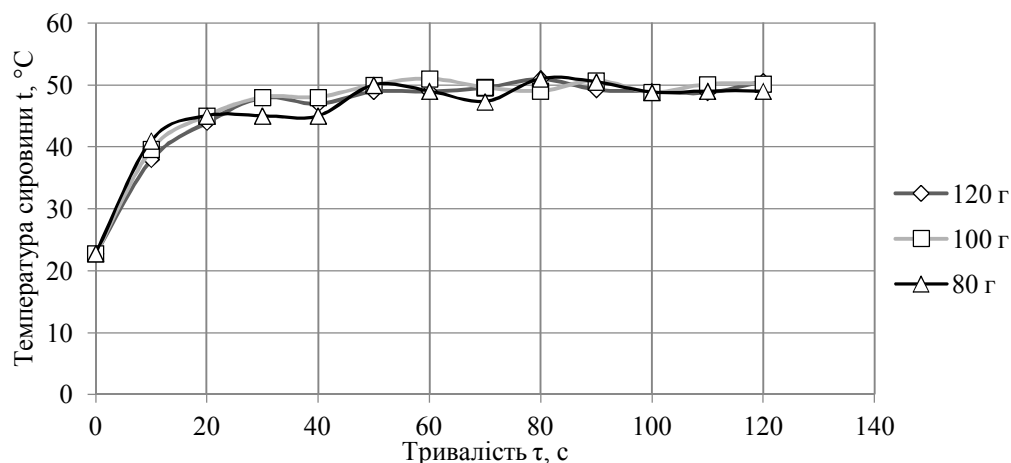


Рис. 5 – Термограми в процесі зневоднення

Проаналізувавши отриманні термограми можна зробити припущення, що харчова цінність кінцевого продукту є досить високою, навіть якщо початкова сировина є термолабільною, що пояснюється низьким термічним навантаженням.

Висновки. Результати дослідів довели, що температурні умови ІЧ обробки сировини на стрічці забезпечують збереження якості сировини. Переваги при цьому мають режими із меншою товщиною шару сировини. Отримана неявна модель у критеріальній формі є основою алгоритму розрахунку стрічкових сушарок з ІЧ генераторами енергії.

References

1. Kravchenko O.Yu., Molchanov M.Yu., Milinchuk K.S., Tersiiiev S.G., Petrovskiy V.V. (2022). Doslidzhennia protsesiv sushinnia reolohichnykh kharchovykh system v ICh poli. *Scientific Works*, 86(1), 91–99. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2409>

2. Wu B., Guo X., Guo Y., Ma H., Zhou C. (2021) Enhancing Jackfruit Infrared Drying by Combining Ultrasound Treatments: Effect on Drying Characteristics, Quality Properties and Microstructure. *Food Chemistry*, 358, 129845. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129845>
3. Zhu K., Li L., Ren G., Duan X., Cao W., Qiu C. (2021) Efficient Production of Dried Whole Peanut Fruits Based on Infrared Assisted Spouted Bed Drying. *Foods*, 10(10), 2383. <https://doi.org/10.3390/foods10102383>
4. Skåra T., Løvdaal T., Skipnes D., Mehloimakulu N.N., Mapengo C.R., Baah R.O., Emmambux M.N. (2023) Drying of Vegetable and Root Crops by Solar, Infrared, Microwave, and Radio Frequency as Energy Efficient Methods: A Review. *Food Reviews International*, 39:9, 7197-7217. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2148688>
5. Sharifian F., Gharkhloo Z.R., Yamchi A.A., Kaveh M. (2023) Infrared and Hot Drying of Saffron Petal (*Crocus sativus* L.): Effect on Drying, Energy, Color, and Rehydration. *Journal of Food Process Engineering*, 46(7), e14342. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14342>
6. Hosseinalipour S.M., Zaghari P. (2022) Design and Fabrication of Catalytic Infrared Fruit Dryer to Evaluate Its Performance in the Bananas Drying Process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46, e16627. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16627>
7. Xu H., Wu M., Wang Y., Wei W., Sun D., Li D., Zheng Z., Gao F. (2022). Effect of Combined Infrared and Hot Air Drying Strategies on the Quality of Chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) Cakes: Drying Behavior, Aroma Profiles and Phenolic Compounds. *Foods*, 11(15): 2240. <https://doi.org/10.3390/foods11152240>
8. Burdo O.G. (2010). *Evolutsiya sushilnykh ustanovok*. Odessa: Poligraf, 368.
9. Burdo O.G., Sirotyuk I.V., Shcherbich M.V., Akimov A.V., Poyan A.S. (2021). Innovation of Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration and Extraction. *Problemele Energeticii Regionale*, 1(49), 86–98. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.1-49.13>
10. Burdo O.G., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V., Shcherbich M.V. (2020) System of Innovative Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration. *Problemele Energeticii Regionale*, 2(46), 92–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>

RESEARCH OF DEHYDRATION PROCESSES OF RHEOLOGICAL PLANT RAW MATERIAL IN THE IR FIELD

Kravchenko O.Yu., graduate student, Terziev S.G., Doc. Tech. Sci., associate professor
Odesa national university of technology, Odesa, Ukraine

Abstract. Food production is quite often characterized by the presence of waste food raw materials, the share of which can reach 2/3 of the total volume of initial raw materials. Usually, the value of such waste is quite high, so the issue of their disposal in compliance with the principles of resource and energy efficiency is quite relevant. It is proposed to involve dehydration technologies to obtain from food waste new types of products or ingredients for use in food production. However, among the difficulties of organizing such a process is the rheological structure of the waste, which can significantly hinder the release of moisture. Taking into account the physical characteristics of raw materials, an infrared energy source was proposed. A critical analysis of the results of food raw materials dehydration under the conditions of the IR field was carried out. The prospects of this direction have been determined, despite the existing shortcomings of the presented designs of dryers, the main one of which is the periodic mode of operation. The design of a belt drying unit with IR emitters is proposed, which will ensure the dehydration of food raw materials in the flow. By the analytical modeling, parametric and physical models of the drying process in the IR field are presented. Based on them, an implicit model for the calculation of belt IR dryers was obtained using the method of similarity theory. As a result of experimental modeling, the influence of layer thickness on the kinetics of dehydration of rheological raw materials was determined. Juice production wastes, namely vegetable and fruit juices, were chosen as objects of research. On the basis of the constructed thermograms, it is possible to assert a low thermal load on thermolabile components, since the temperature of the process did not exceed 50°C. The resulting drying lines indicate a constant rate of moisture removal up to 30% of moisture in the product.

Key words: drying, dehydration, food rheological systems, infrared field, analytical and experimental modeling.

Список використаної літератури

1. Кравченко О.Ю., Молчанов М.Ю., Мілінчук К.С., Терзів С.Г., Петровський В.В. Дослідження процесів сушіння реологічних харчових систем в ІЧ полі. *Scientific Works*, 2022, 86(1), 91–99. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2409>
2. Wu B., Guo X., Guo Y., Ma H., Zhou C. Enhancing Jackfruit Infrared Drying by Combining Ultrasound Treatments: Effect on Drying Characteristics, Quality Properties and Microstructure. *Food Chemistry*, 2021,

- 358, 129845. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129845>
3. Zhu K., Li L., Ren G., Duan X., Cao W., Qiu C. Efficient Production of Dried Whole Peanut Fruits Based on Infrared Assisted Spouted Bed Drying. *Foods*, 2021, 10(10), 2383. <https://doi.org/10.3390/foods10102383>
 4. Skåra T., Løvdaal T., Skipnes D., Mehloimakulu N.N., Mapengo C.R., Baah R.O., Emmambux M.N. Drying of Vegetable and Root Crops by Solar, Infrared, Microwave, and Radio Frequency as Energy Efficient Methods: A Review. *Food Reviews International*, 2023 39:9, 7197-7217. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2148688>
 5. Sharifian F., Gharkhloo Z.R., Yamchi A.A., Kaveh M. Infrared and Hot Drying of Saffron Petal (*Crocus sativus* L.): Effect on Drying, Energy, Color, and Rehydration. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, 46(7), e14342. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14342>
 6. Hosseinalipour S.M., Zaghari P. Design and Fabrication of Catalytic Infrared Fruit Dryer to Evaluate Its Performance in the Bananas Drying Process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46, e16627. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16627>
 7. Xu H., Wu M., Wang Y., Wei W., Sun D., Li D., Zheng Z., Gao F. Effect of Combined Infrared and Hot Air Drying Strategies on the Quality of Chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) Cakes: Drying Behavior, Aroma Profiles and Phenolic Compounds. *Foods*, 2022, 11(15): 2240. <https://doi.org/10.3390/foods11152240>
 8. Бурдо О.Г. *Еволюція сушильних установок*. – Одеса: Поліграф, 2010. – 368с.
 9. Burdo O.G., Sirotyuk I.V., Shcherbich M.V., Akimov A.V., Poyan A.S. Innovation of Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration and Extraction. *Problemele Energeticii Regionale*, 2021, 1(49), 86–98. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.1-49.13>
 10. Burdo O.G., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V., Shcherbich M.V. System of Innovative Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration. *Problemele Energeticii Regionale*, 2020, 2(46), 92–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>

Отримано в редакцію 28.06.2023
Прийнято до друку 28.11.2023

Received 28.06.2023
Approved 28.11.2023

ІННОВАЦІЙНІ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ДЕГІДРАТОРИ ДЛЯ КОНЦЕНТРУВАННЯ РОЗЧИНІВ

Сиротюк І.В., PhD, доцент, Славинська В.О., інженер, Петровський В.В., аспірант
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Сучасний розвиток технологій зневоднення харчової сировини направлений на вирішення одного з головних протиріч виробництва харчокоцентратів, а саме підвищення якості продукту при зниженні енерговитрат на сам процес. Проведено аналіз традиційного обладнання для зневоднення харчових розчинів. Визначено недоліки сучасних технологій випаровування, серед яких особливої уваги заслуговують відсутність можливості отримання високих концентрацій без завдання шкоди поживній цінності готового продукту та довготривале термічне навантаження на сировину. Обґрунтовано перспективність технологій адресної доставки енергії при зневодненні рідких харчових систем, які б дали змогу вирішити ці проблеми. Інструментом реалізації таких технологій визначено електромагнітні джерела енергії мікрохвильового діапазону. Наведено схему експериментального стенду та результати дослідження впливу потужності поля, концентрації та виду сировини на інтенсивність паропроодуктивності. Визначено вимоги до основних вузлів дегідратору. Проведено апробацію модуля дегідратора при концентруванні томатної пасти. В результаті було встановлено, що паропроодуктивність модуля є сталою на протязі всього процесу зневоднення. Доказано ефективність модуля, можливість в разі підвищити концентрацію готового продукту при збереженні його якості. Запропонована методика розрахунку та оптимізації мікрохвильових дегідраторів. Наведено приклад розрахунку кінетики концентрування водних розчинів у мікрохвильовому полі. Отримані результати свідчать про перспективність вищезазначених технологій зневоднення та наявність суттєвих сировинних та енергетичних резервів.

Ключові слова: концентрування, технології адресної доставки енергії, мікрохвильові системи, методи розрахунку дегідратора.

Вступ. Сучасний етап розвитку технологій АПК пов'язаний із вирішенням ключових проблем: підвищення якості готового продукту при зменшенні витрат енергії та навантаження на довкілля. Особливо це стосується енергоємного обладнання, що використовується для зневоднення харчової сировини – випарних апаратів [1, 2]. Перспективним шляхом удосконалення є інноваційні принципи адресного підведення енергії [3] з використанням електромагнітних джерел енергії мікрохвильового (МХ) діапазону. Але, в умовах виробництва приклади використання МХ випромінювання в процесі випарювання не відомі. Відсутні і алгоритми розрахунку МХ випарних апаратів. Особливо це стосується апаратів, що спроможні працювати у безперервному режимі, вирішувати завдання по збільшенню продуктивності обладнання. Тому в роботі поставлено задачу провести дослідження МХ вакуум-випарних апаратів, розробити методи їх проектування. Очікується, що реалізація принципів об'ємного підведення енергії безпосередньо до полярних молекул розчину відкриє нові можливості МХ апаратів. На відміну від традиційної техніки випаровування за принципами теплопередачі в пропозиції відсутні проблеми формування приграничного шару, а це має розширити діапазони кінцевих концентрацій готового продукту. Із-за таких особливостей автори в роботі використовують термін «дегідратор», що більш широко відображає специфіку процесів зневоднення.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми.

Вперше про особливі можливості взаємодії харчової сировини та електромагнітного поля надвисокої частоти було заявлено в роботі [4]. На основі фізичного, математичного та експериментального моделювання обґрунтовувались процеси суттєвої зміни структури сировини, навіть на мікро- та наномасштабних рівнях. Заявлялось про умови локального впливу на оболонку клітини, мікроорганізми, інші елементи, які включають полярні молекули. У подальшому аналітичні та експериментальні дослідження процесів обробки вологої харчової сировини у мікрохвильовому полі [5–7] підтвердили високу інтенсивність масообміну. Мікрохвильові системи дозволили удосконалити технології виробництва кави [8], концентратів гранатового соку [9]. Досліджено ефективність мікрохвильових систем при випаровуванні розчинів [10], при зневодненні зернових продуктів на стрічковій сушарці [11]. Ці роботи стали базою для створення основ теорії адресної доставки енергії до елементів харчової сировини.

Наразі, проблемами дослідження мікрохвильових технологій обробки харчової сировини в наукових лабораторіях світу активно займаються. Перспективи їх використання доказано при сушінні сировини [12, 13] при концентруванні [14–18], при екстрагуванні [19].

Таким чином, проведений критичний огляд визначив наступну проблему. Традиційні вакуум-випарні апарати із вільною циркуляцією розчину працюють по принципу теплопередачі. Із підвищенням концентрації розчину підвищується в'язкість, зростає товщина приграничного шару, росте термічний опір та градієнт

температур у приграничному шарі, з'являється присмак пригару. Продукт псується. Щоб не допустити погіршення якості продукту на практиці обмежуються значенням його кінцевої концентрації.

Приклади промислового використання мікрохвильових дегідраторів не відомі.

Вирішити цю проблему планується за технологіями адресної доставки енергії при об'ємному принципі її підведення [20].

Моделювання модуля дегідратору.

Конструкція елементів модуля дегідратора спрямована на вирішення технологічних завдань і виконана у відповідності до комплексних технічних вимог (таблиця 1).

Таблица 1

Технічні вимоги до модуля дегідратора

Елементи модуля	Технологічні задачі	Технічні вимоги і обмеження
Реактор	Забезпечення процесу зневоднення харчових рідин в умовах вакууму та за температур до 100°C	Радіопрозорість, працездатність в умовах вакууму і сумісність з харчовими розчинами
Вузол введення сировини і виведення концентрату і вторинної пари	Тепло- та гідродинамічні характеристики мають бути узгоджені відповідно до технологічного регламенту. Забезпечення руху потоків уникаючи їх перемішування	Відповідність умовам позамежного хвильоводу, працездатність в умовах вакууму і сумісність з харчовими розчинами
Корпус модуля	Витримувати силові навантаження. Відповідати необхідним рівням теплового захисту	Відповідність нормам електромагнітного захисту апарату
Вузол вводу МХ енергії	Параметри хвильоводу повинні забезпечувати максимальні ККД транспортування енергії	Відповідність вимогам електромагнітного захисту апарату
Система генерації МХ поля	Повинна бути передбачена можливість регулювання вихідної потужності магнетрона	Повинна бути забезпечена автономність та відсутність потреби у пристроях для охолодження силових електроніки

Основними конструктивними вузлами та елементами дегідратор є: металева шахта (1), що виконує функції резонаторної камери, в середині якої розміщується реактор (2), виконаний із радіо прозорого матеріалу. Реактор 2 заповнюється сировиною (розчином 3) (рис. 1).

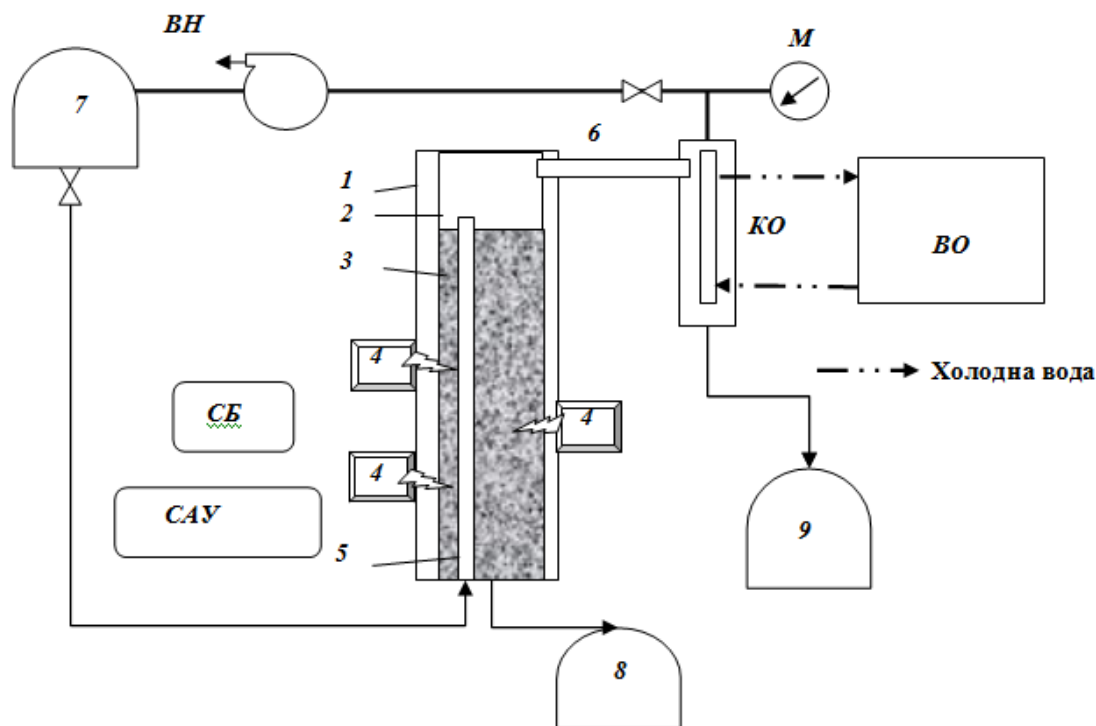


Рис. 1 – Схема експериментально-дослідного зразка дегідратора

На бокових стінках шахти встановлено електромагнітні аплікатори (4) мікрохвильового діапазону. Верхня та нижня кришки шахти (3) мають елементи захисту від витоків електромагнітної енергії за межі шахти. Герметизація реактора забезпечується спеціальними верхнім та нижнім фланцями, які мають штуцери для вводу сировини (5) та виходу концентрату та вторинної пари (6).

