

ISSN 2073 – 8730

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ODESA NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

НАУКОВІ ПРАЦІ SCIENTIFIC WORKS

ТОМ 88
ВИПУСК 1

VOLUME 88
ISSUE 1



ОДЕСА

2024

ББК 36.81 + 36.82
УДК 663 / 664

Міністерство освіти і науки України



НАУКОВІ ПРАЦІ

Том 88, 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, проф.
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., *Сиволап О.С.*

Зареєстровано Національною радою України з питань телебачення та радіомовлення. Рішенням ради №1549, протокол №15 від 09.05.2024 (Ідентифікатор медіа: R30-04051)

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 № 02 від 25.09.2024 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: 2024. – Том 88, Вип. 1. – 183 с.

Адреса редакції:

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

np_onaht@ukr.net

terma_onaft@ukr.net

© Одеський національний технологічний університет, 2024 р.

Founder: **Odesa National
University of Technology**

SCIENTIFIC WORKS

Founded in Odessa, 1937

Volume 88, 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, 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.

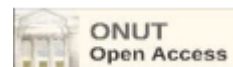
Technical editor: Ruzhitska N.V., Syvolap O.S.

It's recommended for printing and publishing online by
academic council of Odesa National University of
Technology
25 September 2024, protocol № 2

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 – Odesa, Odesa National University of Technology: 2024. – Volume 88, Issue 1. – 183 p.

Address of the editorial office:

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

© Odesa National University of Technology, 2024

ДЕСТРУКЦІЯ ТКАНИН ДЕЯКИХ ЯГІД ТА ФРУКТІВ ПРИ НАГРІВАННІ

Корінчевська Т.В., к.т.н., Михайлик В.А., к.т.н., с.н.с.

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Анотація. Ягоди та фрукти є важливим елементом у здоровому харчуванні завдяки високому вмісту біологічно активних речовин. В той же час вони містять у своєму складі до 90 % води. Це призводить до того, що в процесі зберігання вони можуть швидко псуватись та втрачати свою природню цінність. Тому для мінімізації втрат урожаю плодово-ягідну сировину піддають термічній переробці. З метою оптимізації теплової обробки сировини методами термічного аналізу були проведенні дослідження процесів деструкції, що відбуваються при нагріванні матеріалу. Проаналізовано 17 видів ягід та фруктів, широко представлених в літній сезон на ринку України. Дослідження подрібнених зразків з їстівної частини свіжих плодів проведено в дериватографі при нагріванні з постійною швидкістю до 250 °С. Результати термічного аналізу свідчать, що першим етапом деструкції є дегідратація матеріалу, яка супроводжується поглинанням теплоти. В результаті аналізу отриманих даних були визначені вологість, характерні температури, швидкість та умовний тепловий ефект зневоднення зразків. Встановлено, що кінетика процесу дегідратації та величина умовного теплового ефекту залежить від вмісту вільної та зв'язаної води в продукті і їх співвідношення. Показано, що вміст зв'язаної води визначається хімічним складом, в якому вуглеводи відіграють головну роль. Встановлено, що після повного видалення води відбувається деструкція органічних речовин, яка протікає з поступовою втратою маси зразків та з наростаючим виділенням теплоти. Виявлено, що досліджені фрукти та ягоди можна умовно поділити на дві групи за характером розкладання термолабільних складових органічних речовин. Визначено термічну стабільність досліджених ягід та фруктів, як граничну температуру, після досягнення якої спостерігається розкладання органічних речовин в продукті. Дана температура є одним з основних режимних параметрів термічної обробки плодово-ягідної сировини, що забезпечує високу якість продуктів переробки. Припущено, що термічна стабільність залежить від вмісту моно- та дисахаридів, що входять до складу.

Ключові слова: фрукти, ягоди, термічний аналіз, деструкція, дегідратація, вільна та зв'язана вода, термічна стабільність.

Вступ. Свіжі фрукти та ягоди є джерелом біологічно активних речовин, вживання яких має оздоровчий характер на організм людини. Вони мають високі показники вмісту клітковини, вітамінів, мікро- та макроеlementів, органічних кислот та інших біологічно цінних речовин [1]. При цьому вони мають значні відмінності за своїм хімічним складом і оздоровчим впливом на організм людини [2]. Хімічний склад залежить від різних чинників: ботанічного різновиду, методів вирощування, кліматичних умов, ступеня стиглості плоду, умов зберігання тощо. Основним компонентом свіжих фруктів та ягід є вода, вміст якої сягає 70 – 90 %. Серед основних компонентів сухої маси можна відзначити вуглеводи, білки, жири, клітковину та органічні кислоти.

Серед різноманіття фруктів та ягід для вивчення були вибрані найбільш доступні та широко вживані в літній сезон на ринку України. Дані про їх компонентний склад представлені в таблиці 1 [1–4].

Таблиця 1

Вміст основних харчових речовин в грамах на 100 г їстівної частини

Продукт	Вода	Білки	Жири	Вуглеводи			Кліт-ковина	Органічні кислоти в перерахунок на яблучну	Зола
				загальні	моно- і дисахариди	крохмаль			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Жимолость	85,8	1,0	0,1	9,8	7,6	–	2,2	2,4	0,6
Персик	86,5	0,9	0,2	10,4	9,5	–	0,9	0,7	0,6
Черешня	85,0	1,1	0,2	12,3	11,5	–	0,3	0,8	0,5
Лохина	88,2	1,0	0,3	7,7	7,0	–	1,2	1,6	0,3
Банан	74,0	1,5	0,4	22,4	19,0	2,0	0,8	0,4	0,9
Шовковиця	82,7	0,7	0,4	12,7	12,0	–	1,6	1,2	0,9
Полуниця	84,5	1,8	0,3	8,1	7,2	–	4,0	1,3	0,4
Абрикос	86,0	0,9	0,4	10,5	10,0	–	0,8	1,3	0,7

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Чорниця	86,5	1,1	0,6	8,6	8,0	—	2,2	1,2	0,4
Ожина	88,0	2,0	0,4	5,3	4,4	—	2,0	2,0	0,7
Вишня	85,5	0,8	0,2	11,3	10,6	—	0,5	1,3	0,6
Малина	87,0	0,8	0,6	9,0	8,3	—	5,1	1,9	0,5
Агрус	85,0	0,7	0,5	9,9	9,1	—	2,0	1,9	0,6
Алича	89,0	0,2	0,1	7,4	6,4	—	0,5	2,4	0,5
Смородина	85,0	1,0	0,2	8,0	7,3	—	3,0	2,3	0,9
Нектарин	87,6	1,1	0,3	10,5	7,8	—	1,7		0,5
Порічка червона	85,4	0,6	0,2	8,0	7,3	—	2,5	2,5	0,6

Оскільки фрукти та ягоди є високовологими продуктами, то в процесі зберігання можуть швидко псуватися та втрачати свою природну цінність. Приблизно від 30 до 50% втрат врожаю відбувається при транспортуванні продукції від виробника до споживача [5]. Різні способи переробки плодово-ягідної продукції дозволяють значно продовжити терміни зберігання. Крім того за рахунок своїх високих органолептичних показників продукти переробки фруктів та ягід дозволяють значно розширити асортимент продуктів харчування. Ефективними способами переробки є швидке заморожування, сушіння та виготовлення натуральної консервної продукції з метою забезпечення екологічно чистою та високовітамінною продукцією [6]. Додатково можна відзначити, що найбільший економічний ефект досягається при реалізації продуктів переробки, а не безпосередньо фруктів та ягід.

Щоб дослідити зміни, що відбуваються при термічній обробці плодово-ягідної сировини у світі успішно використовуються методи термічного аналізу, зокрема термогравіметрія. Термогравіметричний аналіз використовують для вивчення змін у стані тканин плодів при зневодненні, визначенні термічної стабільності з метою оптимізації теплової обробки, яка може мінімізувати термоокислювальне пошкодження, а також подовжити їх термін зберігання [7]. В літературних джерелах можна знайти результати досліджень з визначення термостабільності полуниці [8], абрикосу [9], журавлини [7] тощо, а також вивчення зневоднення термогравіметричним методом банану, винограду, персику, ківі, манго, яблука, дині та деяких інших видів [10].

Метою даного дослідження є визначення меж термічної стабільності, вивчення процесу зневоднення та термічного розкладання тканин деяких видів ягід та фруктів, що широко представлені в Україні.

Матеріали та методи. Дослідження виконувались методом термічного аналізу в модернізованому в ІТТФ НАН України дериватографі «Q-1000».

Ягоди та фрукти для термічного аналізу використовували в свіжому вигляді, одразу після придбання на ринку м. Києва. Перед дослідженням м'які тканини плодів подрібнювали, забезпечуючи однорідність структури. Підготовлені зразки масою 190,0 – 230,2 мг розміщували в конічний платиновий тигель з комплекту приладу і піддавали програмованому нагріванню від кімнатної температури до 250 °C зі швидкістю 3,6 K/хв. В якості інертної речовини використовували Al_2O_3 . Атмосферою слугувало нерухоме повітря. Збір та обробку інформації з каналів вимірювання здійснювали за допомогою прикладної комп'ютерної програми «Derivatograph». Похибка в визначенні температури не перевищувала $\pm 0,5$ K.

Результати термічного аналізу отримані у вигляді масиву числових величин, що відображені на дериватограмах відповідними кривими, які відображають стан зразків в процесі їх нагрівання (рис. 1). В процесі дослідження реєстрували зміну температури та маси зразка (TG), швидкість зміни маси (DTG) та тепловий ефект (DTA). Для наочності та порівняння результати вимірів представлені у вигляді сумішених кривих DTG та DTA на рисунках 2 та 3. Криві DTG фактично є першими похідними функції зміни маси зразків внаслідок термічної деструкції, криві DTA відображають тепловий стан системи з реєстрацією ендо- та екзоефектів процесів, які відбуваються в досліджуваних зразках під впливом температури.

Результати досліджень. Під час нагрівання в тканинах відбуваються структурно-механічні та фізико-хімічні зміни. Оскільки всі досліджені матеріали є високовологими продуктами, то їхнє нагрівання на першому етапі супроводжується дегідратацією. Після повного видалення води відбувається поступова втрата маси, що свідчить про термічну деструкцію певних складових матеріалу. Гранична температура, після досягнення якої спостерігається розкладання органічних речовин в продукт, визначає термічну стабільність певного матеріалу (табл. 2). Ця температура є одним з основних режимних параметрів, що обмежує нагрівання і забезпечує високу якість продукту, поживну цінність та збереження в ньому біологічно активних речовин.

Для кращого розуміння процесів, що відбуваються в тканинах фруктів та ягід при нагріванні, на рис. 1, як приклад, відображена розгорнута дериватограма зразка полуниці масою 221,8 мг.

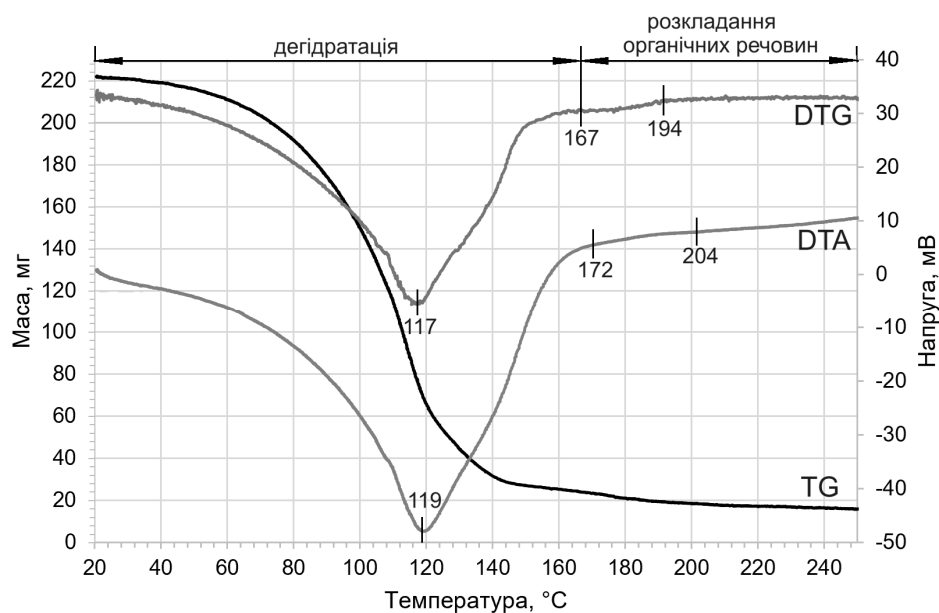


Рис. 1 – Дериватограма полуниці

Криві DTG та DTA (рис. 1) дають можливість визначитись з етапами термічної деструкції. На першому етапі відбувається дегідратація, завершення якої фіксується по кривій DTG.

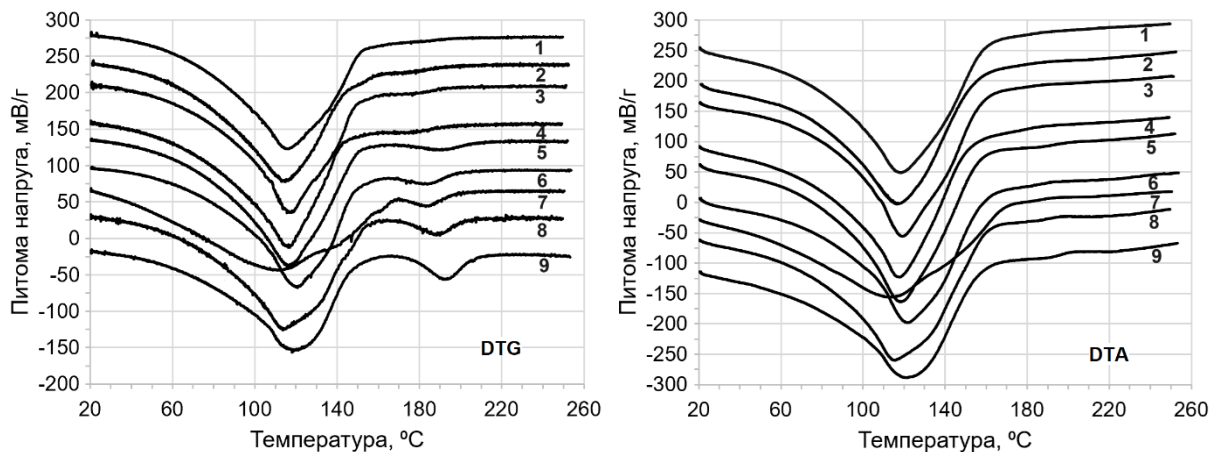
На початку дегідратації до 60 °C втрата води незначна (до 12,5 % від загальної маси). Зі збільшенням температури швидкість зневоднення зростає, досягаючи максимального свого значення в інтервалі від 111 до 121 °C, про що свідчать максимуми на кривих DTG (рис. 2 та 3, табл. 2), значення яких властиві конкретному продукту. В подальшому швидкість дегідратації зменшується, досягаючи практично нульової величини, криві DTG спрямовуються до горизонтальної базової лінії. Кожен вид продукту має власну температуру повного зневоднення, абсолютна величина якої знаходиться в межах від 161 до 197 °C. Дегідратація супроводжується поглинанням теплоти, що відображено ендотермічним піком на кривих DTA (рис. 2 та 3). Визначена вологість зразків зростає від 71,99 % для банану до 92,26 % для нектарину (табл. 2). Якщо порівняти з довідковими даними, наведеними в табл. 1, то можна помітити, що дані добре корелюють, а найбільше відхилення становить 6 %.

Таблиця 2

Результати аналізу

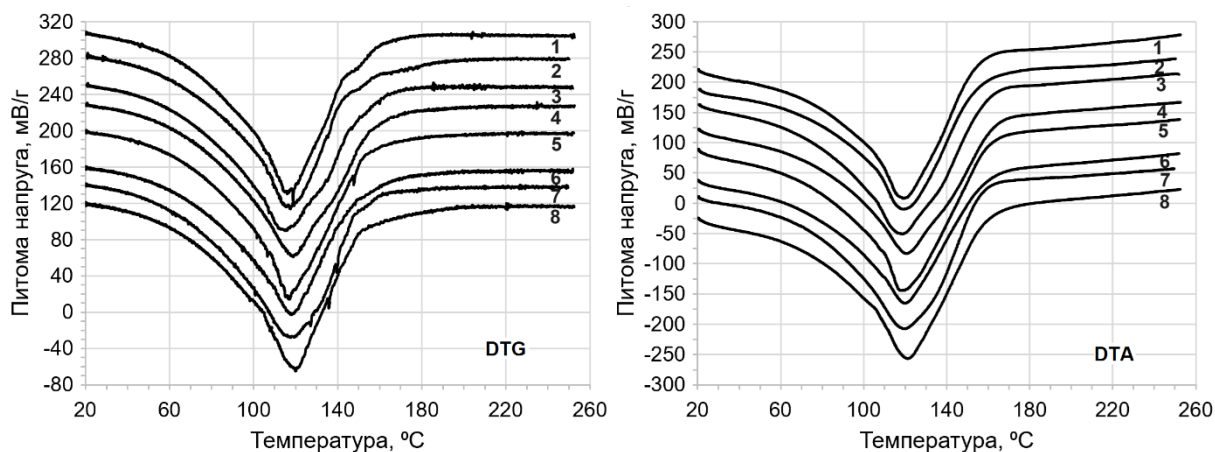
Плоди	Дегідратація					Початок деструкції органічних речовин, °C	Термолабільні органічні речовини, °C
	Температурний інтервал, °C	Максимум швидкості, °C	Вміст води, %	Середня швидкість, %/хв.	Умовний тепловий ефект, мВ·с/мг		
Жимолость	21–161	117	83,60	1,85	253,75	161	161–196
Персик	20–164	114	84,64	1,83	265,45	164	164–209
Черешня	21–165	114	85,32	1,89	241,26	165	165–211
Лохина	21–166	116	86,88	1,91	257,87	166	166–222
Банан	21–166	119	71,99	1,58	261,17	166	166–221
Шовковиця	21–166	121	82,08	1,79	254,88	166	166–215
Полуниця	21–167	117	89,18	1,96	245,43	167	167–194
Абрикос	20–170	111	84,47	1,79	216,17	170	170–213
Чорниця	21–171	116	85,67	1,80	256,43	171	171–204
Ожина	20–177	116	87,74	1,83	243,49	177	–
Вишня	21–182	118	86,33	1,79	239,26	182	–
Малина	21–183	115	89,28	1,78	264,11	183	–
Агрус	21–184	119	90,37	1,82	244,23	184	–
Алича	21–186	117	90,89	1,84	266,89	186	–
Смородина	20–187	118	83,97	1,66	248,20	187	–
Нектарин	21–190	118	92,26	1,77	253,69	190	–
Порічка червона	20–197	120	88,57	1,67	252,59	197	–

Кінетика процесу дегідратації залежить від вмісту вільної та зв'язаної води в продукті і їх співвідношення. Вміст зв'язаної води визначається хімічним складом, в якому вуглеводи (особливо цукри) відіграють головну роль [11]. Можна припустити, що на першому етапі дегідратації, до досягнення максимальної швидкості зневоднення, енергія дегідратації близька до енергії випаровування чистої води. Подальше підвищення температури призводить до дегідратації концентрованих розчинів та тканин, в яких вода утримується сильними зв'язками. Енергія дегідратації зростає, а швидкість процесу зменшується [12, 13].



1 – чорниця; 2 – черешня; 3 – полуниця; 4 – жимолость; 5 – лохина;
6 – шовковиця; 7 – абрикос; 8 – персик; 9 – банан

Рис. 2 – Суміщені криві DTG та DTA



1 – ожина; 2 – вишня; 3 – малина; 4 – абрикос; 5 – алича;
6 – смородина; 7 – нектарин; 8 – порічка червона.

Рис. 3 – Суміщені криві DTG та DTA

Обробка експериментальних даних дозволила визначити середню швидкість дегідратації, що виражається відношенням маси видаленої води (мас.%) до часу зневоднення (хв.) (табл. 2). Середня швидкість варіює від 1,58 до 1,96 %/хв. Причому найнижча швидкість зареєстрована у банана, що є закономірним, оскільки він має найменшу вологість серед досліджених матеріалів та найбільший вміст як загальних вуглеводів, так і зокрема моно- та дисахаридів. Найвища швидкість дегідратації спостерігається у полуниці та лохини.

Для порівняння витрат теплоти на дегідратацію, було розраховано умовний тепловий ефект (УТЕ), який визначали за допомогою прикладної комп'ютерної програми «Derivatograph». Інтегральний тепловий ефект дегідратації пропорційний площі, обмеженої кривою ендотермічного піка DTA та передбачуваною базовою лінією. Площа ендотермічного піка була обчислена методом трапецій. УТЕ являє собою частку від ділення площі ендотермічного піка (мВ·с) на масу видаленої води (мг). За базову лінію прийнято пряму, що з'єднує точки початку та завершення поглинання теплоти на кривій DTA [14]. Результати (табл. 2) свідчать, що

найбільше теплоти витрачається при зневодненні аличі, персика, малини та банана а найменше — абрикоса, що може бути пов'язано з різним співвідношенням вільної та зв'язаної води у зразках [11].

Після повного видалення води відбувається деструкція органічних речовин, яка протікає з поступовою втратою маси зразків та з наростаючим виділенням теплоти, що можна спостерігати по ходу кривих DTA (рис. 2 та 3).

Аналіз отриманих результатів дозволив умовно поділити досліджені продукти на дві групи — ті у яких після завершення дегідратації спостерігається короткотривалий пік на кривій DTG з помітним виділенням теплоти різної інтенсивності в тому ж інтервалі температур (криві DTA, рис. 2) і ті, в яких піків на кривих DTG та DTA не спостерігається (рис. 3). При цьому втрата маси зразками 9 видів продуктів спостерігалась в діапазоні 161 – 222 °C (табл. 2). Це свідчить про наявність та розкладання в них певних термолабільних складових органічних речовин. Найменш інтенсивний пік спостерігається в тканинах чорниці, а найбільш інтенсивний в банані. Дане дослідження не дало можливість ідентифікувати, який саме компонент розкладається. Аналіз літератури дозволяє припустити, що відбувається розкладання певного сахариду.

В другій групі продуктів (рис. 3) після дегідратації подальша зміна маси зразків супроводжується поступовим підйомом кривих DTA, що свідчить про виділення теплоти в результаті термічного розкладання органічних речовин.

Як було зазначено термічна стабільність зразка визначалась за граничної температури повної дегідратації, після чого відбувається деструкція всього комплексу органічних речовин, яка призводить до втрати корисних біологічно активних речовин. В табл. 2 наведено досліджені зразки фруктів та ягід за їх термостабільністю в порядку зростання. У деяких дослідженнях [8, 9, 15] встановлено, що температура початку розкладання органічних речовин залежить від вмісту моно- та дисахаридів. Аналіз зразків полуниці та абрикоса на різних стадіях дозрівання показав, що при дозріванні в плодах збільшується вміст сахаридів. Це призводить до зниження їхньої термічної стабільності.

Якщо розглянути вміст моно- та дисахаридів (табл. 1), то можна помітити, що плоди з нижчим вмістом цукру (алича, смородина, нектарин, порічка, червона) мають вищу термостабільність. Проте є ряд представників (жимолость, лохина, полуниця, ожина), які мають невисокий вміст цукрів, проте є менш термічно стабільними. Тому в подальшому, корисно було б розширити спектр досліджень з залученням сучасних методів.

Висновки. Результати термічного аналізу м'яких тканин деяких фруктів та ягід дозволили визначити вологість, термічну стабільність, середню швидкість дегідратації та оцінити за допомогою умовного теплового ефекту витрати теплоти на зневоднення.

Дослідження показали, що дегідратація тканин при нагріванні розпочинається з температури навколишнього середовища і завершується за температур, що знаходяться в межах 161 – 197 °C. Як з'ясувалось ці температури визначають термічну стабільність тканин і для кожного плоду є характерними.

Визначена вологість зразків співпадає з вологістю плодів, наведеною в літературних джерелах. Середня швидкість дегідратації досліджених тканин коливається від 1,58 (для банана) до 1,96 %/хв. (для полуниці) і залежить від їх вологості.

Висунуто припущення, що величина умовного теплового ефекту дегідратації тканин залежить від вмісту сильно зв'язаної води і її співвідношення з вільною водою. Результати свідчать, що найбільше теплоти витрачається при зневодненні м'яких тканин аличі, а найменше — абрикоса.

Виявлено в тканинах чорниці, черешні, полуниці, жимолості, лохини, шовковиці, абрикосу, персика та банана термолабільні швидко деградуючі компоненти органічних сполук, що необхідно враховувати при термічній обробці плодів.

References

- Lozano, J. E. (2006). Chemical composition of fruits and its technological importance. In *Fruit manufacturing* (с. 133–161). Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30616-2_6.
- Joy, P., Anjana, R., Rashida Rajuva, T. A., & Anjana, R. (2016). *Fruits as a functional food* (Technical report. Chapter P60). https://www.researchgate.net/publication/306037407_FRUITS_AS_A_FUNCTIONAL_FOOD
- Molnár, P. J. (б. д.). Fruits and vegetables. In R. Lasztity (Ed.), *Encyclopedia of life support systems (EOLSS): Vol. II. Food quality and standards*. (28 p.). <http://www.eolss.net/sample-chapters/c10/e5-08-04-04.pdf>
- Marjanović-Balaban, Ž., Grujić, S., Jasic, M., & Vujadinović, D. (2012). Testing of chemical composition of wild berries. In *Third International Scientific Symposium "Agrosym Jahorina 2012"* (с. 154–160). doi.org/10.7251/AGSY1203154B.
- Shah, A. S., Bhat, S. V., Muzaffar, K., A. Ibrahim, S., & Dar, B. N. (2022). Processing technology, chemical composition, microbial quality and health benefits of dried fruits. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 10(1), 71–84. <https://doi.org/10.12944/crnfsj.10.1.06>
- Deinychenko, H. V., Huzenko, V. V., Dmytrevskyi, D. V., Perekest, V. V., & Rivnyi, K. M (2009). 1. Analitichna kharakteristika bezvidkhodnoyi pererobki plodovo-yahidnoyi sirovini. *Prohresivni tekhnika ta tekhnologiyi kharchovikh virobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli*, (1), 85–95. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2019_1_10

7. Shah, A. S., Bhat, S. V., Muzaffar, K., A. Ibrahim, S., & Dar, B. N. (2022). Processing technology, chemical composition, microbial quality and health benefits of dried fruits. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 10(1), 71–84. <https://doi.org/10.12944/crnfsj.10.1.06>
8. Castro, R. I., Muñoz-Vera, M., Parra-Palma, C., Valenzuela-Riffo, F., Figueroa, C. R., & Morales-Quintana, L. (2021). Characterization of cell wall modification through thermogravimetric analysis during ripening of Chilean strawberry (*Fragaria chiloensis*) fruit. *Cellulose*, 28(8), 4611–4623. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03806-w>
9. Kan, T., & Asma, B.M. (2010). Studies on the growth period and SO₂ absorption process in apricot fruits using differential scanning calorimetry. *Indian journal of agricultural research*, 44, 79–87.
10. de Ita, A., Flores, G., & Franco, F. (2015). Fruits and vegetables dehydration. *Journal of Physics: Conference Series*, 582, 012065. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/582/1/012065>
11. Snezhkin, Y., Mykhailik, V., & Dmytrenko, N. (2011). Dynamika zminy stanu vody v parenkhimnykh tkanyakh roslyn pry sushinni. *Industrial heat engineering*, 33(2), 35–40. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60315?show=full>
12. Mykhailik, V. A., Dmitrenko, N. V., & Snezhkin, Y. F. (2014). Change in the specific heat capacity of parenchymal tissues of apples due to dehydration. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87(1), 48–53. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-0983-7>
13. Mykhailik, V., Dmytrenko, N., Korinchevska, T., Parniakov, O., & Snezhkin, Y. (2022). Study of the heat of dehydration of d-fructose solution. *Scientific Works*, 86(1), 17–22. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2397>
14. Mykhailik, V. A., Snezhkin, Y. F., Korinchevska, T. V., & Gornikov, Y. I. (2017). Vplyv rezhymu konvektyvnoho sushinnia na krystalichnist poroshkiv z yabluk ta tsukrovoho buriaku. *Industrial heat engineering*, 37(5), 23–37. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.03>
15. Castro, R. I., & Morales-Quintana, L. (2019). Study of the cell wall components produced during different ripening stages through thermogravimetric analysis. *Cellulose*, 26(5), 3009–3020. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02305-3>

DESTRUCTION OF TISSUES OF SOME BERRIES AND FRUITS DURING HEATING

**Korinchevska T., Ph.D., Mykhailik V., Ph.D., Senior Research Scientist,
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv**

Abstract. Berries and fruits are an important element in healthy nutrition due to their high content of biologically active substances. At the same time, they contain up to 90 % water. This leads to the fact that they can quickly deteriorate and lose their natural value during storage. Therefore, fruit and berry raw materials are subjected to thermal processing to minimize crop losses. Studies of the destruction processes that occur when the material is heated were carried out using thermal analysis methods to optimize the heat treatment of raw materials. 17 types of berries and fruits, widely represented in the Ukrainian market during the summer season, were analysed. Research of crushed samples from the edible part of fresh fruits was carried out in a derivatograph with heating at a constant rate up to 250 °C. The results of thermal analysis indicate that the first stage of destruction is dehydration of the material accompanied by heat absorption. Moisture content, characteristic temperatures, rate and conditional thermal effect of dehydration of samples were determined because of analysis of the obtained data. It was established that the kinetics of the dehydration process and the value of the conditional thermal effect depend on the content of free and bound water in the product and their ratio. It was shown that the content of bound water is determined by the chemical composition, in which carbohydrates play the major role. It was established that the destruction of organic substances occurs after the complete removal of water and proceeds with a gradual loss of the mass of the samples and an increasing release of heat. It was revealed that the studied fruits and berries can be conditionally divided into two groups according to the nature of decomposition of thermolabile components of organic substances. The thermal stability of the studied berries and fruits was determined as the limiting temperature, after reaching which decomposition of organic substances in the product is observed. This temperature is one of the main operating parameters for the heat treatment of fruit and berry raw materials, which ensures high quality of processed products. It is assumed that thermal stability depends on the content of mono- and disaccharides included in the composition.