Вторинна пара із реактора (2) по каналу (6) поступає у конденсатор-охолоджувач (КО), в якому циркулює холодна вода із водоохолоджувача (ВО), який укомплектовано компресорно-конденсаторною холодильною машиною. Тиск в системі забезпечується вакуум-насосом (ВН). Сировина подається до реактору із ємності (7), концентрат збирається в ємність (8). Гідролат із (КО) збирається в ємність (9). Потужність аплікаторів регулюється блоком силової електроніки (СБ) по командах автоматизованої системи управління (САУ). На (САУ) встановлюється потужність кожного магнетрону, циклограма режиму роботи. На дисплеї (САУ) відображається поточна інформація: потужність, температури. Передбачено аварійне відключення дегідрататора при: відсутності циркуляції сировини, підвищення тиску та температури, електромагнітної небезпеки.

На бокових стінках шахти встановлено електромагнітні аплікатори (4) мікрохвильового діапазону. Верхня та нижня кришки шахти (3) мають елементи захисту від витоків електромагнітної енергії за межі шахти. Герметизація реактора забезпечується спеціальними верхнім та нижнім фланцями, які мають штуцери для вводу сировини (5) та виходу концентрату та вторинної пари (6).

Вторинна пара із реактора (2) по каналу (6) поступає у конденсатор-охолоджувач (КО), в якому циркулює холодна вода із водоохолоджувача (ВО), який укомплектовано компресорно-конденсаторною холодильною машиною. Тиск в системі забезпечується вакуум-насосом (ВН). Сировина подається до реактору із ємності (7), концентрат збирається в ємність (8). Гідролат із (КО) збирається в ємність (9). Потужність аплікаторів регулюється блоком силової електроніки (СБ) по командах автоматизованої системи управління (САУ). На (САУ) встановлюється потужність кожного магнетрону, циклограма режиму роботи. На дисплеї (САУ) відображається поточна інформація: потужність, температури. Передбачено аварійне відключення дегідрататора при: відсутності циркуляції сировини, підвищення тиску та температури, електромагнітної небезпеки.

Основними показниками дегідрататора є: продуктивність по парі, кінцева концентрація готового продукту, питомі енергетичні витрати, харчова якість продукту та гідролату. Інноваційна установка має забезпечити наступні положення.

1. Значення паропроductивності має бути практично не залежним від концентрації в сировині вологи.

2. Основним фактором, який визначає величину паропроductивності, є вид розчинника, його прихована теплота фазового переходу та потужність магнетронів.

Параметри дегідрататора. Живлення – електрична мережа, 220В; потужність – 2 кВт; діапазон тисків 5–150 кПа; діапазон концентрацій готового продукту до 85–90%гріх; загальна продуктивність визначається загальною потужністю магнетронів.

При проведенні комплексних експериментальних досліджень були отримані результати, що відображені в таблиці 2.

Таблиця 2

Діапазон експериментальних даних при дегідrataції розчинів

Об'єкт	Розчинник	Тиск, кПа	Температура, °С	Потужність МХ поля, Вт	Концентрація розчину, %	
					Початкова	Кінцева
Розчин цукру	Вода	10	40 – 50	270	15	21
Яблучний сік	Вода	10	40 – 50	270	13,5	20
Кавовий екстракт	Вода	10	40 – 50	270	14,8	19
Біле вино	Вода (90%) Етанол (10%)	10	35 – 50	270	6,1	9,2
Дубовий екстракт	Вода (58%) Етанол (42%)	10	35 – 45	270	15,1	23,1

Результати досліджень наведено у вигляді графічних залежностей впливу типу сировини на ключові параметри процесу (рис. 2–4).

Аналіз експериментальних даних свідчить, що процес концентрування протікає при температурах до 50°C (рис. 2), ступінь підвищення концентрації стала (рис. 3), а паропроductивність визначається значенням теплоти пароутворення розчинника (рис. 4). В результаті, шляхом комплексних стендових досліджень було встановлено статичні та кінетичні характеристики експериментальної конструкції модуля МХ дегідрататора.

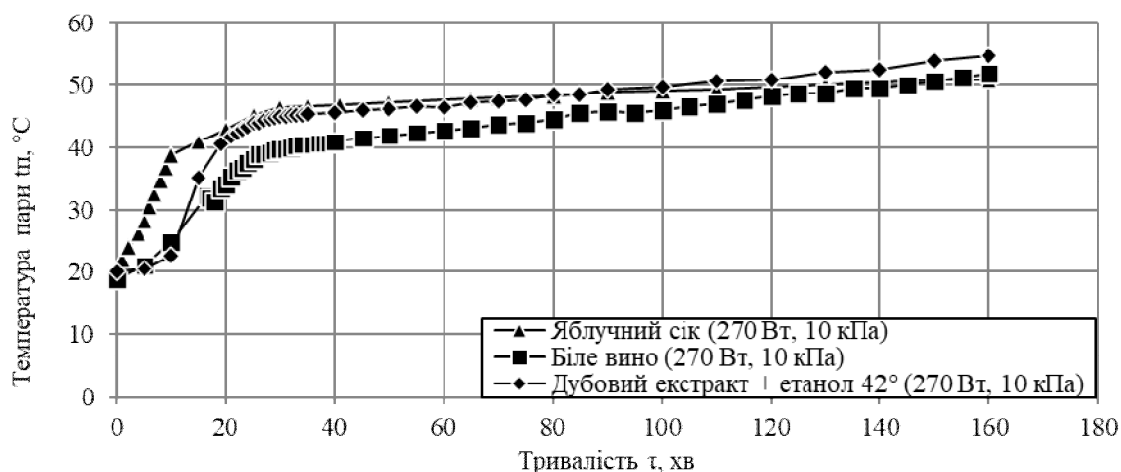


Рис. 2 – Термограми пари на виході із дегідратору

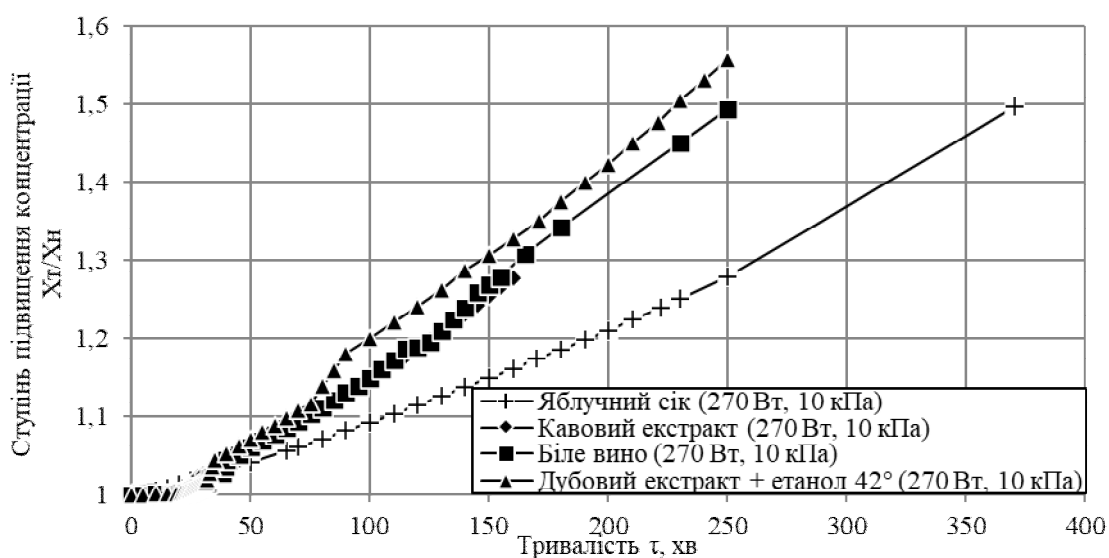


Рис. 3 – Вплив виду продукту на ступень підвищення концентрації

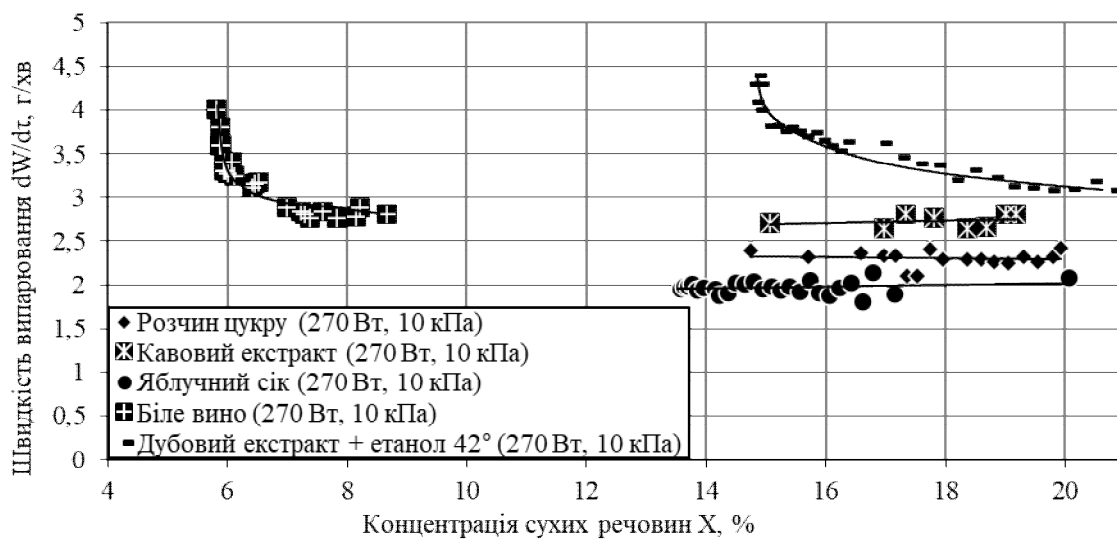


Рис. 4 – Вплив виду продукту на паропроодуктивність

Ефективність МХ дегідратору розглянемо на прикладі удосконалення технології виробництва томатної пасти. Це один із найбільш проблемних продуктів консервної галузі. В традиційних лініях після мийки відкальібровані помідори потрапляють до подрібнювача з метою розрізання овочів на дрібні частини, після

чого отримана сировина перетирається у гомогенну масу. Потім отримана маса потрапляє до вакуум-випарної установки задля подальшого концентрування, оскільки в результаті перетирання отримується напіврідкий продукт, що зумовлює необхідність зневоднення розчину, підвищення кількості сухих речовин. Специфічні реологічні властивості розчину при його концентруванні створюють ряд проблем. По перше, при підвищенні концентрації інтенсивність теплопередачі знижується із-за формуванні на поверхні приграничного шару. По друге, із підвищенням товщини шару зростає градієнт температур. З'являється присмак пригару, продукт псується. Тому на виробництвах обмежуються кінцевою концентрацією томат-пасты до 25–30°brix. Використання МХ дегідраторів дозволить отримати готовий продукт, кінцева концентрація якого значно вища на відміну від традиційних технологій. Це значно підвищить термін зберігання концентрату без завдання шкоди якості. Результати експериментальних досліджень процесу зневоднення томатної пасты у МХ дегідраторі представлені на рисунку 5.

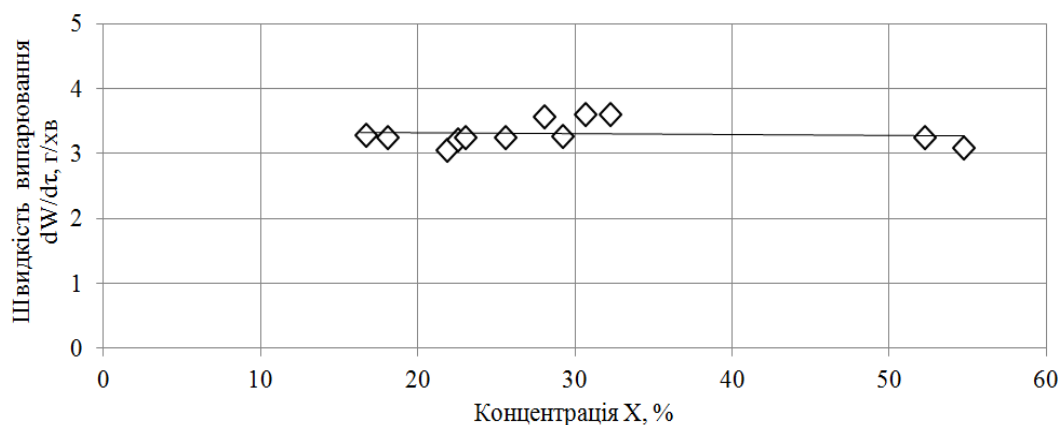


Рис. 5 – Процес зневоднення томатної пасты у дегідраторі

Результати експериментів свідчать, що інтенсивність процесу пароутворення при підвищенні концентрації майже у 4 рази залишається сталою, паропроодуктивність не залежить від концентрації томатної пасты (рис. 5). Так підтверджено гіпотезу, що технології об'ємного підведення енергії мають великі перспективи у харчових та фармацевтичних виробництвах. Але, для проектування МХ дегідраторів необхідно мати методику їх проектування.

Методика розрахунку та оптимізації МХ дегідратора.

Узагальнений алгоритм має включати розрахунки паропроодуктивності, фізичних властивостей розчину, числа енергетичної дії, числа магнетронів (рис. 6). Початковими даними для розрахунку виступають: об'єм вхідного продукту для концентрування, V_C ; значення початкової (X_H) та кінцевої (X_K) концентрацій; час процесу, τ ; електрична потужність одного джерела енергії, модуля, (N_i). Об'єм вологи в сировині, яку слід видалити, (V_B), тому об'єм вторинної пари визначається з матеріального балансу установки:

$$\left. \begin{aligned} V_K + V_B &= V_C \\ V_K X_K &= V_H X_H \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Рис. 6 – Алгоритм розрахунку МХ дегідратора

з (1) при $V_C = V_H$ визначається об'єм вторинної пари:

$$V_B = V_C - V_H \frac{X_H}{X_K} \quad (2)$$

Значення поточної концентрації розчину:

$$X = \frac{V_H \cdot X_H}{V_H - V_B} \quad (3)$$

Приклад використання схеми (рис. 6) наведено на рис. 7.

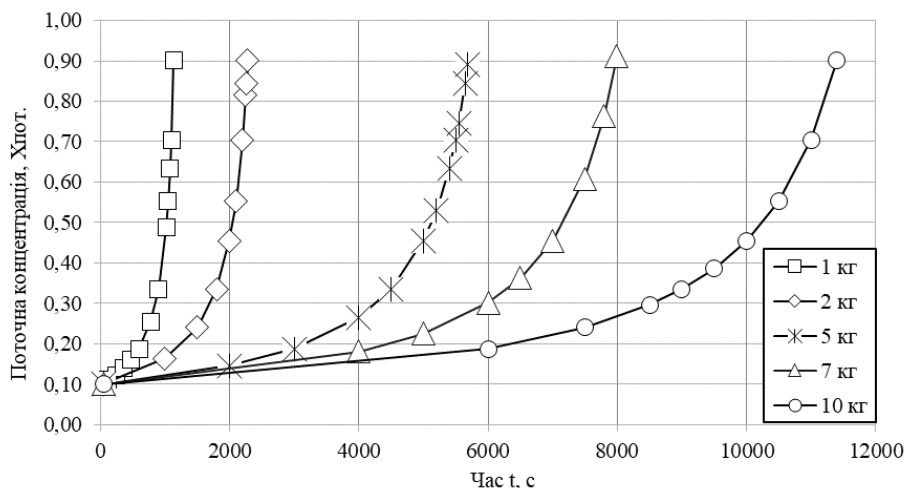


Рис. 7 – Зміна концентрації в часі в залежності від початкового об'єму

Розрахунок мікрохвильового дегідратору не потребує громіздких методів ітераційного проектування і може бути використаний як для проектування таких апаратів, та і для їх оптимізації.

Висновки. Проблеми традиційних технологій концентрування шляхом випаровування вирішуються при переході від принципів теплопередачі до систем об'ємного підведення енергії. Інструментом такого принципу є електромагнітні джерела енергії мікрохвильового діапазону. В роботі наведено приклади роботи дегідраторів із сталою паропроодуктивністю в діапазоні концентрацій до 90°brix. Запропонована методика розрахунку та оптимізації електродинамічних апаратів.

References

- Burdo O.G. (2021). Innovation of Energy Technologies of Food Industry in the Context of Global Problems of Humanity. *Scientific Works*, 85(1), 91–99. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2082>
- Burdo O.G., Zykov A.V., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V. (2016). The Nanotechnological Innovation in Food Industry. *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 6, Is. 3, P. 144–150.
- Burdo O.G., Trishyn F.A., Yarovy I.I. (2020). *Enerhetychni monitorynh kharchovykh i pererobnykh vyrobnytstv.* – Odesa: «Madzhenta», – 246s.
- Burdo O.G. Nanoscale Effects in Food-production Technologies (2005). *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 78, Is. 1, P. 90–96.
- Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Y.O. (2018). Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(2), 210–218.
- Burdo O.G., Gavrilov A.V., Kashkano M.V., Levtrinskaya Y.O., Syrotyuk I.V., Pylypenko E.A., Terziev S.G. (2019). Energy Monitoring of Innovative Energy Technologies of Plant Raw Material Processing. *Problemele energeticii regionale*, 2(43), 23–38. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3367058>
- Burdo O.G., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V., Shcherbich M.V. (2020). System of Innovative Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration. *Problemele Energeticii Regionale*, 2(46), 92–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
- Burdo O., Bezbakh I., Shyshov S., Zykov A., Gavrilov A., Vsevolodov O., Sirotyuk I., Terziev S. (2020). Experimental Studies of the Kinetics of Infrared Drying of Spent Coffee Grounds. *Technology Audit and Production Reserves*. 1(51), 4–10. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.195863>
- Burdo O.G., Alkhuri Yu., Pur D.R., Levtrynska Yu.O. (2018). Zastosuvannya elektromahnitnykh dzherel enerhii v innovatsiinykh tekhnolohiiakh pererobky kharchovoi syrovyny. *Scientific Works*, 81(2).
- Burdo O., Riznychenko T., Ruzhytska N. (2018). Modeliuvannya protsesu kontsentruiuvannya tsukrovnykh rozchyniv v mikrohvylovomu vakuum-vyparnomu aparati. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu*, 17(1).
- Burdo O., Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya J., Marenchenko E. (2017). Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 11–88.