Key words: fruits, berries, destruction, thermal analysis, dehydration, free and bound water, thermal stability.

Список використаної літератури

1. Lozano J. Chemical composition of fruits and its technological importance // Fruit manufacturing. Boston, MA, 2006. P. 133-160. DOI: 10.1007/978-0-387-30616-2_6.
2. Fruits as a functional food / P. Joy et al. 2016. 70 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/306037407_FRUITS_AS_A_FUNCTIONAL_FOOD. (дата звернення: 10.05.2024).

3. Molnár P. J. Fruits and vegetables. *Encyclopedia of life support systems (EOLSS)* / ed. by R. Lasztity. Vol. II : Food quality and standards. 28 p. URL: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c10/e5-08-04-04.pdf> (дата звернення: 16.05.2024).
4. Testing of chemical composition of wild berries / Ž. Marjanović-Balaban et al. *Third International Scientific Symposium "Agrosym Jahorina 2012"* : Conference Paper. 2012. P. 154–160.
5. Processing technology, chemical composition, microbial quality and health benefits of dried fruits / A. S. Shah et al. *Current research in nutrition and food science journal*. 2022. Vol. 10, no. 1. P. 71–84. DOI: 0.12944/crnfsj.10.1.06
6. Аналітична характеристика безвідходної переробки плодово-ягідної сировини / Г. В. Дейниченко та ін. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2009. № 1. С. 85–95. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2019_1_10 (дата звернення: 17.05.2024).
7. Ropelewska E. Thermal properties of fresh and dried cranberry (*Vaccinium macrocarpon*) fruits determined by differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis. *Journal of Food Process Engineering*. 2019. Vol. 42, no. 4. DOI: 10.1111/jfpe.13061
8. Characterization of cell wall modification through thermogravimetric analysis during ripening of Chilean strawberry (*Fragaria chiloensis*) fruit / R. I. Castro et al. *Cellulose*. 2021. Vol. 28, no. 8. P. 4611–4623. DOI: 10.1007/s10570-021-03806-w.
9. Kan T., Asma B.M. Studies on the growth period and SO₂ absorption process in apricot fruits using differential scanning calorimetry. *Indian journal of agricultural research*. 2010. Vol. 44. P. 79-87.
10. de Ita A., Flores G., Franco F. Fruits and vegetables dehydration. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 582. P. 012065. DOI: 10.1088/1742-6596/582/1/012065.
11. Снежкін Ю., Михайлик В., Дмитренко Н. Динаміка зміни стану води в паренхімних тканинах рослин при сушінні. *Промислова теплотехніка*. 2011. Т. 33, № 2. С. 35–40. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60315?show=full>.
12. Mykhailik V. A., Dmitrenko N. V., Snezhkin Y. F. Change in the specific heat capacity of parenchymal tissues of apples due to dehydration. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2014. Vol. 87, no. 1. P. 48–53. DOI: 10.1007/s10891-014-0983-7.
13. Study of the heat of dehydration of d-fructose solution / V. Mykhailik et al. *Scientific Works*. 2022. Vol. 86, no. 1. P. 17–22. DOI: 10.15673/swonaft.v86i1.2397.
14. Вплив режиму конвективного сушіння на кристалічність порошків з яблук та цукрового буряку / В.А. Михайлик та ін. *Промислова теплотехніка*. 2015. Т. 37, № 5. С. 23–37. DOI: 10.31472/ihe.5.2015.03.
15. Castro R. I., Morales-Quintana L. Study of the cell wall components produced during different ripening stages through thermogravimetric analysis. *Cellulose*. 2019. Vol. 26, no. 5. P. 3009–3020. DOI: 10.1007/s10570-019-02305-3.

Отримано в редакцію 11.06.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 11.06.2024
Approved 25.09.2024

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАСІННЯ ДИНИ ТА ТЕПЛОМАСООБМІН В ПРОЦЕСІ ЙОГО СУШІННЯ

Дмитренко Н.В., к.т.н., Іванов С.О., к.т.н., Дабіжа Н.О., к.т.н.
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація. Сушіння є основним технологічним етапом підготовки посівного матеріалу до тривалого зберігання. Під час сушіння відбувається видалення надлишкової вологи з насіння до рівня, при якому припиняється мікробне псування та мінімізується ферментативна активність. Для збереження схожості та сили проростання посівне насіння зазвичай зневоднюють в конвективних сушарках при таких параметрах сушильного агента, при яких не відбувається перевищення гранично допустимої температури нагріву матеріалу. В статті викладені результати всебічних досліджень насіння дини сорту «Ананас» як об'єкта сушіння з метою розроблення енергоефективних режимів зневоднення. З застосуванням диференціального мікрокалориметра ДМКИ-01 проведені експериментальні та розрахункові дослідження теплоємності насіння дини та витрат теплоти на випаровування з нього вологи. Надана формула для розрахунку питомої теплоємності насіння дини в діапазоні змінювання відносної вологості від 10,4 до 37,5 % та температури від 32,5 до 92,5 °С. За результатами досліджень тепломасообмінних процесів під час конвективного сушіння насіння дини при температурах теплоносія 40, 50 та 60 °С та експериментально визначеними теплофізичними властивостями проведені розрахунки критерію Ребіндера і густини теплових потоків на поверхні матеріалу. На підставі сумісного аналізу одержаних експериментальних та розрахункових даних зроблено висновок про те, що задля раціонального використання енергії та збереження якості та схожості насіння дини, його доцільно конвективно сушити при температурі теплоносія 40 °С до вологості 15 % відн.. Після досягнення насінням вологості 25 % відн. необхідно знижувати енергопідведення, бо теплові потоки на поверхні матеріалу з цього моменту процесу сушіння стабілізуються на дуже низькому рівні.

Ключові слова: насіння дини, теплоємність, питома теплота випаровування, сушіння, тепломасообмін, критерій Ребіндера, теплові потоки.

Вступ. Агропромисловий сектор, основою якого є сільське господарство, забезпечує промисловість сировиною, а населення – високоякісними та безпечними харчовими продуктами. Одним з таких продуктів є плоди дини, які традиційно вирощують у східно-південних районах України. Крім вишуканого смаку, ніжного аромату та соковитої м'якоти, диня має лікувальні й профілактичні властивості та є цінним дієтичним продуктом. Для одержання високих урожаїв дині важливим завданням є підготовка і збереження посівного матеріалу. Однією з головних проблем заготівлі насіння дини є те, що воно швидко псується під час зберігання, що призводить до зниження його поживної цінності та схожості.

Сушіння є основним технологічним етапом підготовки посівного матеріалу до тривалого зберігання. Під час сушіння відбувається видалення надлишкової вологи з насіння до рівня, при якому в ньому мінімізується ферментативна активність та припиняється життєдіяльність мікробів. Для збереження схожості та сили проростання посівне насіння зазвичай зневоднюють в конвективних сушарках при таких параметрах сушильного агента, при яких не відбувається перевищення гранично допустимої температури нагріву матеріалу.

Дослідження насіння дини як об'єкта сушіння потребує експериментального визначення його теплофізичних властивостей та закономірностей тепломасоперенесення в процесі зневоднення задля підбору доцільних технологічних параметрів, що дозволить отримати якісний продукт. Використання результатів цих досліджень при розробленні енергоефективних режимів зневоднення і проектуванні та оптимізації сушильних установок є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити, що в літературних джерелах було знайдено дуже мало досліджень щодо сушіння насіння дини.

Так у статті [1] показано, що отримання якісного насіннєвого матеріалу дини потребує низькотемпературних режимів сушіння, бо тривала дія температури негативно впливає на схожість насіння. Це підтверджено дослідженнями, в яких схожість при температурі 38 та 41 °С зменшувалась на 2...10%, а в деяких випадках до 16%.

В дослідженні [2] наведені данні з сушіння насіння дини при температурі теплоносія 40, 50, 60 °С і відносній вологості повітря 10, 20, 30, 40, 50 %. Збільшення вологості повітря і зменшення температури сушіння збільшує ту рівноважну вологість насіння дини, якої можна досягти під час зневоднення. Так, при температурі 70 °С можлива рівноважна вологість насіння дини після висушування становить від 0 до 9 %, при 60 °С – від 0 до 10 %, при 50 °С – від 0 до 12 %, а при 40 °С – від 0 до 13 %. Температура теплоносія і його вологість впливають також на інтенсивність та коефіцієнт сушіння. При температурі теплоносія 60 °С та

відносній вологості повітря 30 % тривалість сушіння насіння дині склала 80 хв з коефіцієнтом сушіння $13,5 \text{ хв}^{-1}$.

В роботі [3] вивчали періодичне та безперервне сушіння насіння дині «Неве». Насіння сушили в сушарці з нерухомим шаром при температурі 60°C та швидкості повітря 1 м/с з подальшим прогнозуванням кінетики сушіння з використанням емпіричних моделей.

Раніше вже були визначені деякі теплофізичні властивості насіння дині. Відомо, що збільшення температури від 30 до 100°C приводить до зниження його питомої теплоємності від $2,995$ до $1,596 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, а теплопровідності від $3,62$ до $0,46 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ [4]. Але рівняння теплоємності та теплопровідності тут не були виведені.

Дослідження змінювання критерію Ребіндера Rb під час сушіння насіння дині та змінювання густини теплових потоків на поверхні матеріалу при різних температурах досі не проводилися. Але, зазвичай, чисельні значення Rb в процесі сушіння рослинних матеріалів змінюються в межах від $0,2$ до $0,003$. Наприклад, при конвективному сушінні моркви від вологості 800 до 50% абс., чисельні значення Rb змінювались від $0,151$ до $0,0038$ [5].

Аналіз існуючих досліджень показав, що для повної характеристики тепломасобміну в процесі сушіння насіння дині, забезпечення ефективності витрат теплоти і правильного вибору технологічних параметрів процесу сушіння потрібно визначити питому теплоємність та питому теплоту випаровування води з насіння дині. Це дозволить розрахувати критерій Ребіндера процесу сушіння, теплові потоки на поверхні матеріалу та правильно підібрати технологічні параметри процесу сушіння насіння дині.

Тому нами було поставлено завдання дослідити змінювання в процесі сушіння теплоти випаровування води з насіння дині сорту «Ананас» (не гібрид), експериментально визначити його питому теплоємність та розрахувати за цими даними критерій Ребіндера і теплові потоки під час конвективного сушіння насіння за різними температурними режимами.

Матеріали і методи. Для дослідження був вибраний сорт дині «Ананас» (не гібрид). Це середньоранній сорт, від висадки розсади до збору першого врожаю якого проходить приблизно $65-70$ днів. Вирощується у відкритому ґрунті. Рослина сильна, з густим, рясним листям, з добре розвинутою кореневою системою. Плоди дині «Ананас» витягнуто-овальної форми, середніх розмірів, насичено-жовтого кольору. Вага – від $1,5$ до 3 кг . Шкірочка шорстка, покрита густою, дрібною сіткою, щільна. На зрізі плоди кремово-жовтого кольору, з насінневою камерою середніх розмірів, великою кількістю насіння і м'ясистим ендокарпієм (м'якоттю).

Для дослідів стиглу диню розрізали і з насінневої камери виймали м'якоть з насінням, яке ретельно відокремлювали від м'якоті, просушували та зберігали в прохолодному місці.

Для визначення теплоємності насіння дині та питомої теплоти випаровування води з нього застосовували диференціальний мікрокалориметр ДМКИ-01, що розроблений у відділі теплотерії Інституту технічної теплофізики НАН України [6]. Прилад являє собою сукупність функціонально поєднаних теплового блоку, аналітичних ваг, компресора, блоку електронного керування і персонального комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням. Для дослідження досить крупного, з великим термічним опором насіння дині було використано калориметричну платформу з циліндричними комірками глибиною 36 мм , в яких перетворювач теплового потоку розміщений вздовж периметру стінок комірок.

Визначення теплоти випаровування за допомогою ДМКИ-01 засновано на синхронному вимірюванні змінювання маси матеріалу та кількості теплоти, що витрачається на випаровування під час ізотермічного конвективно-кондуктивного сушіння. Поточні значення питомих витрат теплоти на випаровування води зі зразка під час сушіння визначали після закінчення дослідів за формулою:

$$r_i = \frac{\int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} q(\tau) d\tau}{m(\tau_i) - m(\tau_{i+1})}, \quad (1)$$

де r_i – питома витрата теплоти на випаровування за час сушіння від τ_i до τ_{i+1} , кДж/кг ;

τ_i та τ_{i+1} – поточні моменти часу процесу сушіння, с ;

$q(\tau)$ – тепловий потік всередині робочої камери як функція часу, кДж/с ;

$m(\tau_i)$ та $m(\tau_{i+1})$ – маса зразка в моменти часу τ_i та τ_{i+1} , кг .

Визначення питомої теплоємності за допомогою ДМКИ-01 здійснювали за стандартизованою методикою методом покрокового сканування через кожні 5°C [7]. На підставі отриманих даних визначали питому теплоємність насіння при температурі середини температурного ступеня за формулою:

$$c_i = \frac{\int_{\tau_{поч}}^{\tau_{кін}} q(\tau) d\tau}{m(t_{кін} - t_{поч})}, \quad (2)$$

де c_i – питома теплоємність матеріалу при температурі середини температурного кроку, кДж/(кг·К);

m – маса матеріалу, кг;

$t_{поч.}$ та $t_{кін}$ – температура початку та кінця температурного кроку, К.

Дослідження тепломасообмінних процесів при зневодненні насіння дині проводились на конвективному сушильному стенді за методикою, що викладена в монографії [5]. Насіння насипали на сітчастий піддон розміром 100х50х4 мм, який розміщували на штанзі терезів в середині сушильної камери. Для відстеження змінювання температури матеріалу під час сушіння в середину насіння вставляли термопару. Дослідження кінетики сушіння насіння дині в елементарному шарі на конвективному сушильному стенді здійснювалися за режимами, вибір яких було зроблено за літературними даними [2, 8-10]. Для збору інформації під час досліджень використовувався персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням. За експериментальними даними одержані криві сушіння насіння дині $W = f(\tau)$ та температурні криві $t = f(\tau)$. При певній обробці цих даних встановлена залежність середньооб'ємної температури матеріалу від вологовмісту.

Для оптимізації інтенсивності теплопідведення в процесі сушіння за встановленою залежністю середньооб'ємної температури насіння дині від його вологовмісту, а також за експериментально визначеними питомими теплоємністю насіння та витратами теплоти на випаровування з нього вологи проводилися розрахунки числа Ребіндера за формулою:

$$Rb_i = \frac{c_i}{r_i} \left(\frac{dt_i}{du_i} \right), \quad (3)$$

де $u_i = (m_i - m_{сух}) / m_{сух}$ – вологовміст зразка по відношенню до маси сухої речовини у певний момент сушіння, кг/кг с.м.

Критерій Ребіндера характеризує співвідношення кількості теплоти, що витрачена на нагрівання матеріалу, до кількості теплоти, що витрачена на випаровування з нього вологи, за нескінченно малий проміжок часу, тобто визначає ефективність витрат теплоти на процес випаровування і за фізичним змістом є критерієм оптимізації. Оскільки нагрівання матеріалу є нераціональною витратою теплоти під час сушіння, бажаним є зведення величини Rb до мінімально можливої під час певного процесу. Знання залежності між Rb і вологовмістом матеріалу дозволяє привести рішення рівняння масообміну до відповідного рішення рівняння теплообміну. Якщо визначити відносну густину теплового потоку $q^*(\tau)$ як відношення потоку тепла в період падаючої швидкості сушіння $q(\tau)$ до потоку тепла в період постійної (максимальної) швидкості сушіння q_N , тоді, як показано в [11], можна одержати співвідношення:

$$q^*(\tau_i) = \frac{q(\tau_i)}{q_N} = \left(\frac{du_i}{d\tau_i} \right)^* (1 + Rb_i), \quad (4)$$

де $\left(\frac{du_i}{d\tau_i} \right)^* = \frac{100}{N} \left(\frac{du_i}{d\tau_i} \right) = \frac{1}{N} \left(\frac{dW_i^C}{d\tau_i} \right)$ – відносна швидкість сушіння;

$N = \frac{dW_N^C}{d\tau_N}$ – нормувальний коефіцієнт, який визначається в періоді постійної (максимальної)

швидкості сушіння;

$W_N^C = u_N \cdot 100$ – абсолютна вологість матеріалу в періоді постійної (максимальної) швидкості сушіння, %.

Співвідношення (4) встановлює зв'язок між тепло- і вологообміном під час сушіння за допомогою критерію Rb та є основним рівнянням кінетики процесу сушіння. Воно дозволяє дослідити змінювання густини теплового потоку $q(\tau_i)$ в процесі сушіння, уникаючи визначення коефіцієнту теплообміну, за оберненою залежністю:

$$q(\tau_i) = q^*(\tau_i) \cdot q_N, \text{ кВт/м}^2, \quad (5)$$

де $q_N = r_N \cdot \frac{\Delta m_N}{\Delta \tau_N \cdot S}$ – помножена на теплоту випаровування кількість вологи, яка видалена з 1 м² поверхні сушіння (S) за 1 с в періоді постійної (максимальної) швидкості сушіння.

Результати досліджень. Теплоємність насіння дині з вологістю $W = 0 \dots 37,5$ % відн. визначена в діапазоні температур $t = 32,5 \dots 97,5$ °C (рис. 1).

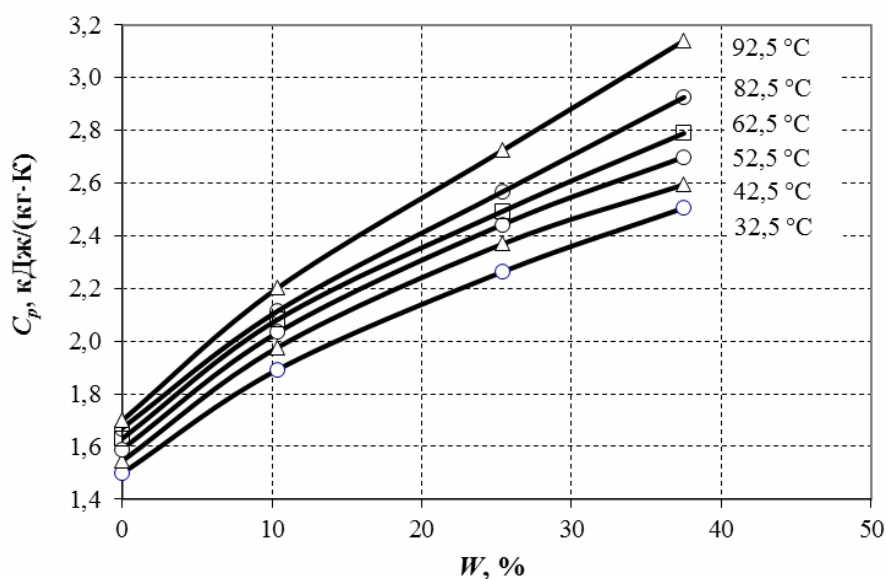


Рис. 1 – Залежність питомої теплоємності насіння дині сорту «Ананас» від відносної вологості при різних температурах

Як видно з рис. 1, при досягненні відносної вологості $W \approx 10\%$ відбувається злам лінійності графіків залежності теплоємності насіння дині від вологості, такий самий як і для інших рослинних тканин [12]. Це явище обумовлено деградацією спіральної структури білків при зневодненні, бо саме молекули води формують спіраль з молекули білка. Без води структура білків хаотична, вони мають теплоємність меншу за теплоємність білків, що закручені у спіраль. Оскільки під час конвективного сушіння рідко вдається досягнути вологості насіння менше 10%, була проведена лінійна апроксимація одержаних даних в діапазоні вологості насіння $W = 10,4 \dots 37,5$ % відн. за температур $t = 32,5 \dots 92,5$ °C та визначена формула для розрахунку теплоємності насіння дині сорту «Ананас» з похибкою не більше 2%:

$$C_p(W, t) = 1,6569 + 0,01488W + 0,002t + 0,0002tW, \text{ кДж/(кг·К)}. \quad (6)$$

Дослідження витрат теплоти на випаровування вологи з насіння дині проводили при температурах конвективно-кондуктивного сушіння 40, 50 та 60 °C (рис.2).

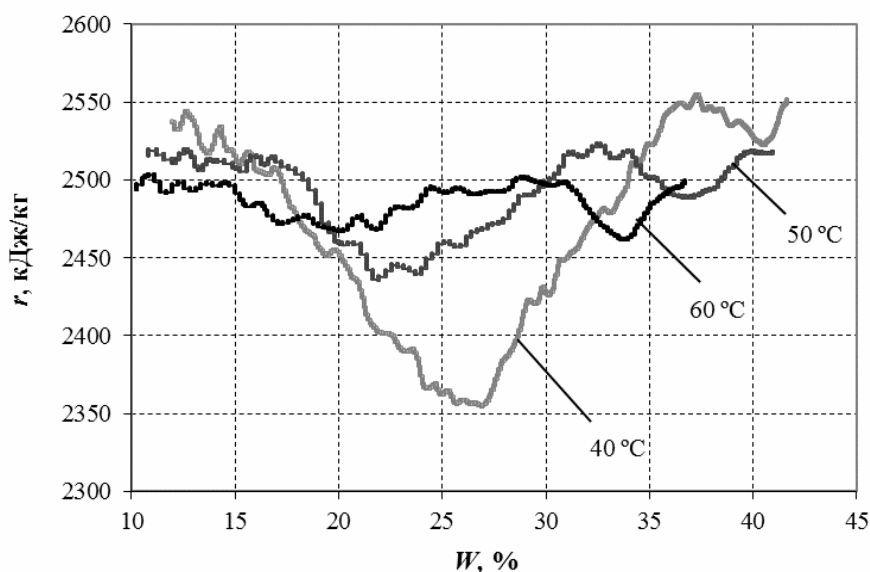


Рис. 2 – Залежність питомих витрат теплоти на випаровування вологи з насіння дині сорту «Ананас» від відносної вологості під час конвективно-кондуктивного сушіння при різних температурах

Як видно (рис. 2), експериментально одержані питомі витрати теплоти на випаровування води з насіння дині перевищили приблизно на 6 % табличні значення теплоти випаровування чистої води для кожної з температур (2406, 2382 та 2358 кДж/кг, відповідно). Це свідчить про видалення з насіння не лише вільної, але й зв'язаної води з самого початку сушіння, хоча традиційно вважається, що істотне зростання енерговитрат на випаровування відбувається на заключному етапі сушіння і обумовлено початком видалення гігроскопічної води матеріалу. При тому, загальне збільшення температури сушіння з 40 до 60 °C зменшує питомі витрати теплоти на випаровування відповідно зменшенню питомої теплоти випаровування чистої води.

На експериментальних кривих (рис. 2) спостерігаються також піки зниження теплових витрат на випаровування, початок яких зсувається в бік більш низької вологості при збільшенні температури сушіння. Додаткові візуальні спостереження поточних змін стану насіння під час сушіння дозволили ідентифікувати це явище як тепловий ефект, що пов'язаний з руйнуванням спочатку верхньої тонкої оболонки насіння – плівки-принасінника (перший пік екзотермічного ефекту), потім нижньої твердої оболонки – склеротесту (другий пік екзотермічного ефекту). Слід зазначити, що оскільки процес руйнування не є рівноважним, то робити висновки щодо конкретної величини теплового ефекту руйнування на підставі отриманих даних не є коректним.

Дослідження кінетики процесу сушіння насіння дині проводили на конвективному сушильному стенді при температурах теплоносія 40, 50, 60 °C, швидкості руху повітря 1,5 м/с та його вологовмісті 7 г/кг сухого повітря (рис. 3).

За експериментально одержаними даними щодо теплофізичних характеристик (рис. 1 і 2) та кінетики зневоднення (рис. 3) за формулою (3) було вираховано змінювання критерію Ребіндера Rb в процесі сушіння насіння дині сорту «Ананас» для різних температурних режимів (рис. 4).

На початку процесу сушіння відбувається прогрівання матеріалу, і Rb має досить великі значення (рис. 4). В процесі сушіння Rb зменшується до нуля, що вказує на те, що теплота поступово починає витрачатися переважно на випаровування води з матеріалу, а не на його нагрівання. Коли Rb знову починає зростати, це означає, що все більша частка теплоти починає витрачатися переважно на нагрівання матеріалу, а не на випаровування з нього води. Процес зневоднення значно сповільнюється, а подальше сушіння насіння до більш низької вологості є тепловитратним та недоцільним. Сушіння насіння, особливо посівного, доцільно проводити до моменту зростання критерію Ребіндера. Тобто насіння дині варто сушити при температурі 40 °C до досягнення ним вологості 15 % відн., при температурі 50 °C – до 13 % відн., при температурі 60 °C – до 11 % відн.