12. Wang R., Zhao D.H., Gao Yp., Xu Q., Wu L., Li Z. (2021). Power Control in Microwave Drying of Green Turnip. *Drying Technology*, 40(10), 2153–2163. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1927073>
13. Lei Yd., Chen Jl., Zhang Zh., Deng Xr. (2022). Influence of microwave vacuum drying on the effective moisture diffusivity of seedless white grapes. *Food science and technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.37020>
14. Dincer C. (2021). Effect of Intermittent Microwave Vacuum Concentration on Quality Parameters of Apple Juice and Sour Cherry Nectar and Mathematical Modeling of Concentration. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 55(3). <https://doi.org/10.1080/08327823.2021.1952837>
15. Nejad S.L., Shahedi M., Fathi M. (2021). Comparative Study of Microwave-Assisted Vacuum Evaporation, Microwave-Assisted Evaporation, and Conventional Evaporation Methods on Physicochemical Properties of Barberry Juice. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(2), 307–317.
16. Bozkir H., Tekgul Y. (2022). Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of food processing and preservation*, 46(6), e15902. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15902>
17. Tao Y., Yan Bw., Zhang N.N., Wang M.F., Zhao Jx., Zhang H., Chen W., Fan Dm. (2021). Microwave Vacuum Evaporation as a Potential Technology to Concentrate Sugar Solutions: a Study Based on Dielectric Spectroscopy. *Journal of food engineering*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110414>
18. Chua Ls., Leong C.Y. (2020). Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. *Journal of food processing and preservation*, 44(10), e14786. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14786>
19. Khan M., Ghauri Ym., Alvi, T., Amin, U., Khan M.I., Nazir A., Saeed F., Aadil R.M., Nadeem M.T., Babu I. (2022). Microwave Assisted Drying and Extraction Technique, Kinetic Modeling, Energy Consumption and Influence on Antioxidant Compounds of Fenugreek Leaves. *Food science and technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.56020>
20. Електронний ресурс: <http://nanofood.com.ua/>

INNOVATIVE ELECTRODYNAMIC DEHYDRATORS FOR CONCENTRATION OF SOLUTIONS

**Syrotiuk I.V., PhD, associate professor, Slavinska V.O., engineer, Petrovskiy V.V., graduate student
Odesa national university of technology, Odesa, Ukraine**

Abstract. The modern development of technologies for dehydration of food raw materials is aimed at solving one of the main contradictions in the production of food concentrates, namely improving the quality of the product while reducing the energy consumption of the process itself. An analysis of traditional equipment for dehydration of food solutions was carried out. The shortcomings of modern evaporation technologies are identified, among which the lack of the possibility of obtaining high concentrations without harming the nutritional value of the finished product and the long-term thermal load on the raw materials deserve special attention. The prospects of targeted energy delivery technologies for dehydration of liquid food systems, which would allow solving these problems, are substantiated. Electromagnetic sources of energy in the microwave range are defined as a tool for the implementation of such technologies. The scheme of the experimental stand and the results of the study of the effect of field power, concentration and type of raw materials on the intensity of steam productivity are given. The requirements for the main components of the dehydrator are determined. Approbation of the dehydrator module during the concentration of tomato paste was carried out. As a result, it was established that the steam productivity of the module is constant throughout the dehydration process. The efficiency of the module has been proven, it is possible to increase the concentration of the finished product several times while maintaining its quality. The method of calculation and optimization of microwave dehydrators is proposed. An example of calculating the kinetics of concentration of aqueous solutions in a microwave field is given. The obtained results indicate the prospects of the above-mentioned dehydration technologies and the presence of significant raw material and energy reserves.

Key words: concentration, address energy delivery technologies, microwave systems, dehydrator calculation methods.

Список використаної літератури

1. Burdo O.G. Innovation of Energy Technologies of Food Industry in the Context of Global Problems of Humanity. *Scientific Works*, 2021, 85(1), 91–99. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2082>
2. Burdo O.G., Zykov A.V., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V. The Nanotechnological Innovation in Food Industry. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2016, Vol. 6, Is. 3, P. 144–150.
3. Бурдо О.Г., Трішин Ф.А., Яровий І.І. *Енергетичний моніторинг харчових і переробних виробництв*. – Одеса: «Маджента», 2020. – 246с.
4. Burdo O.G. Nanoscale Effects in Food-production Technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2005, Vol. 78, Is. 1, P. 90–96.

5. Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Y.O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2018, 54(2), 210–218.
6. Burdo O.G., Gavrilov A.V., Kashkano M.V., Levtrinskaya Y.O., Syrotyuk I.V., Pylypenko E.A., Terziev S.G. Energy Monitoring of Innovative Energy Technologies of Plant Raw Material Processing. *Problemele energeticii regionale*, 2019, 2(43), 23–38. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3367058>
7. Burdo O.G., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V., Shcherbich M.V. System of Innovative Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration. *Problemele Energeticii Regionale*, 2020, 2(46), 92–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
8. Burdo O., Bezbakh I., Shyshov S., Zykov A., Gavrilov A., Vsevolodov O., Sirotyuk I., Terziev S. Experimental Studies of the Kinetics of Infrared Drying of Spent Coffee Grounds. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, 1(51), 4–10. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.195863>
9. Бурдо О.Г., Альхурі Ю., Пур Д.Р., Левтринська Ю.О. Застосування електромагнітних джерел енергії в інноваційних технологіях переробки харчової сировини. *Наукові праці ОНАХТ*, 2018, 81(2).
10. Бурдо О., Різниченко Т., Ружицька Н. Моделювання процесу концентрування цукрових розчинів в мікрохвильовому вакуум-випарному апараті. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2018, 17(1).
11. Burdo O., Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya J., Marenchenko E. Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 4, 11–88.
12. Wang R., Zhao D.H., Gao Yp., Xu Q., Wu L., Li Z. Power Control in Microwave Drying of Green Turnip. *Drying Technology*, 2021, 40(10), 2153–2163. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1927073>
13. Lei Yd., Chen Jl., Zhang Zh., Deng Xr. Influence of microwave vacuum drying on the effective moisture diffusivity of seedless white grapes. *Food science and technology*, 2022, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.37020>
14. Dincer C. Effect of Intermittent Microwave Vacuum Concentration on Quality Parameters of Apple Juice and Sour Cherry Nectar and Mathematical Modeling of Concentration. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2021, 55(3). <https://doi.org/10.1080/08327823.2021.1952837>
15. Nejad S.L., Shahedi M., Fathi M. Comparative Study of Microwave-Assisted Vacuum Evaporation, Microwave-Assisted Evaporation, and Conventional Evaporation Methods on Physicochemical Properties of Barberry Juice. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(2), 307–317.
16. Bozkir H., Tekgul Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of food processing and preservation*, 2022, 46(6), e15902. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15902>
17. Tao Y., Yan Bw., Zhang N.N., Wang M.F., Zhao Jx., Zhang H., Chen W., Fan Dm. Microwave Vacuum Evaporation as a Potential Technology to Concentrate Sugar Solutions: a Study Based on Dielectric Spectroscopy. *Journal of food engineering*, 2021, 294. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110414>
18. Chua Ls., Leong C.Y. Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. *Journal of food processing and preservation*, 2020, 44(10), e14786. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14786>
19. Khan M., Ghauri Ym., Alvi, T., Amin, U., Khan M.I., Nazir A., Saeed F., Aadil R.M., Nadeem M.T., Babu I. Microwave Assisted Drying and Extraction Technique, Kinetic Modeling, Energy Consumption and Influence on Antioxidant Compounds of Fenugreek Leaves. *Food science and technology*, 2022, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.56020>
20. Електронний ресурс: <http://nanofood.com.ua/>

Отримано в редакцію 29.06.2023

Прийнято до друку 28.11.2023

Received 29.06.2023

Approved 28.11.2023

КОМПЛЕКС МОДУЛЬНИХ ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПЕРВИННОЇ ПЕРЕРОБКИ АГРОПРОДУКЦІЇ

Палагута В.М., канд. техн. наук, доцент, Перетяка С.М., канд. техн. наук, доцент,
Хотін С.Ю., канд. техн. наук, доцент, Савчук Є. В. ст. викладач; Котенко О.В., ст. викладач
Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Робота присвячена рішення актуальній в даний час проблемі впровадження в масове виробництво і експлуатацію геліоенергетичних систем для первинної переробки сільськогосподарської продукції. Технологічні процеси пов'язані з переробкою агропродукції частенько є досить енергоємними і вимагають значного вжитку теплової і електричної енергії, які мають високу вартість. Тому, їх заміна на енергію сонячної радіації могла б дати значний економічний ефект.

Сонячні енергосистеми здатні забезпечувати широкий спектр запитів різних споживачів і перш за все в сфері виробництва і переробки аграрної продукції, таких як гаряче водопостачання, теплофікація, сушіння сільгосппродукції та різних матеріалів та інше.

Але в даний час сонячні енергоустановки для енергозабезпечення вищезгаданих технологічних процесів використовуються досить рідко. Однією з головних причин цього є відсутність єдиної системи стандартизації і уніфікації сонячних теплоенергетичних систем. Для вирішення цієї проблеми в справжній роботі пропонується комплекс модульних геліоенергетичних систем, призначений для енергопостачання споживачів агропромислового сектора економіки.

Він являє собою універсальний набір уніфікованих модулів і блоків за допомогою яких можна буде зібрати різні за функціональним призначенням, потужністю, теплотехнічними параметрами та габаритними розмірами геліоенергетичні системи. Характерною особливістю даного комплексу буде його досить висока мобільність, багатofункціональність, широкий діапазон технологічних регулювань, зручність та простота в експлуатаційному обслуговуванні, а також відносно невисока собівартість.

Впровадження даного комплексу дозволить:

- зменшити собівартість виробництва геліоенергетичних систем приблизно на 50% і приблизно на стільки ж підвищити їх рівень економічної рентабельності;
- спростити їх експлуатаційне обслуговування та скоротити трудомісткість монтажу та демонтажу, зробивши тим самим геліоустановки мобільними;
- розширити сферу їх застосування;
- суттєво спростити завдання організації великосерійного виробництва;
- створювати цілі модельні ряди сонячних енергосистем різного призначення, кожен з яких включатиме декілька однакових по своєму функціональному призначенню, але різних по масогабаритним параметрам і потужності геліоенергетичних установок.

Масове використання запропонованих геліосистем забезпечить агропідприємствам і побутовим споживачам скорочення споживання органічного палива і мережевої електроенергії, що приведе не лише до зниження собівартості переробки сільськогосподарської продукції, але і до скорочення шкідливих викидів в довкілля.

Ключові слова: сонячні енергосистеми, комплекс, геліоколектор, концентратор, енергія, теплоприймач, фоклін, установка, їжа, продукція

Постановка проблеми. Незважаючи на те, що в даний час геліоенергетика знайшла широке застосування в різних сферах життєдіяльності, досі в Україні її використовують в основному для генерації електроенергії як на великих сонячних електростанціях, так і в побутових умовах, у приватних домогосподарствах, фермерських агропідприємствах, дачних ділянках і т.п.

Тим часом сонячні енергосистеми здатні забезпечувати набагато більший спектр запитів різних споживачів і перш за все у сфері виробництва і переробки аграрної продукції, таких як гаряче водопостачання, теплофікація, сушіння сільгосппродукції та різних матеріалів та інше. Аналізуючи поточну ситуацію, можна зробити висновки, що нашій країні розвитку цих напрямів приділяється недостатня увага.

Тим часом, агропромисловий сектор економіки вимагає значна кількість теплової і електричної енергії для первинної переробки агропродукції і найбільш актуальною ця проблема є для відносно невеликих агропромислових підприємств, перш за все на базі фермерських господарств, що бажають не лише вирощувати, але і переробляти сільгосппродукцію.

Однією з основних причин цього є те, що в галузі геліотехніки відсутня єдина система стандартизації та уніфікації сонячних енергосистем. У низці країн, у тому числі й в Україні, існують національні стандарти в

галузі геліотехніки, але вони мають узагальнений характер і призначені головним чином для сонячних електростанцій на базі фотоелектричних елементів і не регламентують багато технічних та санітарно-гігієнічних параметрів теплотехнічних геліосистем, а також виробничо-технологічні та експлуатаційні вимоги до них. Як наслідок цього, існує безліч різних конструктивних пристроїв і експлуатаційних характеристик геліосистем аналогічного призначення, які мають велику кількість оригінальних вузлів і елементів і несумісні один з одним.

Це підвищує собівартість їх виробництва, робить незручними в експлуатації та практично виключає виробничу кооперацію, що у свою чергу перешкоджає організації великосерійного виробництва геліоустановок та їх масових поставок кінцевому споживачеві [1].

Вирішити проблему допоможе комплекс модульних геліоенергетичних установок для первинної переробки агропродукції. Тому, метою даної роботи є розробка геліоенергетичного комплексу, що складається з набору модульних різних по своєму функціональному призначенню сонячних енергоустановок.

Основний текст. Пропонований комплекс геліотехнічних систем призначений для постачання електричною і тепловою енергією споживачів, що працюють в агропромисловому секторі, функціонують не цілий рік залежно від сезону і здатних періодично міняти своє місцезнаходження. Такими є пересувні сушарки сільськогосподарської продукції, теплиці, водоопріснювачі, установки для термічної обробки овочів і фруктів, освітлювальні пристрої а також пересувні житлові комплекси для сільськогосподарських робітників, які можуть бути розташовані в районах, віддалених від магістральних і розподільних енергокомунікацій.

Він буде являти собою універсальний комплекс (набір) уніфікованих модулів і блоків за допомогою яких можна буде зібрати різні за функціональним призначенням, потужністю, теплотехнічними параметрами та габаритними розмірами геліоенергетичні системи.

У комплексі обов'язково будуть присутні такі уніфіковані модулі певних типорозмірів:

- концентратори сонячної радіації змінної геометрії;
- універсальні теплоприймачі, що генерують як теплову, так і електричну енергію;
- корпуси колекторів;
- опорно-силові конструкції та підйомно-поворотні пристрої.

Також стандартизовані та уніфіковані будуть усі сполучні, комутаційні та кріпильні елементи.

Для управління та контролю за роботою геліоустановок запропоновано вимірювально-керуючий модуль, що складається з електронно-цифрових контрольно-вимірювальних приладів та керуючих систем, що випускаються серійно. Його використання дозволить забезпечити безперебійну роботу геліоустановок як в автоматичному режимі, так і керувати ними дистанційно в ручному режимі з єдиного пульта управління.

Характерною особливістю даного комплексу буде його досить висока мобільність, яка забезпечується невеликою масою геліоенергетичних установок і їх модулів, можливістю швидкого монтажу та демонтажу, зручністю транспортування.

До переваг модульних геліоенергетичних систем слід також віднести їх багатофункціональність, широкий діапазон технологічних регулювань, зручність та простота в експлуатаційному обслуговуванні, а також відносно невисока собівартість [1, 2].

З уніфікованих модулів та елементів можуть бути створені такі пристрої:

- комбіновані концентруючі геліоколектори для генерації як електричної так і теплової енергії за рахунок нагрівання охолоджуючих рідин та отримання пари низьких параметрів;
- освітлювальні пристрої на базі енергопостачальних складних плоских фотоелектричних панелей;
- геліоустановка для приготування їжі;
- установка для сушіння овочів, фруктів, зернокультур та іншої рослинної продукції.

Як додаткова опція за бажанням замовника в комплект геліоенергетичних пристроїв може бути включена складна водоопріснювальна геліоустановка, виготовлена з еластичних матеріалів [3].

Докладніше зупинимося на конструкції двох геліоенергетичних пристроїв, що входять в пропонований комплекс: комбінованому концентруючому геліоколекторі та геліоенергетичній установці для приготування їжі.

Комбінований геліоколектор, оснащений лінійними системами, що концентрують «Двогранный плоский фоклін – фотоелемент» представлений на рис. 1, де позицією (1) показаний корпус геліоколектора, (2) – фоклін, (3) – фотоелементи.

У нижній частині колектора безпосередньо під фотоелементами розташована порожнина (4), через яку в процесі роботи установки пропускається вода, яка охолоджує фотоелементи. Це дозволяє підвищити міру концентрації сонячної радіації, виключивши перегрів фотоелементів. Підігріта вода може використовуватися для опалення та побутових потреб. Верхнє покриття колектора (5) скляне.

Основними геометричними параметрами Д-фокліна є: ширина вхідного отвору - D , ширина вихідного отвору - d , висота фокліна - H , ширина грані фокліна - L . Відношення ширини вхідного і вихідного отворів фокліна називається геометричним коефіцієнтом концентрації - $K = D/d$.

Кут між нормаллю до площини вхідного і вихідного отвору фокліна і його гранню називається параметричним кутом - α , а кут між гранями фокліна називається кутом розкриття- β [4].

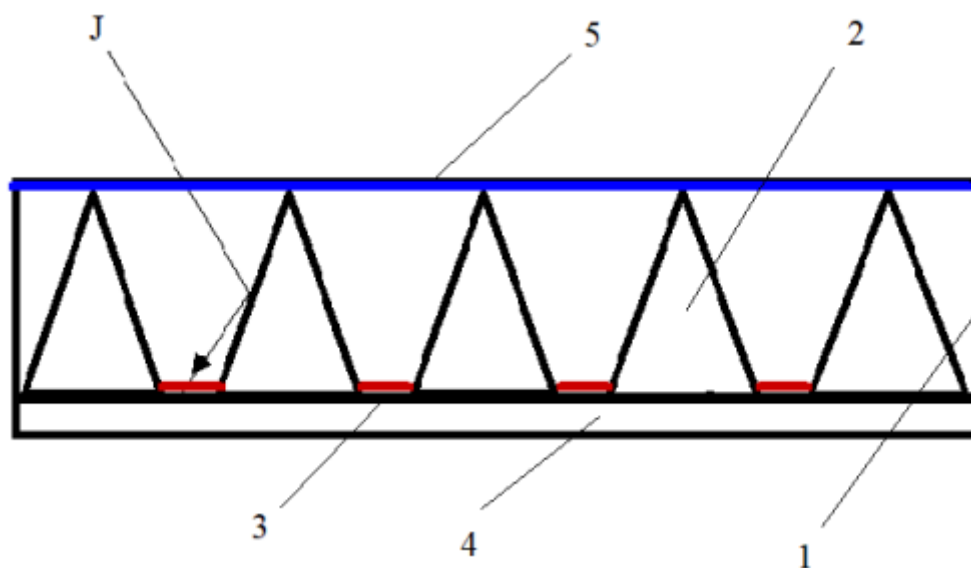


Рис. 1 – комбінований концентруючий фотоелектричний геліоколектор

Геліоконцентратори типу двогранні плоскі фокліни є простими у виготовленні, зручними в експлуатації, мають низьку собівартість та не вимагають систем доbowого стеження по сонцю. Їх застосування дозволить у 2,5-3 рази скоротити загальну площу фотоелементів, собівартість яких значно вища, що призведе до зниження вартості геліоустановки, за збереження обсягу виробництва електроенергії з одиниці площі робочої поверхні геліоколектора.

Визначимо теплову і електричну потужність комбінованого концентруючого геліоколектора.

Теплова потужність визначається по формулі [1, 4],

$$P = K Y J S \rho \tau \lambda \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}; \quad (1)$$

де: K - коефіцієнт концентрації сонячної радіації,

Y - геометричний коефіцієнт пропускання сонячної радіації фокліна;

J - щільність сонячної радіації, Вт/м²;

S - площа робочої поверхні геліоколектора, м²;

λ - коефіцієнт поглинання сонячної радіації фотоелементами;

ρ - коефіцієнт відблиску дзеркальних граней фокліна,

τ - коефіцієнт пропускання сонячної радіації скляним покриттям геліоколектора.

Геометричним коефіцієнтом пропускання називається відношення кількості сонячної енергії, що потрапляє на вхідний отвір фокліна, до кількості енергії, що виходить з вихідного отвору. Він залежить від кута падіння сонячних променів на поперечний перетин фокліна - X, а також від його параметричного кута і визначається по формулі [5],

$$Y = (\sin \alpha + \sin(\alpha - x)) / (2 \sin \alpha \cos x), \quad (2)$$

Електрична потужність даного геліоколектора визначається з розрахункового співвідношення [1],

$$P = K Y J S \rho \tau \eta \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}; \quad (3)$$

де η - КПД фотоелементів.

Виконані розрахунки показують, що на території Одеської області в літній період максимальна теплова потужність під час астрономічного півдня з 1 м² робочої площі геліоколектора складе 680-700 Вт, а його середньодобова теплова потужність буде знаходитися в районі 350 Вт. Максимальна питома електрична потужність з 1 м² робочої площі даного геліоколектора складе близько 120 Вт, а середньодобове значення цього параметра буде близько 60 Вт [1, 3].

Проблема приготування їжі в польових умовах без використання органічного палива залишається актуальною і в даний час. Зокрема, пропонувані для цієї мети різні сонячні енергоустановки, мають високу вартість, значну масу і габаритні розміри і тому незручні при транспортуванні. Для їх збірки і налаштування на місці роботи, а також подальшого демонтажу потрібний значний час. Саме тому, розроблені раніше моделі геліоустановок для приготування їжі не набули широкого поширення.

Геліонергетична установка для приготування їжі, що пропонується, може бути використана для приготування різноманітного харчування на сільськогосподарських угіддях, на присадибних ділянках, містах відпочинку, а також у важкодоступних та віддалених районах де бракує органічного палива.

Геліосистема (рис. 2) являє раму з трьома опорами (1), на котрій монтується концентратор сонячної радіації перемінної геометрії, типу двогранний плоский фоклін (2). У вихідному отворі концентратора встановлено спеціальні ємкості для їжі (3 та 4), або рожен. Перша ємкість зображає герметичну закриту циліндричну капсулу для виготовлення рідкої їжі або гарячих напоїв, а друга – є жолобоподібним листом для других страв. За бажання замовника установка може комплектуватися газовою пальницею з регулятором інтенсивності горіння (5), котра монтується під днищем капсули і трубопроводом (6) з'єднується газовим балоном (7), який при необхідності закріплюється у лівій частині установки. Стоянки кріплення граней фокліна забезпечені шарнірами (8), з допомогою яких змінюють кут нахилання та коефіцієнт концентрації сонячної радіації [6].

Вночі та при хмарній погоді їжу готують, використовуючи газову запальничку.

Геліоустановка, має ряд переваг у порівнянні з вже відомими сонячними енергосистемами аналогічного призначення. Передусім це можливість готування не тільки твердої їжі, але й «перші страви» і різноманітні гарячі напої. Установка має змогу нагрівати воду для різних побутових потреб.

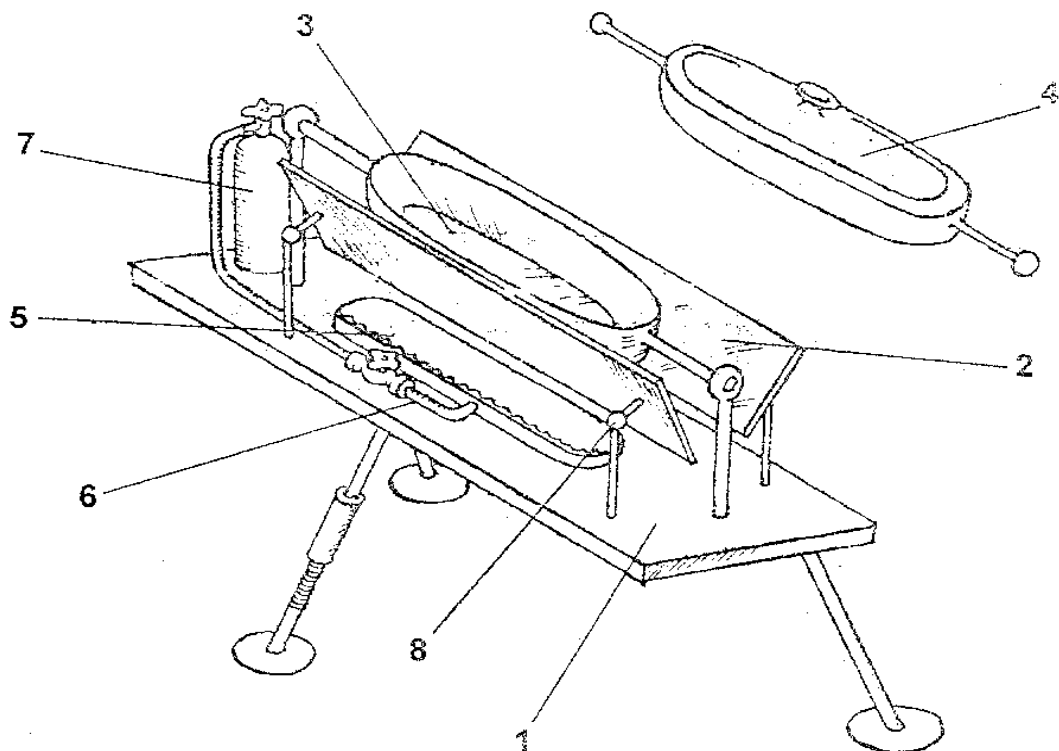


Рис. 2 – Геліоенергетична установка для приготування їжі

Концентратор перемінної геометрії дозволяє встановити режими термічної обробки їжі різної інтенсивності [6, 7]. Крім того, вона не вимагає включення в свою конструкцію систем добового стеження за положенням Сонця, що значно знижує її собівартість в порівнянні з іншими аналогічними по потужності і можливостям геліосистемами.

Легка, розбірна і у той же час проста конструкція установки робить її зручною для транспортування та при експлуатації. Час монтажу та демонтажу конструкції не перевищує п'яти хвилин. У комплект вищеприписаної геліосистеми входить спеціальний футляр, призначений для її розміщення в розібраному вигляді при перевезенні або тривалому зберіганні.

Пропонується модельний ряд, що містить три геліоустановки для готування їжі, які відрізняються розміром, функціональними можливостями та тепловою потужністю. При цьому слід зазначити, що не менше 40% деталей і вузлів для всього модельного ряду вищеприписаних геліоустановок будуть уніфікованими.

Висновки. Впровадження даного комплексу дозволить:

- зменшити собівартість виробництва геліоенергетичних систем приблизно на 50 % і приблизно на стільки ж підвищити їх рівень економічної рентабельності;
- спростити їх експлуатаційне обслуговування та значно збільшити ремонтпридатність;
- скоротити трудомісткість монтажу та демонтажу, зробивши тим самим геліоустановки мобільними;
- розширити сферу їх застосування.

- зробити геліосистеми сумісними як одна з одною, так і з енергетичними системами інших типів
- суттєво спростити завдання організації великосерійного виробництва.
- створювати цілі модельні ряди сонячних енергосистем різного призначення, кожен з яких включатиме декілька однакових по своєму функціональному призначенню, але різних по масі, габаритним параметрам і потужності геліоенергетичних установок.

Крім того масове використання запропонованих геліосистем забезпечить агропідприємствам і побутовим споживачам скорочення споживання органічного палива і мережевої електроенергії до 40%, що приведе не лише до зниження собівартості переробки сільськогосподарської продукції, але і до скорочення шкідливих викидів в довкілля.

Все вищесказане дозволить реалізувати більш масове використання геліотехнічних систем як для первинної переробки агропродукції так і в інших сферах економіки, а також для побутових потреб індивідуальних користувачів чим в даний час, забезпечуючи практично всі їхні потреби в енергопостачанні у весняно-літній період.

References

1. Khotin S.YU., Shpota O.O. (2007) Universal'ni modul'ni helioenerhetychni systemy *Tekhnichni problemy*, 2, 104-111.
2. Dzhon A. Daffi, Vil'yam A. Bekman. (2013) *Heliotekhnika teplovykh protsesiv*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., , 888 p.
3. Khotin S.Yu. (2008) Enerhopostachannya ob'yektiv infrastruktury mors'kykh portiv i terminaliv za rakhunok sonyachnoyi enerhiyi II *mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya «Suchasni porty – problemy ta shlyakhy vyryshennya»*. Tezy dopovidey. Odesa-Stambul., 102-105.
4. Nemykina O.V. (2020.) *Vidnovlyuvani ta al'ternatyvni dzhherela enerhiyi. Dlya studentiv spetsial'nosti 141 Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika*, NU «Zaporiz'ka politekhnika», 188 s.
5. S.Yu. Khotyn, V. M. Palahuta, B. I. Strykysa (2003) Perspektivni proekty kontsentruiyuchykh sonyachnykh enerhosystem [Prospective designs of concentrating solar energy systems] *Tekhnichni problem*, 3, 46-53.
6. Khotin S.YU. (2000) Helioenerhetychna ustanovka dlya pryhotuvannya yizhi v pol'ovykh umovakh [Helioenergy installation for cooking food in field conditions]. *Ahrarnyi vysnik Prychornomoria*, 3 (11), 133-137.
7. Mysak YU. S. (2014) *Sonyachna enerhetyka [Solar energy]*. L'viv: L'vivs'ka politekhnika, 340

COMPLEX OF MODULAR HELIO ENERGY INSTALLATIONS FOR PRIMARY PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTS

Palaguta V.M., PhD, Associate Professor, Peretiaka S.M., PhD, Associate Professor,
Khotin S.Y., PhD, Associate Professor, Savchuk Y. V. sn. lecturer; Kotenko O.V., sn. lecturer
Odessa National Maritime University

Abstract. The work is devoted to the solution of the currently topical problem of introduction into mass production and operation of solar energy systems for the primary processing of agricultural products. Technological processes related to the processing of agricultural products are often quite energy-intensive and require significant consumption of thermal and electrical energy, which have a high cost. Therefore, their replacement with solar radiation energy could give a significant economic effect.

Solar energy systems are able to satisfy a wide range of consumer needs, primarily in the field of production and processing of agricultural products, such as hot water supply, heating, drying of agricultural products and various materials, etc.

However, today, solar power plants are rarely used to provide energy for the aforementioned technological processes. One of the main reasons for this is the absence of a single system of standardization and unification of solar thermal energy systems. In order to solve this problem, this paper proposes a complex of modular solar energy systems intended for energy supply to consumers of the agro-industrial sector of the economy.

It is a universal set of unified modules and blocks, by means of which it will be possible to assemble solar energy systems that differ in functional purpose, power, thermal parameters and overall dimensions. A characteristic feature of this complex will be its high mobility, multifunctionalness, a wide range of technological adjustments, convenience and easiness of operation and maintenance, as well as a relatively low cost.

Implementation of this complex will allow to:

- reduce the production cost of solar energy systems by approximately 50% and increase their economic profitability by approximately the same amount;
- simplify their operational maintenance and reduce the labor-intensiveness of installation and dismantling, thus making solar installations mobile;

- expand the field of their application;
- significantly simplify the task of organizing multi-series production;
- create continuous model series of solar energy systems of various purposes, each of which will include several solar power plants that are identical in terms of their functional purpose, but different in terms of mass, dimensions and capacities.

Mass use of the proposed solar systems will provide agricultural enterprises and household consumers with a reduction in the consumption of organic fuel and network electricity, which will lead not only to reduction in the cost of processing agricultural products, but also to reduction in harmful emissions into the environment.

Keywords: solar energy systems, complex, solar collector, concentrator, energy, heat receiver, foklin, installation, food, production

Список використаної літератури

1. Хотін С.Ю., Шпота О.О. Універсальні модульні геліоенергетичні системи // Проблеми техніки. 2007 № 2. С. 104-111.
2. John A. Duffie William A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes: Training and Reference Manual. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013, 888 с.
3. Хотин С. Ю. Энергоснабжение объектов инфраструктуры морских портов и терминалов за счёт солнечной энергии // II международная научно-практическая конференция «Современные порты – проблемы и решения». Тезисы докладов. Одеса-Стамбул. 2008. С. 102-105.
4. О.В. Немикіна Поновлювальні та альтернативні джерела енергії. Для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка: навч. посібник // Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020, 188 с.
5. Хотин С. Ю., Палагута В.М., Стрикица Б. И. Перспективные конструкции концентрирующих гелиоэнергетических систем // Проблеми техніки. № 3. 2003., С. 46-53.
6. Хотін С.Ю. Геліоенергетична установка для приготування їжі у польових умовах // Аграрний виснік Причорномор'я: збірник наук праць. Одеський ДСПГ. Одеса. Випуск № 3 (11). 2000., С 133 -137.
7. Мисак Й. С. Сонячна енергетика. Видавництво: Львівська політехніка, 2014, 340 с.

Отримано в редакцію 29.06.2023

Прийнято до друку 29.11.2023

Received 29.06.2023

Approved 29.11.2023

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ СИРОВИННИХ ПОТОКІВ КОВБАСНОГО ВИРОБНИЦТВА

Ощипок І. М. д-р техн. наук, професор
Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів

Анотація. В статті розглянуто питання розробки процесу формалізації надходження м'ясної сировини на переробку при виготовленні ковбасних виробів. Оскільки м'ясо — перш за все, основне джерело тваринного білка завдяки своїм багатством незамінних амінокислот, що відносить його до повноцінних білків, важливо в технології його переробки зберегти притаманні йому властивості. Найбільше в Європейській частині споживається свинячого м'яса і яловичини, менше овець. Завдяки високому виходу туші, вважається, що тварини відіграють важливу роль у виробництві м'яса в країні. Наявність значної кількості води в м'ясі, високої біологічної цінності білків робить його цінною сировиною для збалансованого харчування. Щоб забезпечити ефективність процесу переробки в сучасних умовах різного за своїм походженням, фізико-хімічними властивостями м'ясної сировини, слід застосовувати методи з комп'ютерним моделюванням та розробленням належного забезпечення програмами. В процесі розроблення програмних продуктів, які щільно пов'язані з областю управління проектами, отримане програмне забезпечення вважається оригінальним результатом. Організація цього процесу впливає на основні показники передбачені в проекті - строки виконання, розрахований бюджет, якість розробки. Але вміле управління проектами не може гарантувати досягнення зазначених показників. Значну роль у цьому відіграє архітектура розроблених програм, досвід і кваліфікація членів команди яка приймала участь в розробці, а також регулярну фіксацію всіх етапів в процесі розробки таких програм. Тут враховані різні українські та міжнародні стандарти, що регламентують організацію процесу розробки, документування окремих послідовних етапів призначених для застосування фахівцями і дослідниками з розробки і проектування комп'ютерних моделей і програмного забезпечення виготовлення ковбасних виробів. Ще один тип знань, якого так не вистачає сьогодні на підприємствах, стосується кінетики явищ, і зокрема їх залежності від умов виробництва (температури, активності вода, рН тощо). Однак кінетика є важливою інформацією для високоєфективного ведення процесу переробки яку важливо враховувати. Запропоновано ефективність ковбасного виробництва досягти шляхом формалізації потоку різної м'ясної сировини за допомогою методів математичного програмування і застосуванням комп'ютерних технологій з врахуванням нестабільної якості використовуваної м'ясної сировини при виробництві ковбасних виробів.

Ключові слова: м'ясо, технологія, проектування комп'ютерних моделей, програмне забезпечення, ковбасні вироби.

Постановка проблеми в загальному вигляді та зв'язок із найважливішими науковими чи практичними завданнями. М'ясна промисловість здійснює переробку немалой кількості сировини, що застосовується у виробництві широкого спектру ковбасних виробів. Можемо згадати, як ілюстрацію до сказаного, продукти рослинного походження (у вигляді зерна, листків, бульб, стебел тощо), продукти тваринного походження (м'ясо, молоко та всі інші похідні), складні продукти і речовини промислово синтезовані біологічним шляхом (ферменти, ароматизатори тощо).