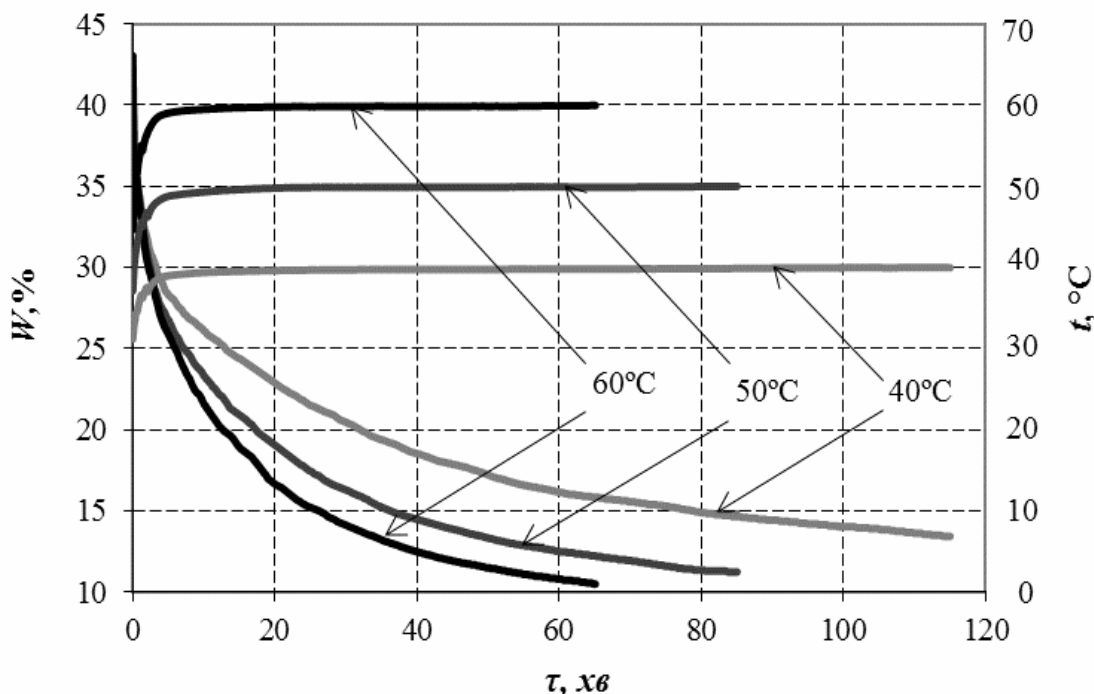


Рис. 3 – Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння насіння дині сорту «Ананас» в елементарному шарі (верхні криві – зміна температури насіння, нижні – криві сушіння)

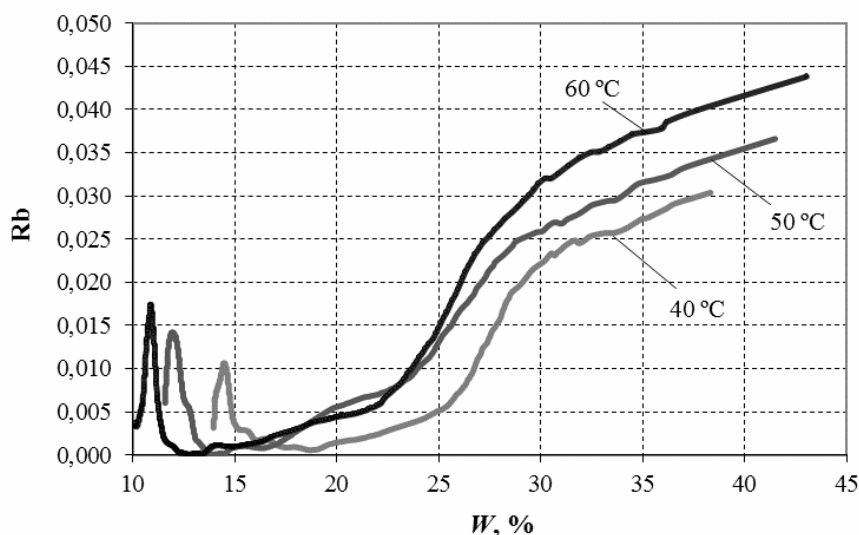


Рис. 4 – Залежність Rb від відносної вологості насіння дині сорту «Ананас» під час його сушіння в елементарному шарі на конвективному сушильному стенді при різних температурах теплоносія

Швидке спадання чисельних значень Rb наприкінці процесу сушіння, обумовлене не лише остаточним прогріванням матеріалу до температури теплоносія, але й початком періоду видалення з насіння виключно зв'язаної води, що потребує значних витрат теплоти та часу на її випаровування. Витрати теплоти на випаровування (на рис. 2 та у знаменнику дробу формули 3) швидко зростають, а теплоємність залишається сталою величиною, тому Rb швидко зменшується.

За одержаними даними щодо змінювання критерію Ребіндера Rb в процесі сушіння насіння дині сорту «Ананас» (рис. 4) за формулою (5) було вираховано змінювання густини теплового потоку під час сушіння при різних температурах теплоносія та представлено в залежності від досягнутої насінням відносної вологості (рис. 5). При цьому, зауважимо, що теплові потоки визначали за експериментально одержаними теплофізичними характеристиками (теплоємністю та теплотою випаровування), що дозволило врахувати реальні витрати теплоти в процесі сушіння, а саме, крім теплоти пароутворення, теплоту руйнування зв'язків молекул води з іншими речовинами рослинної тканини і теплоту адсорбції пари води матеріалом.

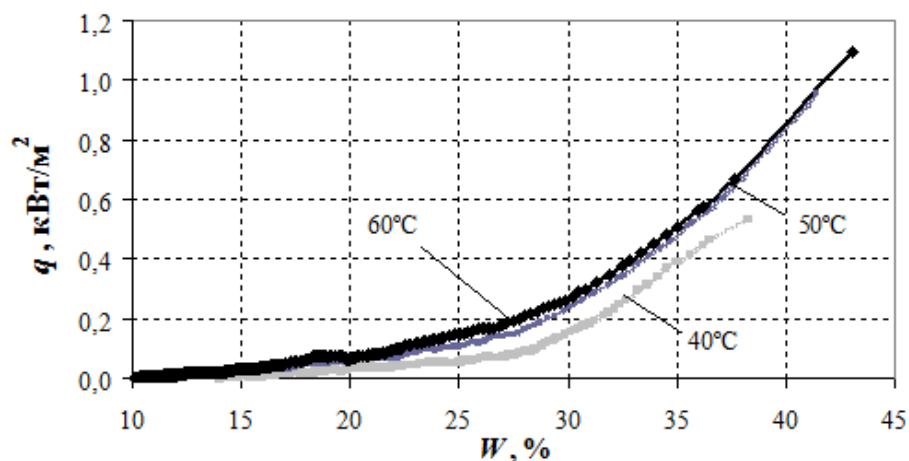


Рис. 5 – Залежність густини теплового потоку від відносної вологості насіння дині сорту «Ананас» при різних температурах теплоносія

За одержаними величинами теплових потоків можна розрахувати витрати теплоти в сушарці, які корисно витрачаються на нагрівання матеріалу та його зневоднення. На графіках (рис. 5) бачимо, що теплові потоки зменшуються зі зменшенням вологості насіння і, коли основні витрати теплоти йдуть на випаровування (при зменшенні вологості насіння нижче 25 % відн. згідно значень числа Rb), величини q прямують до мінімуму. Значить, в цьому періоді сушіння можливо зменшити підведення енергії у сушильну камеру.

Наочне порівняння значень критерію Rb (рис.4) та густини теплового потоку q (рис. 5) при різних режимах сушіння показує, що вони залежать від температури теплоносія: більші значення Rb та q відповідають

режиму з вищою температурою. Це свідчить про доцільність використання більш низької температури теплоносія, не лише задля більш раціонального використання енергії, але й задля позитивного впливу на якість та схожість насіння.

Висновки. На підставі експериментальних досліджень одержана формула для розрахунку, з похибкою не більше 2 %, теплоємності насіння дині сорту «Ананас» в залежності від двох факторів: відносної вологості насіння в діапазоні $W = 10,4 \dots 37,5$ % та температури в діапазоні $t = 32,5 \dots 92,5$ °C.

Експериментальне дослідження витрат теплоти на зневоднення насіння дині показало, що їхня відмінність від табличних значень теплоти випаровування чистої води складає в середньому 6 %, а розтріскування оболонки насіння через висушування супроводжується викидом теплоти (екзотермічним тепловим ефектом).

За експериментально одержаними даними з теплоємності та теплоти випаровування розраховані значення критерію Ребіндера в процесі сушіння насіння дині сорту «Ананас» та густини теплових потоків при різних температурах теплоносія, які можна використовувати при розрахунках сушильних установок задля їхньої оптимізації.

Сумісний аналіз одержаних експериментальних та розрахункових даних показав, що задля більш раціонального використання енергії та більш позитивного впливу на якість і схожість насіння доцільно проводити конвективне сушіння насіння дині сорту «Ананас» до вологості 15% відн. за температури теплоносія 40 °C. Після досягнення насінням вологості 25 % відн. можливо зменшення підводу енергії всередину сушильної камери задля більш раціонального її використання.

References

1. Torres, S. B., & Filho, J. M. (2003). Accelerated aging of melon seeds. *Scientia Agricola*, 60(1), 77–82. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162003000100012>
2. Ajibola, O. O. (1989). Thin-layer drying of melon seed. *Journal of Food Engineering*, 9(4), 305–320. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(89\)90037](https://doi.org/10.1016/0260-8774(89)90037)
3. da Silva, R. C., da Silva, W. P., Gomes, J. P., de Melo Queiroz, A. J., et al. (2022). A new empirical model for predicting intermittent and continuous drying of “Neve” melon (*Cucumis melo* sp.) seeds. *Agriculture*, 12, 328–340. <https://doi.org/10.3390/agriculture12030328>
4. Asoiro, F. U., Simeon, M. I., & Ezugwu, I. C. (2018). Aerodynamic and thermal properties of melon (*Citrullus lanatus*) seeds under varying drying temperature for separation from shells and processing. *AZOJETE*, 14(sp.i4), 149–160.
5. Snyezhkin, Yu. F., & Shapar, R. O. (2018). *Teplomassoobminni tekhnolohiyi pererobky pektynovmisnoyi syrovyny*. TOV «SIK HRUP Ukrayina».
6. Snyezhkin, Yu. F., Dekusha, L. V., Dubovikova, N. S., Hryshchenko, T. H., Vorobyov, L. Y., & Boryak, L. A. (2008). *Kalorymetrichnyy prystriy dlya vyznachennya pytomoyi teploty vyparovuvannya volohy ta orhanichnykh ridyn z materialiv* (Patent Ukrayiny № 84075). Derzhavna sluzhba intelektual'noyi vlasnosti Ukrayiny.
7. (2011). *Plastmasy. Dyferentsial'na skanuval'na kalorymetriya. Chastyna 4. Vyznachennya pytomoyi teployemnosti* (DSTU ISO 11357-4:2010). Derzhspozhyvstandart Ukrayiny.
8. Sacilik, K. (2007). Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Food Engineering*, 79, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.023>
9. Guiné, R. P. F., Pinho, S., & Barroca, M. J. (2011). Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita Maxima*). *Food and Bioprocess Processing*, 89, 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.09.001>
10. Hashim, N., Daniel, O., & Rahaman, E. (2014). A preliminary study: Kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita Moschata*) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.048>
11. Lykov A. V. (1968). *Teoriya sushinnya*. Enerhiya.
12. Mikhailik, V. A., Dmitrenko, N. V., Snyezhkin, Y. F. (2014). Change in the specific heat capacity of parenchymal tissues of apples due to dehydration. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87(1), 48–53. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-0983-7>

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MELON SEEDS AND HEAT AND MASS TRANSFER IN ITS DRYING PROCESS

Dmytrenko N.V., Ph.D., Ivanov S.O., Ph.D., Dabizha N.O., Ph.D.

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

Abstract. Drying is the main technological stage of seed preparation for long-term storage. During drying moisture is removed from seeds to a level that microbial spoilage stops and enzymatic activity minimizes. In order to

preserve germination seeds are usually dehydrated in convective dryers at such parameters of the drying agent that do not exceed the maximum allowable heating temperature of the material. The article presents the results of comprehensive studies of "Pineapple" melon seeds as a drying object with the aim of developing energy-efficient dehydration regimes. Using the DMKY-01 differential microcalorimeter, experimental and calculated studies of the heat capacity of melon seeds and heat consumption for moisture evaporation from it were carried out. The formula for calculating the specific heat capacity of melon seeds in the range of changing relative humidity from 10,4 to 37,5 % and temperature from 32,5 to 92,5 °C is given. According to the results of studies of heat and mass exchange processes during convective drying of melon seeds at coolant temperatures of 40, 50 and 60 °C and experimentally determined thermophysical properties, calculations of Rebinder's criterion and heat flows on the surface of the material were carried out. On the basis of the combined analysis of the obtained experimental and calculation data, it was concluded that for the rational use of energy and preservation of the quality and germination of melon seeds, it is advisable to convectively dry them at a coolant temperature of 40 °C to relative humidity of seeds 15 %. After relative humidity of seeds reaches 25 % it is necessary to reduce the energy input, because heat flows on the surface of the material from this moment of the drying process stabilize at a very low level.

Key words: melon seeds, heat capacity, specific heat of evaporation, drying, heat and mass transfer, Rebinder's criterion, heat flows.

Список використаної літератури

1. Torres S. B., Filho J. M. Accelerated aging of melon seeds. *Scientia Agricola*. 2003. Vol. 60, no. 1. P. 77–82. DOI: 10.1590/s0103-90162003000100012.
2. Ajibola O. O. Thin-layer drying of melon seed. *Journal of Food Engineering*. 1989. Vol. 9, no. 4. P. 305–320. DOI: 10.1016/0260-8774(89)90037-x.
3. da Silva R. C., da Silva W. P., Gomes J. P., de Melo Queiroz A. J., et al. A new empirical model for predicting intermittent and continuous drying of “Neve” melon (*Cucumis melo* sp.) seeds. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. P. 328–340. DOI: 10.3390/agriculture12030328.
4. Asoiro F. U., Simeon M. I., Ezugwu, I. C. Aerodynamic and thermal properties of melon (*Citrullus lanatus*) seeds under varying drying temperature for separation from shells and processing. *AZOJETE*. 2018. Vol. 14(SP.i4). P. 149–160.
5. Снежкін Ю. Ф., Шапар Р. О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини : монографія. Київ : ТОВ «СІК ГРУП Україна», 2018. 228 с.
6. Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів : пат. 84075 України : G01N 25/26, G01N 25/28. № а 2006 13266 ; заявл. 15.12.2006 ; опубл. 10.09.2008, Бюл. №17. 10 с.
7. ДСТУ ISO 11357-4:2010. Пластмаси. Диференціальна сканувальна калориметрія. Частина 4. Визначення питомої теплоємності. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2011. 8 с.
8. Sacilik K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Food Engineering*. 2007. Vol. 79, no. 1. P. 23–30. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.023.
9. Guiné R. P. F., Pinho S., Barroca M. J. Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita Maxima*). *Food and Bioproducts Processing*. 2011. Vol. 89, no. 4. P. 422–428. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.09.001.
10. Hashim N., Daniel O., Rahaman E. A preliminary study: Kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita Moschata*) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2014. Vol. 2. P. 345–352. DOI: 10.1016/j.aaspro.2014.11.048.
11. Лыков А. В. Теория сушки. Москва : Энергия, 1968. 472 с.
12. Mikhailik V. A., Dmitrenko N. V., Snezhkin Y. F. Change in the specific heat capacity of parenchymal tissues of apples due to dehydration. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2014. Vol. 87, no. 1. P. 48–53. DOI: 10.1007/s10891-014-0983-7.

Отримано в редакцію 24.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 24.07.2024
Approved 25.09.2024

ПЕРЕРОБКА ХУРМИ (DIOSPYROS KAKI L.) СУШІННЯМ

Петрова Ж.О., д.т.н., професор, Новікова Ю.П., доктор філософії, Слободянюк К.С., к.т.н.,
Граков О.П., доктор філософії, Коваль І.О., аспірант
Інститут технічної теплофізики НАН України, м.Київ

Анотація. У світі збільшується попит на функціональне харчування, яке може забезпечувати організм людини макро- та мікронутрієнтами, зменшувати ризик хронічних захворювань, покращувати фізичний стан і психічне благополуччя. Функціональне харчування відіграє важливу роль у підтримці здорового способу життя та зниженні факторів ризику різних захворювань. До функціональних продуктів відносять ті, які містять один або кілька біологічно активних харчових інгредієнтів. У харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості значний потенціал для прогресу продемонстрували каротиноїди, завдяки своїй багатій поживній цінності та функціональними властивостями. Каротиноїди це природні органічні пігменти, що виробляються мікроорганізмами та рослинами. Сьогодні розпізнано близько 600 каротиноїдів. Їх поділяють на два класи: ксантофіли та каротини. Каротиноїди в основному містяться у фруктах, ягодах, овочах, мікроорганізмах і деяких морських організмах. Хурма (*Diospyros Kaki L.*) – це солодкий, злегка терпкий фрукт, який є джерелом бета-каротину, вітамінів А і Е, аскорбінової кислоти, багата вуглеводами, дубильними речовинами і фенольними сполуками, є хорошим джерелом клітковини, а також має потужну антиоксидантну дію. Хурма найбільш поширена в країнах Східної Азії. Хурма відноситься до сезонних продуктів, та має обмежені терміни зберігання, для їх збільшення можна використовувати сушіння. Більш розповсюдженими методами сушіння є конвекція, сублімація, сонячне та інфрачервоне. З цих методів конвективне сушіння дає якісний матеріал з меншими енерговитратами. Але при цьому в світі розповсюджується комбіноване сушіння. Тому метою роботи є переробка плодів хурми сушінням та визначення впливу різних режимів. Дослідження кінетики сушіння показало, що найбільш доцільними режимами є ступеневий та комбіновані режими сушіння, які інтенсифікують процес у 1,92 та 1,63 рази порівняно з 65 °С.

Ключові слова: сушіння, хурма, конфекція, комбіноване сушіння, інтенсифікація.

Постановка проблеми. Сьогодні у всьому світі збільшується попит на здорове харчування, яке полягає у раціональному та збалансованому поєднанні рослинної та тваринної продукції, для забезпечення організму людини необхідними макронутрієнтами, так і мікронутрієнтами на кожному етапі життя [1]. Макронутрієнти - це поживні речовини, які потрібні організму у великих кількостях, оскільки вони забезпечують організм енергією [2]. В основному їх класифікують як вуглеводи, білки та жири. Мікронутрієнти - це елементи, які містяться в раціоні в невеликих кількостях, такі як вітаміни та мінерали [3].

Велика кількість досліджень [4 – 6] стверджують, що споживання їжі, збагаченої інгредієнтами, які називають функціональними, (наприклад: вітамінами, мінералами, клітковиною та антиоксидантами), може зменшити ризик хронічних захворювань, покращити фізичний стан і психічне благополуччя.

Оскільки існує прямий зв'язок між їжею та здоров'ям, у світі розвиваються дослідження по визначенню впливу харчових продуктів або дієтичних речовин на ключові функції організму [7]. В Японії вперше почали використовувати термін «функціональні продукти» до самого продукту, який має користь для здоров'я [7, 8]. Це пов'язано з тим, що ними була поставлена мета збільшити тривалість життя населення і згодом знизити витрати на охорону здоров'я шляхом покращення щоденних харчових звичок [8].

До функціональних продуктів відносять ті, що містять один або кілька біологічно активних харчових інгредієнтів: хімічні елементи та речовини або інші компоненти їжі, які позитивно впливають на здоров'я людини, включаючи вітаміни [9], каротиноїди [10], флавоноїди [11] та пребіотики [12] та інше [13].

У харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості значний потенціал для прогресу продемонстрували каротиноїди, завдяки своїй багатій поживній цінності та функціональним властивостям [14]. Каротиноїди, також відомі як тетратерпеноїди, включають клас жиророзчинних пігментів, які утворені з восьми молекул п'яти ізопреноїдів вуглецю. Вони складаються з вуглеводню, що містить 40 атомів вуглецю та два кінцевих кільця, відповідальні за жовте, оранжеве та червоне забарвлення [15]. Сьогодні відомо про 600 каротиноїдів, і близько 40 людина регулярно вживає у своєму раціоні. Каротиноїди можна розділити на дві групи: оксигеновані ксантофіли (наприклад, астаксантин, лютеїн і зеаксантин) і вуглеводневі каротини, включаючи α -каротин, β -каротин і лікопін [15].

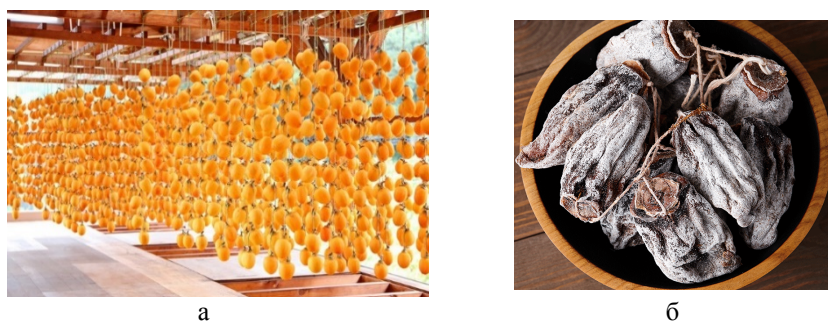
Каротиноїди в основному містяться у фруктах, ягодах, овочах, мікроорганізмах і деяких морських організмах [16, 17]. Більшість каротиноїдів міститься в жовто-помаранчевих та червоних фруктах, овочах та ягодах. Також вони містяться в низці зелених овочів та у травах [15].

Хурма (*Diospyros kaki L.*) – це субтропічний фрукт, який є джерелом бета-каротину, вітамінів А і Е, аскорбінової кислоти, багатий вуглеводами, дубильними речовинами і фенольними сполуками, є хорошим

джерелом клітковини, а також має потужну антиоксидантну дію [18 – 23]. Традиційними виробниками хурми є Китай, Корея та Японія, також вона була натуралізована в багатьох країнах Східної Азії та Південної Європи [24 – 26]. Китай – перша країна, яка культивувала дерева хурми, при цьому використання їх плодів було зафіксовано ще за часів династії Хань [27]. Китай також має найбільшу в усьому світі культивовану площу для виробництва хурми [28]. Плоди хурми можна переробляти на такі продукти, як сухофрукти [29], джеми, хурмовий оцет, фруктові соки [30, 31].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хурма відноситься до сезонних продуктів, та має обмежені терміни зберігання. Для збільшення термінів зберігання можна використовувати методи консервування, такі як сушіння, заморожування, пастеризація, маринування та інші [32]. Сушіння є одним із найстаріших методів консервування, що широко використовується у харчовій промисловості [26].

Зневоднення хурми на відкритому повітрі – це найдавніший і найпростіший спосіб сушіння хурми, при цьому отримують напівсуху хурму з вологістю близько 50% або доводять її до вологості 35% і нижче [33 – 35]. Спочатку хурму миють, потім або перев'язують «хвостики» або проколюють сухі плодоніжки міцними нитками, так щоб вони не торкалися один одного. Такі готові «гірлянди» підвішують від навісом (рис. 1 а) [33].

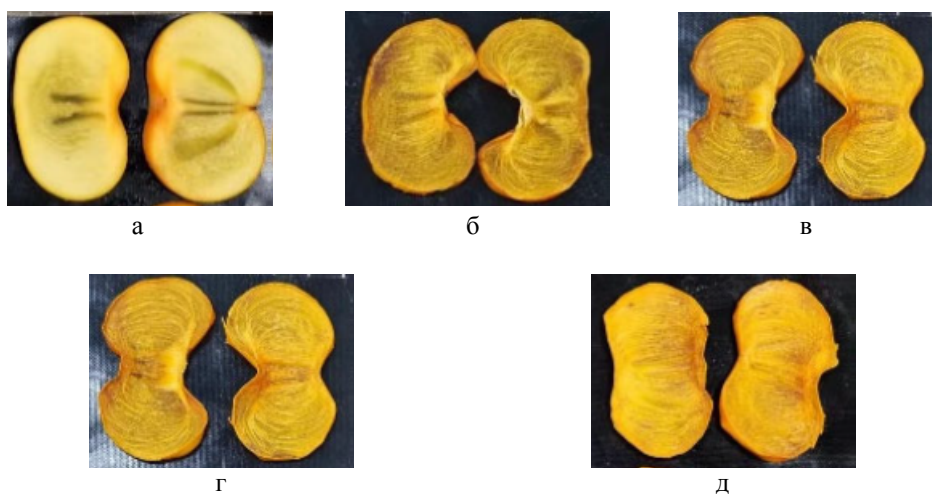


а – процес зневоднення, б – сушена хурма

Рис. 1 – Заводнення хурми на відкритому повітрі

Деякі виробники під час сушіння періодично злегка роздавлюють плоди пальцями, щоб надати їм кращої форми та прискорити появу цукрового нальоту (рис. 1 б). Сушіння плодів йде протягом місяця, але іноді їх залишають висіти на нитці до березня [33].

У Китаї науковцями проведено дослідження вакуумного сушіння хурми [36]. Свіжі плоди промивають, видаляють плодоніжки та нарізають на скибочки товщиною 4 мм. Дослідження проводили на імпульсно-вакуумній сушильній установці при температурах сушіння 60, 65, 70, 75 °C та постійним коефіцієнтом імпульсного вакууму 12:4 хв.. Сушіння проводили до вологості зразків 15,0±3%. Тривалість сушіння при різних температурах сушіння 60, 65, 70, 75 °C відповідно становили 412, 432, 314, 252 хв. Результати показали, що при підвищенні температури сушіння від 60 до 75 °C, час скорочується у 1,64 рази. На рис. 2 представлено порівняння імпульсно-вакуумних висушених зразків зі свіжими, яке показало, що чим довше обробляється зразок, тим більше знижується яскравість та міняється колір.



а – свіжа хурма; б – імпульсно-вакуумне сушіння при 60°C; в – імпульсно-вакуумне сушіння при 65°C; г – імпульсно-вакуумне сушіння при 70°C; д – імпульсно-вакуумне сушіння при 75°C

Рис. 2 – Порівняння хурми за різних умов імпульсно-вакуумного сушіння зі свіжою [36]

Науковцями були виконані дослідження з визначення коефіцієнту набухання та оцінка за допомогою скануючої електронної мікроскопії. Результати показали, що значний тривалий вплив теплового середовища або високої температури можуть призвести до колапсу клітин і тканин, які спричиняють погіршення відновлюваних властивостей матеріалу [36, 37].

Дослідниками з Туреччини проведені дослідження сублімаційного сушіння хурми [38]. Плоди нарізають скибочками товщиною 5 мм. Сушіння проводили на установці ScanVac Coolsafe марки Labogene. Скибочки хурми, заморожені при -15°C , поміщаються в установку та зберігаються протягом перших 60 хвилин. Експеримент починається при -40°C і тиску 0,01кПа, а потім, підтримуючи постійний тиск йдуть наступні етапи: 180 хв при -30°C , 180 хв при -20°C , 120 хвилин при -10°C , 120 хв при 0°C ; 120 хв при 5°C і нарешті, протягом 60 хв при 10°C . За всіма наведеними вище етапами виконується процес сублімаційного сушіння, який загалом завершується за 14 годин [38].



а – свіжа хурма; б – сушена хурма

Рис. 3 – Порівняння хурми сублімаційного сушіння та свіжої [38]

На рис. 3 представлено зразки сублімаційно висушеної хурми зі свіжої. Хурма, яка висушена на сублімаційній установці, має неясний колір порівняно з імпульсно-вакуумним сушінням (рис. 2).

Одним із способів сушіння хурми є інфрачервоне випромінювання. У роботі [39] представлені дослідження інфрачервоного сушіння за двома режимами: безперервний та періодичний. Для досліджень хурму мили, відчищали від шкірок та нарізали на скибочки товщиною до 3 мм. Процес інфрачервоного сушіння проводився в спеціально розробленій сушарці, оснащеній галогенною інфрачервоною лампою потужністю 1500 Вт, яка розташована над матеріалом в повздовньому порядку на відстані 12 см. Використовували два режими інфрачервоного сушіння: безперервний і періодичний. У періодичному режимі використовувалися специфічні співвідношення: перше 30с увімкнено – 30 с вимкнено і друге 20с увімкнено–40с вимкнено [39].

Для досліджень були використані потужності інфрачервоних ламп 300, 400 та 500 Вт. В результаті для безперервного режиму тривалість сушіння становила 225, 140, 100 хв; для першого періодичного співвідношення – 170, 90, 80 хв; для другого періодичного співвідношення – 85, 55, 40хв. При періодичному інфрачервоному сушінні утворені інтервали релаксації сприяють зниженню загальної температури зразка через теплову дифузію, що одночасно призводить до перерозподілу вмісту вологи [39].

Сушіння хурми виконувалося за комбінованим способом мікрохвильового та конвективного сушіння [40]. Плоди хурми мили, нарізали на скибочки товщиною 8 мм. Сушку плодів хурми комбінованим способом за допомогою мікрохвильової печі та конвективної сушарки. Мікрохвильова піч працювала на чотирьох мікрохвильових потужностях 200, 300, 400 і 500 Вт, тоді як конвективна сушарка працювала при постійній температурі 60°C . Мікрохвилі та гаряче повітря застосовували альтернативно відповідно до коефіцієнта імпульсів для сушіння шматочків плодів хурми до вологості $9,86 \pm 1,79\%$. Імпульсне співвідношення використовувалося на трьох рівнях для альтернативної роботи нагрівання за допомогою мікрохвиль і гарячого повітря у співвідношенні 1:5, 1:10 і 1:15 для проведення сушіння скибочок плоду хурми. На кожному рівні коефіцієнтів імпульсів мікрохвильова піч працювала протягом 1 хвилини, а гаряче повітря працювало на основі певного рівня. Наприклад, при коефіцієнті імпульсів 1:15 спочатку матеріал обробляли за циклом протягом 1 хвилини при вибраній потужності мікрохвиль у мікрохвильовій печі, а потім зразок сушили за допомогою гарячого повітря у сушарці при температурі 60°C протягом 15 хвилин. Цикли повторювали доки зразок не досягне бажаної вологості. Після кожного циклу сушіння відповідно до обраного рівня коефіцієнту імпульсу зразок аналізували на вміст вологи, загальний вміст фенолів, антиоксидантну активність, загальну кількість флавоноїдів і зміну кольору [40].

При коефіцієнті імпульсу 1:5 було встановлено, що час сушіння становив 66, 90, 102 і 114 хв для зразка, висушеного при рівні мікрохвильової потужності 500, 400, 300 і 200 Вт відповідно. При коефіцієнті імпульсу 1:10 було встановлено, що час сушіння знаходився в діапазоні 132 – 143 хв. При коефіцієнті імпульсу 1:15 було встановлено, що час сушіння становив 160, 177, 177 і 208 хв. для зразка, висушеного при рівні мікрохвильової потужності 500 Вт, 400 Вт, 300 Вт і 200 Вт відповідно. Результати показали, що збільшення часу сушіння погіршує фізико-хімічні якості плодів хурми [40].

Розповсюдженим методом є конвективне сушіння, яке є більш простим доступним, дешевшим. У роботі [41] представлено дослідження конвективного сушіння хурми при температурах теплоносія 45, 50, 55, 60 і 65 °С. Хурму мили та нарізали на слайси товщиною 6 мм. Експерименти з сушіння слайсів хурми проводилися в конвективній сушарці (FCV/E6L3, Zanussi, Порденоне, Італія), що працювала при постійній температурі. Скибочки хурми поміщали на пластикову сітку розміром 0,01 м × 0,01 м у сушарці та сушили при 45, 50, 55, 60 та 65 °С при фіксованій відцентровій швидкості повітря 2,3 м/с. Тривалість сушіння зразків становила 540, 465, 420, 360 та 320 хв. відповідно до 45, 50, 55, 60 і 65 °С. Тривале сушіння при 45 °С призвело до погіршення кольору та потемніння матеріалу, при цьому найкраща якість та колір близький до свіжого при режимі 65°С. Ці результати показують, що температура та час сушіння є вирішальними факторами при зневодненні хурми [41].

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено спосіб одержання харчового порошкоподібного барвника з плодів хурми [42]. Плоди хурми середньої стиглості миють та нарізають на шматочки. Після чого їх направляють на сушіння. Сушіння хурми проводять конвективним способом в сушарках, наприклад таких, як тунельних, стрічкових або теплонасосних, при температурі теплоносія 50-60 °С. Сушіння при даних температурах дозволяє зберегти з мінімальними втратами каротиноїди, білки, органічні кислоти та вуглеводи. Висушений продукт подрібнюють, а отриманий порошок розсіюють на різні фракції. Розмір частинок для порошкоподібного барвника має становити 0,16 мм. Отриманий порошок має кінцеву вологість 6-8 % [42, 43].

У таблиці наведено результати досліджень складу хурми та порошку з хурми [44]. Збільшення вмісту харчових речовин у порошках, порівняно зі свіжою хурмою, дозволяє стверджувати, що видалення води у процесі сушіння концентрувати мікро- і макронутрієнти у порошках.

Постановка завдання. Конвективне сушіння є одним з кращих методів сушіння плодів хурми, але при цьому має переважно велику тривалість, яку для кращого збереження функціональних властивостей необхідно зменшувати. Тому *метою роботи* є дослідження комбінованих методів сушіння, для зменшення тривалості.

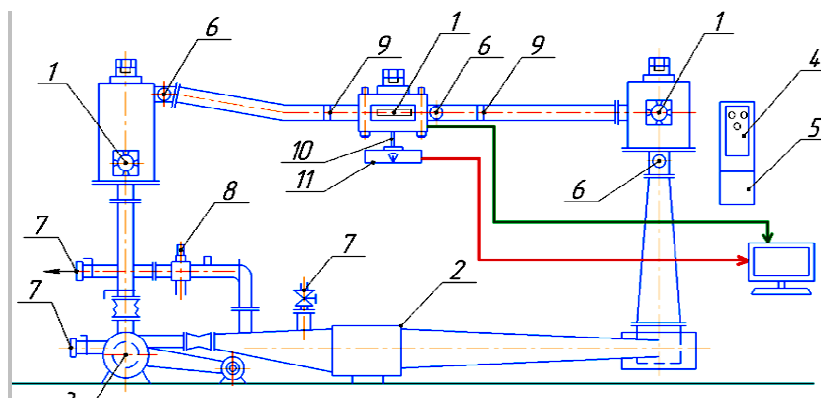
Для досліджень використовували плоди хурми, які спочатку мили, нарізали на кубики розміром близько 5х5 мм.

Таблиця 1

Хімічний склад хурми [44]

Назва продуктів		Добова потреба	Хурма свіжа			Порошок хурми		
			Хурма свіжа	Усього – 100	% добової потреби	Порошок хурми	Усього – 100	% добової потреби
Білок		80	0,6	0,6	0,75	4,5	4,5	5,63
Пектини		5	0,5	0,5	10	5,0	5,0	100
Мінеральні речовини, мг/100г	Ca	1200	127	127	10	317,5	317,5	26,46
	K	3500	200	200	5,71	501,4	501,4	14,33
	J	0,15	0,13	0,13	86,67	0,54	0,54	360
	Mg	500	56	56	11,2	130,48	130,48	26,1
	Na	3000	12	12	0,4	36,3	36,3	1,21
	Fe	15	2,5	2,5	16,67	6,67	6,67	44,47
Вітамін и, мг/100г	P	1500	42	42	2,8	97,44	97,44	6,5
	β-каротин	4	1,2	1,2	30	1,9	1,9	47,5
	B1	1,6	0,02	0,02	1,25	0,2	0,2	12,5
	B2	2	0,03	0,03	1,5	0,25	0,25	12,5
	PP	15	0,2	0,2	1,33	0,64	0,64	4,27

Дослідження кінетики сушіння матеріалу проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації (рис. 4) [45]. Який складається з основних компонентів: 3-х сушильних камер (1), блоку електричних нагрівачів (2), вентилятора (3), ізольованих повітропроводів та автоматичної системи контролю процесу сушіння.



1 – сушильні камери; 2 – електричні нагрівачі; 3 – вентилятор; 4 – терморегулятор; 5 – регулятор швидкості теплоносія; 6 – термометри опору; 7 – патрубки з шиберами; 8 – психрометр; 9 – спеціальні решітки; 10 – штанга вагів; 11 – ваги AD-500

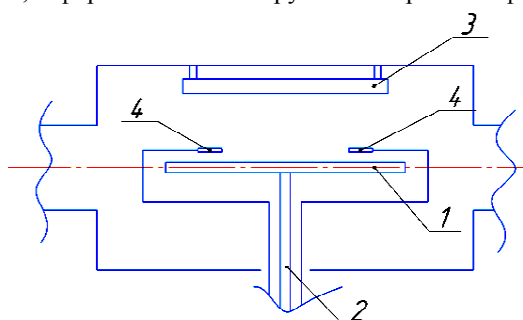
Рис. 4 – Схема експериментального конвективного стенду для сушіння матеріалу [45]

На щиті керування регулятором швидкості теплоносія (5) налаштовується робота вентилятора (3), який дозволяє досягнути широкий діапазон коливань швидкості і температури теплоносія. Відцентровим вентилятором за допомогою перетворювача частоти при ручному регулюванні шляхом зміни подачі повітря регулюється швидкість руху теплоносія. Патрубками з шиберами (7) можливо регулювати співвідношення між відпрацьованим і свіжим повітрям.

Зразок дослідного матеріалу розміщують на штангах вагів (10), після встановлення на стенді заданого режиму дослідження. За допомогою вагів AD-500 (11), які з'єднані з комп'ютером, безперервно проводиться реєстрація зменшення маси зразка в процесі сушіння.

На конвективному сушильному стенді допускається здійснювати термічну обробку композитної сировини теплоносієм з температурою 40 – 150 °C і швидкістю 0,5 – 5 м/с. Встановлені високоточні ваги реєструють зміну маси зразка до 0,001 г. Температура в сушильній камері підтримується з точністю до 0,02°C. Зчитування даних експерименту в сушильній камері, а саме маси та температури зразку, а також температури теплоносія, відбувається 7 раз за хвилину і записується на комп'ютері. Похибки запису даних на експериментальному конвективному сушильному стенді з системою автоматизованого збору інформації, похибка вимірювання якої для температур не перевищує $\pm 1^\circ\text{C}$ та для маси $\pm 5\text{мг}$.

Експериментальний стенд оснащений допоміжним обладнанням, таким як аналого-цифровий перетворювач i-7018, конвертор інтерфейсів i-7520 та персональний комп'ютер з процесором CPU AMD ATHLON XP 2200+, для підвищення точності, інформативності та зручності обробки інформації.



1 – сітка, 2 – штанга вагів; 3 – інфрачервоні лампи, 4 – термопари

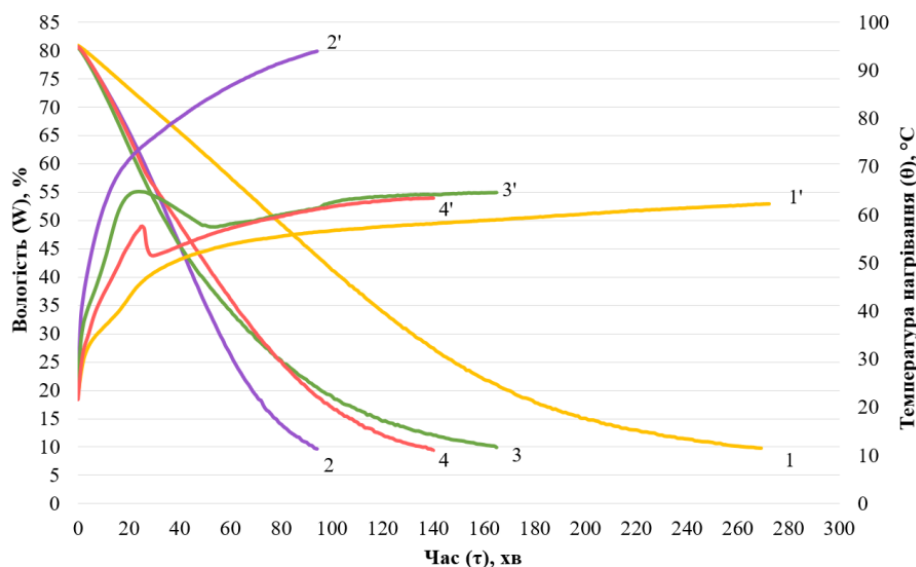
Рис. 5 – Схема експериментального конвективного стенду для сушіння матеріалів [45]

Сушильна камера, представлена на рис. 5, являє собою прямокутний короб з металу з знімальним люком. Камера має прозоре скло, завдяки якому можливо спостерігати за станом матеріалу в процесі сушіння. Для визначення зміни маси під час сушіння на ваги встановлена штанга (2) із сіткою (1). На сітці розташовують матеріал, який піддається термічній обробці. Над сіткою (1) розміщені інфрачервоні лампи (3). В матеріал встановлюється хромель-копелеві термоелектричні перетворювачі 4 (ДСТУ 2837 – 94 [47]) діаметром 0,2 мм, для знімання експериментальних даних зміни температури. Також у камері встановлені інфрачервоні випромінювачі 3 на відстані 50 мм від матеріалу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження хурми проводили за режимами сушіння 65, 100, 100/65 °C та комбінованим 3800Вт/м² +65 °C, швидкість теплоносія 3,0 м/с. Сушіння проводили до вологості матеріалу $9,5 \pm 0,3\%$.

На рисунку 6 представлена зміна вологості та температури в середині шару плодів хурми нарізаних на кубики розміром 5х5 мм. Як видно з рисунку найбільша тривалість сушіння за режимом 65 °C і становить

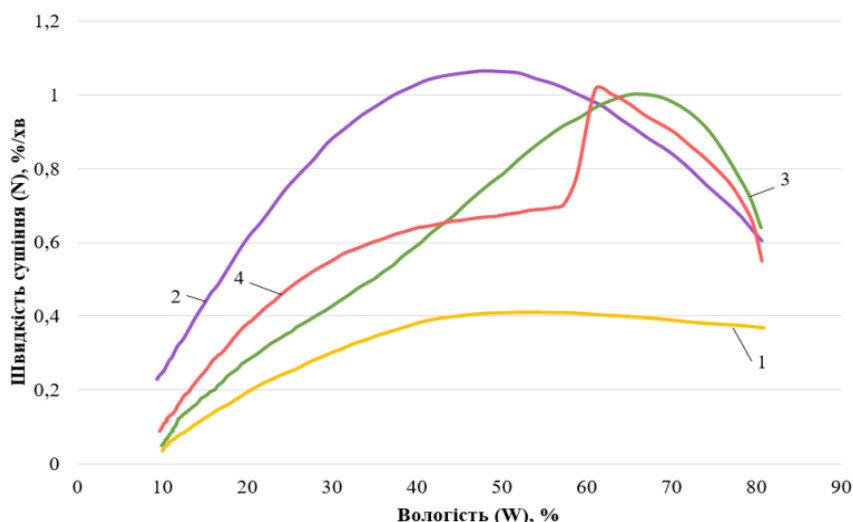
269 хв. Найменша тривалість сушіння за режимом 100 °С становить 94 хв.



1 – 65 °С, 3 м/с; 2 – 100 °С, 3 м/с; 3 – 100/65 °С, 3 м/с; 4 – 3800 Вт/м² + 65 °С, 3 м/с

Рис. 6 – Зміна вологості (1, 2, 3, 4) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4') хурми нарізаної кубиками розміром 5х5 мм від часу

Для режимів сушіння 100/65 °С та 3800 Вт/м² + 65 °С, на початку процесу температуру матеріалу підіймали до 58 °С, після чого процес сушіння відбувався за температури теплоносія 65 °С. Як видно комбінований 3800 Вт/м² + 65 °С та ступеневий 100/65 °С режими сушіння мають нижчу тривалість сушіння порівняно з режимом 65 °С та становлять 140 і 165 хв. відповідно. На початку дослідження з комбінованим режимом 3800 Вт/м² + 65 °С працювали інфрачервоні лампи на потужності 3800 Вт/м² та теплоносії 65 °С а після досягнення температури матеріалу 58 °С вимикали інфрачервоні лампи та температура матеріалу починала знижуватися до 51,5 °С, далі вона підіймається до 63,5 °С. За ступеневим режимом 100/65 °С матеріал сушили при температурі теплоносія 100 °С температури матеріалу 58 °С. Потім температуру теплоносія зменшували до 65 °С, при цьому температура матеріалу збільшилась до 64,8 °С, після чого температура матеріалу поступово зменшувалася до 57,5 °С, та подальшому збільшувалася до 64,2 °С.



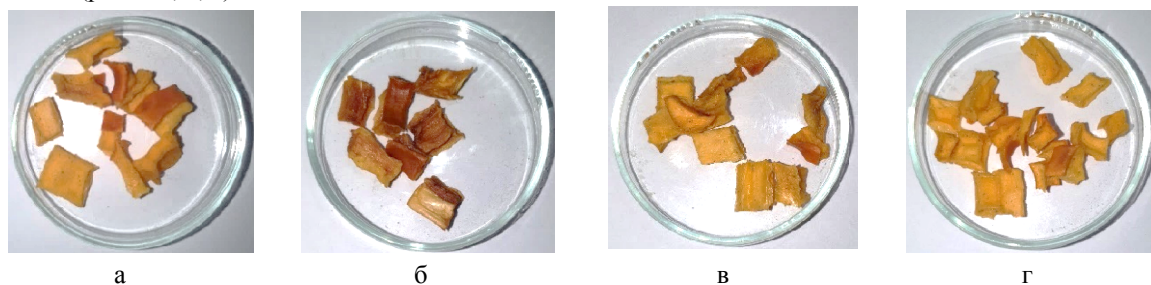
1 – 65 °С, 3 м/с; 2 – 100 °С, 3 м/с; 3 – 100/65 °С, 3 м/с; 4 – 3800 Вт/м² + 65 °С, 3 м/с

Рис. 7 – Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) хурми нарізаної кубиками розміром 5х5 мм

На рис. 7 представлено зміна швидкості сушіння плодів хурми нарізаної на кубики розміром 5х5 мм. Як видно з рис. 7 найбільша максимальна швидкість сушіння за режимом 100 °С і становить 1,06 %/хв, найменша за режимом 65 °С – 0,41 %/хв. Комбінований режим 3800 Вт/м² + 65 °С має максимальну швидкість сушіння 1,02 %/хв при увімкнених інфрачервоних лампах, при вимиканні спостерігається різке зменшення швидкості до 0,71 %/хв і потім іде поступове зменшення швидкості. За ступеневим режимом 100/65 °С максимальна швидкість сушіння 1 %/хв.

На рисунку 8 зображені висушена хурма при різних режимах 65, 100, 100/65 °С та комбінованим 3800

Вт/м² +65 °С. Потемніння матеріалу спостерігається при сушінні при температурі 100 °С (рис. 8 б). Найкраще зберігаються кольори у хурми при режимах 65 °С, та ступеневому 100/65 °С та комбінованому 3800 Вт/м² +65 °С (рис. 8 а, в, г).



а – 65 °С; б – 100 °С; в – 100/65 °С; г – 3800Вт/м² +65 °С

Рис. 8 – Порівняння висушених зразків хурми при різних режимах

Висновки. У роботі виконані дослідження впливу різних режимів сушіння на плоди хурми. Визначено, що найменша тривалість сушіння при режимі 100 °С становить 94 хв., але при цьому спостерігається потемніння матеріалу. Найбільша тривалість при режимі 65 °С і становить 269 хв., що у 2,86 разів більше за 100 °С, але при цьому зберігається яскравий колір. Ступеневий 100/65 °С та комбінований 3800 Вт/м² +65 °С режими сушіння інтенсифікують процес у 1,92 та 1,63 рази порівняно з 65 °С. Тому доцільно використовувати комбіновані або ступеневі режими сушіння для інтенсифікації процесу.

References

1. Cusquisibán-Alcantara, Y., Toledo-Garrido, C., Calizaya-Milla, Y. E., Carranza-Cubas, S. P., & Saintila, J. (2024). Impact of a Nutrition Education Intervention on Knowledge, Healthy Eating Index, and Biochemical Profile in a Rural Community in Peru. *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, 17, 1111–1125. <https://doi.org/10.2147/JMDH.S440195>
2. Macronutrients & Micronutrients | Pomona College in Claremont, California - Pomona College. Pomona College in Claremont, California - Pomona College. <https://www.pomona.edu/administration/dining/health-wellness/macronutrients>
3. Taşğın, E. (2017). Macronutrients and Micronutrients in Nutrition. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 1(1), 10-15.
4. Arshad, M. S., Khalid, W., Ahmad, R. S., Khan, M. K., Ahmad, M. H., Safdar, S., Kousar, S., Munir, H., Shabbir, U., Zafarullah, M., Nadeem, M., Asghar, Z. & Suleria, H. A. R. (2021). Functional foods and human health: an overview. *Functional Foods Phytochem Health Promoting Potential*, 3. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.99000>
5. Sharma, L., & Yadav, A. (2022). Role of Functional Foods in Human Health and Disease Prevention. In *Bioactive Components: A Sustainable System for Good Health and Well-Being* (pp. 225-243). Singapore: Springer Nature Singapore. DOI: 10.1007/978-981-19-2366-1_14
6. Herdiana, Y. (2023). Functional Food in Relation to Gastroesophageal Reflux Disease (GERD). *Nutrients*, 15(16), 3583. doi:10.3390/nu15163583
7. Khairnar, S. J., Rudrapal, M., Ahire, E. D., Jagtap, M. R., & Kshirsagar, S. J. (2024). Overview of Functional Foods. In *Applications of Functional Foods in Disease Prevention* (pp. 1-31). Apple Academic Press. DOI: 10.1201/9781003395737-1
8. Sgroi, F., Sciortino, C., Baviera-Puig, A., & Modica, F. (2024). Analyzing consumer trends in functional foods: A cluster analysis approach. *Journal of Agriculture and Food Research*, 101041. DOI: 10.1016/j.jafr.2024.101041
9. Basu, T. K., & Dickerson, J. W. (1996). *Vitamins in human health and disease*. Cab International.
10. Amengual, J. (2019). Bioactive properties of carotenoids in human health. *Nutrients*, 11(10), 2388. <https://doi.org/10.3390/nu11102388>
11. Justino, J. (Ed.). (2017). *Flavonoids: From Biosynthesis to Human Health*. BoD–Books on Demand. <http://dx.doi.org/10.5772/65575>
12. Lee, E. S., Song, E. J., Nam, Y. D., & Lee, S. Y. (2018). Probiotics in human health and disease: from nutraceuticals to pharmabiotics. *Journal of Microbiology*, 56, 773-782. <https://doi.org/10.1007/s12275-018-8293-y>
13. McClements, D. J. (2014). *Nanoparticle-and microparticle-based delivery systems: Encapsulation, protection and release of active compounds*. CRC press.
14. Meléndez-Martínez, A. J., Stinco, C. M., & Mapelli-Brahm, P. (2019). Skin carotenoids in public health and nutricosmetics: The emerging roles and applications of the UV radiation-absorbing colourless carotenoids phytoene and phytofluene. *Nutrients*, 11(5), 1093. doi: 10.3390/nu11051093
15. Cheng, S. H., Khoo, H. E., Kong, K. W., Prasad, K. N., & Galanakis, C. M. (2020). Extraction of carotenoids and applications. In *Carotenoids: Properties, Processing and Applications* (pp. 259-288). Academic Press.

- DOI:10.1016/b978-0-12-817067-0.00008-7
16. Li, Y., Zhao, Y., Zhang, H., Ding, Z., & Han, J. (2024). The Application of Natural Carotenoids in Multiple Fields and Their Encapsulation Technology: A Review. *Molecules*, 29(5), 967. <https://doi.org/10.3390/molecules29050967>
 17. Li, Y., Li, T., Yan, Z., Bariami, W., Wu, C., Yan, S., ... & Cheng, J. (2024). Carotenoids in berries: Composition, benefits, metabolic processes and influencing factors-A review. *Scientia Horticulturae*, 329, 112956. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.112956
 18. Bozkir, H., Ergün, A. R., Serdar, E., Metin, G., & Baysal, T. (2019). Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrasonics sonochemistry*, 54, 135-141. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.02.006
 19. Saeed, A. R., Tahle, M. A. K., & Tlay, R. H. (2023). Effect of drying agents on quality parameters of lyophilized persimmon purée powder. DOI: 10.21603/2308-4057-2024-2-605
 20. Karakasova, L., Babanovska-Milenkovska, F., Lazov, M., Karakasov, B., & Stojanova, M. (2013). Quality properties of solar dried persimmon (*Diospyros kaki*). *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 54–59.
 21. Suzuki, T., Someya, S., Hu, F., & Tanokura, M. (2005). Comparative study of catechin compositions in five Japanese persimmons (*Diospyros kaki*). *Food Chemistry*, 93(1), 149-152. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.10.017
 22. Luo, Z. (2007). Effect of 1-methylcyclopropene on ripening of postharvest persimmon (*Diospyros kaki* L.) fruit. *LWT-Food Science and Technology*, 40(2), 285-291. DOI: 10.1016/j.lwt.2005.10.010
 23. Butt, M. S., Sultan, M. T., Aziz, M., Naz, A., Ahmed, W., Kumar, N., & Imran, M. (2015). Persimmon (*Diospyros kaki*) fruit: hidden phytochemicals and health claims. *EXCLI journal*, 14, 542–561. Doi: 10.17179/excli2015-159
 24. Anjum, N., Bhat, A., & Hameed, F. (2021). Effect of drying methods on chemical composition, color and bioactive compounds of persimmon (*Diospyros kaki* L.) pulp. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 22(39-40), 67-76.
 25. Jang, I. C., Oh, W. G., Ahn, G. H., Lee, J. H., & Lee, S. C. (2011). Antioxidant activity of 4 cultivars of persimmon fruit. *Food science and biotechnology*, 20, 71-77. Doi:10.1007/s10068-011-0010-0
 26. Hyun, J. E., Kim, J. Y., Kim, E. M., Kim, J. C., & Lee, S. Y. (2019). Changes in microbiological and physicochemical quality of dried persimmons (*Diospyros kaki* Thunb.) stored at various temperatures. *Journal of Food Quality*, 2019(1), 6256409. Doi: 10.1155/2019/6256409
 27. Lyu, Z.Y., Guan, C.F., Li, J.Y., Ding, Y., Fan, Z.R., Yang, Y. (2023). Research Progress on Tissue Culture of *Diospyros*. *North. Hortic*, 12, 129–137.
 28. Han, W.J., Cao, K., Diao, S.F., Sun, P., Li, H.W., Mai, Y.N., Suo, Y.J., & Fu, J. (2022). Characterization of browning during CO₂ deastringency treatment in astringent persimmon fruit. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(3), 2273-2281. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01298-1>
 29. Zhou, M., Chen, J., Bi, J., Li, X., & Xin, G. (2022). The roles of soluble poly and insoluble tannin in the enzymatic browning during storage of dried persimmon. *Food Chemistry*, 366, 130632. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130632>
 30. Xu, Y., Liu, C., Yang, X., Wu, K., & Gong, B. (2023). Genome-wide microsatellite characterization and marker development in *Diospyros oleifera*. *Industrial Crops and Products*, 203, 117182. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050955>
 31. Lalou, S., Ordoudi, S. A., & Mantzouridou, F. T. (2021). On the effect of microwave heating on quality characteristics and functional properties of persimmon juice and its residue. *Foods*, 10(11), 2650. DOI: 10.3390/foods10112650 <https://doi.org/10.3390/foods10112650>
 32. Учасники проєктів Вікімедіа. (2011b, 19 липня). Консервування — Вікіпедія. Вікіпедія. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Консервування>
 33. Hafizov, G., Hafizov, S., & Hafizov, R. (2023). Processing Methods of Dried Persimmons. Preprints doi:10.20944/preprints202309.1119.v1
 34. Kim, J. H., Chung, I. K., Kim, H. Y., & Kim, K. M. (2018). Comparison of the quality of dried persimmon (*Diospyros kaki* THUNB.) treated with medicinal plant extracts and food additives. *Food Science & Nutrition*, 6(8), 1991-1998. DOI: 10.1002/fsn3.673
 35. Kang, W. W., Kim, J. K., Oh, S. L., Kim, J. H., Han, J. H., & Choi, J. U. (2023). Physicochemical characteristics of Sangju traditional dried persimmons during drying process. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 33(2), 386–391. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2004.33.2.386>
 36. Yang, K. W., Wang, D., Vidyarthi, S. K., Li, S. B., Liu, Z. L., Wang, H., Chen, X.J. & Xiao, H. W. (2022). Pulsed vacuum drying of persimmon slices: Drying kinetics, physicochemical properties, microstructure and antioxidant capacity. *Plants*, 11(19), 2500. <https://doi.org/10.3390/plants11192500>
 37. Liu, Z. L., Xie, L., Zielinska, M., Pan, Z., Deng, L. Z., Zhang, J. S., Gao, L., Wang, S.Y., Zheng, Z.A. & Xiao, H. W. (2022). Improvement of drying efficiency and quality attributes of blueberries using innovative far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102948. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102948
 38. Dağdeviren, A., Acar, B., Alhammadi, A., Roshanaei, K., Coşkun, T., İnanç, Ö., & Özkaymak, M. (2021).

- Freeze-drying of persimmon (*diospyros kaki*) slices investigation of drying characteristics. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 487-494. <https://doi.org/10.2339/politeknik.949139>
39. Polat, A., Taskin, O., & Izli, N. (2024). Assessment of freeze, continuous, and intermittent infrared drying methods for sliced persimmon. *Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994>
 40. Borah, M. S., Raj, G. B., Tiwari, A., & Dash, K. K. (2023). Effect of intermittent microwave convective drying on quality characteristics of persimmon fruit. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100816. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100816>
 41. Senadeera, W., Adiletta, G., Önal, B., Di Matteo, M., & Russo, P. (2020). Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices. *Foods*, 9(1), 101. doi: 10.3390/foods9010101
 42. Sniezhkin, Yu., Petrova Zh.O., Dziundzia O.V., & Peresichnyi M.I. (2011). Sposib oderzhannia kharchovoho poroshkopodobnoho barvnyka z plodiv khurmy (Patent Ukrainy № 97053). Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy.
 43. Sniezhkin, Yu.F., Petrova, Zh.O., & Dziundzia, O.V. (2010). Sukhofrukty ta kharchovyi poroshok z khurmy. (Tekhnichni umovy TU U 15.3-05417118-037:2009). Ukrmetrteststandart.
 44. Petrova, Zh.O., & Dziundzia, O.V. (2010). Poroshok iz khurmy – produkt funktsionalnogo pryznachennia. Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv, 25, 100–106.
 45. Petrova, Z., Sniezhkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
 46. Petrova, Z., Novikova, Y., & Petrov, A. (2024). Intensyfikatsiia teplomasoobminnykh protsesiv pererobky zastarilykh mulovykh vidkladen. *Enerhetyka i avtomatyka*, 0(1), 54-65. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.054](http://dx.doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.054)
 47. Derzhspozhyvstandart. (1996). Peretvoriuvani termoelektrychni. Zahalni tekhnichni umovy (DCTU 2857-94).