Споживчі характеристики готового продукту є відображенням трансформацій, які відбуваються під час його виробництва. Виріб, отриманий за відповідною технологією характеризується належними фізичними властивостями, такими як вміст води, активність води; органолептичними властивостями, такими як колір, аромат і текстура, поживними властивостями (вмістом жиру, вітамінів тощо); показниками стабільності, такими як інактивація ферментів і мікроорганізмів. Окрім стандартних вимог до продукції, існують обмеження на промислове виробництво. Врахування всієї складності технології виробництва ковбасних виробів вимагає співпраці різноманітних спеціалістів: біологів, технологів, біохіміків, фахівців харчової науки і харчування, виробництв з різними підходами та науковими методами. Тому є необхідний комплексний підхід, виходячи з масштабів виробництва за допомогою впровадження комп'ютерних технологій.

Різноманітність і взаємодія притаманних, при переробці м'яса явищ означає, що знання цих механізмів все ще обмежено враховуються при виготовленні ковбасних виробів. Наприклад, процес формування текстури під час варіння ковбас, денатурації білків під час стерилізації або шляхи синтезу ароматичних сполук різними мікроорганізмами все ще залишаються у сфері фундаментальних досліджень. Проте цей тип знань в даний час зустрічається часто і достатньо добре відомий, щоб бути придатним для моделювання та виконання роботи з виготовлення ковбасних виробів. Крім того, в процесі виробництва цікавляться термодинамічними та хімічними властивостями органічних сполук в продуктах харчування (білки, жири, ароматизатори тощо), а також їх взаємні взаємодії в матриці виробу, відносно невідомі. Існуючі бази даних, з проведе-

них робіт в хімічній інженерії, обмежувані певними типами молекул і існуючих матриць, які загалом нерепрезентативні для застосування у харчовій промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проєктуванням програмного забезпечення технологічного процесу виготовлення м'ясних виробів займалися Токарев А. В., Красуля О. Н. в задачі оптимізації керуючих впливів у рецептурах ковбасних виробів за наявності технологічних дефектів, Джарратано Д., Райлі Г., Чорний А. І., Попов Ф. А. досліджували проблеми і принципи побудови інтерфейсів користувача інформаційних систем й інші автори в працях[1,4,6,7]. Розглянуте композиційне проєктування вареної ковбаси, карти підключення: моделювання та аналіз зв'язків у процесах розробки продукту теорію та методи статистики і розробки експериментальних планів сумішевих систем з багатокомпонентними обмеженнями в працях [11, 12].

Розробка програмного забезпечення технологічного процесу [1] включає наступні операції:

–формування вимог до програмного продукту, який професійно та точно відображає мету та завдання програмної моделі;

– склад і уточнювання об'єктів програмного забезпечення (ПЗ) і структуру зв'язків між блоками програмного продукту (так звані програмні модулі);

– склад і структура зв'язків між складовими програмної розробки, методики виконання проєкту, узгоджено з якими застосовуються алгоритми обробки інформації, визначення інформаційних систем проєктування, які використовують для розроблення моделі;

– розробка технічного проєкту.

Постановка завдання. Враховуючи вищевикладене і оцінюючи складність м'яса як предмета праці, досягти ефективності ковбасного виробництва можна шляхом формалізації потоку різної м'ясної сировини за допомогою методів математичного програмування і застосуванням комп'ютерних технологій.

Пропонована технологія розв'язання даної задачі передбачає врахування нестабільної якості використаної м'ясної сировини при виробництві ковбасних виробів, зокрема варених ковбас. Використання методів математичного програмування у виробничих умовах дозволяє значно звузити пошук рішень, і тим самим створити своєрідний «фільтр» для вибору оптимальної рецептури.

М'ясо характеризується великою неоднорідністю, воно в основному складається з поперечно-смугастих скелетних м'язів, до складу яких також входять інші тканини сильно варіює залежно від виду, породи, віку, раціону та регіону, анатомічного складу. Здебільшого це сполучні тканини, іноді жирові кістки та шкіра. М'ясо для виробництва ковбасних виробів поділяється за кольором на червоне та біле, за вмістом жиру: нежирне м'ясо та з більшим-вмістом жиру. Червоне м'ясо - це всі частини туші домашніх тварин придатні для споживання людиною, таких як велика рогата худоба, вівці, кози, коні. До білого м'яса відносяться всі їстівні частини птиці і кроликів. Колір м'яса також дозволяє класифікувати його: домашня птиця з білим м'ясом (кури та півні) та рожеве м'ясо (фермерські кролики) [9].

Виклад основного матеріалу дослідження. При виробництві ковбасних виробів слід враховувати можливі нелінійні обмеження, що накладаються на якісні характеристики, або можливий нелінійний критерій сировини. Це може призвести до того, що формально оптимальна рецептура буде не адекватною споживчим вимогам. Для вирішення вищезгаданої проблеми в системі управління технологічним процесом є необхідність розробки аналізу вхідних матеріальних потоків м'ясної сировини при виробництві ковбасних виробів обумовленою неможливістю в даний час створення математичних моделей, що дозволяють у виробничих умовах розрахувати всі показники якості готової продукції при нестабільній якості використовуваної сировини. База наявних знань, що бере участь у процедурі розробки оптимальної рецептури, проєктується окремим модулем і є набором окремих сутностей в основі набутих знань. Ці сутності відображають знання предметної галузі (виробництво ковбасних виробів) та накопичений виробничий досвід технологів щодо усунення технологічних дефектів в умовах нестабільності якості використовуваної сировини. Нині такі розробки для ковбасного виробництва ще слід досліджувати.

Реалізація перетворення також дуже різноманітні, наприклад рис. 1:



Рис. 1 – Реалізація перетворення м'ясної сировини для ковбас

Процеси перетворення сировини є складними, деякі з них проходять кілька типів трансформацій, як

правило, відбуваються одночасно, під час однієї і тієї ж операції. Наприклад, під час смаження відбуваються фізичні явища, такі як передача тепла шляхом конвекції та провідності, фазові переходи (замерзлої води до рідини та пари), біохімічні явища, такі як реакції побуріння, зміна стану крохмалю, утворення ароматичних сполук, тощо, а також біологічні явища, що призводять до інактивації мікроорганізмів.

Основна операція управління на етапі оперативного планування: виробництва ковбасних виробів є «Скласти результативну рецептуру і виробничі завдання». Розглянемо теоретико-множинну постановку завдань, пов'язаних з цією операцією.

Нехай в момент часу T задано:

- наявну кількість сировини у вигляді ряду $X(T)$

- можливу кількість потоків $X(T, i)$:

$$X(T, i) = \langle X(T, i, 1), X(T, i, 2), \dots, X(T, i, K + 1) \rangle \quad (1)$$

де $X(T, i, 1)$ - кількість i -ї сировини в камерах за час T ,

$X(T, i, 2), \dots, X(T, i, K)$ - показники якості i -ї сировини в камерах в момент T ,

K - кількість показників якості,

$$X(0) = \emptyset$$

$$X(T) = \bigcup_{i=1}^N x(T, i) \quad (2)$$

$$N = |X(T)|$$

N - наявна кількість допоміжних матеріалів у вигляді

$X_{vsm}(T)$ - наявна кількість потоків: $X_{vsm}(T, i)$

$$X_{vsm}(T, i) = \langle X_{vsm}(T, i, 1), X_{vsm}(T, i, 2), \dots, X_{vsm}(T, i, K_v + 1) \rangle \quad (3)$$

де $X_{vsm}(T, i, 1)$ - кількість допоміжного матеріалу i -го виду на складі в момент T ;

$X_{vsm}(T, i, 2), \dots, X_{vsm}(T, i, K_v + 1)$ - показники якості i -го виду допоміжних матеріалів на складах в час

T ;

K_v - вибрані показники якості i -го виду допоміжного матеріалу,

$$X_{vsm}(0) = \emptyset$$

$$X_{vsm}(T) = \bigcup_{i=1}^x x_{vsm}(T, i) \quad (4)$$

$$N_v = |X_{vsm}(T)|$$

У момент часу T задано планове завдання на виробництво ковбасних виробів:

$$P_z(T) = \langle P_z(T, 1), P_{zmax}(T, 2), \dots, P_{zmax}(T, L), P_{zmin}(T, 2), \dots, P_{zmin}(T, N_p) \rangle \quad (5)$$

де $P_z(T, 1)$ - обсяг запланованого виробництва ковбаси;

$P_{zmax}(T, 2), \dots, P_{zmax}(T, L)$ - максимально допустимі показники якості ковбасних виробів;

$P_{zmin}(T, 2), \dots, P_{zmin}(T, L)$ - мінімально допустимі показники якості ковбасних виробів.

N_p - кількість показників якості готової продукції.

Необхідно визначити:

На заданому інтервалі dT слід синтезувати оператор U , який формує потік $R(T + dT)$:

$$R(T + dT) = U(X(T), P_z(T), ORec(T)) \quad (6)$$

де $R(T + dT) = \langle X_p(T + dT), X_{pvsm}(T + dT), F_p(T + dT) \rangle$

$X_p(T + dT)$ - наявна кількість сировини, передбачена для використання в проміжку $[T, T + dT]$ під час виготовлення продукції;

$X_{pvsm}(T + dT)$ - наявна кількість допоміжних матеріалів, запланована для використання в проміжку $[T, T + dT]$ на виготовлення продукції;

$F_p(T + dT)$ - виробі, заплановані для виготовлення в проміжку $[T, T + dT]$;

$F_p(T + dT) = \langle F_p(T + dT, 1), F_p(T + dT, 2), \dots, F_p(T + dT, N_p) \rangle$;

$F_p(T + dT, 1)$ - обсяг за планом при виробництві продукції,

$F_p(T + dT, 2), \dots, F_p(T + dT, N_p)$ - показник якості виробленої продукції;

$ORec(T)$ - результативна рецептура, розроблена в момент часу T .

Нехай $F_f(T + dT)$ - потік фактично виробленої продукції в інтервалі $[T, T + dT]$:

$F_f(T + dT) = \langle F_f(T + dT, 1), F_f(T + dT, 2), \dots, F_f(T + dT, N_p) \rangle$,

$F_f(T + dT, 1)$ - вироблена продукція в проміжку $[T, T + dT]$;

$F_f(T + dT, 2), \dots, F_f(T + dT, N_p)$ - вироблена продукція з необхідним показником якості,

Для забезпечення виконання запропонованих співвідношень напишемо оператор U_{dop} :

$$k(P_{zmin}(T + dT, k) \leq F_p(T + dT, k) \leq P_{zmax}(T + dT, k)), k = 2, \dots, N_p \quad (7)$$

$$k(P_{zmin}(T + dT, k) \leq F_f(T + dT, k) \leq P_{zmax}(T + dT, k)), k = 2, \dots, N_p \quad (8)$$

Записані нерівності (7), (8) дозволять отримати продукцію необхідної якості.

При умові що $X_n(T + dT)$ - наявна кількість сировини, що надійшла в камери, в інтервалі $[T, T + dT]$,

то наявна кількість сировини в момент $T + dT$ визначиться співвідношенням:

$$X_n(T+dT) = X(T) \cup X_n(T+dT) \setminus X_p(T+dT) \quad (9)$$

Аналогічно для допоміжних видів матеріалів маємо такі співвідношення:

$$X_{vsm}(T+dT) = X_{vsm}(T) \cup X_{vsmn}(T+dT) \setminus X_{vsmp}(T+dT) \quad (10)$$

де $X_{vsm}(T + dT)$ - наявна кількість допоміжних матеріалів на складі в момент $T + dT$, X_{vsm} ;

(T) - наявна кількість допоміжних матеріалів на складі в момент T ;

$X_{vsmn}(T + dT)$ - наявна кількість допоміжних матеріалів, що надійшла на склад в інтервалі $T + dT$,

$X_{vsmp}(T + dT)$ - наявна кількість допоміжних матеріалів, що плануються до використання в інтервалі $T + dT$.

Нехай

$$S1(T) = \sum_{i=1}^l Pz(t,1)$$

$$S2(T) = \sum_{i=1}^l Fp(t,1)$$

$$S3(T) = \sum_{i=1}^l Ff(t,1)$$

Тоді процес виробництва ковбасних виробів можна уявити на площині станів $\langle S, T \rangle$, представленого на рис. 2. На цьому рисунку показані сумарні планові завдання $S1(T)$, пунктирними сходящими - сумарні виробничі завдання $S2(T)$, а суцільна крива лінія відображає фактичний сумарний обсяг виробленої ковбасної продукції до моменту $S3(T)$.

Допустимий оператор U_d забезпечує переведення процесу зі стану $\langle 0,0 \rangle$ в стан $S2(T)$ при

$$S1(T) - S2(T) \leq \delta P1. \quad (11)$$

$$S1(T) - S3(T) \leq \delta P2. \quad (12)$$

де $\delta P1$ - допустиме відхилення оперативного завдання від планового,

$\delta P2$ - допустиме відхилення фактичного випуску від планового.

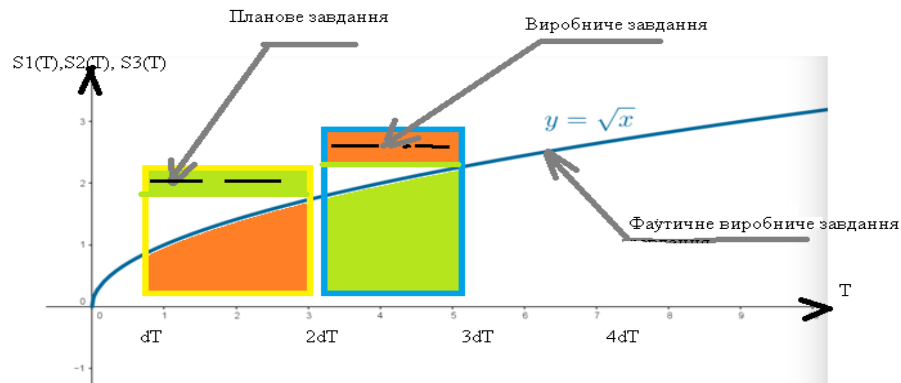


Рис. 2 – Процес виробництва на площині стану в порівнянні з прогнозованим фактичним виробничим завданням прийнятим у вигляді графіку $y = \sqrt{x}$

Оператори оптимальний U_o і допустимий $U_{доп}$ які забезпечують оптимальну вагомість прийнятого критерія ефективності Q (вартість м'ясопродуктів).

В силу багатоетапності і складності технологічного процесу виробництва ковбасних виробів оператор U представимо набором операторів:

$$U = \bigcup_{i=1}^4 U_i \quad (13)$$

де U_1 -оператор, який формує X_p - наявну кількість сировини для переробки.

Відповідно з плановим завданням вибирається величина $X_p(T)$ для виготовлення продукції:

$$X_p(T) = U_1(X(T), Pz(T)) \quad (14)$$

На підставі обраної підмножини $X_p(T)$ оператором U_2 формується перелік напівфабрикатів для приготування фаршу:

$$\langle Y(T), X_{vsmp}(T) \rangle = U_2(X_p(T), P_z(T)) \quad (15)$$

де $Y(T) = \{y(T,i)\} \quad i=1,...,|Y(T)|$;

$$y(T,i) = \langle y(T,i,1), y(T,i,2), \dots, y(T,i,M) \rangle$$

$y(T,i,1)$ - кількість i -го напівфабрикату,

$y(T,i,2), \dots, y(T,i,M)$ - ознака якості i -го напівфабрикату;

M - кількість показників якості i -го напівфабрикату;

$X_{\text{vsmp}}(T)$ – наявна кількість допоміжних матеріалів, використовуваних в інтервалі $T + dT$ при формуванні фаршу.

На підставі кількості сировини $Y(T)$ оператором $U3$ формується фарш $Z(T)$:

$$Z(T) = U_3(Y(T), P_z(T), R),$$

$$Z(T) = \langle Z(T, 1), Z(T, 2), \dots, Z(T, N_f) \rangle \quad (16)$$

де $Z(T, 1)$ - планова кількість фаршу;

$Z(T, 2), \dots, Z(T, N_f)$ - показники якості фаршу;

N_f - кількість показників якості фаршу.

Фарш $Z(T)$ оператором $U4$ перетворюється в планову готову продукцію $Fp(T + dT)$:

$$Fp(T + dT) = U4(Z(T), P_z(T)) \quad (17)$$

Не вирахуваний потік фактично виробленої продукції $Ff(T + dt)$ формується з звітної документації підприємства.

Таким чином, формалізований потік різної м'ясної сировини для отримання результативної рецептури і виробничого завдання за допомогою методів математичного програмування і застосуванням комп'ютерних технологій.

Висновок. Розроблений формалізований метод для математичного програмування дозволить у виробничих умовах значно звузити пошук рішень, і тим самим створить своєрідний «фільтр» для вибору оптимальної рецептури.

При дослідженні розглядуваної тематики слід поглиблювати фундаментальні знання з вимірювання важливих властивостей ковбасних виробів, в реальному часі та в виробничих умовах. До таких властивостей слід включати активність води, яка важлива для збереження численних м'ясопродуктів та концентрацію ароматичних сполук, які є дуже малими, але важливими для органолептичного сприйняття. Усунення труднощів, пов'язаних з вимірюванням цих показників на виробництві.

References

1. Oshchypok I. M., Rozroblennya arkhitektury proqramnoho zabezpechennya ta interfeysu korystuvacha u tekhnolohiyi m'yasnykh vyrobnystv. Visnyk L'viv's'koho torhovel'no-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky. No 30, 2022. S.53-59. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-30-07>
2. Barriero Mendez J.A. Modelaje matematico para la prediction de nutrientes en el procesamiento termico de alimentos: una revision // Rev. Latinoamer. Tfanst. Col. Mat., 1983, vol.7, № 1, pp.3-14.
3. Flores, M. (2016). Sausages and Comminuted Products: Cooked Sausages. Encyclopedia of Food and Health, 722-727. doi: 10.1016/b978-0-12-384947-2.00613-9
4. Kerry Joseph, Kerry John, Ledward David. Meat processiong: Improving Quality. Woodhead publishing limited, 2002. – 443 p.
5. Kotsymbas, I. Y., Kotsymbas, G. I., & Shchepentovskaya, O. M. (2011). Examination of semi-finished products of meat and meatvegetable sections by microstructural method. Lviv: Afisha (in Ukrainian).
6. MacDougall D.B., Allen R.A. Mathematical Modelling in Meat Processing. -N. Y., 1984.- pp. 298-300
7. Paliy, A. P., Zavgorodniy, A. I., Stegnyy, B. T. & Palii, A. P. (2020). Scientific and methodological grounds for controlling the development and use of disinfectants. Kharkiv: Miskdruk. (In Ukrainian)
8. Potoroko I. I., Krasulia O. N., Tokarev A. V. Innovative solutions in management of process and accounting tasks at meat industry enterprises s a product quality factor. Economics & Management Research Journal of Eurasia. 2014. No 1. C. 58–65.
9. Sablani Shyam S., Rahman M. Shafiur, Datta Ashim K., Mujumdar Arun S. Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. – 613 p
10. Snee Ronald D. Experimental designs for mixture systems with multicomponent constraints. Communications in Statistics Theory and Methods. – 1979. – pp.303 – 326.
11. Yassine, A., Whitney, D., Daleiden, S., Lavine, J., (2003). Connectivity maps: Modeling and analysing relationships in product development processes. Journal of Engineering Design 14, 377–394. <https://doi.org/10.1080/0954482031000091103>
12. Yulia A. Diner, Natalia A. Yurk, Olga V. Kosenchuk, Olga V. Skryabina, and Dina S. Ryabkova. Composition Designing of Cooked Sausage "Udachnaya" Based on Optimization Principles. Yulia A. Diner: <http://orcid.org/0000-0003-2787-7278>

FORMALIZATION OF THE PROCESSING OPERATION OF RAW MATERIAL FLOWS OF SAUSAGE PRODUCTION

Oshchypok I.M. Dr. Sciences, Professor
Lviv trade and economic University, Lviv, Ukraine

Abstract. The article deals with the development of the process of formalization of the receipt of meat raw materials for processing in the production of sausage products. Since meat is, first of all, the main source of

animal protein due to its wealth of essential amino acids, which makes it a complete protein, it is important to preserve its inherent properties in its processing technology. The European part consumes the most pork and beef, less sheep. Due to the high yield of carcasses, it is believed that animals play an important role in the production of meat in the country. The presence of a significant amount of water in meat, high biological value of proteins makes it a valuable raw material for a balanced diet. In order to ensure the efficiency of the processing process in modern conditions of meat raw materials of different origin, physical and chemical properties, computer modeling methods should be used with the development of appropriate software. The process of developing software systems is closely related to the field of project management, because any software product is a unique result. The main characteristics of the implementation of the software project directly depend on the organization of this process - the deadlines, the planned budget, the quality of the produced product. But professional project management by itself cannot ensure the achievement of the specified characteristics. An important role in this is played by the architecture of the software system, the experience and qualifications of the members of the development team, as well as the correct documentation of all software development processes. Various Ukrainian and international standards are taken into account here, which regulate the organization of the development process, documentation of individual sequential stages intended for use by specialists and researchers in the development and design of computer models and software for the production of coimbatore products. Another type of knowledge, which is so lacking in enterprises today, concerns the kinetics of phenomena, and in particular their dependence on production conditions (temperature, water activity, pH, etc.). However, kinetics is important information for highly efficient management of the processing process, which is important to consider. It is proposed to achieve the efficiency of sausage production by formalizing the flow of various meat raw materials with the help of mathematical programming methods and the use of computer technologies, taking into account the unstable quality of the meat raw materials used in the production of sausage products.

Keywords: meat, technology, design of computer models, software, sausage products

Література

1. Ощипок І. М., Розроблення архітектури програмного забезпечення та інтерфейсу користувача у технології м'ясних виробництв. Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки. No 30, 2022. С.53-59. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-30-07>
2. Barriero Mendez J.A. Modelaje matematico para la prediction de nutrientes en el procesamiento termico de alimentos: una revision // Rev. Latinoamer. Tfanst. Col. Mat., 1983, vol.7, № 1, pp.3-14.
3. Flores, M. (2016). Sausages and Comminuted Products: Cooked Sausages. Encyclopedia of Food and Health, 722-727. doi: 10.1016/b978-0-12-384947-2.00613-9
4. Kerry Joseph, Kerry John, Ledward David. Meat processing: Improving Quality. Woodhead publishing limited, 2002. – 443 p.
5. Kotsyumbas I. Y., Kotsyumbas G. I., Shchebentovskaya O. M. Examination of semi-finished products of meat and meatvegetable sections by microstructural method. Lviv: Afisha, 2011.
6. MacDougall D.B., Allen R.A. Mathematical Modelling in Meat Processing. -N. Y., 1984.- pp. 298-300
7. Scientific and methodological grounds for controlling the development and use of disinfectants / Paliy A. P. et al. . Kharkiv: Miskdruk, 2010.
8. Potoroko I. I., Krasulia O. N., Tokarev A. V. Innovative solutions in management of process and accounting tasks at meat industry enterprises s a product quality factor. Economics & Management Research Journal of Eurasia. 2014. No 1. C. 58–65.
9. Sablani Shyam S., Rahman M. Shafiur, Datta Ashim K., Mujumdar Arun S. Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. 613 p
10. Snee Ronald D. Experimental designs for mixture systems with multicomponent constraints. Communications in Statistics Theory and Methods. – 1979. – pp.303 – 326.
11. Connectivity maps: Modeling and analysing relationships in product development processes / Yassine A. et al. // Journal of Engineering Design. 2003.№ 14. P. 377-394.
12. Yulia A. Diner, Natalia A. Yurk, Olga V. Kosenchuk, Olga V. Skryabina, and Dina S. Ryabkova. Composition Designing of Cooked Sausage "Udachnaya" Based on Optimization Principles. Yulia A. Diner: <http://orcid.org/0000-0003-2787-7278>

Отримано в редакцію 13.06.2023

Прийнято до друку 29.11.2023

Received 13.06.2023

Approved 29.11.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ НАСІННЯ РІПАКУ З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Бандура В.М. д.т.н., професор¹, Безбах І.В. д.т.н., доцент²

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

² Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Одним із нових методів сушіння є використання мікрохвильового випромінювання. Мета роботи – вивчити режими сушіння насіння ріпаку електромагнітним випромінюванням надвисокочастотного діапазону в поєднанні з фільтрацією. Проведені дослідження показали, що температура насіння при максимальній потужності мікрохвиль підвищується в цілому в 1,5...1,8 рази швидше, ніж при половинній потужності. Чим більша вологість насіння, тим підвищення температури збільшується швидше. Після кожного циклу продування, який становив 15 секунд, температура знижувалася на 8-12 °С і циклічно стабілізувалася. Експериментальні дані можуть бути враховані при розробці конструкцій малогабаритних сушарок для сільськогосподарських підприємств і фермерів.

Ключові слова: мікрохвильова енергія, конвективне продування, насіння ріпаку, температура сушіння.

Вступ. Ріпак є ключовим джерелом харчової рослинної олії та рослинного білка серед чотирьох основних світових олійних культур [1]. Насіння ріпаку багаті ліпідами, які можуть забезпечити організм енергією, незамінними жирними кислотами та різними пов'язаними ліпідами, такими як фітостероли, вітамін Е та сквален [2]. Ріпакова олія та ріпаківий шрот виробляються шляхом обробки насіння ріпаку, у якому ріпакова олія є важливим джерелом корисних для здоров'я сполук, таких як поліфеноли, фітостероли та токоферолі в раціоні людини [3], тоді як ріпаківий шрот є основний матеріал для різноманітних комерційних продуктів, таких як корми та добрива [5]. Основним технологічним процесом збереження властивостей насіння є сушіння [5]. Вирощений урожай ріпаку перед переробкою необхідно очистити і просушити.

Енергоспоживання, екологічні проблеми, якість продукції є актуальними проблемами, пов'язаними з процесами сушіння насіння. Необхідно звернути увагу на розробку нових конструкцій енергоефективних сушарок для насіння [6]. На підприємствах сушіння рослинної сировини здійснюється гарячим повітрям або димовими газами на конвективних сушильних установках. ККД конвективних сушарок становить 40%. Енергоспоживання конвективних сушарок досягає 8 МДж/кг видаленої вологи, що майже втричі перевищує фізично необхідний мінімум. Вміст канцерогенів у сушильному агенті та продукт не контролюється [7]. Але спеціального технологічного обладнання для сушіння ріпаку немає, тому процес ведеться на зерносушильному обладнанні. Існуючі зерносушарки не повністю відповідають вимогам до якості висушеного насіння. Недосконалість конструкції існуючих зерносушарок призводить до високих втрат (до 50%) і зниження якості насіння. Конвективний спосіб теплопостачання, який використовується в існуючих сушарках, обмежений високою температурою сушіння та інертністю процесу, що призводить до перегріву насіння, і не забезпечує рівномірність висушеного насіння. Температура сушарки повинна бути не вище +50 °С, щоб насіння не втратило життєздатність. Чим менше вологість, тим нижче повинна бути температура сушіння.

Одним із нових методів сушіння є використання інфрачервоного та мікрохвильового випромінювання [8, 9]. В роботі [10] теоретично обґрунтовано процеси радіаційно-конвективного тепломасообміну між усіма визначальними об'єктами всередині вібросушарки з ІЧ-живленням. На основі теплового та матеріального балансів визначено рівняння, що описують основні динамічні характеристики умов сушіння олійного зернового матеріалу в ІЧ-сушарці безперервної дії. У зв'язку з тим, що точного аналітичного розв'язку наведеної математичної моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь у частинних похідних не існує, запропонований розв'язок дозволяє виявити залежності розподілу температури та вологості зерна та олійної сировини від довжина сушарки в будь-який час.

Коллективом авторів на чолі з Бурдо О.Г. запропоновано технології адресної доставки енергії для інтенсифікації тепломасообміну при переробці харчової сировини [11]. В основу висунутих гіпотез лягли хвильові технології комбінованої електромагнітної та вібраційної дії. Обґрунтовано механізми, ефекти та математичні моделі бародифузії та дії вібраційних полів. Запропоновано числа подібності хвиль, на основі яких узагальнено бази експериментальних даних по висиханню.

Використання мікрохвиль має багато переваг. Найважливішим аспектом є зменшення часу термічного процесу (навіть на 50%) і скорочення експлуатаційних витрат. Крім того, це дозволяє підвищити ефективність процесів при збереженні високої якості [12]. Використання мікрохвильової енергії залежить від різних факторів, включаючи структуру обладнання, умови сушіння (мікрохвильова енергія, частота, температура та швидкість повітря) і властивості матеріалу. Систему сушіння можна ефективно покращити, якщо ці параметри налаштовані належним чином і враховано споживання енергії на обробку [13]. Перспективним вважа-

ється сушіння насіння ріпаку енергією електромагнітного поля НВЧ-діапазону, оскільки під впливом енергії НВЧ-поля насіння прогрівається відразу у всьому об'ємі, в якому відбуваються градієнти тиску, температури та вологості. однакова спрямованість, що дозволяє значно інтенсифікувати процес сушіння та зменшити ризик тривалого впливу високих температур [14, 15]. Крім того, мікрохвильове нагрівальне обладнання дає можливість проектувати невеликі та мобільні сушильні установки, зручні для використання в невеликих сільськогосподарських підприємствах і фермерських господарствах.

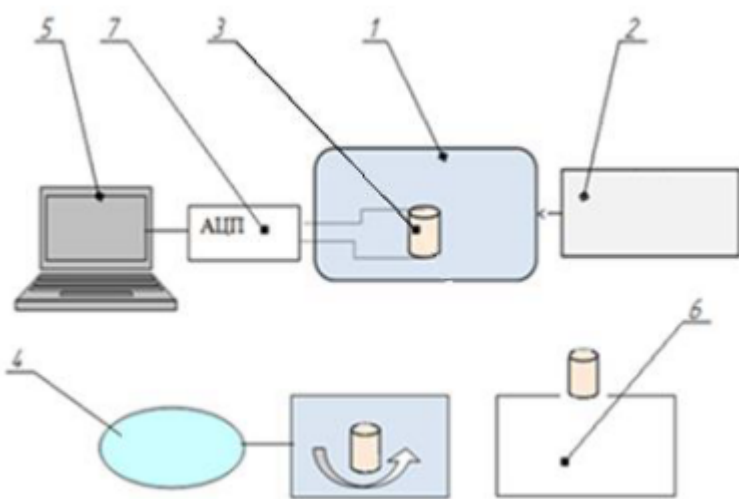
Автори [16] провели серію експериментів, аналізу та вимірювань, що насіння ріпаку з початковою вологістю 15%–30% можна висушити до безпечної вологості для зберігання шляхом зміни співвідношення потужності G , температури T , часу нагріву t і циклу навантаження D_c , відповідно. Польові випробування показали, що якість насіння залишилася незмінною, а сходи дещо зросли; сушіння в мікрохвильовій печі може активувати насіння ріпаку та підвищити його здатність до проростання.

Грунтуючись на рівняннях Максвелла, Олівейра та Франка змоделивали опромінення МВт увімкнення та вимкнення в поєднанні з обертанням зразка та виявили, що ця комбінація забезпечує більш рівномірні температурні профілі порівняно з кожним методом, застосованим окремо [17].

Основним недоліком мікрохвильового сушіння є його нерівномірне нагрівання, зокрема перегрів по краях зразка [18]. Через нерівномірний розподіл енергії в мікрохвильовій (МВт) установці, застосування мікрохвильового нагріву залишається значною перешкодою. Конвеєрна стрічкова сушарка MW з безперервним контролем потужності за допомогою кількох джерел MW 2,45 ГГц покращує рівномірність нагріву. Завдяки послідовному регулюванню вхідної потужності джерел НВЧ, електричного поля і коливань температури було значно зменшено гарячі та холодні точки в мікрохвильовому резонаторі. Експериментальні результати показують, що МВт-нагрівання за допомогою запропонованого безперервного методу з регульованою потужністю може досягти приблизно на 34% кращої рівномірності нагріву порівняно з одночасним методом кількох входів (звичайний режим) [19]. Дослідження [20] вказали, що насіння ріпаку можна безпечно сушити при температурі 55 °C, зберігаючи при цьому схожість до 90%. Для підвищення швидкості сушіння при збереженні життєздатності насіння в дослідженні використовували гібридну мікрохвильову (МВ) конвективну сушарку. Гібридні сушарки забезпечували більш рівномірний нагрів і швидкий перенос вологи в продукт, зберігаючи продукт холоднішим і більш життєздатним [20]. Аполінар і Хоакін (2012) розробили математичну модель сушіння зерна в безперервній вібраційній сушарці з киплячим шаром [21]. Для опису процесу використовували просте обладнання та моделі матеріалів. У моделі плунжерного обладнання досліджувався тонкий шар частинок, що рухалися вперед і добре перемішувалися в напрямку потоку газу, що створювало однорідний колір продукту під час нагрівання.

Для усунення перелічених недоліків, пропонується поєднувати сушіння в мікрохвильовій установці з іншими методами сушіння.

Таким чином, дослідження процесу сушіння насіння ріпаку з метою вирішення проблеми збереження якості продукції та підвищення ефективності процесу сушіння є актуальним науково-технічним завданням.



1 – камера мікрохвильової обробки, 2 – генератор електромагнітного поля, 3 – касета з продуктом, 4 – вентилятор, 5 – комп'ютер, 6 – ваги, 7 – модуль аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Рис. 1 – Розрахункова схема для проведення досліджень установки з мікрохвильовим енергозабезпеченням у поєднанні з фільтраційною сушкою

Водночас для розробки сучасного високопродуктивного обладнання для сушіння ріпаку та обґрунтування раціональних режимів сушіння необхідно досліджувати процес сушіння ріпаку як традиційними, так і новими, більш ефективними способами сушіння.

Метою роботи було дослідження режимів сушіння насіння ріпаку електромагнітним випромінюванням надвисокочастотного діапазону в поєднанні з фільтрацією.

Матеріали і методи

Для дослідження кінетики процесу сушіння дисперсних систем та впливу мікрохвильового випромінювання на насіннєву сировину, створено експериментальний стенд. Схема експериментального стенду представлена на рис. 1.

Дослід проводили за періодичною схемою, спочатку проводили мікрохвильову обробку продукту, потім касету з насінням продували повітрям і зважували. За допомогою модуля АЦП і термопар вимірювали температуру продукту, тривалість мікрохвильової обробки та

швидкість повітря.

На дослідному стенді використовувалися магнетрони ЛГ 2М226 з такими характеристиками: магнетрон ЛГ 2М226; частота (при погодженому навантаженні): 2460 МГц; середня вихідна потужність (при погодженому навантаженні): 1500 Вт; розміри касети (д/ш/в): 140/129/96 мм; охолодження: повітряне, примусове.

Магнетрон ЛГ 2М226 є типовим пристроєм для використання в побутовій техніці, характеризується досить високою потужністю НВЧ-випромінювання (~1500 Вт) і невисокою вартістю (~350...500 грн.), яка у промислових використаннях дозволяє віднести його до витратних матеріалів.

Досліди з сушіння насіння ріпаку в установці з мікрохвильовим живленням наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Діапазон вимірюваних значень

Сировина	Тривалість нагріву НВЧ, с	Тривалість продувки повітрям, с	Потужність НВЧ, кВт	Вологість насіння, початкова, %
Ріпак	0...120	5-15	0,24...0,8	12...20

Потужність випромінювання встановлювалася за допомогою стандартних засобів пульта керування мікрохвильової нагрівальної камери, що дозволяє встановити потужність випромінювання у відсотках від максимальної потужності випромінювача. З урахуванням робочих характеристик обладнання були обрані значення 30, 50, 70 і 100% потужності, що відповідають 240, 400, 560 і 800 Вт НВЧ випромінювання генератора. Зміна показника потужності на максимальне значення та схему керування магнетроном забезпечували за допомогою широтно-імпульсної модуляції, а як засіб контролю під час експериментів хронометрували роботу випромінювача за показниками індикатора НВЧ-випромінювання з подальшим розрахунком співвідношення між часом роботи випромінювача і часом зупинки.