PERSIMMON (DIOSPYROS KAKI L.) PROCESSING BY DRYING

Petrova Zh.O., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor , Novikova Y.P., PhD, Slobodianiuk K.S., Ph.D., Grakov O.P. PhD, Koval I.O., graduate student
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Abstract. *There is a growing global demand for functional foods that can provide the human body with macro- and micronutrients, reduce the risk of chronic diseases, and improve physical and mental well-being. Functional food plays an important role in maintaining a healthy lifestyle and reducing risk factors for various diseases. Functional foods are those that contain one or more biologically active food ingredients. In the food, cosmetics and pharmaceutical industries, carotenoids have demonstrated significant potential for progress due to their rich nutritional value and functional properties. Carotenoids are natural organic pigments produced by microorganisms and plants. Today, about 600 carotenoids have been recognised. They are divided into two classes: xanthophylls and carotenes. Carotenoids are mainly found in fruits, berries, vegetables, microorganisms and some marine organisms. Persimmon (*Diospyros Kaki L.*) is a sweet, slightly tart fruit that is a source of beta-carotene, vitamins A and E, ascorbic acid, rich in carbohydrates, tannins and phenolic compounds, a good source of fiber, and has a powerful antioxidant effect. Persimmon is most common in East Asia. Persimmons are seasonal products and have a limited shelf life, which can be extended by drying. The most common drying methods are convection, sublimation, solar and infrared. Of these methods, convective drying produces high-quality material with lower energy consumption. But at the same time, combined drying is becoming more widespread in the world. Therefore, the aim of the work is to process persimmon fruits by drying and determine the effect of different modes. The study of drying kinetics has shown that the most appropriate modes are step and combined drying modes, which intensify the process by 1.92 and 1.63 times compared to 65 °C.*

Keywords: drying, persimmons, confectionery, combined drying, intensification.

Список використаної літератури

1. Cusquisibán-Alcantara Y., Toledo-Garrido C., Calizaya-Milla Y. E., Carranza-Cubas S. P., Saintila J. Impact of a Nutrition Education Intervention on Knowledge, Healthy Eating Index, and Biochemical Profile in a Rural Community in Peru // *Journal of Multidisciplinary Healthcare*. 2024., 17. P. 1111–1125. <https://doi.org/10.2147/JMDH.S440195>
2. Macronutrients & Micronutrients | Pomona College in Claremont, California - Pomona College. *Pomona College in Claremont, California - Pomona College*. URL: <https://www.pomona.edu/administration/dining/health-wellness/macronutrients> (дата звернення: 19.06.2024).

3. Taşğın E. Macronutrients and Micronutrients in Nutrition // *International Journal of Innovative Research and Reviews*. 2017., 1(1). P. 10-15.
4. Arshad M. S., Khalid W., Ahmad R. S., Khan M. K., Ahmad M. H., Safdar S., Kousar S., Munir H., Shabbir U., Zafarullah M., Nadeem M., Asghar Z., Suleria, H. A. R. Functional foods and human health: an overview // *Functional Foods Phytochem Health Promoting Potential*. 2021., 3.
5. Sharma L., Yadav A. Role of Functional Foods in Human Health and Disease Prevention // *Bioactive Components: A Sustainable System for Good Health and Well-Being*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. Pp. 225-243.
6. Herdiana Y. Functional Food in Relation to Gastroesophageal Reflux Disease (GERD) // *Nutrients*. 2023., 15(16), 3583.
7. Khairnar S. J., Rudrapal M., Ahire E. D., Jagtap M. R., Kshirsagar, S. J. Overview of Functional Foods // *Applications of Functional Foods in Disease Prevention*. Apple Academic Press, 2024. Pp. 1-31.
8. Sgroi F., Sciortino C., Baviera-Puig A., Modica F. Analyzing consumer trends in functional foods: A cluster analysis approach // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2024., 101041.
9. Basu T. K., Dickerson J.W.T. Vitamins in human health and disease. Cab International, 1996. 368p.
10. Amengual J. Bioactive Properties of Carotenoids in Human Health // *Nutrients*. 2019., 11(10), 2388. <https://doi.org/10.3390/nu11102388>
11. Justino G.C, editor. Flavonoids - From Biosynthesis to Human Health. InTech, 2017. 484 p. <http://dx.doi.org/10.5772/65575>
12. Lee E.S., Song E.J., Nam Y.D. et al. Probiotics in human health and disease: from nutraceuticals to pharmabiotics // *J Microbiol*. 2018., 56. P. 773–782 . <https://doi.org/10.1007/s12275-018-8293-y>
13. McClements D. J. Nanoparticle-and microparticle-based delivery systems: Encapsulation, protection and release of active compounds. *CRC press*, 2014. 572 p.
14. Meléndez-Martínez A.J., Stinco C.M., Mapelli-Brahm P. Skin Carotenoids in Public Health and Nutricosmetics: The Emerging Roles and Applications of the UV Radiation-Absorbing Colourless Carotenoids Phytoene and Phytofluene // *Nutrients*. 2019., 11, 1093.
15. Cheng S.-H., Khoo H.E., Kong K.W., Prasad K.N., Galanakis C.M. 8—Extraction of carotenoids and applications // *Carotenoids: Properties, Processing and Applications* / Galanakis, C.M., Ed.. Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2020. pp. 259–288.
16. Li Y., Zhao Y., Zhang H., Ding Z., Han J. The Application of Natural Carotenoids in Multiple Fields and Their Encapsulation Technology: A Review // *Molecules*. 2024., 29, 967. <https://doi.org/10.3390/molecules29050967>
17. Li Y., Li T., Yan Z., Bariami W., Wu C., Yan S., Yan Sh., Fan G., Li. X., Zhou D., Cong K., Cheng J.. Carotenoids in berries: Composition, benefits, metabolic processes and influencing factors-A review // *Scientia Horticulturae*. 2024., 329, 112956. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.112956
18. Bozkir H., Ergün A. R., Serdar E., Metin G., Baysal T. Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit // *Ultrasonics sonochemistry*. 2019., 54. P.135-141. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.02.006
19. Saeed A. R., Kheir Tahle M. A., Tlay R. H. Effect of drying agents on quality parameters of lyophilized persimmon purée powder // *Foods and Raw Materials*. 2023. P. 256–263. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-605>.
20. Karakasova L., Babanovska-Milenkovska F., Lazov M., Karakasov B., Stojanova M. Quality properties of solar dried persimmon (Diospyros kaki) // *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2013. P. 54–59.
21. Suzuki T., Someya S., Hu F., Tanokura M. Comparative study of catechin compositions in five Japanese persimmons (Diospyros kaki) // *Food Chemistry*. 2005., 93(1). P. 149-152. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.10.017
22. Luo Z. Effect of 1-methylcyclopropene on ripening of postharvest persimmon (Diospyros kaki L.) fruit // *LWT-Food Science and Technology*. 2007., 40(2). P. 285-291. DOI: 10.1016/j.lwt.2005.10.010
23. Butt M. S., Sultan M. T., Aziz M., Naz A., Ahmed W., Kumar N., Imran M. Persimmon (Diospyros kaki) fruit: hidden phytochemicals and health claims // *EXCLI journal*. 2015., 14. P. 542–561. Doi: 10.17179/excli2015-159
24. Anjum N., Bhat A., Hameed F. Effect of drying methods on chemical composition, color and bioactive compounds of persimmon (Diospyros kaki L.) pulp // *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*. 2021., 22(39-40). P. 67-76.
25. Antioxidant activity of 4 cultivars of persimmon fruit / I.-C. Jang et al // *Food Science and Biotechnology*. 2011. Vol. 20, no. 1. P. 71–77. <https://doi.org/10.1007/s10068-011-0010-0>.
26. Changes in Microbiological and Physicochemical Quality of Dried Persimmons (Diospyros kaki Thunb.) Stored at Various Temperatures / J.-E. Hyun et al // *Journal of Food Quality*. 2019. Vol. 2019. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2019/6256409>.
27. Lyu Z.Y., Guan C.F., Li J.Y., Ding Y., Fan Z.R., Yang Y. Research Progress on Tissue Culture of Diospyros // *North. Hortic*. 2023., 12. P. 129–137.

28. Han W.J., Cao K., Diao S.F., Sun P., Li H.W., Mai Y.N., Suo Y.J., Fu J.M. Characterization of Browning During CO₂ Deastringency Treatment in Astringent Persimmon Fruit // *J. Food Meas. Charact.* 2022., 16. P. 2273–2281. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01298-1>
29. Zhou M., Chen J.X., Bi J.F., Li X., Xin G. The Roles of Soluble Poly and Insoluble Tannin in the Enzymatic Browning During Storage of Dried Persimmon // *Food Chem.* 2021., 366. 130632. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130632>
30. Xu Y., Liu C., Yang X., Wu K., Gong B. Genome-wide microsatellite characterization and marker development in *Diospyros oleifera* // *Industrial Crops and Products.* 2023., 203. 117182. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050955>
31. Lalou S., Ordoudi S.A., Mantzouridou F.T. On the Effect of Microwave Heating on Quality Characteristics and Functional Properties of Persimmon Juice and Its Residue // *Foods.* 2021., 10, 2650. DOI: 10.3390/foods10112650 <https://doi.org/10.3390/foods10112650>
32. Учасники проєктів Вікімедіа. Консервування – Вікіпедія. *Bikinediia*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Консервування> (дата звернення: 20.06.2024).
33. Hafizov G., Hafizov S., Hafizov R. Processing Methods of Dried Persimmons // *Preprints.* 2023. doi:10.20944/preprints202309.1119.v1
34. Kim J. H., Chung I. K., Kim H. Y., Kim K. M. Comparison of the quality of dried persimmon (*Diospyros kaki* THUNB.) treated with medicinal plant extracts and food additives // *Food Science & Nutrition.* 2018., 6(8), 1991-1998. DOI: 10.1002/fsn3.673
35. Kang W. W. et al. Physicochemical characteristics of Sangju traditional dried persimmons during drying process // *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition.* 2023., 33, №. 2. 386 – 391. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2004.33.2.386>
36. Yang K. W., Wang D., Vidyarthi S. K., Li S. B., Liu Z. L., Wang H., Chen X.J., Xiao H. W. Pulsed vacuum drying of persimmon slices: Drying kinetics, physicochemical properties, microstructure and antioxidant capacity // *Plants*, 2022., 11(19). 2500. <https://doi.org/10.3390/plants11192500>
37. Liu Z. L., Xie L., Zielinska M., Pan Z., Deng L. Z., Zhang J. S., Gao L., Wang S.Y., Zheng Z.A., Xiao H. W. Improvement of drying efficiency and quality attributes of blueberries using innovative far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) // *Innovative Food Science & Emerging Technologies.* 2022., 77. 102948. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102948
38. Dağdeviren A., Acar B., Alhammadi A., Roshanaei K., Coşkun T., İnanç Ö., Özkaymak, M. Freeze-drying of persimmon (*diospyros kaki*) slices investigation of drying characteristics // *Politeknik Dergisi.* 2021. 26(2). P.487-494. <https://doi.org/10.2339/politeknik.949139>
39. Polat A., Taskin O., Izli N. Assessment of freeze, continuous, and intermittent infrared drying methods for sliced persimmon // *Journal of Food Science.* 2024. V.89, Is.4. P. 2332-2346 <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994>
40. Borah M. S., Raj G. B., Tiwari A., Dash K. K. Effect of intermittent microwave convective drying on quality characteristics of persimmon fruit // *Journal of Agriculture and Food Research.* 2023., 14, 100816. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100816>
41. Senadeera W., Adiletta G., Önal B., Di Matteo M., Russo P. Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices // *Foods.* 2020., 9(1), 101. doi: 10.3390/foods9010101
42. Спосіб одержання харчового порошкоподібного барвника з плодів хурми: пат. 97053 Україна: МПК (2011.01), A23L 1/27 (2006.01), A23P 1/06 (2006.01), C09B 61/00. № a201014614; заявл. 26.12.2011; опубл. 26.12.2011, Бюл.№ 24. 2 с.
43. ТУ У 15.3-05417118-037:2009. Сухофрукти та харчовий порошок з хурми. Укрметртестстандарт, № 02568182/035794 від 01.07.2010 р.
44. Петрова Ж.О., Дзюндзя О.В. Порошок із хурми – продукт функціонального призначення // *Обладнання та технології харчових виробництв.* 2010. № 25. С. 100–106.
45. Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand // *Journal of Ecological Engineering.* 2021. 22(6). P. 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
46. Petrova Z., Novikova Y., Petrov A. Інтенсифікація тепломасообмінних процесів переробки застарілих мулових відкладень // *Енергетика і автоматика*, 2024., 1. С. 54-65. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.054](http://dx.doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.054)
47. ДСТУ 2857-94. Перетворювані термоелектричні. Загальні технічні умови. Київ: Держспоживстандарт, 1996.

Отримано в редакцію 24.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 24.07.2024
Approved 25.09.2024

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ РЕЖИМИ НАСИЧЕННЯ ЦУКРОЗОЮ ЧАСТИНОК ПЛОДУ ЛИМОНУ

Гузьова І.О., к.т.н., доц., Атаманюк В.М., д.т.н., проф.
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Анотація. Дана стаття присвячена вирішенню проблеми насичення частинок плодів лимону цукрозою за мінімальний проміжок часу за умов максимального енергозбереження. Авторами статті розроблені режими насичення частинок плоду лимону. Насичення частинок проводилося в двох режимах. Перший – режим настоювання, сироп в стані спокою. Дослідження проводили за температур 50 °С, 60 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С. Другий – режим барботування, об'єм сиропу барботується повітрям через дренажну тарілку. Частинок плоду лимону при цьому знаходяться на решітці, зануреній в сироп над дренажною тарілкою. Дослідження в режимі барботування проводили за температури 70 °С та витратах повітря ($\text{м}^3/\text{с}$): $6,25 \cdot 10^{-5}$; $8,06 \cdot 10^{-5}$; $12,5 \cdot 10^{-5}$; $15,6 \cdot 10^{-5}$, що відповідає швидкості через отвори дренажної тарілки: 3 м/с; 4 м/с; 6,5 м/с; 8 м/с відповідно.

Авторами статті доведено, що найменші енерговитрати ($\Sigma Q = 8,353 \text{ кДж/кг}_{\text{сиропу}}$) будуть під час насичення частинок лимону цукрозою за умов барботування сиропу за температури 70 °С повітрям швидкістю 6,5 м/с, що підтверджує економічну доцільність даного методу.

В роботі наведені та проаналізовані залежності зміни швидкості насичення від концентрації та в часі. Аналіз залежностей доводить, що на початку процесу швидкість насичення зменшується. На цьому етапі відбувається процес масовіддачі молекул цукрози з барботуючого розчину до поверхні частинок, значну роль при цьому відіграє процес масовіддачі, що сприяє скороченню часу насичення порівняно з насиченням в умовах настоювання.

В роботі проведені узагальнення експериментальних даних залежності зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за температури 70 °С в режимі барботування за різних швидкостей. В результаті узагальнення експериментальних даних методом теорії подібності, виведені критеріальні рівняння, які дають змогу розрахувати коефіцієнт масовіддачі молекул цукрози через границю розділу фаз в середину частинки в різних гідродинамічних режимах. Також отримані рівняння дають змогу розрахувати кількість цукрози, яка переходить з сиропу в частинку плоду лимону шляхом масовіддачі.

Ключові слова: масовіддача, плід лимону, енергозбереження, насичення, настоювання, барботування.

Формулювання проблеми. Зростаючий попит на здорове харчування в Україні за останній час стимулював дослідження, направлені на збереження якості готових продуктів під час їх тривалого зберігання. Вплив попередньої обробки продуктів харчування на їх зберігання має бути максимально безпечним для здоров'я людей. Саме тому, дана стаття присвячена вирішенню проблеми насичення частинок плодів лимону безпечним консервантом – цукрозою за мінімальний проміжок часу за умов максимального енергозбереження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори статті [1] досліджують процеси збагачення біоактивними речовинами та цукрозою кубиків папаї, а саме: втрати води, приріст твердих речовин, зміна загальних антиоксидантних властивостей. Дослідження проводилися в межах температур 45 °С – 65 °С, узагальнення експериментальних досліджень проводилося на основі напіваналітичного рішення нестационарного рівняння дифузії. В статті [2] наведені результати експериментальних та теоретичних досліджень насичення біоактивними речовинами та цукрозою індійського аргусу та амели. Дослідження проводилися в межах концентрації цукрових розчинів 30–70 °Brix. В статті [2] доведено, що із збільшенням концентрації розчину цукрози процес зневоднення інтенсифікується, а процес насичення плодів цукрозою сповільнюється. Аналогічні висновки роблять автори робіт [3 – 4] під час дослідження процесів насичення томатів кухонною сіллю (NaCl). В статті [2] доведено, що настоювання плодів 24 години без подальшого сушіння дозволяє максимально зберегти вітамін С в готових цукатах. В роботі [5] розглядається вплив попередньої обробки цукрозою на клітинну структуру, компоненти клітинної стінки та механічні властивості частинок плоду персика, з метою виготовлення персикових чіпсів після повітряного сушіння.

Для виготовлення цукатів, автори статті [6] рекомендують використовувати плоди середньої зрілості. Під час дозрівання гарбуза спостерігається збільшення загального вмісту цукрів та каротину [6]. Також для виготовлення цукатів, рекомендують використовувати плоди фініків, бланшовані насиченою водяною парою [7]. Доведено, що така обробка не впливає на загальний вміст цукрів та вітамінний комплекс [7].

Для узагальнення експериментальних даних процесів екстрагування та насичення плодів рослинної сировини розчинними речовинами автори [8 – 10] використовували безрозмірний аналіз та аналітичне рішення рівнянь масоперенесення.

Формулювання мети статті. Метою даної статті є розроблення методів насичення частинок плоду лимону, порівняння цих методів та виявлення найбільш енергоефективного; експериментальні та теоретичні дослідження процесів, їх узагальнення та виведення критеріальних рівнянь для розрахунку коефіцієнтів масовіддачі.

Методи дослідження. Насичення цукрозою плодів лимону відбувалося наступним чином. Плоди лимону сорту «Київський» мили та нарізали на частинки циліндричної форми діаметром 0,053 м та висотою 0,007 м. Частинки бланшували 5 хв насиченою водяною парою. Бланшування паром дозволяє максимально зберегти вітамінний комплекс, зокрема вітамін С, який є нестійким [11]. Після бланшування частинки плодів лимону занурювали в ємність з сиропом, в якому вони просочувалися цукрозою до досягнення рівноважної концентрації за даних умов. Насичення частинок проводили в двох режимах. Перший – режим настоювання, сироп в стані спокою. Дослідження проводили за температур 50 °С, 60 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С. Вміст цукрози

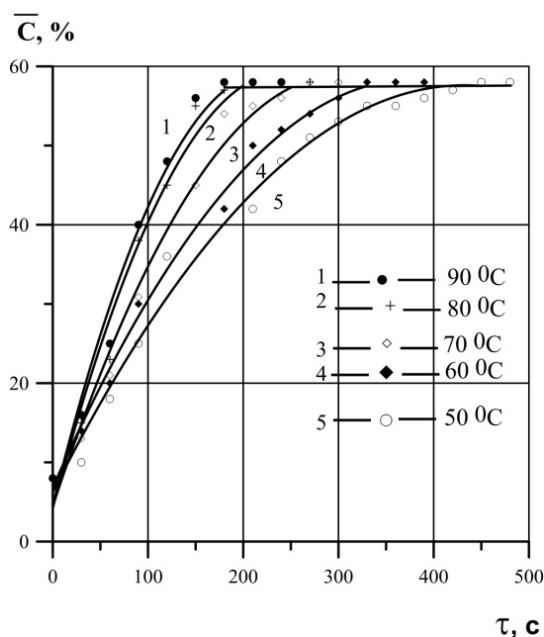


Рис. 1 – Залежність зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за різних температур (режим настоювання).

тур 80 °С – 90 °С відбувається випаровування води з сиропу, що спричиняє нерівномірний процес насичення. За умов температур 50 °С – 60 °С процес насичення відбувається в 2 – 3 рази повільніше. Виходячи з рис. 1., можна зробити попередній висновок про доцільність використання сиропу температурою 70 °С для насичення цукром частинок плоду лимону. Проте, остаточний висновок можливо зробити, проаналізувавши процес насичення цукром частинок плоду лимону в режимі барботування.

Залежність зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі в режимах як настоювання, так і барботування наведена на рис. 2.

Як видно з рис. 2, частинка лимону насичується цукром протягом 150с за температури 70 °С в режимі барботування, в той час, як в режимах настоювання частинка лимону насичується цукром протягом 180с за температури 90 °С, що свідчить про значну перевагу процесу насичення в умовах барботування.

Розрахуємо енергетичні затрати на процес насичення в умовах настоювання та барботування: затрати на підігрів сиропу до встановленої темпера-

в частинках визначали рефрактометричним методом через певні проміжки часу [12]. Другий – режим барботування, об'єм сиропу барботується повітрям через дренажну тарелю. Частинки плоду лимону при цьому знаходяться на решітці, занурені в сироп над дренажною тарелею. Дренажні отвори тарелі та отвори решітки, на якій знаходяться частинки лимону, мають отвори 0,005 м. Дослідження в режимі барботування проводили за температури 70 °С та витратах повітря ($\text{м}^3/\text{с}$): $6,25 \cdot 10^{-5}$; $8,06 \cdot 10^{-5}$; $12,5 \cdot 10^{-5}$; $15,6 \cdot 10^{-5}$, що відповідає швидкості через отвори: 3 м/с; 4 м/с; 6,5 м/с; 8 м/с відповідно. Вміст цукрози в частинках, аналогічно до першого режиму, визначали рефрактометричним методом через певні проміжки часу [13]. Об'єм сиропу становив 0,002 м^3 . Для кожного експерименту в сироп занурювали частинки кількістю 40 шт. Таке об'ємне співвідношення (1:5,5) дає можливість збереження сиропу незмінної концентрації з одночасним насиченням цукрозою частинок плодів.

Виклад результатів та їх аналіз. Залежність зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за різних температур сиропу (режим настоювання) наведена на рис. 1. Як видно з рис. 1., частинка лимону насичується цукром протягом 180с за температури 90 °С, протягом 210с за температури 80 °С та протягом 270с за температури 70 °С. Тобто, зростання температури від 80 °С до 90 °С несуттєво впливає на процес. Крім того за умов темпера-

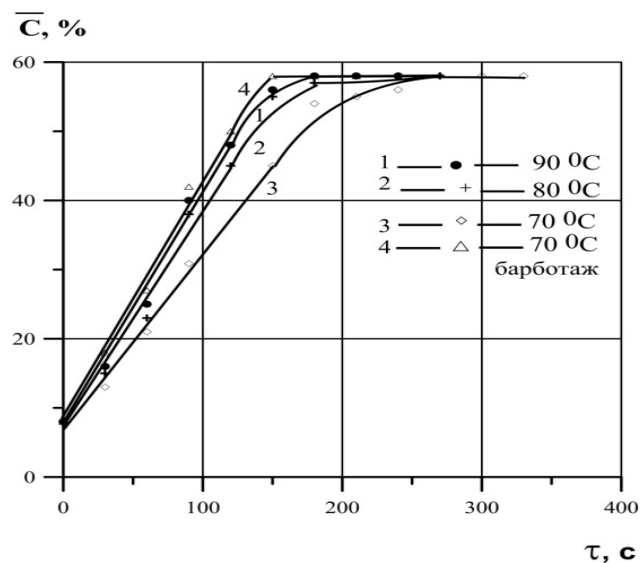


Рис. 2 – Залежність зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за температур 70 °С, 80 °С, 90 °С (режим настоювання) та температури 70 °С (режим барботування, швидкість повітря 6,5 м/с)

тури та на процес насичення до моменту досягнення рівноваги (Q); затрати вентилятора для подачі повітря на барботування ($Q_{\text{вент}}$); затрати калорифера на нагрів повітря (Q_k), сумарні затрати (ΣQ). Результати розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Питомі енергозатрати (кДж/кг_{сиропу}) досліджуваних режимів насичення частинок лимону в розчині цукрози

режим	t, C	$\tau_{\text{нагріву}}$, с	$\tau_{\text{насих}}$, с	Q , кДж/кг	$Q_{\text{вент}}$, кДж/кг	Q_k , кДж/кг	ΣQ , кДж/кг
барботування	70	3600	150	6,667	0,748	0,938	8,353
настоювання	70	3600	270	12,1	0	0	12,1
	80	4000	210	10,08	0	0	10,08
	90	4700	180	8,579	0	0	8,579

Як видно з таблиці 1, найменші енергозатрати ($\Sigma Q = 8,353$ кДж/кг_{сиропу}) будуть під час насичення частинок лимону цукрозою за умов барботування сиропу температурою 70 °С повітрям швидкістю 6,5 м/с. Це підтверджує економічну доцільність проведення процесу насичення в умовах барботування сиропу температурою 70 °С.

Наведемо результати експериментальних та теоретичних досліджень процесу насичення частинок лимону цукрозою з її водного розчин температурою 70 °С в режимі барботування сиропу повітрям за різних швидкостей.

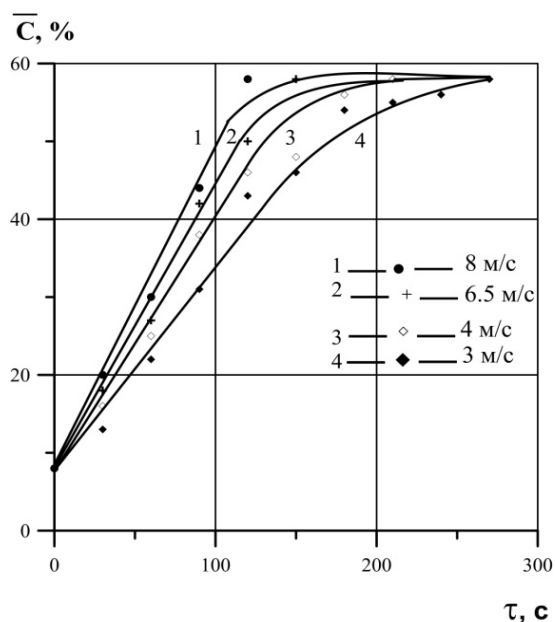


Рис. 3 – Залежність зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за температури 70 °С в режимі барботування

Як видно з рис.3, збільшення швидкості барботування сиропу сприяє швидкому процесу насичення. Проте, як показує експеримент, за умов швидкості барботування 8 м/с відбувається винесення краплин сиропу з зони насичення. Саме тому, найбільш доцільною швидкістю барботування сиропу була обрана швидкість 6,5 м/с. Як видно з рис. 2, на початку процесу насичення концентрація цукрози в частинці лимону зростає швидше, далі процес сповільнюється. Для визначення часових меж різних етапів процесу насичення наведемо графіки залежності зміни швидкості насичення від концентрації та в часі (рис. 4). Як видно з рис. 3., на початку процесу швидкість насичення зменшується. На цьому етапі відбувається процес масовіддачі молекул цукрози з барботуючого розчину до поверхні частинок. Лімітуючою стадією при цьому буде дифузійний процес з пограничного нерухомого шару сиропу, який утворюється навколо частинки в середину самої частинки. На цьому етапі значну роль буде відігравати процес масовіддачі, що сприяє скороченню часу насичення порівняно з насиченням в умовах настоювання. Тривалість цього етапу – τ_n (рис. 4(б)), зміна концентрації при цьому – $c_n - c_0$ (рис. 4(а)).

Наступна ділянка кривої (рис. 4.) відображує процес постійної швидкості насичення. На цьому етапі відбувається насичення цукрозою пор та капілярів співрозмірних між собою в середині частинок плоду лимону. Під час насичення за умов постійної швидкості, переміщення частинок цукрози в середині плоду шляхом

масовіддачі є незначним, а суттєву роль відіграє процес молекулярної дифузії. Найповільніша стадія насичення – остання ділянка на кривих (рис. 4) – прагнення концентрації цукрози в плодах лимону до рівноваги, що відбувається виключно шляхом молекулярної дифузії.

Виходячи з аналізу кривих швидкості насичення (рис.4), процес масовіддачі розглядається в проміжку часу τ_n (рис. 4(б)).