Зразки насіння ріпаку масою 200 г поміщали в касету, яка створювала питоме навантаження 5 кг·м⁻². Потім касету поміщали в експериментальну установку з мікрохвильовим випромінювачем і негайно піддавали опроміненню.

Дослідження проводили за періодичною схемою, спочатку проводили вплив на продукт мікрохвильового випромінювання, потім касету з продуктом продували повітрям і зважували. За допомогою модуля АЦП і термопар вимірювали температуру продукту, тривалість мікрохвильової обробки та швидкість повітря.

Вологість зерна вимірювали цифровим вологоміром РМ-

600 та вологоміром типу Wile.

Результати досліджень.

Як свідчать графіки, наведені на рис. 2 і 3, температура насіння при потужності НВЧ $P = 800$ Вт зростає в цілому в 1,5...1,8 рази швидше, ніж при потужності $P = 400$ Вт. залежить від потужності електромагнітного випромінювання, що подається. Із збільшенням потужності електромагнітного випромінювання зростає і інтенсивність підвищення температури.

Відповідно до графіків, наведених на малюнку 3, коли потужність електромагнітного випромінювання зменшується, швидкість підвищення температури також зменшується. При потужності електромагнітного випромінювання $P = 400$ Вт температурні криві більш

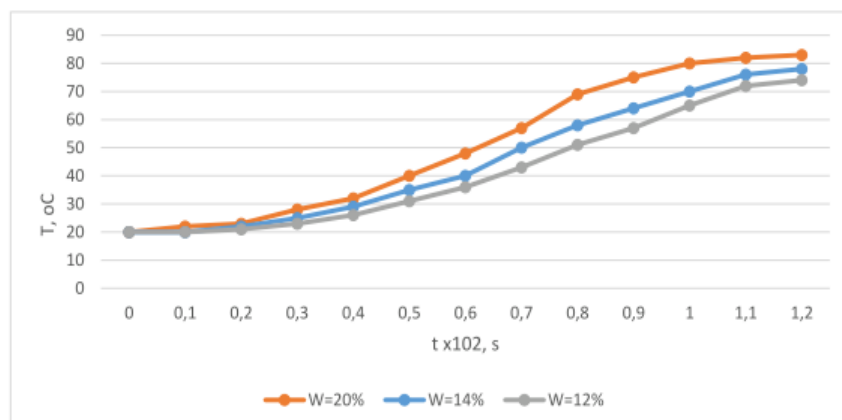


Рис. 2 – Динаміка нагрівання насіння ріпаку різної вологості під впливом електромагнітного випромінювача потужністю 800 Вт

сіння при потужності НВЧ $P = 800$ Вт зростає в цілому в 1,5...1,8 рази швидше, ніж при потужності $P = 400$ Вт.

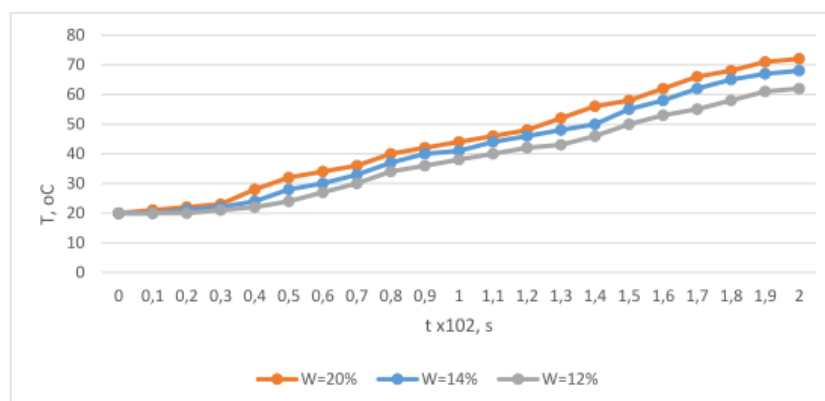


Рис. 3 – Динаміка нагрівання насіння ріпаку різної вологості під впливом електромагнітного випромінювача потужністю 400 Вт

пологі. Крім того, при такій потужності зниження інтенсивності підвищення температури починається при температурі 62...72°C.

На другому етапі дослідження насіння ріпаку опромінювали мікрохвильовим випромінюванням і продували повітрям.

Термограми під час сушіння ріпаку мають ступінчастий характер (рис. 4 і 5), що зумовлено тим, що продування шару матеріалу здійснювалося періодично.

Термограма нагріву насіння ріпаку (рис. 4) відповідає 5 с періоду обдування та 5 с впливу мікрохвиль. Термограма нагрівання насіння ріпаку (рис. 5) відповідає 15 с продування та 15 с впливу мікрохвиль.

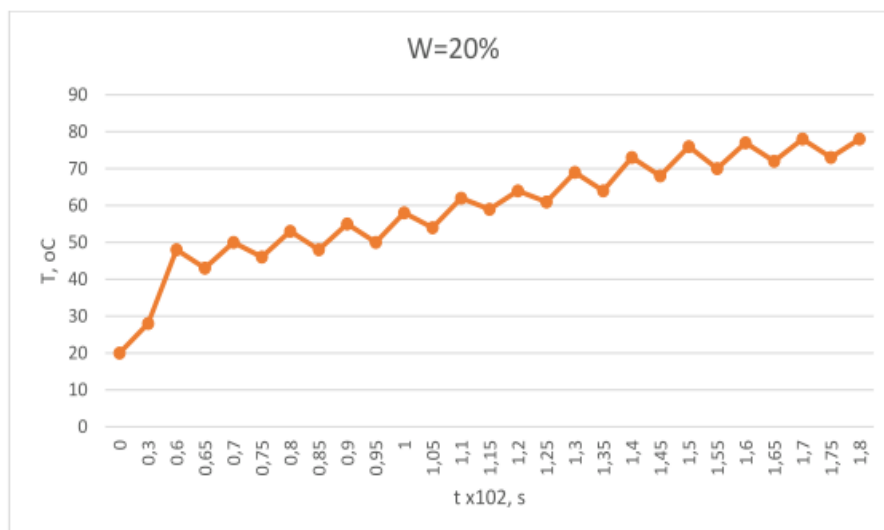


Рис. 4 – Зміна температури насіння ріпаку з вологістю 20% при потужності мікрохвиль 800 Вт і тривалості обдування 5 с

Температуру насіння підтримували близькою до технологічної на рівні 50 °C.

Температура насіння ріпаку на рис. 4 відповідає періоду обдування 5 с та впливу мікрохвиль 5 с, температура насіння ріпаку на рис. 5 – обдуву 15 с, впливу мікрохвиль 15 с. Аналіз показує, що тривалість продування суттєво впливає як на температуру нагрівання об'єму насіння, так і на швидкість сушіння.

Аналіз графіків, показаних на рисунку 4, показує, що зміна температури насіння неоднакова між циклами процесу сушіння. Після кожного циклу охолодження температура встановлюється вище, ніж у попередньому. А це означає, що часу продування насіння повітрям недостатньо для стабілізації температури, і тому при наступній подачі мікрохвильової енергії температура насіння підвищується.

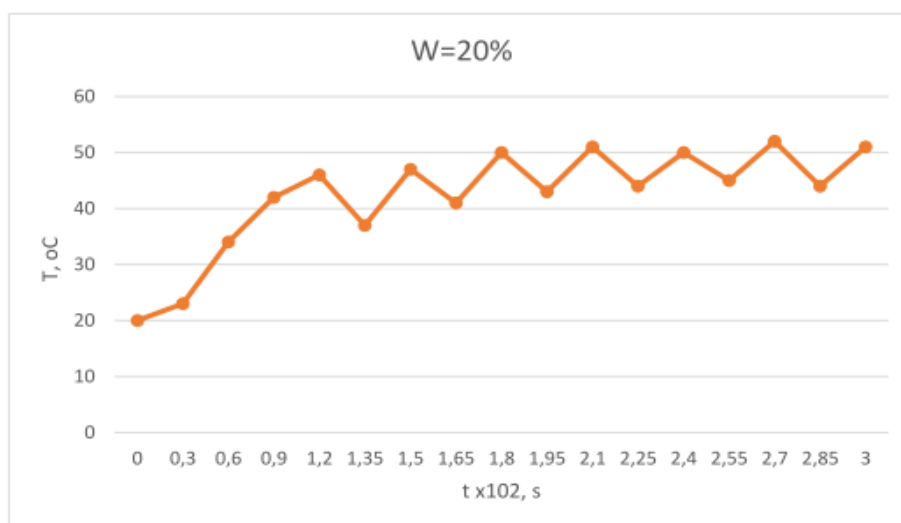


Рис. 5 – Зміна температури насіння ріпаку з вологістю 20% за потужності мікрохвильової енергії 400 Вт і періоду обдування 15 с

Крім того, спостерігалось поступове підвищення температури при подальшому подовженні стадії продування. Такий характер зміни температури також підтверджено результатами досліджень кінетики сушіння.

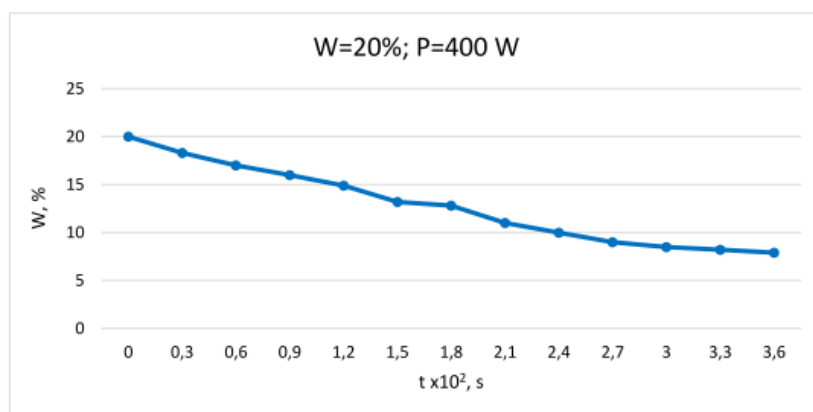


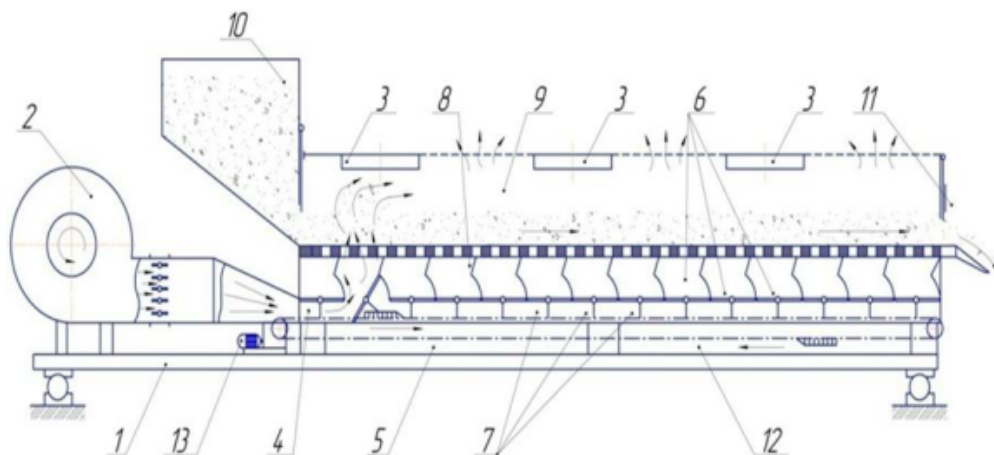
Рис. 6 – Кінетика процесу сушіння насіння ріпаку за допомогою мікрохвильової енергії з періодичним охолодженням на 8-12 °С від температури сушіння при потужності 400 Вт і початковій вологості насіння 20%

Дослідження кінетики сушіння, проведені за цією схемою, дозволили встановити раціональні співвідношення тривалості етапів сушіння, при яких на першому етапі здійснювався мікрохвильовий нагрів насіння до необхідної температури, а обдування з охолодженням – на 8 ...12°C від заданої температури сушіння проводилося на другому етапі. При охолодженні насіння до 3...5°C спостерігалось нерівномірне охолодження та перемішування насіння через недостатню подачу повітря вентилятором за короткий проміжок часу.

При обраних значеннях тривалість першої та другої ступенів приблизно однакова і становить 1,8...3 хв залежно від енергії НВЧ. Кондиційну вологість насіння 7...8% досягають за 8...12 циклів залежно від вихідної вологості.

Для забезпечення нормального процесу термічної обробки (прогрівання та сушіння) необхідне дотримання ряду умов: рівномірне підведення тепла до всієї площі посівного шару; постійне видалення вологості, що утворюється на поверхні зерна (постійна подача сухого і видалення вологого повітря). Виконання цих вимог (умов) безпосередньо пов'язане з параметрами установки: перш за все, з параметрами тепловіддачі елементів, які певним чином характеризують джерело тепла і визначають режими його роботи: температура, споживана потужність; характер розподілу температури за об'ємом зернового шару, товщиною зернового шару, витратою сушильного агента та ін. Крім того, на процес сушіння впливає також стан навколишнього середовища, а саме температура і вологість.

На основі проведених досліджень авторами розроблено малогабаритну сушарку насіння. Конструктивно-технологічна схема запропонованої сушарки наведена на рис. 7. На підставі 1 встановлено напірний вентилятор 2, який у подальшому з'єднаний з газорозподільчим механізмом 5, який містить напірну камеру 4, ряд повітря. повітроводи з поворотними клапанами 7, що з'єднують напірну камеру з ділянками газорозподільних решіток 8 сушильної камери 9, поздовжній нахил яких регулюється. На початку сушильної камери встановлено бункер для сировини 10, а з протилежного боку — вихідний пристрій 11 для виходу підсушеного насіння. На зовнішній частині барокамери розташована ланцюгова передача 12, на якій закріплені виступи 14. Виступи служать для відкриття заслінок.



1 – основа; 2 – вентилятор; 3 – мікрохвильовий опромінювач; 4 – барокамера; 5 – газорозподільний механізм; 6 – секції газорозподільного механізму; 7 – клапани; 8 – газорозподільча сітка; 9 – сушильна камера; 10 – бункер для сировини; 11 – вихідний пристрій; 12 – ланцюг приводний; 13 – електропривод; 14 – виступ.

Рис. 7 – Конструктивно-технологічна схема сушарки

Сушарка працює наступним чином. Вологе насіння ріпаку з бункера 10 надходить на газорозподільні решітки 8 з певною товщиною шару. Сушильну камеру 9 встановлюють з необхідним нахилом. Одночасно вмикаються вентилятор 2, НВЧ-опромінювач 3 і ланцюгова передача 13. При переміщенні ланцюга 12 з виступами 14 по черзі відкриваються заслінки 7, при цьому нагріте повітря по чергово подається в повітропроводи 6, звідки послідовно надходить у роз'єднані ділянки решіток газорозподільного ланцюга. В результаті насіннева маса набуває киплячого (киплячого) стану не на всій поверхні газорозподільної решітки, а на ділянці.

Далі стулки під дією виступу 14 відкриваються по черзі, і подача повітря йде в другу секцію. Цей процес відбувається послідовно по всій газорозподільчій решітці 8. В результаті виникає хвиля киплячого зернового матеріалу, який рухається і одночасно перемішує продукт. У процесі видування відбувається активна вентиляція, а висихання матеріалу відбувається під впливом мікрохвильової енергії. Рух насіння при сушінні, а отже, і тривалість сушіння, відбувається за рахунок поєднання нахилу газорозподільної решітки і дії псевдозрідження. Висушене насіння видаляється із сушарки через вихідний пристрій 11, а відпрацьоване повітря з сушильної камери 9 надходить у навколишнє середовище.

Висновки. Одним із нових методів сушіння ріпаку є використання мікрохвильової енергії в поєднанні з фільтрацією.

- Температура насіння ріпаку при максимальній потужності мікрохвиль 800 Вт підвищується загалом у 1,5...1,8 разів швидше, ніж при половинній потужності. Чим вище початкова вологість насіння, тим швидше буде підвищення температури.

- Продування ріпаку слід починати, коли температура ріпаку досягне 40-45 °С, проводити не менше 15 секунд, щоб підтримувати температуру насіння до 50 °С. Таких циклів має бути 10-12.

- Розроблено малогабаритну сушарку для ріпаку.