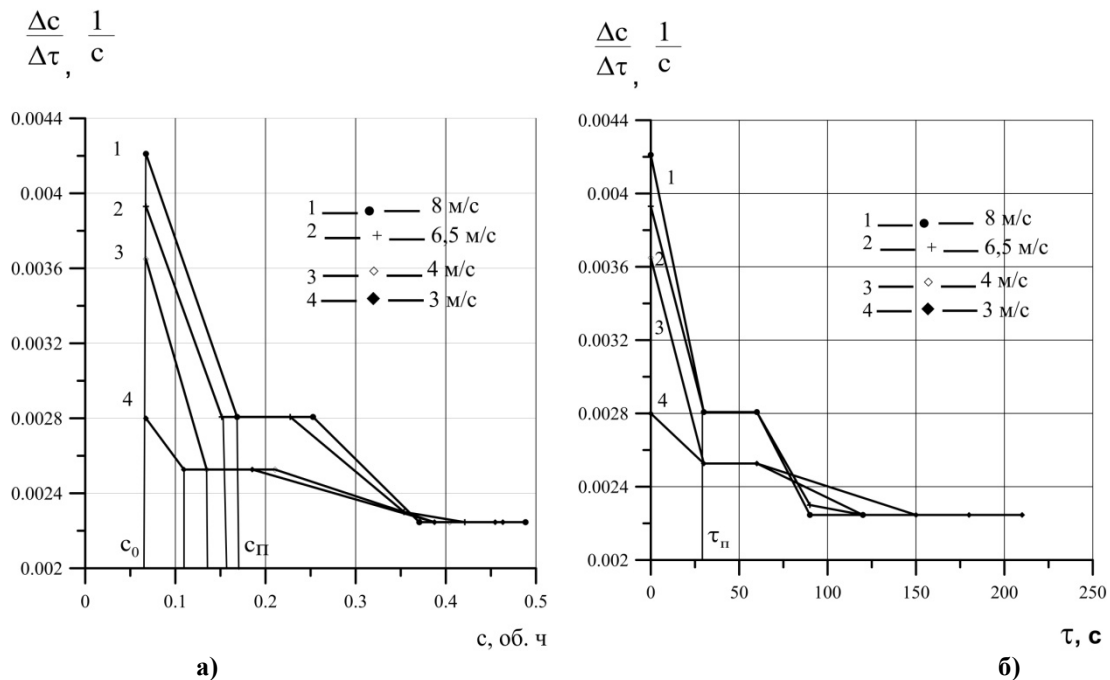


Рис. 4 – Залежності зміни швидкості насичення від концентрації (а) та в часі (б)

Проведемо узагальнення експериментальних даних залежності зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за температури 70°C в режимі барботування. Узагальнення проводились на основі законів Фіка [12 – 13].

На поверхні частинок плоду лимону одночасно відбувається масовіддача та дифузія [12 – 13]:

$$\beta \cdot (c - c_n) = -D_n \cdot \frac{dc}{dn} \quad (1)$$

Коефіцієнт масовіддачі:

$$\beta = \frac{V_n}{F \cdot (c - c_n)} \quad (2)$$

Ефективний коефіцієнт дифузії навколо частинки:

$$D_n = \frac{V_n}{F} \cdot \frac{c_n - c_0}{R} \quad (3)$$

де V_n – об'єм цукрози, яка продифундувала з сиропу до поверхні частинки, м³/с;

F – зовнішня площа циліндричної поверхні частинки плоду лимону, м²;

R – еквівалентний радіус частинки, м.

Критерій Шервуда на основі рівнянь (1 – 3) для процесу насичення частинок плоду лимону цукрозою:

$$Sh = \frac{\beta \cdot d_e}{D_n} \quad (4)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі від середовища цукрового сиропу до поверхні частинки плоду лимону, м/с

d_e – еквівалентний діаметр циліндричної частинки плоду лимону, м;

R – поверхня циліндричної частинки плоду лимону, м.

Як відомо [14], процес масовіддачі залежить від гідродинамічних умов процесу та від властивостей середовища, в якому відбувається процес. Тобто, критерій Шервуда (Sh) прямо пропорційний критерію Рейнольдса (Re) і Шмідта (Sc) [14]. Якщо критерій Шмідта (Sc) в умовах експерименту є величиною сталою, то для узагальнення експериментальних даних методом теорії подібності, застосуємо критерій Пекле дифузійний ($Pe_d = Re \cdot Sc$) [14]. Залежність критерію Шервуда (Sh) від Пекле дифузійного (Pe_d) зображена на рис. 5.

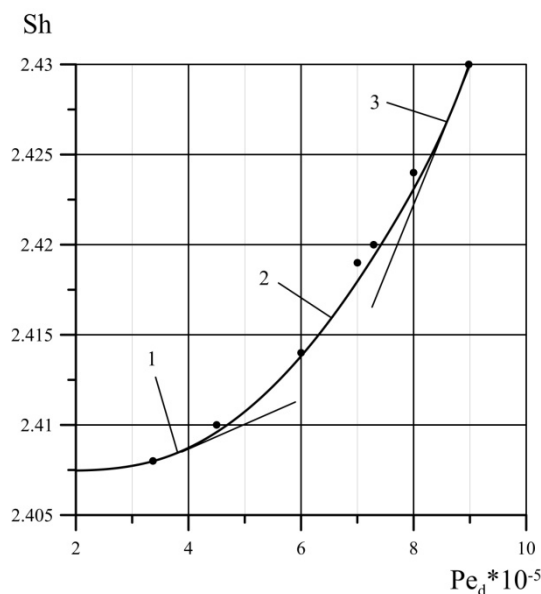


Рис. 5 – Узагальнення процесу насичення частинок плоду лимону цукрозою за температури 70 °С при зміні швидкості подачі повітря на барботування

З рис. 5 бачимо, що отриману узагальнюючу криву можна розділити на три ділянки, які відповідають трьом гідродинамічним режимам.

Перший режим – ділянка 1, за умов незначної турбулізації потоку. При значеннях $Re < 44\,000$ та $Pe_d < 4,5 \cdot 10^5$ ділянка кривої (рис. 5) добре описується співвідношенням:

$$Sh = 2.407 + 1.1 \cdot 10^{-14} \cdot Pe_d^{1.9} \quad (5)$$

Другий режим – ділянка 2, за умов збільшення турбулізації потоку. При значеннях $44\,000 < Re < 72\,000$ та $4,5 \cdot 10^5 < Pe_d < 8,2 \cdot 10^5$ ділянка кривої (рис. 5) добре описується співвідношенням:

$$Sh = 2.1 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot Pe_d^{1.5} \quad (6)$$

Третій режим – ділянка 3, за умов максимальної турбулізації потоку. При значеннях $Re > 72\,000$ та $Pe_d > 8,2 \cdot 10^5$ ділянка кривої (рис. 5) добре описується співвідношенням:

$$Sh = 2.4 - 1.5 \cdot 10^{-6} \cdot Pe_d^{1.1} \quad (7)$$

Критеріальні рівняння (5 – 7) дають змогу розрахувати коефіцієнт масовіддачі молекул цукрози через границю розділу фаз в середину частинки. Також рівняння (5 – 7) дають змогу розрахувати кількість цукрози, яка переходить з сиропу в частинку плоду лимону шляхом масовіддачі.

Висновки. В статті досліджено два режими насичення частинок плодів лимону цукрозою з її водного розчину. Доведено, що в режимі барботування сиропу повітрям насичення цукрозою частинок відбувається більш інтенсивно. Визначено енергетичні затрати на процес настоювання за різних температур та на процес барботування. Встановлено, що найменші енергозатрати ($\Sigma Q = 8,353$ кДж/кг_{сиропу}) будуть під час насичення частинок лимону цукрозою за умов барботування сиропу температурою 70°C повітрям швидкістю 6,5 м/с, що підтверджує економічну доцільність проведення процесу насичення в умовах барботування сиропу.

Наведено узагальнення результатів експериментальних досліджень процесу насичення частинок плоду лимону цукрозою за температури 70°C при зміні швидкості подачі повітря на барботування. В результаті узагальнення виведені критеріальні рівняння (5 – 7) для різних гідродинамічних режимів, які дають змогу розрахувати коефіцієнт масовіддачі для різних режимів барботування сиропу. За допомогою рівнянь 5 – 7 можливо розрахувати кількість цукрози, яка переходить з сиропу в частинку плоду лимону шляхом масовіддачі.

References

1. Mariana Aguirre-García, Orlenda Cortés-Zavaleta, Paola Hernández-Carranza, Héctor Ruiz-Espinosa, Carlos Enrique Ochoa-Velasco, Irving Israel Ruiz-López. (2023). Modeling the impregnation of roselle antioxidants into papaya cubes. Journal of Food Engineering, 357, 111585. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111585>.
2. Sachin R. Adsare, Ashwini N. Bellary, H.B. Sowbhagya, Revathy Baskaran, Maya Prakash, Navin K. Rastogi. (2016). Osmotic treatment for the impregnation of anthocyanin in candies from Indian gooseberry (Emblica officinalis). Journal of Food Engineering, 175, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.023>.
3. V.R.N. Telis, R.C.B.D.L. Murari, F. Yamashita. (2004). Diffusion coefficients during osmotic dehydration of tomatoes in ternary solutions. Journal of Food Engineering, 61(2), 253-259. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00097-9).

4. Berta Zecchi, Patricia Gerla. (2020). Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 274, 109821. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109821>.
5. Chun-ju Liu, You-lin Xue, Jia Guo, Han-ci Ren, Song Jiang, Da-jing Li, Jiang-feng Song, Zhong-yuan Zhang. (2021). Citric acid and sucrose pretreatment improves the crispness of puffed peach chips by regulating cell structure and mechanical properties. *LWT*, 142, 111036. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111036>.
6. Genilza Almeida da Graça, Pryanka Thuyra Nascimento Fontes, Alysson Caetano Soares, Mônica Silva de Jesus, Patrícia Nogueira Matos, Maria Terezinha Santos Leite Neta, Adriano do Nascimento Simões, Luciana Marques de Carvalho, Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Júnior, Marcelo Augusto Gutierrez Carnelossi, Aline de Almeida Vasconcelos. (2024). Characterization of growth and development of pumpkin cv Mini Jack fruits. *Food Chemistry Advances*, 5, 100743 <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100743>.
7. Sarra Cherif, Alexandre Leca, Sylvie Bureau, Jameleddine Ben Abda, Carine Le Bourvellec. (2024). Does hydration of 'Deglet Nour' date palm fruits improve their quality and help to reduce waste? *Food Chemistry*, 458, 140323 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140323>.
8. K. Castillo-Santos, I.I. Ruiz-López, G.C. Rodríguez-Jimenes, J. Carrillo-Ahumada, M.A. García-Alvarado. (2017). Analysis of mass transfer equations during solid-liquid extraction and its application for vanilla extraction kinetics modeling. *Journal of Food Engineering*, 192, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.07.020>.
9. Gumnitsky, J., Venger, L., Sabadash, V., Hyvlud, A., Gnativ, Z. (2022). Physical And Mathematical Models Of Target Component Extraction From Rectilinear Capillaries. *Chemistry and Chemical Technology*, 16(1), 112–117 <https://doi.org/10.23939/chcht16.01.112>
10. Fedoryshyn, O.M., Petrina, R.O., Krvavych, A.S., Hubrii, Z.V., Atamanyuk, V.M. (2023). Research on aspects of the extraction kinetics of metabolites of carlina acaulis while mixing. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 1, 3–10. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2023-146-1-3-10>
11. Manoj Kumar Solanki, Zhen Wang, Amit Kaushik, Vipin Kumar Singh, Rajib Roychowdhury, Manish Kumar, Dharmendra Kumar, Joginder Singh, Sandeep Kumar Singh, Bhavana Dixit, Ajay Kumar. (2024). From orchard to table: Significance of fruit microbiota in postharvest diseases management of citrus fruits. *Food Control*, 165, 110698. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110698>.
12. Huzova I. (2023). Study on the diffusion process of zucchini fruits saturation with sucrose from an aqueous solution. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(3), 552–562. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.280561>
13. 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. <https://doi.org/10.15673/fst.v11i4.727>
14. Huzova I., Atamanyuk V. (2023). Study on the kinetics, hydrodynamics and mass transfer of the process of zucchini fruits saturation with sucrose from an aqueous solution. *Food Science and Technology*, 16(4), 56–63. <https://doi.org/10.15673/fst.v16i4.2541>

ENERGY-SAVING REGIMES FOR SATURATING LEMON FRUIT PARTICLES WITH SUCROSE

Iryna Huzova, PhD of Technical Sciences, Associate Professor
Volodymyr Atamanyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University

Abstract. This article is dedicated to solving the problem of saturating lemon fruit particles with sucrose in the shortest possible time while maximizing energy savings. The authors of the article developed regimes for saturating lemon fruit particles. The saturation was conducted in two modes. The first mode is soaking, with the syrup in a state of rest. Research was conducted at temperatures of 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, and 90°C. The second mode is bubbling, where the volume of syrup is aerated through a drainage tray. The lemon fruit particles are placed on a grid submerged in the syrup above the drainage tray. Research in the bubbling mode was conducted at a temperature of 70°C and air flow rates (m^3/s): $6.25 \cdot 10^{-5}$; $8.06 \cdot 10^{-5}$; $12.5 \cdot 10^{-5}$; $15.6 \cdot 10^{-5}$, which corresponds to the speed through the drainage tray holes: 3 m/s; 4 m/s; 6.5 m/s; 8 m/s, respectively.

The authors proved that the lowest energy consumption ($\Sigma Q = 8.353 \text{ kJ/kg}$ of syrup) occurs during the saturation of lemon particles with sucrose under bubbling conditions at a syrup temperature of 70°C with an air speed of 6.5 m/s, confirming the economic feasibility of this method.

The study presents and analyzes the dependencies of the saturation rate on concentration and time. The analysis shows that at the beginning of the process, the saturation rate decreases. At this stage, the process of mass transfer of sucrose molecules from the bubbling solution to the surface of the particles occurs, with the mass transfer process playing a significant role, which helps to reduce the saturation time compared to soaking conditions.

The study generalizes experimental data on the change in sucrose concentration in lemon fruits over time at a temperature of 70°C in the bubbling mode at different speeds. As a result of generalizing the experimental data using the similarity theory method, criterion equations were derived, allowing the calculation of the mass transfer coefficient of sucrose molecules through the phase boundary into the particle under various hydrodynamic regimes. The obtained equations also enable the calculation of the amount of sucrose transferred from the syrup to the lemon fruit particle through mass transfer.

Keywords: mass transfer, lemon fruit, energy saving, saturation, soaking, bubbling.

Список використаної літератури

1. Mariana Aguirre-García, Orlenda Cortés-Zavaleta, Paola Hernández-Carranza, Héctor Ruiz-Espinosa, Carlos Enrique Ochoa-Velasco, Irving Israel Ruiz-López. Modeling the impregnation of roselle antioxidants into papaya cubes // *Journal of Food Engineering*. 2023. 357. P. 111585.
2. Sachin R. Adsare, Ashwini N. Bellary, H.B. Sowbhagya, Revathy Baskaran, Maya Prakash, Navin K. Rastogi. Osmotic treatment for the impregnation of anthocyanin in candies from Indian gooseberry (*Emblica officinalis*) // *Journal of Food Engineering*. 2016. 175. P. 24-32.
3. V.R.N. Telis, R.C.B.D.L. Murari, F. Yamashita. Diffusion coefficients during osmotic dehydration of tomatoes in ternary solutions // *Journal of Food Engineering*. 2004. 61(2). P. 253-259.
4. Berta Zecchi, Patricia Gerla. Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage // *Journal of Food Engineering*. 2020. 274. P. 109821.
5. Chun-ju Liu, You-lin Xue, Jia Guo, Han-ci Ren, Song Jiang, Da-jing Li, Jiang-feng Song, Zhong-yuan Zhang. Citric acid and sucrose pretreatment improves the crispness of puffed peach chips by regulating cell structure and mechanical properties // *LWT*. 2021. 142. P. 111036.
6. Genilza Almeida da Graça, Pryanka Thuyra Nascimento Fontes, Alysson Caetano Soares, Mônica Silva de Jesus, Patrícia Nogueira Matos, Maria Terezinha Santos Leite Neta, Adriano do Nascimento Simões, Luciana Marques de Carvalho, Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Júnior, Marcelo Augusto Gutierrez Carnelossi, Aline de Almeida Vasconcelos. Characterization of growth and development of pumpkin cv Mini Jack fruits // *Food Chemistry Advances*. 2024. 5. P. 100743
7. Sarra Cherif, Alexandre Leca, Sylvie Bureau, Jameleddine Ben Abda, Carine Le Bourvellec. Does hydration of 'Deglet Nour' date palm fruits improve their quality and help to reduce waste? // *Food Chemistry*. 2024. 458. P. 140323
8. K. Castillo-Santos, I.I. Ruiz-López, G.C. Rodríguez-Jimenes, J. Carrillo-Ahumada, M.A. García-Alvarado. Analysis of mass transfer equations during solid-liquid extraction and its application for vanilla extraction kinetics modeling // *Journal of Food Engineering*. 2017. 192. P. 36-44.
9. Gumnitsky, J., Venger, L., Sabadash, V., Hyvlud, A., Gnativ, Z. Physical And Mathematical Models Of Target Component Extraction From Rectlinear Capillaries // *Chemistry and Chemical Technology*. 2022. 16(1). P. 112-117.
10. Fedoryshyn, O.M., Petrina, R.O., Krvavych, A.S., Hubrii, Z.V., Atamanyuk, V.M. Research on aspects of the extraction kinetics of metabolites of carlina acaulis while mixing // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2023.1. P. 3-10.
11. Manoj Kumar Solanki, Zhen Wang, Amit Kaushik, Vipin Kumar Singh, Rajib Roychowdhury, Manish Kumar, Dharmendra Kumar, Joginder Singh, Sandeep Kumar Singh, Bhavana Dixit, Ajay Kumar. From orchard to table: Significance of fruit microbiota in postharvest diseases management of citrus fruits // *Food Control*. 2024. 165. P. 110698
12. Huzova I. Study on the diffusion process of zucchini fruits saturation with sucrose from an aqueous solution // *Journal of Chemistry and Technologies*. 2023. 31(3). P. 552-562.
13. 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.
14. Huzova I., Atamanyuk V. Study on the kinetics, hydrodynamics and mass transfer of the process of zucchini fruits saturation with sucrose from an aqueous solution // *Food Science and Technology*. 2023. 16(4). P. 56-63.

Отримано в редакцію 14.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 14.07.2024
Approved 25.09.2024

КОМБІНОВАНА СИСТЕМА МІКРОХВИЛЬОВОГО ДЕГІДРАТОРА ІЗ ТЕПЛОНАСОСНИМИ ВИПАРНИМИ АПАРАТАМИ

Бурдо О. Г., д.т.н., професор, Славинська В.О., інженер
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Проведено аналіз розроблених авторами електромагнітних дегідраторів, визначено резерв по зменшенню витрат енергії, за умов утилізації енергії пари шляхом її термотрансформації. Виявлені суттєві недоліки випарних апаратів та методики вирішення існуючих проблем та протиріч. Запропоновано об'єднання впливу на систему мікрохвильового поля та теплового насоса. Розглядаються інноваційні методи зневоднення завдяки використанню теплових насосів у харчовій промисловості. Сформовано принципову схему енергоефективного двоступеневого електродинамічного дегідратора з тепловим насосом. Виконано порівняння показників енергоефективності різних традиційних технологій зневоднення та запропонованого інноваційного апарату. Наведено методику розрахунку енергетичної ефективності систем із прямими та реверсними потоками енергії. Аналізуються схеми багаступневих дегідраторів із тепловими насосами. Наведено результати комп'ютерного експерименту із двоступеневим та чотирьохступеневим дегідратором. Показано, як зростає загальний ККД за рахунок формування реверсних потоків. Розглядаються питання оптимізації систем із реверсними потоками. Наведено, що використання на останній ступені електродинамічного апарата дозволяє отримати висококонцентрований якісний розчин, а використання енергії вторинної пари на основі теплових насосів у разі підвищити енергетичну ефективність системи. Запропоновано інноваційну установку із комбінованими системами електродинамічного та тепло насосного типів. Визначено режими її експлуатації та оптимізації.

Ключові слова: мікрохвильові електродинамічні дегідратори, теплові насоси, енергетична ефективність, реверсні потоки енергії.

Вступ. Випарні апарати завдяки простоті конструкції та експлуатації найбільш поширені в хімічних, харчових, фармацевтичних та інших галузях промисловості. Разом з тим, принцип поверхневого підведення енергії у випарних апаратах для деяких розчинів має суттєвий недолік. З підвищенням концентрації розчину зростає в'язкість, знижується інтенсивність циркуляції розчину, на поверхні зростає товщина примезового шару і його термічний опір, з'являється присмак варіння і пригару. На практиці ця проблема вирішується обмеженням величини кінцевої концентрації готового продукту. Останніми роками активно ведуться дослідження з використання принципів об'ємного підведення енергії та термотрансформації на базі теплових насосів. У цій роботі досліджується технічна ідея комбінації систем електродинамічного типу і теплових насосів для утилізаторів теплоти вторинної пари.

Аналіз проблеми та формулювання науково-технічної гіпотези. У роботі [1] розглядається вплив різних інноваційних методів зневоднення з використанням сушарки з тепловим насосом на ефективність процесу та якість сушених яблук, бананів, винограду, мармеладу, ківі та ананасів. Сушарки з тепловим насосом використовуються як один із корисних і багатообіцяючих методів зневоднення в харчовій промисловості завдяки їхньому низькому споживанню енергії та витратам, високій продуктивності, низькій температурі сушіння, і часу, а також меншій втраті якості сушених продуктів.

У дослідженні [2] чорний виноград GP Kalecik karası з насінням сушили в сушарці з тепловим насосом замкнутого циклу, призначений для продуктів з високим вмістом вологи. Визначено вплив температури сушильного повітря на біоактивні властивості та характеристики сушіння побічних продуктів виноробства, а також продуктивність системи. У дослідженні [3] проводиться теоретичний аналіз та експериментальне дослідження низькотемпературної системи сушіння за допомогою теплового насоса.

На основі теоретичних моделей проведено аналіз чутливості температури випаровування, температури конденсації та масової витрати повітря до температури та вологості повітря на виході з сушильної шафи, швидкості сушіння та питомої витрати електроенергії. У роботі [4] було вивчено сушильну установку з тепловим насосом з погляду продуктивності системи та енергоефективності під час сушіння баклажанів (*Solanum melongena* L.) за постійної температури повітря та різних систем роботи. У дослідженні [5] розроблено імітаційну гідродинамічну модель на основі експериментального дослідження сушіння листя амаранту в оптимізованій сушильній установці з тепловим насосом. Досліджено вплив різних умов на тепло- та масообмін.

У дослідженні [6] було розроблено гібридну систему сушіння, що поєднує в собі всі переваги різних методів сушіння. Метою даного дослідження було порівняння експериментальних результатів сушильної установки з тепловим насосом і сушильної установки з тепловим насосом з інфрачервоним випромінюванням, визначення енергетичної та ексергетичної ефективності сушарок, а також аналіз кінетики сушіння тертої моркви. У роботі [7] було виготовлено та випробувано сушильну установку з тепловим насосом, оптимізо-

вану з різних конфігурацій з використанням програмного забезпечення обчислювальної гідродинаміки. Експериментальне дослідження проводили в оптимізованій конфігурації для діапазону температур від 50 до 60°C, діапазону відносної вологості від 20 до 12% і швидкостей повітря 1,41 м/с, 2,39 м/с і 3,24 м/с.

Таким чином, теплові насоси широко й ефективно використовуються для задач зневоднення в сушарках. Досліджень щодо використання теплових насосів у комбінованих схемах випаровування та мікрохвильової дегідратації в доступних публікаціях не знайдено. Для розв'язання протиріч традиційних випарних апаратів, сформульованих у вступі, пропонується така науково-технічна гіпотеза: «використання на останньому ступені зневоднення електродинамічних систем об'ємного підведення енергії з подальшою утилізацією енергії вторинної пари теплонасосним циклом для зневоднення на перших ступенях дасть змогу при істотному скороченні витрат енергії одержувати додатково розчин гідролата».

Методи та результати досліджень. На основі сформульованої науково-технічної гіпотези розроблено принципову схему двоступеневого електродинамічного дегідратору з тепловим насосом. На останньому ступені за рахунок електричної енергії Ne формується потік електромагнітної енергії, який, взаємодіючи з полярними молекулами розчину, переводить їх у пару (рис. 1). У результаті концентрація розчину (X_k) підвищується і готовий продукт у кількості (M) відводиться з установки. Вторинна пара (W_2) надходить у випарник (I) теплового насоса, конденсується і відводиться з установки у вигляді потоку гідролата (G_r). Енергія конденсації передається робочому тілу (G_x) теплового насоса і, за допомогою компресора (K_m), трансформується на більш високий рівень температур. Це дає змогу в конденсаторі теплового насоса (K_d) здійснювати випарювання із сировини, витрата якої (G_c) а концентрація (X_c). Частково зневоднений розчин із концентрацією (X_1) у кількості (G_1) подається в останній ступінь.

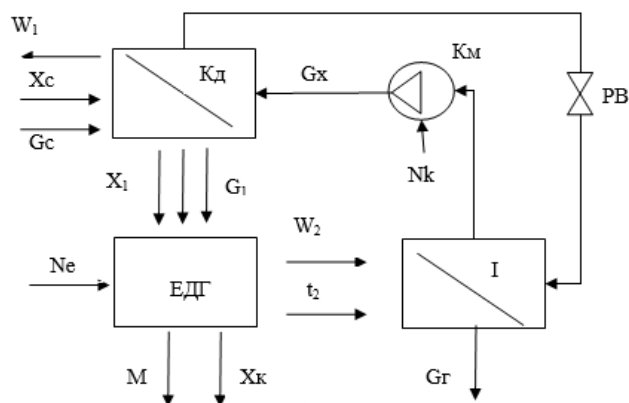


Рис. 1 – Принципова схема двоступеневого мікрохвильового дегідратору з тепловим насосом

Енергетичний ефект установки полягає в тому, що передбачена можливість утилізації теплоти вторинної пари, тобто організація «реверсного» потоку, що підвищує енергетичний ККД.

У разі «реверсних» потоків енергії розраховуються ККД реверсних елементів.

$$\eta_{pi} = \frac{Q_{pi}}{E_T} \quad (1)$$

Підсумковий тепловий показник системи визначається:

$$\eta = \frac{E_{np} + \sum_i Q_{pi}}{E_T} = \prod_{i=1}^n \eta_i + \frac{\sum_i Q_{pi}}{E_T} \quad (2)$$

На основі цієї гіпотези пропонується оперувати в розрахунках базовими характеристиками джерела енергії, наприклад палива з теплою згоряння 40 МДж/кг. Тобто 1 кг нафтового еквівалента (кг н.е.) виділяє енергію в 40 МДж/кг н.е.

Для проведення аналізу розглянутих схем вводиться показник ефективності використання енергії палива:

$$d = \frac{Gn}{b} \quad (3)$$

де, b — 1 кг палива; G — кількість видаленої вологи, кг.

На основі цієї методології проведено аналіз двоступеневого електродинамічного дегідратору з реверсним потоком (табл. 1). Використовується енергія вторинної пари останнього ступеня, яка тепловим насосом

трансформується на вищий температурний рівень. Це дає змогу за рахунок тепла, що утилізується, здійснити випарювання в першому ступені. Коефіцієнт термотрансформації теплового насоса для розглянутих діапазонів температур прогнозується від 4 до 6.

Таблиця 1

Порівняння традиційних і запропонованого показників енергоефективності різних технологій зневоднення

Енерготехнологія	Витрата на 1 кг видаленої води		ККД		
	Енергії, J, МДж,	Палива, до, 1кг н.е.	Прямих потоків	Реверсних потоків	Загальний
Сушка традиційна	4- 10	0,1 – 0,25	0,4-0,1	0	0,2
Сушка в ЕМП	3	0,15 – 0,25	0,5-0,8	0	0,4
Випарка+сушка традиційна	3 - 6		0,3 – 0,4	0	0,3 – 0,4
Випарка традиційна	3		0,5	0	0,5
Двоступеневий дегідратор із тепловим насосом	1,5		0,4	0,2	0,6

За допомогою запропонованої методики проведено оцінку ефективності використання енергії в традиційних технологіях сушіння та випарювання і запропонованих в ОНТУ методів сушіння та випарювання в електромагнітному полі. Проведені оцінки свідчать про енергетичні та економічні переваги пропонованих апаратів. Природно, капітальні витрати на проектування і виготовлення таких апаратів виявляються вищими, ніж у традиційних конструкцій, що вимагає окремих розрахунків.

Розглянемо кінетику дегідратації у двоступеневій установці з тепловим насосом за таких вихідних даних. Тип розчину - водний, тиск - 30 кПа, початкова концентрація розчину X_I — 0,1, кінцева концентрація продукту, X_F — 0,85, кількість готового продукту, M — 4 кг, електрична потужність другого ступеня, N_E — 2 кВт, температура продукту на вході, t_I °С, температура випарювання, t_{Ev} °С, 2 ступінь працює за циклом теплового насоса (рис. 2). Час циклу прийнято 7220 с.

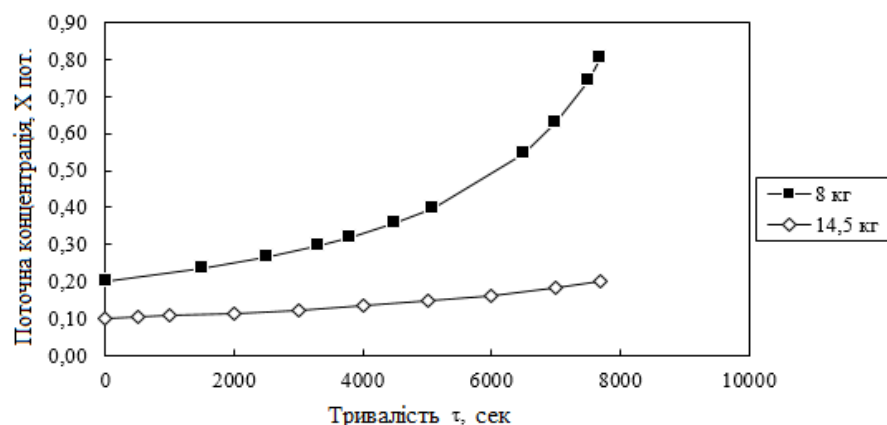


Рис. 2 – Кінетика зневоднення у двоступеневій установці

Видно, що в 1 ступені видалено 14,5 кг води, а концентрація підвищилася на 0,5%. У 2 ступені видалено 8 кг води, а концентрація підвищилася в 4 рази (з 0,2 до 0,8).

Зі збільшенням числа теплонасосних ступенів енергетична ефективність установки підвищуватиметься. Проведемо аналіз у чотириступеневій установці з тепловими насосами за таких вихідних даних (табл. 2).

Таблиця 2

Зведення вихідних даних для чотириступеневого дегідратора з тепловими насосами

N	Параметр	Розмірність	Значення
1	Тиск	кПа	30
2	Початкова концентрація розчину, X_n		0,1
3	Кінцева концентрація продукту, X_k		0,85
4	Кількість готового продукту, M	кг	4
5	Електрична потужність 4 ступені, N_e	кВт	2
6	Час циклу	с	7220

Обчислювальний експеримент проведено для водного розчину.

Методика розрахунку. Корисною вважається енергія, яка витрачається на утворення парової фази, кількість якої W . При цьому, $W_1=W_2=W_3=W_4=W$, таким чином, оптимізація виконується за параметром W . Кількість корисної енергії визначається за співвідношенням:

$$Q_V = W \cdot r \quad (4)$$

де r - теплота фазового переходу, Дж/кг. Температура випарювання у всіх ступенях однакова, t_{EV} , °C. Методика розрахунку останнього четвертого ступеня.

Розглянемо матеріальний та енергетичний баланси реактора (рис. 3).

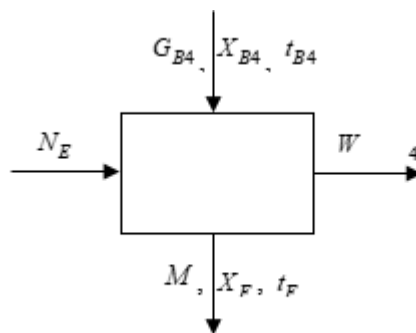


Рис. 3 – Постановка завдання

Параметри: M , X_F , N_E — є вихідними даними, температура визначається за тиском у реакторі залежно від типу розчину. Кількість випареної води розраховується за співвідношенням (4), що разом із G_{B4} є основним результатом розрахунку цього ступеня і вхідними параметрами для 3 ступеня.

Методика розрахунку третього ступеня.

Розглянемо матеріальний та енергетичний баланси 3 ступеня.

Відомими параметрами 3 ступеня є $G_{K3}=G_{B4}$ і $X_{K3}=X_{B4}$. Залишаються постійними параметри: P , t , W , τ .

Повний матеріальний баланс:

$$G_{I3} = G_{K3} + W \quad (5)$$

Матеріальний баланс за цільовим компонентом:

$$G_{B3} \cdot X_{B3} = G_{K3} \cdot X_{K3} \quad (6)$$

Енергетичний баланс:

$$N_k \cdot \Psi = W \cdot r \quad (7)$$

де Ψ — коефіцієнт термотрансформації теплового насоса, який для температурних режимів задачі може змінюватися в межах 4—6, N_k — потужність компресора теплового насоса.

Параметри G_{B3} та X_{B3} є основним результатом розрахунку цього ступеня і вхідними параметрами для 2 ступеня. Фізичні схеми, розрахункові співвідношення для 2 і 1 ступенів аналогічні 3 ступеню за умови узгодження відповідних індексів. Особливістю розрахунку 1 ступеня є те, що необхідно визначити ту кількість вихідного розчину G_R , яке відповідає значенню концентрації вихідного розчину X_R (рис. 2) і встановленому часу циклу.

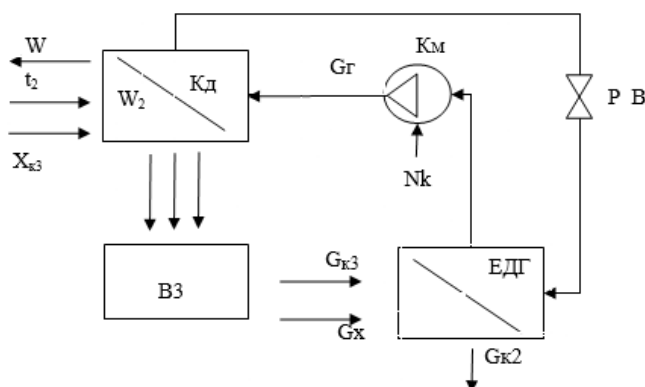


Рис. 4 – Схема 3 ступені

Оціночні розрахунки виконано для такого набору вихідних даних (табл. 3).

Таблиця 3

Зведення вихідних даних для розрахунку 4-х ступеневого електродинамічного теплонасосного дегідратора

N	Параметр	Значення	N	Параметр	Значення	N	Параметр	Значення
1	P, кПа	30	2	t, C	20	3	M, кг	4
4	Xс	0,1	5	Xк	85	6	Ne, кВт	2
7	W, кг	5	8	ψ	5	9		

Встановлено прийнятне для вихідних даних (табл. 1) значення часу циклу, $\tau = 7200$ с. За такими вихідними даними проведено обчислювальний експеримент за спеціальною програмою. У результаті встановлено матеріальні баланси: у 1 ступінь необхідно подавати 32 кг розчину, у 2 - 20, у 3 - 14, у 4 - 9.

Кінетика зміни поточних концентрацій ($X_{\text{пот}}$ у чотирьох ступенях наведено на рис. 5.

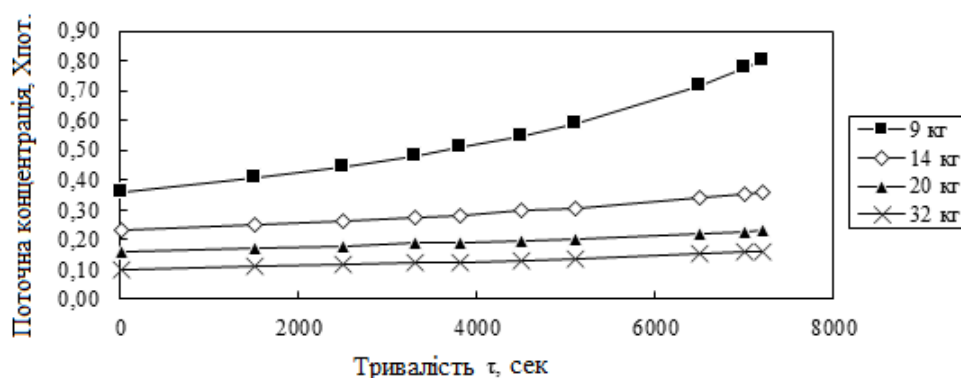


Рис. 5 – Кінетика процесів випаровування в 4-ступеневій установці

Розроблена програма дає змогу розраховувати будь-які комбінації електродинамічних і теплонасосних систем. Однак, питання економічної ефективності потребують врахування специфічних науково-технічних протиріч. З одного боку, ступінь підвищення потенціалу парового потоку не настільки істотний і не є проблемою для теплових насосів. З іншого боку, рівень температур вторинної пари потребує серйозного аналізу під час оцінювання енергетичної ефективності.

У статті під час розрахунків двоступеневих і чотиріступеневих циклів прийнято найбільш жорсткі температурні режими. Пом'якшення режимів можливе шляхом зниження тиску в дегідраторі.

Висновки. Комбіноване використання електродинамічних систем і теплових насосів є новим технічним рішенням у проблемі вдосконалення обладнання для дегідrataції. Ефект такого напрямку пов'язаний із розумінням науково-технічного протиріччя, що виникає при взаємодії електромагнітного поля та термотрансформаторів. При цьому, формування реверсних потоків енергії здатне значно підвищити підсумковий енергетичний ККД обладнання. У роботі представлено методику розрахунку енергетичного ККД з урахуванням формування таких реверсних потоків. Проведений обчислювальний експеримент показав, що для двоступеневих апаратів із тепловими насосами підсумковий ККД можна підвищити з 0,4 до 0,6, а для чотиріступеневих дегідраторів з 0,4 до 0,8. Результати роботи дають можливість перейти до проектування дослідно-промислового зразка багатоступінчастого дегідратора з електродинамічними та теплонасосними системами.

References

1. Salehi F. (2021). Recent Applications of Heat Pump Dryer for Drying of Fruit Crops: A Review. *International Journal of Fruit Science*, 546-555. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1911746>
2. Aktaş M., Taşeri L., Şevik S., Gülcü M., Seçkin G.U., Dolgun E.C. Heat Pump Drying of Grape Pomace: Performance and Product Quality Analysis, *Drying Technology*, 2019, P. 1766—1779, <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1536983>
3. Zhang T., Yan Z.W., Wang L.Y., Zheng W.J., Wu Q., Meng Q.L. (2021). Theoretical Analysis and Experimental Study on a Low-Temperature Heat Pump Sludge Drying System, *Energy*, Volume 214, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118985>
4. Doymaz İ., Tunçalp C., Göksel Z. (2023). Comparison of drying kinetics, energy efficiency and color of dried eggplant slices with two different configurations of a heat pump dryer, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Volume 45, 690-707 <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2169415>

5. Babu A.K., Kumaresan G., Raj V.A.A., Sharmila Babu V.S. (2023). Numerical simulation of heat pump thin layer drying of Amaranth leaves, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Volume 45, 9383-9395, <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2232737>
6. Aktaş M., Khanlari A., Amini A., Şevik S. (2017). Performance analysis of heat pump and infrared—heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology, *Energy Conversion and Management*, Volume 132, 327-338, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.027>
7. Babu A.K., V. Raj A.A., Velraj R., Govindaraj K. (2020) Experimental Investigations of Thin-layer Drying of Leaves in a Heat-Pump Assisted Tray-type Batch Drying Chamber, *Journal of Mechanical Engineering* 66 (4), 254-265. Doi:10.5545/sv-jme.2019.6510

COMBINED SYSTEM OF MICROWAVE DEHYDRATOR WITH HEAT PUMP EVAPORATORS

Burdo O. G., Slavinska V. O.
Odesa National Technological University, Odesa

Abstract. An analysis of the electromagnetic dehydrators developed by the authors is carried out, a reserve for reducing energy consumption is determined, provided that steam energy is utilised by its thermal transformation. Significant disadvantages of evaporators and methods of solving existing problems and contradictions are revealed. The combination of the influence of the microwave field and the heat pump on the system is proposed. Innovative methods of dehydration using heat pumps in the food industry are considered. A schematic diagram of an energy-efficient two-stage electrodynamic dehydrator with a heat pump is formed. A comparison of energy efficiency indicators of various traditional dehydration technologies and the proposed innovative device has been carried out. A methodology for calculating the energy efficiency of systems with forward and reverse energy flows is presented. Schemes of multi-stage dehydrators with heat pumps are analysed. The results of a computer experiment with a two-stage and a four-stage dehydrator are presented. It is shown how the overall efficiency increases due to the formation of reverse flows. The issues of optimisation of systems with reverse flows are considered. It is shown that the use of an electrodynamic apparatus at the last stage allows obtaining a highly concentrated high-quality solution, and the use of secondary steam energy on the basis of heat pumps can significantly increase the energy efficiency of the system. An innovative installation with combined systems of electrodynamic and heat pump types is proposed. The modes of its operation and optimisation are determined.

Keywords: microwave electrodynamic dehydrators, heat pumps, energy efficiency, reverse energy flows.

Список використаної літератури

1. Salehi F. Recent Applications of Heat Pump Dryer for Drying of Fruit Crops: A Review. *International Journal of Fruit Science*, 2021, P. 546-555. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1911746>
2. Aktaş M., Taşeri L., Şevik S., Gülcü M., Seçkin G.U., Dolgun E.C. Heat Pump Drying of Grape Pomace: Performance and Product Quality Analysis, *Drying Technology*, 2019, P. 1766—1779, <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1536983>
3. Zhang T., Yan Z.W., Wang L.Y., Zheng W.J., Wu Q., Meng Q.L. Theoretical Analysis and Experimental Study on a Low-Temperature Heat Pump Sludge Drying System, *Energy*, 2021, Volume 214, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118985>
4. Doymaz İ., Tunçkal C., Göksel Z. Comparison of drying kinetics, energy efficiency and color of dried eggplant slices with two different configurations of a heat pump dryer, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2023, Volume 45, P. 690-707 <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2169415>
5. Babu A.K., Kumaresan G., Raj V.A.A., Sharmila Babu V.S. Numerical simulation of heat pump thin layer drying of Amaranth leaves, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2023, Volume 45, P. 9383-9395, <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2232737>
6. Aktaş M., Khanlari A., Amini A., Şevik S. Performance analysis of heat pump and infrared—heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology, *Energy Conversion and Management*, 2017, Volume 132, P. 327-338, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.027>
7. Babu A.K., V. Raj A.A., Velraj R., Govindaraj K. Experimental Investigations of Thin-layer Drying of Leaves in a Heat-Pump Assisted Tray-type Batch Drying Chamber, *Journal of Mechanical Engineering* 66(2020)4, P.254-265. Doi:10.5545/sv-jme.2019.6510

Отримано в редакцію 12.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 12.07.2024
Approved 25.09.2024

ОСОБЛИВОСТІ СКЛАДУ ГЕЙНЕРІВ ЯК АКТУАЛЬНОГО ВИДУ СПОРТИВНОГО ХАРЧУВАННЯ

Авдєєва Л.Ю., д.т.н., с.н.с., Декуша Г.В., к.т.н., ст. докл., Турчина Т.Я., к.т.н., с.н.с.,
Макаренко А.А., к.т.н.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

Анотація. Стаття присвячена аналізу особливостей хімічного складу гейнерів – безпечних білково-вуглеводних добавок у спортивному харчуванні з метою розробки вітчизняної технології гейнерів з високою харчовою та біологічною цінністю, збагачених натуральними біологічно активними речовинами.

Сучасні тенденції розвитку ринку продуктів спортивного харчування свідчать про зростаючий попит на продукцію даного сегменту товарів у світі та Україні. Однак, не зважаючи на їх популярність, вітчизняний асортимент продуктів спортивного харчування, в тому числі гейнерів, представлений переважно продукцією імпортного виробництва.

Наведено характеристику та проаналізовано особливості складу протеїнових та вуглеводних компонентів гейнерів. Для досягнення максимально швидкого нарощування м'язової маси у рецептурах білково-вуглеводних добавок доцільне поєднання «швидких» та «повільних» протеїнів та вуглеводів. Серед «швидких» протеїнів найчастіше використовують протеїни молочної сироватки, як найбільш фізіологічні та повноцінні білки, та їх гідролізати. «Повільні» протеїни представлені казеїном, міцелярним казеїном, яєчними білками, а також соєвими та білками льону, останні є джерелом глутамінової кислоти. Визначальний вплив на нарощування м'язової маси мають вуглеводи – джерело швидкої енергії для відновлення фізичних сил. Поєднання швидких (глюкоза, сахароза) та повільних (мальтодекстрини з різним декстрозним числом, кластерний декстрин, нативні та модифіковані крохмалі, клітковина тощо) вуглеводів дозволяє забезпечити організм енергією впродовж тривалого часу.

Аналіз білково-вуглеводного складу гейнерів свідчить про необхідність проведення комплексних досліджень для розробки вітчизняних технологій виробництва гейнерів.

Ключові слова: спортивне харчування, гейнер, склад, білки, вуглеводи.

Постановка проблеми. Активний спосіб життя та збалансований раціон харчування є базовими, взаємопов'язаними чинниками фізичного та ментального здоров'я людини. Популярність спорту та інтерес споживачів до нутритивної підтримки організму для відновлення фізичної енергії, захисних сил та досягнення бажаних спортивних результатів призвели до активного попиту на продукти спортивного харчування – особливу групу безпечних добавок, що містять певну кількість окремих поживних речовин. В залежності від спрямованості фізіологічної дії на організм та складу їх поділяють на жиропалювачі, енергетики, ізотоники, донатори оксиду азоту, а також білкові, вуглеводні, вітамінно-мінеральні, амінокислотні та змішані комплекси [1, 2].

За даними [3] в 2022 р. лідерами споживання продуктів спортивного харчування на душу населення є США (56 кг), Австралія (32 кг) та Велика Британія (25 кг). Наразі на ринку представлені різноманітні форми спортивного харчування, включаючи спортивні напої, батончики і добавки до спортивного харчування. Індустрія спортивного харчування швидко розвивається і має значні перспективи для розширення ринку, розвитку виробничих технологій і збільшення капіталовкладень. Однак, він також стикається з багатьма проблемами, такими як відсутність інновацій, недостатньо глибокі наукові дослідження, ризики та проблеми безпеки [4, 5].

Особливу нішу серед товарів даного сегменту займають гейнери – білково-вуглеводні добавки, що призначені для максимально швидкого нарощування м'язової маси та відновлення енергетичних запасів організму після посиленних фізичних навантажень і користуються стабільним попитом у споживачів. Особливістю хімічного складу гейнерів є те, що вони представлені швидкими або повільними протеїнами (15–40%) та вуглеводами (60–85%), що дозволяє ефективно задовольнити потреби організму як в амінокислотах для росту мускулатури, так і у вуглеводах для відновлення запасів енергії. Для посилення тренувального ефекту гейнери додатково збагачують біологічно активними добавками, наприклад, креатином для стимулювання вироблення тестостерону, L-карнітином, головною функцією якого є транспорт жирних кислот в мітохондрії, вітамінними та мінеральними комплексами та ін.

Світовими виробниками гейнерів є США («Optimum Nutrition», «BSN», «Dymatize», «MuscleTech», «Universal Nutrition») та країни Заходу – Німеччина, Великобританія, Польща («Weider», «Applied nutrition», «OstroVit» відповідно). За версією BB.com в 2022 р. рейтинг кращих гейнерів був наступним: Serious Mass (Optimum Nutrition), True-Mass («BSN»), Pro Gainer («Optimum Nutrition»), Super Mass Gainer («Dymatize»), Mass Gainer («MuscleTech»), Mass JYM, Real Gains («Universal Nutrition»), Clean Gainer Rivalus, Gain Fast

3100 («Universal Nutrition»), True-Mass 1200 («BSN») [6]. В Україні одним з найбільших виробників білкових продуктів є ВАТ «Техмолпром» (м. Гадяч, Полтавська обл.). В числі своєї молочної продукції компанія випускає сироваткові протеїни (КСБ-65-УФ), які використовують у складі гейнерів та протеїнових сумішей.

Аналізуючи вітчизняний ринок білково-вуглеводних добавок для спортивного харчування можна зазначити, що більшість українських фірм-виробників та інтернет-магазинів в основному пропонують досить широкий асортимент гейнерів зарубіжного виробництва і незначний відсоток продукції виробленої в Україні, але переважно на основі імпортової сировини. З огляду на значний попит товарів даного сегменту, розробка нових вітчизняних технологій гейнерів з високою харчовою та біологічною цінністю і збагачених натуральними біологічно активними компонентами має значні перспективи і представляє собою актуальну задачу для харчової промисловості.

Метою роботи є проведення аналізу протеїнових та вуглеводних компонентів, які використовуються у спортивному харчуванні для виробництва гейнерів.

Аналіз результатів досліджень. На теперішній час вважається, що для людей, які проходять інтенсивні тренування з першочерговим наміром нарощування м'язової маси, потрібна більша кількість протеїнів, яка становить 1,4–2,0 г на кілограм маси тіла на день [7].

При виробництві гейнерів у сухій порошкоподібній формі виробники найчастіше застосовують технологію «сухого» змішування, при якій спочатку одержують всі сухі компоненти окремо, а потім змішують їх у визначеній кількості згідно рецептури. Така технологія отримання гейнерів спрощує технологічний процес, не вимагає великих виробничих площ, використання спеціалізованого високовартісного обладнання і знижує витрати електроенергії на виробництво продукції, однак при цьому зникає можливість впливати на якість і безпечність окремих компонентів і готової продукції в цілому [8].

За технологією «мокрого» змішування спочатку готують суміш необхідного складу у рідкій формі, яку потім подають на згущення та сушіння. Перевагою даної технології є те, що весь розчин суміші проходить теплову обробку і виробник може гарантувати відповідність готового продукту за показниками якості і безпечності. У виробництві продуктів спортивного харчування даний спосіб використовують рідше, надаючи перевагу технології «сухого» змішування.

Найпоширенішими білковими компонентами гейнерів є концентрати (65–85% білка) та ізоляти (90–95%) білків молочної сироватки, що вироблені із застосуванням мембранної мікро- або ультрафільтрації.

Білки молочної сироватки, їх гідролізати [9] та гідролізати інших білків тваринного або рослинного походження з різним ступенем гідролізу відносяться до «швидких» протеїнів. Завдяки високій біологічній цінності, збалансованому амінокислотному складу та швидкому засвоєнню (1–3 год) вони входять до складу більшості білково-вуглеводних сумішей, оскільки є найбільш фізіологічними для організму людини. Особливою популярністю користуються гідролізати білків молочної сироватки, оскільки частково розщеплені за допомогою протеолітичних ферментів [10, 11] білки в гідролізованій формі мають найвищу швидкість засвоєння – 15–20 хв (наприклад, «Gold standard gainer», «Pro gainer»).

Серед «повільних» протеїнів в спортивному харчуванні найчастіше використовують казеїни, казеїнати, яєчні та соєві білки та ін..

Популярний в останні роки міцелярний казеїн («Isomass xtreme gainer®») на відміну від звичайного казеїнового протеїну діє не 6–8 год, а 12 год, він добре розчинний у воді та не створює у напоях клейкої консистенції. Міцелярний казеїн виробляють за допомогою технології мембранної мікрофільтрації – при тиску 0,1–0,5 МПа відбувається розділення компонентів за діаметром часток в діапазоні 10–50 мкм [12]. Процес проходить без участі кислот та високих температур і тому на виході отримують казеїн з непорушеною структурою молекул (30–300 нм), що якісно очищений від лактози, вуглеводів та інших домішок. У порівнянні з іншими методами така обробка молочних білків, яку ще називають «холодною стерилізацією», є найбільш конкурентною завдяки тому, що зникає необхідність в пастеризації отриманих розчинів, а отже і в додаткових енерговитратах. До топ-4 краєвих брендів спортивного харчування, що виготовляють найякісніший міцелярний казеїн відносять «Gold Standard Casein» («Optimum Nutrition», США), «Micellar Casein» («Quamtrax», Іспанія), «Rule 1», «R1 Casein» («Rule One Proteins», США); «100% Casein Complex» («Scitec Nutrition», Угорщина).

Казеїнат кальцію виготовляється обробленням казеїну-сирця або сухого казеїну хімічно чистим гідроксидом кальцію із застосуванням екструзії або електродіалізу [13], завдяки чому продукт набуває гідрофільних властивостей утворюючи у воді колоїдну суспензію з високими емульгуючими, стабілізуючими та водозв'язуючими властивостями. Продукт містить повний набір амінокислот і тому часто входить до складу гейнерів (наприклад, «Serious mass», «Pro gainer»).

Повільно абсорбується організмом і яєчний білок. Крім збалансованого амінокислотного профілю, він є багатим джерелом амінокислот з розгалуженими боковими ланцюгами (BCAA), які ідеальні для потреб організму при нарощуванні та підтриманні м'язової тканини [14]. Він міститься у «Serious Mass» («Optimum Nutrition»), «Gain Bolic 6000» («Olimp Labs», Польща), «Max 2000» («Extremal Sports Nutrition», Україна).

Серед рослинних білків найчастіше до складу гейнерів вводять соєві протеїни («Super Mega Mass 2000» від «Weider», Німеччина; «Max 2000» від «Extremal Sports Nutrition», Україна). Завдяки високій біологічній цінності та досить збалансованому амінокислотному складу (крім деякого дефіциту сірковмісних амінокис-

лот) при поєднанні протеїнів сої з тваринними білками можна отримати повноцінну білкову складову з високими технологічними властивостями.

Прикладом гідролізаців рослинних білків є пептиди глутаміну («Pro gainer» (пшеничні) та «Critical mass»). Вільний L-глутамін або його дипептид при тривалому споживанні можуть послабити травми та запалення, викликані інтенсивними тренуваннями. Однак вплив пептидів глутаміну на відновлення м'язів після тренувань з навантаженнями остаточно не вияснено і потребує подальших досліджень [15, 16].

У складі білків льону («Gold standard gainer») переважають фракції проламінів та глютелінів, які є джерелом глутамінової кислоти [17]. У порівнянні з казеїнатом натрію, ізолятом білків сироватки та ізолятом соєвих білків ізолят білків льону має вищі індекси стабільності (179,5 год) та активності (375,51 м²/г) емульсії. Середній розмір крапель емульсії, стабілізованих цими білками, знаходився в порядку казеїнат натрію < ізолят білків льону < ізолят білків сироватки < ізолюваний соєвий білок. Здатність утримувати воду та поглинати жир у білків льону не поступається вищезгаданім білкам [18].

Основною складовою гейнерів, що забезпечує організм необхідною при інтенсивних та тривалих фізичних навантаженнях енергією, є вуглеводи. Для набору м'язової маси добова потреба у вуглеводах становить 7 г на 1 кг маси тіла. Оскільки кожен вид вуглеводів засвоюється з певною швидкістю, цей фактор враховують при розробці рецептур гейнерів для забезпечення стабільного отримання енергії впродовж тривалого періоду часу. Кожен виробник використовує певне поєднання комплексу швидких та повільних вуглеводів, що вводять до складу свого продукту.

До «швидких» вуглеводів відносять моно- та дисахариди, які завдяки високому глікемічному індексу (більше 100) та низькій молекулярній масі забезпечують організм енергією максимально швидко і при швидкому використанні організмом не відправляються в жирові запаси. Так, всмоктування глюкози відбувається швидко, процес її розпаду починається у ротовій порожнині під дією слинної амілази, перетравлення мальтози займає 1–1,5 год, а для повного перетравлювання олігозидів необхідно вже 2–3 год.

Дуже часто до складу гейнерів входить мальтодекстрин. Цей полісахарид складається з одиниць D-глюкози, пов'язаних переважно лінійно альфа-1,4-зв'язками, але також можуть мати розгалужену структуру через альфа-1,6-зв'язки. Виробляється шляхом часткового гідролізу картопляного або кукурудзяного крохмалю ферментним препаратом бактеріальної α -амілази або кислотного гідролізу крохмалю з наступним очищенням і розпилювальним сушінням. Чим вище ступінь гідролізу, тим вище декстрозний еквівалент DE. Співвідношення амілози/амілопектину в різних натуральних крохмалях також може впливати на властивості і, отже, технологічне застосування мальтодекстринів, отриманих із цих крохмалів, а також на їх травні властивості. Завдяки цьому змінюється його засвоюваність організмом, порівняно до крохмалю. Вони входять до складу більшості гейнерів, а також пропонуються до продажу у вигляді окремого продукту (наприклад, «OstroVit–Maltodextrin» («Ostrovit», Польща), «Maltodextrin» («GymBeam», Німеччина), «Maltodextrin Power» («STC Nutrition», Франція та ін). В спортивному харчуванні мальтодекстрини використовуються для часткової заміни сахарози або глюкози. Не зважаючи на низьку поживну цінність мальтодекстринів, вони користуються особливо великим попитом у бодібілдингу саме як потужне джерело швидкої енергії, необхідної для нарощування м'язової маси. З точки зору функціонально-технологічних властивостей мальтодекстрини виступають в ролі загущувачів, емульгаторів, а також структуруючих добавок при розпилювальному сушінні, в тому числі при виробництві продуктів спортивного харчування в сухій формі [19].