References

1. Kaiser, F., Harbach, H., Schulz, C. (2022). Rapeseed proteins as fishmeal alternatives: A review. *Rev. Aquac.* 14, 1887-1911. <https://doi.org/10.1111/raq.12678>
2. De Oliveira, A.M.R.C.B., Yu, P. (2022). Research progress and future study on physicochemical, nutritional, and structural characteristics of canola and rapeseed feedstocks and co-products from bio-oil processing and nutrient modeling evaluation methods. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 1-7. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2033686>
3. Yang, R., Xue, L., Zhang, L., Wang, X., Qi, X., Jiang, J., Yu, L., Wang, X., Zhang, W., Zhang, Q., et al. (2019). Phytosterol Contents of Edible Oils and Their Contributions to Estimated Phytosterol Intake in the Chinese Diet. *Foods*, 8, 334. <https://doi.org/10.3390/foods8080334>
4. Lannuzel, C., Smith, A., Mary, A., Della Pia, E., Kabel, M., de Vries, S. (2022). Improving fiber utilization from rapeseed and sunflower seed meals to substitute soybean meal in pig and chicken diets: A review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 285, 115213. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115213>
5. Paziuk, V.M., Liubin, M.V., Yaropud, V.M., Tokarchuk, O.A., Tokarchuk, D.M. (2018). Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 12, 39-48. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-33>
6. Bezbah, I., Zykov, A., Mordynskyi, V., Osadchuk, P., Philipova, L., Bandura, V., Yarovyi, I., Marenchenko, E. (2022). Designing the structure and determining the mode characteristics of the grain dryer based on thermosiphons. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 2(8 (116)), 54-61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253977>
7. Burdo, O., Bezbah, I., Kepin, N., Zykov, A., Yarovyi, I., Gavrilov, A., Bandura, V., Mazurenko, I. (2019). Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11-101), 24-32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937>
8. Bandura, V., Mazur, V., Yaroshenko, L., Rubanenko, O. (2019). Research On Sunflower Seeds Drying Process In A Monolayer Tray Vibration Dryer Based On Infrared Radiation. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 57(1), 233-242.
9. Bulgakov, V., Bandura, V., Arak, M., Olt, J. (2018). Intensification of rapeseed drying process through the use of infrared emitters. *Agronomy Research*, 16(2), 349-356; <http://dx.doi.org/10.15159/ar.18.054>
10. Bandura, V., Kalinichenko, R., Kotov, B., Spirin, A. (2018). Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-power supply, *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 4/8 (94), 50-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>
11. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Zozulyak, I., Levtrinskaya, J., Marenchenko, E. (2017). Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/11 (88), 34-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>
12. Guzik, P., Kulawik, P., Zajac, M., Migdal, W. (2022). Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62:29, 7989-8008; <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871>

13. An, N.-n., Li, D., Wang, L.-j., Wang, Y. (2022). Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: an updated understanding, Critical Reviews in Food Science and Nutrition. DOI: 10.1080/10408398.2022.2124947. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2124947>
14. Li, Y., Zhang, T., Wu, C., Zhang, C. (2014). Intermittent microwave drying of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds. Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences, 2(1), 32-36. Available at: <http://www.jebas.org/wp-content/uploads/2014/09/Zhang-et-al-JEBAS1.pdf>
15. Zhao, Y., Jiang, Y., Zheng, B., Zhuang, W., Zheng, Y., & Tian, Y. (2017). Influence of microwave vacuum drying on glass transition temperature, gelatinization temperature, physical and chemical qualities of lotus seeds. Food chemistry, 228, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.141>
16. Qingxi L., Caixia S., Boping T. (2015). Effect of microwave drying on rapeseed's dehydrating characteristics and quality properties. QUALITY, NUTRITION AND PROCESSING: Processing Technology, 189-191.
17. Oliveira, M.E.C., Franca, A.S. (2002). Microwave heating of foodstuffs. Journal of Food Engineering, 53(4), 347-359; [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00176-5)
18. Li, Z. Y., Wang, R. F., Kudra, T. (2011). Uniformity Issue in Microwave Drying. Drying Technology, 29, 652-660. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.521963>.
19. Bae, S.-H., Jeong, M.-G., Kim, J.-H., Lee, W.-S. (2017). A Continuous Power-Controlled Microwave Belt Drier Improving Heating Uniformity. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 27(5), 527-529. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2690849>
20. Hemis, M., Choudhary, R., Gariépy, Y., Raghavanc, V.G.S. (2015). Experiments and modelling of the microwave assisted convective drying of canola seeds. Biosystems Engineering, November, 139, 121-127 <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.010>
21. Apolinar, P., Joaquin, M.z (2012). Mathematical Modeling of a Continuous Vibrating Fluidized Bed Dryer for Grain. Drying Technology, 30(13), 1469-1481. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.690123>

STUDY OF COMBINED RAPESEED SEED DRYING WITH THE USE OF MICROWAVE ENERGY

Bandura V.M. SciD, professor ¹, Bezbakh I.V. SciD, docent ²

¹ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Одеський національний технологічний університет, Odesa, Ukraine

Abstract. Rapeseed has to be dried very carefully. This process is one of the most time-consuming and responsible in the technology of drying both grain and oil crops. This is primarily due to a high risk of spontaneous combustion of wet seeds, which contain a large percentage of oil and protein. In addition, it should be dried with special care so that the protein does not curdle. Rapeseed seeds with over 8% moisture content cannot be stored in containers for more than one day. The combination of high humidity and temperature during storage can lead to spoilage and self-heating. At a relative air humidity of 70%, rapeseed humidity of 8.3% and temperature of +25 °C, the development of mold fungi begins. The process is carried out on grain drying equipment. However, existing grain dryers do not fully meet the requirements for the quality of dried seeds. Imperfect designs of existing grain dryers lead to large losses (up to 50%) and a decrease in seed quality. The convective heat supply method used in existing dryers is limited by the high drying temperature and the inertia of the process, which leads to seed overheating, and does not ensure the uniformity of the dried seeds. Therefore, the modes of the drying process and the development of technological equipment are relevant.

The purpose of the work is to study the modes of drying rapeseed by electromagnetic radiation of the microwave range in combination with convective radiation. Conducted studies have confirmed that the temperature of seeds at maximum power of microwaves rises 1.5...1.8 times faster than at lower power. The design of a small-sized dryer, which combines two types of drying, has been developed. The application of microwave energy takes moisture from the inside of the seed and pushes it to the surface, while air blowing removes moisture from the surface of the seed and prevents it from overheating. In addition, microwave heating equipment makes it possible to design small and mobile drying units, convenient for the use in small agricultural enterprises and farms.

Key words: microwave energy, convective blowing, rapeseed, drying temperature.

Список використаної літератури

1. Kaiser F., Harbach H., Schulz C. Rapeseed proteins as fishmeal alternatives: A review. // Rev. Aquac. 2022. № 14. P. 1887-1911. <https://doi.org/10.1111/raq.12678>
2. De oliveira, A. M., Yu, P. Research progress and future study on physicochemical, nutritional, and structural characteristics of canola and rapeseed feedstocks and co-products from bio-oil processing and nutrient modeling evaluation methods // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2022. P. 1-7. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2033686>

3. Phytosterol Contents of Edible Oils and Their Contributions to Estimated Phytosterol Intake in the Chinese Diet / Yang R. et al. // Foods. 2019. № 8. P. 334.. <https://doi.org/10.3390/foods8080334>
4. Improving fiber utilization from rapeseed and sunflower seed meals to substitute soybean meal in pig and chicken diets: A review / Lannuzel C. et al. // Anim. Feed Sci. Technol. . 2022. № 285. P. 115-213. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115213>
5. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. / Paziuk V. M. et al. // INMATEH – Agricultural Engineering. 2018. № 12. P. 39-48. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-33>
6. Designing the structure and determining the mode characteristics of the grain dryer based on thermosiphons. / Bezbah I. et al. // Eastern-european Journal of Enterprise Technologies. 2022., No. 8 Vol. 2. P. 54-61.
7. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. / Burdo O. et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, . 2019. № 5. P. 24-32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937>
8. Research On Sunflower Seeds Drying Process In A Monolayer Tray Vibration Dryer Based On Infrared Radiation. / Bandura V. et al. // INMATEH - Agricultural Engineering. 2019., No. 1 Vol. 57. P. 233-242.
9. Intensification of rapeseed drying process through the use of infrared emitters. / Bulgakov V. et al. // Agronomy Research, (2), ; 2018., No. 2 Vol. 16. P. 349-356. <http://dx.doi.org/10.15159/ar.18.054>
10. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-power supply / Bandura V. et al. // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2018., No. 8 Vol. 4. P. 50-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>
11. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes, / Burdo O. et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017., No. 11 Vol. 4. P. 34-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>
12. Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments / Guzik P. et al. // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022., No. 29 Vol. 62. P. 7989-8008. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871>
13. An, N-n., Li, D., Wang, L.-j., Wang, Y. Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: an updated understanding, // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022 DOI: 10.1080/10408398.2022.2124947. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2124947>
14. Li, Y., Zhang, T., Wu, C., Zhang, C. Intermittent microwave drying of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds. // Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences. 2014., 2(1), 32-36. Available at: <http://www.jebas.org/wp-content/uploads/2014/09/Zhang-et-al-JEBAS1.pdf>
15. Influence of microwave vacuum drying on glass transition temperature, gelatinization temperature, physical and chemical qualities of lotus seeds / Zhao Y. et al. // Food chemistry. 2017. № 228. P. 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.141>
16. Qingxi L., Caixia S., Boping T. Effect of microwave drying on rapeseed's dehydrating characteristics and quality properties. QUALITY, NUTRITION AND PROCESSING: Processing Technology. 2015., 189-191.
17. Oliveira, M.E.C., Franca, A.S. Microwave heating of foodstuffs. Journal of Food Engineering, 2002., 53(4), P. 347–359; [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00176-5)
18. Li, Z. Y., Wang, R. F., Kudra, T. Uniformity Issue in Microwave Drying. Drying Technology, 2011., 29, P. 652-660. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.521963>.
19. A Continuous Power-Controlled Microwave Belt Drier Improving Heating Uniformity. / Bae S. H. et al. // IEEE Microwave and Wireless Components Letters, . 2017. № 275. P. 527-529. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2690849>
20. Experiments and modelling of the microwave assisted convective drying of canola seeds. / Hemis M. et al. // Biosystems Engineering, November. 2015. № 139. P. 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.010>
21. Apolinar, P., Joaquin, M.Z. Mathematical Modeling of a Continuous Vibrating Fluidized Bed Dryer for Grain. Drying Technology, 2012., 30(13), 1469–1481. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.690123>

Отримано в редакцію 29.06.2023
Прийнято до друку 29.11.2023

Received 29.06.2023
Approved 29.11.2023

ЗМІСТ

СИСТЕМА ТЕХНОЛОГІЙ АДРЕСНОЇ ДОСТАВКИ ЕНЕРГІЇ ДО ЕЛЕМЕНТІВ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ	
Бурдо О.Г., Терзієв С.Г., Сиротюк І.В., Молчанов М.Ю.	4
ТЕРМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАЛИВА З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ	
Корінчевська Т.В., Михайлик В.А., Снєжкін Ю.Ф.	13
АКТИВНІСТЬ ВОДИ ВИСУШЕНИХ ЯГІД ЛОХИНИ (<i>VACCINIUM CORYMBOSUM</i> L.)	
Петрова Ж.О., Слободянюк К.С., Кузнєцова І.В., Граков О.П., Вишнівська Т.А.	20
ВПЛИВ ЕКСТРУЗІЙНОЇ ОБРОБКИ НА СТАН ЖИРІВ КОРМОВИХ СУМІШЕЙ	
Іваницький Г.К., Целень Б.Я., Недбайло А.Є., Радченко Н.Л.	28
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИFUЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НАСИЧЕННЯ ЦУКРОЗОЮ ЧАСТИНОК КОРЕНЯ МОРКВИ	
Гузьова І.О., Атаманюк В.М.	36
ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ БІОМАСИ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИХ МІКРОВОДОРОСТЕЙ <i>CHLORELLA VULGARIS</i>	
Дячок В.В., Кочубей В.В.	43
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЕТАПУ ГІДРОЛІЗУ БІЛКІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ДІТЯЧИХ СУХИХ ГІПОАЛЕРГЕННИХ СУМІШЕЙ	
Авдєєва Л.Ю., Декуша Г.В., Макаренко А.А., Козак М.М.	50
ІНТЕНСИВНІСТЬ МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ СУШІННІ КОЛОЇДНИХ РОЗЧИНІВ ТА РІДКИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ	
Турчина Т.Я., Малецька К.Д., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А.	56
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ГІДРОДИНАМІКИ ПОТОКУ В КАВІТАЦІЙНИХ ЗМІШУВАЧАХ З РІЗНИМИ ТИПАМИ НАСОСІВ	
Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А.	62
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІНІВ ПРИДАТНОСТІ ДО СПОЖИВАННЯ ПЛЮДІВ ГЛОДУ ПІСЛЯ ТЕРМОРАДІАЦІЙНО-КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ	
Дубковецький І.В., Тарасенко Т. В., Бадах В. М.	69
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ	
Заврічко С.С., Кобзар О.В., Осадчук П. І.	76
ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ НА ОСНОВІ КОМПОЗИТНОГО АДСОРБЕНТУ «СИЛІКАГЕЛЬ – КРИСТАЛОГІДРАТ»	
Беляновська О.А., Сухий К.М., Сергієнко Я.О., Сухий М.К., Суха І.В.	81
РОЗРОБКА ШТАМПУ ДЛЯ ЦІЛЬНОТЯГНУТОЇ ЖЕРСТЯНОЇ БАНКИ №6	
Всеволодов О.М., Фарофонов В.С.	87
ЕНЕРГЕТИЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В МЕМБРАНАХ ВАКУУМНИХ ЗАКУПОРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ	
Ватренко О.В.	93
ІННОВАЦІЇ КОМБІКОРМОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ХХІ СТОЛІТТЯ	
Єгоров Б.В., Макаринська А.В., Турпурова Т.М.	100
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕКСТРАГУВАННЯ ЕФІРНИХ ОЛІЙ У МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ	
Коваленко О.А., Славинський Р.Л., Федосов Я. С., Славинська В.О., Аль-Хамад І.М.	109
ОДЕРЖАННЯ РОСЛИННИХ ОЛІЙ МОДИФІКОВАНОГО СКЛАДУ Бурдо О.Г., Ружицька Н.В., Левицький А.П., Лапінська А.П., Запорожець Д.О., Гуліваті В.Г.	117
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ РЕОЛОГІЧНОЇ СИРОВИНИ В ІЧ ПОЛІ	
Кравченко О.Ю., аспірант, Терзієв С.Г.	123
ІННОВАЦІЙНІ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ДЕГІДРАТОРИ ДЛЯ КОНЦЕНТРУВАННЯ РОЗЧИНІВ	
Сиротюк І.В., Славинська В.О., Петровський В.В.	130
КОМПЛЕКС МОДУЛЬНИХ ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПЕРВИННОЇ ПЕРЕРОБКИ АГРОПРОДУКЦІЇ	
Палагута В.М., Перетяка С.М., Хотін С.Ю., Савчук Є. В, Котенко О.В.	138
ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ СИРОВИННИХ ПОТОКІВ КОВБАСНОГО ВИРОБНИЦТВА	
Ощипок І. М.	144
ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ НАСІННЯ РІПАКУ З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ЕНЕРГІЇ	
Бандура В.М. д.т.н., професор ¹, Безбах І.В.	150

CONTENTS

THE SYSTEM OF TECHNOLOGIES OF ADDRESSED ENERGY DELIVERY TO FOOD ELEMENTS Burdo O.G., Terziev S.G., Sirotiyuk I.V., Molchanov M.Yu., Burdo A.C.	4
THERMAL CHARACTERISTICS OF FUEL FROM MUNICIPAL SOLID WASTE Korinchevska T., Mykhailyk V., Snezhkin Yu.	13
WATER ACTIVITY OF DRIED BLUEBERRIES (<i>VACCINIUM CORYMBOSUM</i> L.) Petrova Z.O., Slobodianiuk K.S., Kuznietsova I. V., Grakov O.P., Vyshnievska T.A.	20
THE EFFECT OF EXTRUSION TREATMENT ON THE STATE OF FATS IN FEED MIXTURES Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya, Nedbailo A.Ye., Radchenko N.L.	28
STUDY OF DIFFUSION PROCESSES OF SUCROSE SATURATION OF CARROT ROOT PARTICLES Huzova I., Atamanyuk V.	36
THERMAL ANALYSIS OF BIOMASS OF CHLOROPHYLL SYNTHESIZED MICROALGAE <i>CHLORELLA VULGARIS</i> Dyachok V., Kochubei V.	43
IMPROVEMENT IN STAGE OF PROTEOLYSIS IN THE TECHNOLOGY OF DRY HYPOALLERGENIC FORMULAE FOR INFANT NUTRITION Avdieieva L.Y., Dekusha H.V., Makarenko A.A., Kozak M.M.	50
MASS TRANSFER INTENSITY DURING THE DRYING PROCESS OF COLLOIDAL SOLUTIONS AND LIQUID HETEROGENEOUS SYSTEMS Turchyna T.Y., Maletska K.D. Avdieieva L. Yu, Makarenko A.A.	56
INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS IN CAVITATION MIXERS WITH DIFFERENT TYPES OF PUMPS Avdieieva L.Yu., Makarenko A.A.	62
STUDY OF THE SHELF LIFE OF HAWTHORN FRUITS AFTER THERMAL RADIATION-CONVECTIVE DRYING Dubkovetskyi I.V., Tarasenko T., Badakh V.	69
ENERGY-EFFICIENT USE OF EQUIPMENT FOR SUNFLOWER OIL PRODUCTION Zavrichko S.S., Kobzar O.V., Osadchuk P. I.	76
PERFORMANCE OF HEAT PUMP BASED ON COMPOSITE DSORBENT ‘SILICA GEL – CRYSTALLINE HYDRATE’ Belyanovskaya E.A., Sukhyi K.M., Serhiienko Ya.O, Sukhyi M.K, Sukha I.V.	81
DEVELOPMENT OF A STAMP FOR A CONTINUOUS TIN CAN NO. 6 Vsevolodov O.M., Farofontov V.S.	87
ENERGY TRANSFORMATIONS IN THE MEMBRANES OF VACUUM SEALING MEANS Vatrenko O. V.	93
INNOVATIONS OF FEED TECHNOLOGIES OF THE XXI CENTURY Igorov B., Makarynska A., Turpurova T.	100
EXPERIMENTAL SIMULATION OF ESSENTIAL OIL EXTRACTION PROCESSES IN MICROWAVE FIELD Kovalenko O.O., Slavinsky R.L., Fedosov Y. S., Slavinska V.O., Al-Hamad I.M.	109
OBTAINING VEGETABLE OILS OF MODIFIED COMPOSITION Burdo O.G., Ruzhytska N.V., Levytskyi A.P., Lapinska A.P., Zaporozhets D.O., Hulivati V.G.	117
RESEARCH OF DEHYDRATION PROCESSES OF RHEOLOGICAL PLANT RAW MATERIAL IN THE IR FIELD Kravchenko O.Yu., Terziev S.G.	123
INNOVATIVE ELECTRODYNAMIC DEHYDRATORS FOR CONCENTRATION OF SOLUTIONS Syrotyuk I.V., Slavinska V.O., Petrovskiy V.V.	130
COMPLEX OF MODULAR HELIO ENERGY INSTALLATIONS FOR PRIMARY PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTS Palaguta V.M., Peretiaka S.M., Khotin S.Y., Savchuk Y. V. Kotenko O.V.	138
FORMALIZATION OF THE PROCESSING OPERATION OF RAW MATERIAL FLOWS OF SAUSAGE PRODUCTION Oshchypok I.M.	144
STUDY OF COMBINED RAPESEED SEED DRYING WITH THE USE OF MICROWAVE ENERGY Bandura V.M., Bezbakh I.V.	150