В останні роки одним із найпопулярніших джерел «швидких» вуглеводів став кластерний декстрин (Cluster dextrin™). Завдяки швидкому всмоктуванню в організмі, низькій осмолярності та несолодкому смаку кластерний декстрин вводять до складу багатьох фітнес-добавок [20]. Він сприяє пом'якшенню кислого присмаку овочевих, фруктових або напоїв з гірчинкою (зелений чай) без зміни значень pH. Вуглевод виробляють з амілопектину шляхом реакції циклізації специфічним ферментом класу трансфераз, який надає крохмалю розгалуженої структури. Особливістю будови кластерного декстрину є наявність бічних ланцюгів з глюкози (більше 10 одиниць), що мають тенденцію приймати в розчині спіральну структуру, в порожнинах якої утворюються комплекси з включенням низькомолекулярних сполук. Водний розчин кластерного декстрину високостабільний, стійкий під час зберігання з низькою здатністю до осадження, злипання та ретроградації. Кластерні декстрини можливо використовувати в якості допоміжних речовин при розпилювальному сушінні сумішей з високим вмістом олій. Отримані продукти в порошковій формі легко диспергуються у воді та є більш стійкими до окислення у порівнянні з іншими сумішами на основі декстринів. Однак, ефективність споживання кластерних декстринів однозначно не доведено і в науковій літературі можна знайти суперечливі результати експериментальних досліджень [21, 22].

Джерелами «повільних вуглеводів» у гейнерах найчастіше виступають ізомальтоза, ізомальтулоза, крохмалі, клітковина та ін.

Ізомальтоза заявлена виробниками та продавцями як вуглевод, який всмоктується організмом повільніше за глюкозу, хоча наукові дані, що однозначно підтверджують її перевагу у гейнерах відсутні. У складі білково-вуглеводних сумішей вона слугує також додатковим агентом, що запобігає грудкуванню сухих сумішей.

Ізомальтулозу, більш відому у продуктах спортивного харчування як «Палатиноза™», виробляють шляхом ферментативного гідролізу сахарози, в результаті якого між молекулами глюкози та фруктози глікозид-

ний зв'язок $\alpha(1 \rightarrow 2)$ піддається ізомеризації на більш стабільний у порівнянні з сахарозою $\alpha(1 \rightarrow 6)$ зв'язок. В натуральному вигляді ізомальтулоза міститься у меді та цукровій тростині, має низький глікемічний індекс (30) та м'який солодкий смак (50% від солодкості сахарози). «ПалатинозаTM» виступає в ролі замінильника сахарози у співвідношенні 1:1 та може легко поєднуватися з різними підсолоджувачами для досягнення точно заданого профілю солодкості. Вона некарієсогенна, безпечна для здоров'я зубів та при споживанні забезпечує організм енергією, що рівномірно вивільнюється впродовж тривалого часу та підвищує інтенсивність утилізації жирів при фізичних навантаженнях. Випускається у вигляді порошку низької гігроскопічності та зберігає стабільність при температурі 25°C і відносній вологості 85% [23]. Палатиноза® входить до складу гейнерів «CarboJetGain» («Amix Nutrition», Великобританія), «FluCarb-GymBeam» (Німеччина) та ін.

Велику групу високомолекулярних вуглеводів, які входять до складу продуктів спортивного харчування в нативному або модифікованому вигляді є крохмалі.

Серед нативних найчастіше використовують крохмаль з воскової кукурудзи, оскільки їх особливістю є надзвичайно високий вміст амілопектину (до 95%), завдяки якому крохмаль набуває необхідних технологічних властивостей і використовується для покращення однорідності, кремової структури та стійкості текстури при відновленні продуктів в сухій формі. Через високу відновлювану здатність, стабільність та прозорість розчинів восковий кукурудзяний крохмаль слугує вихідним матеріалом і для виробництва мальтодекстринів [24]. Саме гейнери, що містять у своєму складі вуглеводи воскової кукурудзи, вважаються одними з найоптимальніших для закриття «вуглеводного вікна», оскільки не призводять до значного стрибка цукру в крові, сприяють росту та відновленню м'язової маси, забезпечуючи її необхідною кількістю глікогену [25]. На ринку України в чистому вигляді їх можна придбати, наприклад, у «Ostrovit» (Польща) – продукт на основі маїсу «Waxy Maize».

Переваги та доцільність введення картопляного крохмалю (наприклад, «Вансітон Карбо-400», Україна), а також картоплі як окремого компонента з високим вмістом калію, що регулює водний баланс організму при тренуваннях, підтверджена дослідженнями [26].

Модифіковані крохмалі надають гейнерам бажаних функціональних властивостей та забезпечують тривалий ефект накопичення енергії організмом за рахунок більш повільного засвоєння. Як приклад, можна навести димамілопектин – чистий амілопектин, який є основним вуглеводним компонентом в складі гейнеру для швидкого набору м'язової маси «Flud 100% Waxy Maize» («Dymatize Nutrition», США).

Гідролізовані крохмалі містять різні типи цукрів у різному співвідношенні, яке залежить від параметрів проведення ферментативного гідролізу – тривалості, температури та походження ферменту. Наприклад, після гідролізу рисового або ячмінного крохмалю утворюються складні (олігозиди) та прості цукри (45% мальтози та 3% глюкози). Отриману гідролізовану суміш цукрів фільтрують та концентрують до отримання густих сиропів з легким карамельним присмаком. Ферментування використовують також як доповнення до кислотного гідролізу, що дозволяє регулювати співвідношення глюкози і мальтози в продукті.

Цінною природною добавкою до раціону спортсменів є нерозчинна рослинна клітковина. Вівсяна («OstroVit Oat Fiber VEGE» від «Ostrovit», Польща), з ячміню, насіння льону («Hyper Mass» від «Excellent nutrition», Україна), пшенична («Mass Gain» від «Nutrend», Чехія) або у вигляді какао-волокон («Cocoa Fiber VEGE 150 g» від «Ostrovit», Польща) вона налагоджує роботу шлунково-кишкового тракту, виводить токсини і солі важких металів з організму, знижує рівень холестерину в крові та знижує відчуття голоду. Її частка у вуглеводній складовій гейнерів може коливатися в широкому діапазоні, однак частіше клітковину все ж пропонують до продажу у вигляді окремої спортивної добавки – наприклад, «Optimum Nutrition Fiber» від «Optimum nutrition» (США), яка містить 6 видів клітковини (полідекстроза, стійкий до перетравлювання мальтодекстрин, інулін, частково гідролізована гуарова камедь, лушпиння насіння подорожника, гуміарабік). Харчові волокна характеризуються високими функціональними властивостями, нейтральні за смаком та запахом, вони мають високу зв'язуючу та водоутримуючу здатність, надають сипкість сумішам та є ефективними загусниками.

Висновки. Попит на продукти спортивного харчування в останні роки має тенденцію до зростання завдяки популярності здорового та активного способу життя серед всіх верств населення. Найбільш розвинуті американський, європейський та китайський ринки товарів спортивного харчування пропонують широкий асортимент поживних сумішей різної фізіологічної дії та направленості, в тому числі гейнери. В Україні даний сегмент товарів представлений переважно імпортними виробниками. Одним з найбільших вітчизняних виробників білкових продуктів для спортивного харчування є ВАТ «Техмолпрот» (м. Гадяч, Полтавська обл.). Аналіз білково-вуглеводного складу гейнерів показав, що вони представлені швидкими або повільними протеїнами (15–40%) та вуглеводами (60–85%), які дозволяють ефективно задовольнити потреби організму як в амінокислотах для росту мускулатури, так і у вуглеводах для відновлення запасів енергії. Асортимент компонентів складу гейнерів є досить широким і постійно збільшується за рахунок результатів нових наукових досягнень.

З огляду на значний попит споживачів на товари даного сегменту в Україні, розроблення вітчизняних технологій спортивного харчування в сухій формі, в т.ч. гейнерів є перспективним напрямком харчової промисловості. Вирішення завдань пов'язаних із розвитком цього напрямку вимагає інвестиційних вкла-

день, а також проведення широких комплексних наукових досліджень із врахуванням виробничо-технологічних, медичних, соціальних та інших факторів.

References

1. Pritulska, N.V., Koshelnyk, A.V. (2018). Assortment policy of sports nutrition manufactures in Ukraine and in the world. *Herald of Lviv University of Trade and Economics. Proceedings*, 20, 41-47.
2. Pritulska, N.V., Antiushko, D.P., Motuzka, Y.M. (2012). Suchasni tendentsii rynku sportyvnoho kharchuvannia. *Food science and Technology*, 1, 49-52.
3. Global Sports Nutrition. Innova market insights. URL: <https://www.innovamarketinsights.com/trends/global-sports-nutrition/> (date of access: 26.06.2024).
4. Cui, P., Li, M., Yu, M., Liu, Y., Ding, Y., Liu, W., Liu J. (2022). Advances in sports food: Sports nutrition, food manufacture, opportunities and challenges. *Food Research International*, 157, 111258. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111258>
5. Arenas-Jal, M., Suñé-Negre, J.M., Pérez-Lozano, P., García-Montoya, E. (2020). Trends in the food and sports nutrition industry: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 60(14), 2405-2421. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1643287>
6. The Best Mass Gainers of 2022. *Bodybuilding.com*. URL: <https://www.bodybuilding.com/content/the-best-mass-gainers.html> (date of access: 26.06.2024).
7. Kerkick, C.M., Wilborn, C.D., Roberts, M.D., Smith-Rayn, A., Kleiner, S.M. et al. (2018). ISSN exercise and sports nutrition review update: research and recommendations. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 15(1), 1-57. <https://doi.org/10.1186/s12970-018-0242-y>
8. Pellegrino, L., Hogenboom, J.A., Rosi, V., Sindaco, M., Gerna, S., D'Incecco, P. (2022). Focus on the Protein Fraction of Sports Nutrition Supplements. *Molecules*. 27(11), 3487. <https://doi.org/10.3390/molecules27113487>
9. Manninen, A. (2009). Protein hydrolysates in sports nutrition. *Nutrition and Metabolism*, 6, 1-6. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-6-38>
10. Avdieieva, L., Dekusha, H., Zhukotskyi, E. (2020). Enzymatic protein hydrolysates for specialized food products. *Scientific Works of NUFT*, 26(3), 198-204. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2020-26-3-22>
11. Nasri, M. (2017). Protein hydrolysates and biopeptides: production, biological activities and applications in foods and health benefits. A review. *Advances in food and nutrition research*, 81, 109-159. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2016.10.003>
12. Salunke, P., Marella, C., Metzger, L.E. (2021). Microfiltration and Ultrafiltration Process to Produce Micellar Casein and Milk Protein Concentrates with 80% Crude Protein Content: Partitioning of Various Protein Fractions and Constituents. *Dairy*, 2(3), 367-384. <https://doi.org/10.3390/dairy2030029>
13. Gagnon, R.D., Bazinet, L., Mikhaylin, S. (2022). Functional properties of Casein and Caseinate Produced by Electrodialysis with Bipolar Membrane Coupled to an Ultrafiltration Module. *Membranes*, 12(3), 270. <https://doi.org/10.3390/membranes12030270>
14. Puglisi, M.J., Fernandez, M.L. (2022). The Health Benefits of Egg Protein. *Nutrients*, 14, 2904. <https://doi.org/10.3390/nu14142904>
15. Raizel, R., Tirapegui, J. (2018). Role of glutamine, as free or dipeptide form, on muscle recovery from resistance training: a review study. *Nutrire* 43, 28. <https://doi.org/10.1186/s41110-018-0087-9>
16. DuBourdieu, D. (2021). Glutamine supplementation: hope, hype or stay tuned? *Nutraceuticals*, 61, 1027-1036. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821038-3.00061-6>
17. Polyakov, V., Levchuk, H., Lyakh, V. (2011). Study of protein complex in oil flax seeds. *Bulletin of Zaporizhzhia National University*, 3(2), 23-28.
18. Kaushik, P., Dowling, K., McKnight, S., Barrow, C.J., Wang, B., Adhikari, B. (2016). Preparation, characterization and functional properties of flax seed protein isolate. *Food Chemistry*, 197(Pt A), 212-20. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.106>
19. Li, K., Pan, B., Ma, L., Miao, S., Ji, J. (2020). Effect of Dextrose Equivalent on Maltodextrin/Whey Protein Spray-Dried Powder Microcapsules and Dynamic Release of Loaded Flavor during Storage and Powder Rehydration. *Foods*, 9(12), 1878. <https://doi.org/10.3390/foods9121878>
20. Wilburn, D., Machek, S., Ismaeel, A. (2021). Highly Branched Cyclic Dextrin and its Ergogenic Effects in Athletes: A Brief Review. *Journal of Exercise and Nutrition*, 4(3), 15. ISSN:2640-2572
21. Shiraki, T., Kometani, T., Yoshitani, K., Takata, H., Nomura, T. (2015). Evaluation of Exercise Performance with the Intake of Highly Branched Cyclic Dextrin in Athletes. *Food Science and Technology Research*, 21(3), 499-502. <https://doi.org/10.3136/fstr.21.499>
22. Nishimura, Y., Jensen, M., Bülow, J., Thomsen, T.T., Arimitsu, T. et al. (2022). Co-ingestion of cluster dextrin carbohydrate does not increase exogenous protein-derived amino acid release or myofibrillar protein synthesis following a whole-body resistance exercise in moderately trained younger males: a double-blind randomized controlled crossover trial. *European Journal of Nutrition*, 61, 2475-2491. <https://doi.org/10.1007/s00394-021-02782-y>

23. Sawale, P.D., Shendurse, A.M., Mohan, M.S., Patil G.R. (2017). Isomaltulose (Palatinose) – An emerging carbohydrate. Food Bioscience, 18, 46-52. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.04.003>
24. Šárka, E., Dvořáček, V. (2017). New processing and applications of waxy starch (a review). Journal of Food Engineering, 206, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.006>
25. Sands, A.L., Leidy, H.J., Hamaker, B.R., Maguire, P., Campbell, W.W. (2009). Consumption of the slow-digesting waxy maize starch leads to blunted plasma glucose and insulin response but does not influence energy expenditure or appetite in humans. Nutrition Research, (29)6, 383-390.
26. Kanter, M., Elkin, C. (2019). Potato as a Source of Nutrition for Physical Performance. American Journal of Potato Research, 96, 201-205. <https://doi.org/10.1007/s12230-018-09701-8>

FEATURES OF COMPOSITION OF GAINERS AS TOPICAL PRODUCTS IN SPORT NUTRITION

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

Abstract. *A paper is devoted to the analysis of the characteristics of the chemical composition of gainers, which are safe protein-carbohydrate supplements in sports nutrition, for the development of domestic technology for gainers with high nutritional and biological value, enriched with natural biologically active substances.*

Modern trends in the development of the sports nutrition market indicate a growing demand for the products of this segment of goods in the world and in Ukraine. However, despite their popularity, the domestic assortment of sports nutrition products, including gainers, is mainly represented by imported products.

The characteristics of the composition of the protein and carbohydrate components of gainers are given and analyzed. To achieve the fastest possible growth of muscle mass in the formulations of protein-carbohydrate supplements, it is advisable to combine fast and slow proteins and carbohydrates. Among the "fast" proteins, whey proteins are often used as the most physiological and complete proteins, as well as their hydrolysates. "Slow" proteins are represented by casein, micellar casein, egg and soy proteins, flax proteins, the latter are a source of glutamic acid. Carbohydrates have a decisive influence on building muscle mass, as a source of quick energy for restoring physical strength. The combination of fast (glucose, sucrose) and slow (maltodextrins with different dextrose values, cluster dextrin, native and modified starches, fiber, etc.) carbohydrates allows you to provide the body with energy for a long time.

Analysis of the protein-carbohydrate composition of gainers indicates the need for comprehensive research to develop domestic technologies for the production of gainers.

Key words: sport nutrition, gainer, composition, proteins, carbohydrates.

Список використаної літератури

1. Притульська Н. В., Кошельник А. В. Асортиментна політика виробників спортивного харчування в Україні та світі // Вісник львівського торговельно-економічного університету. 2018. № 20. С. 41-47.
2. Притульська Н. В., Антюшко Д. П., Мотузка Ю. М. Сучасні тенденції ринку спортивного харчування // Харчова наука і технологія. 2012. № 1. С. 49-52.
3. Global Sports Nutrition // Innova market insights: [Website]. URL: <https://www.innovamarketinsights.com/trends/global-sports-nutrition/> (viewed on: 26.02.2024).
4. Cui P., Li M., Yu M., Liu Y., Ding Y., Liu W., Liu J. Advances in sports food: Sports nutrition, food manufacture, opportunities and challenges // Food Research International. 2022. Vol. 157. 111258.
5. Arenas-Jal M., Suñé-Negre J. M., Pérez-Lozano P., García-Montoya E. Trends in the food and sports nutrition industry: A review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2020. Vol. 60. Iss. 14. P. 2405-2421. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1643287>
6. The Best Mass Gainers of 2022 // Bodybuilding.com: [Website]. URL: <https://www.bodybuilding.com/content/the-best-mass-gainers.html> (viewed on: 26.04.2024).
7. Kerkick C., Wilborn C. D., Roberts M. D., Smith-Rayan A., Kleiner S. M. et al. ISSN exercise and sports nutrition review update: research and recommendations // Journal of the International Society of Sports Nutrition. 2018. Vol. 15, Iss. 1. P. 1-57.
8. Pellegrino L., Hogenboom J. A., Rosi V., Sindaco M., Gerna S., D'Incecco P. Focus on the Protein Fraction of Sports Nutrition Supplements // Molecules. 2022. Vol. 27. Iss. 11. 3487.
9. Manninen A. Protein hydrolysates in sports nutrition // Nutrition and Metabolism. 2009. №6. P. 1-6.
10. Avdieieva L., Dekusha H., Zhukotskyi E. Enzymatic protein hydrolysates for specialized food products // Scientific Works of NUFT. 2020. No. 3 Vol. 26. P. 198-204.
11. Nasri M. Protein hydrolysates and biopeptides: production, biological activities and applications in foods and health benefits. A review // Advances in food and nutrition research. 2017., No. 81, P. 109-159.

12. Salunke P., Marella C., Metzger L. E. Microfiltration and Ultrafiltration Process to Produce Micellar Casein and Milk Protein Concentrates with 80% Crude Protein Content: Partitioning of Various Protein Fractions and Constituents // *Dairy*. 2021. Vol. 2. Iss. 3. P. 367-384.
13. Gagnon R. D., Bazinet L., Mikhaylin S. Functional properties of Casein and Caseinate Produced by Electrodialysis with Bipolar Membrane Coupled to an Ultrafiltration Module // *Membranes*. 2022. Vol. 12. Iss. 3. 270.
14. Puglisi M. J., Fernandez M. L. The Health Benefits of Egg Protein // *Nutrients*. 2022. No 14. 2904.
15. Raizel R., Tirapegui J. Role of glutamine, as free or dipeptide form, on muscle recovery from resistance training: a review study // *Nutrire*. 2018. No. 43. 28.
16. DuBourdieu D. Glutamine supplementation: hope, hype or stay tuned? // *Nutraceuticals*. 2021. No. 61, P. 1027-1036.
17. Polyakov V., Levchuk H., Lyakh V. Study of protein complex in oil flax seeds // *Bulletin of Zaporizhzhia National University*. 2011. Vol. 3. No. 2. P. 23-28.
18. Kaushik P., Dowling K., McKnight S., Barrow C.J., Wang B., Adhikari B. Preparation, characterization and functional properties of flax seed protein isolate // *Food Chemistry*. 2016. 197 (Pt A). P. 212-220.
19. Li K., Pan B., Ma L., Miao S., Ji J. Effect of Dextrose Equivalent on Maltodextrin/Whey Protein Spray-Dried Powder Microcapsules and Dynamic Release of Loaded Flavor during Storage and Powder Rehydration // *Foods*. 2020. Vol. 9. No. 12. 1878.
20. Wilburn D., Machek S., Ismael A. Highly Branched Cyclic Dextrin and its Ergogenic Effects in Athletes: A Brief Review // *Journal of Exercise and Nutrition*. 2021. Vol. 4. No. 3. 15.
21. Shiraki T., Kometani T., Yoshitani K., Takata H., Nomura T. Evaluation of Exercise Performance with the Intake of Highly Branched Cyclic Dextrin in Athletes // *Food Science and Technology Research*. 2015. Vol. 21. Iss. 3. P. 499-502.
22. Nishimura Y., Jensen M., Bülow J., Thomsen T. T., Arimitsu T. et al. Co-ingestion of cluster dextrin carbohydrate does not increase exogenous protein-derived amino acid release or myofibrillar protein synthesis following a whole-body resistance exercise in moderately trained younger males: a double-blind randomized controlled crossover trial // *European Journal of Nutrition*. 2022. No. 61. P. 2475-2491.
23. Sawale P. D., Shendurse A. M., Mohan A. M., Patil G. R. Isomaltulose (Palatinose) – An emerging carbohydrate // *Food Bioscience*. 2017. Vol. 18. P. 46-52.
24. Šárka E., Dvořáček V. New processing and applications of waxy starch (a review) // *Journal of Food Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 77-87.
25. Sands A. L., Leidy H. J., Hamaker B. R., Maguire P., Campbell W. W. Consumption of the slow-digesting waxy maize starch leads to blunted plasma glucose and insulin response but does not influence energy expenditure or appetite in humans // *Nutrition Research*. 2009. Vol. 29. Iss. 6. P. 383-390.
26. Kanter M., Elkin C. Potato as a Source of Nutrition for Physical Performance // *American Journal of Potato Research*. 2019. Vol. 96, P. 201-205.

Отримано в редакцію 09.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.07.2024
Approved 25.09.2024

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЮРЕ ІЗ ГАРБУЗА

Авдєєва Л.Ю., докт. техн. наук, ст. наук. співр., Макаренко А.А., канд. техн. наук
Турчина Т.Я. канд. техн. наук, ст. наук. співр., Декуша Г.В. канд. техн. наук, ст. наук. співр.
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація. Фруктово-овочева продукція представляє собою цінну харчову сировину з високою біологічною цінністю. Суттєвим недоліком є сезонність і висока схильність плодово-овочевої сировини до псування, що вимагає використання спеціальних технологій і обладнання для її переробки. Одним із доведених методів інтенсифікації гідромеханічних процесів в дисперсних системах при зниженні непродуктивних витрат енергії є застосування обладнання в якому реалізований принцип дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Для збільшення дисперсності твердої фази дослідної системи при одержанні пюре з гарбуза використовували гомогенізацію зразків в проточному роторно-пульсаційному апараті (РПА) циліндричного типу з поступовим нарощуванням гідромеханічного впливу за рахунок збільшення циклів обробки. Встановлена залежність динамічної в'язкості гарбузового пюре від тривалості гідромеханічного впливу. Дослідження довели, що зі зменшенням дисперсності в результаті проведення тривалої гідромеханічної обробки при диспергуванні гарбузового пюре значення динамічної в'язкості зменшуються. Водночас збільшується однорідність і рівномірність розподілення дисперсної фази по усьому об'єму суспензії. З підвищенням температури в'язкість всіх дослідних дисперсних систем зменшується, що можна пояснити зниженням енергії міжмолекулярних взаємодій, яка перешикоджає переміщення молекул. У стані спокою, при витримуванні системи впродовж 24 год. і більше, надлишок вільної поверхневої енергії високодисперсних частинок призводить до стабілізації системи із укрупненням частинок дисперсної фази і незначного підвищення динамічної в'язкості. Проведені дослідження реологічних властивостей довели, що метод обробки за допомогою використання механізмів ДІВЕ є ефективним для одержання однорідного і стабільного в процесі зберігання пюре з гарбуза.

Ключові слова: гомогенізація, реологія, гарбузове пюре, роторно-пульсаційний апарат, дискретно-імпульсне введення енергії

Постановка проблеми. Фрукти і овочі широко використовуються в харчуванні людини. Ця продукція має високу біологічну цінність за рахунок вмісту до 20% біологічно активних речовин, низьку калорійність і високі смакові властивості. Сезонність і висока схильність плодово-овочевої сировини до псування вимагає використання спеціальних технологій переробки, які дозволяють подовжити терміни зберігання продукції і урізноманітнити її асортимент. Через специфіку продукції, застосування інноваційних методів обробки набуває первинного значення, а розробка технологій переробки фруктово-овочевої сировини представляє собою швидко зростаючий сектор харчової промисловості [1, 2].

До цінної овочевої сировини відносяться гарбузи, вирощування яких є традиційним для України і займає важливе місце в українському агропромисловому секторі. Істівна частина гарбуза містить моно- і дисахариди (глюкозу, фруктозу, сахарозу), а також полісахариди (крохмаль, клітковину і пектинові речовини), значну кількість макро- і мікроелементів та вітамінів[3, 4].

Методи обробки сировини представляють важливе значення для збереження біологічно активних речовин, визначають якість і безпечність готової продукції, а також термін її зберігання. Найчастіше м'якоть гарбуза переробляють для вживання у вигляді соків, паст або сухих порошоків. Пюре із гарбузів найчастіше використовують як функціональний інгредієнт у різноманітних кондитерських, хлібобулочних, м'ясних, молочних виробів раціонального, оздоровчого і дієтичного призначення [5-9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За традиційною технологією виробництва гарбузового пюре передбачається інспекція сировини, миття, калібрування, очищення, розварювання, подрібнення, диспергування і гомогенізація. Обладнання, яке застосовується у технології виробництва, а також режими і параметри його роботи впливають на цілий комплекс характеристик якості готового продукту. До найголовніших показників готової продукції відносяться харчова та біологічна цінність, структурно-механічні і органолептичні властивості - зовнішній вигляд, консистенція, колір та смак, а також його стабільність в процесі зберігання.

Подрібнення, диспергування і гомогенізацію використовують для одержання стабільної однорідної гомогенної маси. Аналіз літератури свідчить, що для подрібнення і одержання пюре з фруктово-овочевої сировини використовують різні типи пристроїв: протиральні машини, плунжерні гомогенізатори, колоїдні млини, роторно-пульсаційні апарати та ін. В результаті досліджень було виявлено, що протиральні машини типу МПР-350, РЗ-КИС, П1-7,1 не забезпечують необхідної однорідності маси (умовний середній діаметр

частинок від 20 мкм до 1000 мкм і більше). Після обробки в масі присутні частинки непротертої сировини, що негативно впливає на зовнішній вигляд і консистенцію готового пюреподібного продукту. Колоїдні млини типу К7 ФТІ, К6 КМ дозволяють одержувати однорідну масу з умовним середнім діаметром частинок від 30 до 500 мкм, але висока енергоємність і конструктивні особливості не гарантують надійної роботи пристрою. Найчастіше для отримання високого ступеня диспергування пюре із гарбуза використовуються три- або чотириплунжерні насоси-гомогенізатори, в яких овочева маса пропускається під тиском 10-15 МПа через гомогенізуючу голівку де подрібнюється до частинок з розміром 20-30 мкм. Але це обладнання так само характеризується енергоємністю і особливостями конструкції, які не гарантують стабільної роботи пристрою [10].

Досить новим методом обробки, який застосовується при багатьох тепломасообмінних і гідродинамічних процесах, таких як: варіння, різання, емульгування, гомогенізація, екстракція та інактивація мікроорганізмів є ультразвукова обробка. Цей метод оснований на використанні ефектів акустичної кавітації. Відноситься до економічно доцільних і екологічно чистих методів обробки харчової сировини. При різних рівнях амплітуди (50 та 100 мкм), тривалості імпульсу (50% та 100%) та температури (40, 50 і 60 °С) ультразвукової обробки фруктово-овочевої сировини таке обладнання дозволяє покращити консистенцію, динамічну в'язкість, стійкість до розшарування, мікробіологічну і ферментативну стабільність. При нераціональних режимах можливим недоліком використання цього методу є те, що окрім структурної модифікації, кавітація може викликати хімічні ефекти, такі як вивільнення вільних радикалів, зменшення вмісту або біодоступності деяких поживних речовин. [11-13].

Одним із ефективних методів інтенсифікації гідромеханічних процесів в дисперсних системах, які забезпечують зниження непродуктивних витрат енергії, є застосування обладнання в якому реалізований принцип дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Рівень дисипації енергії в такому обладнанні на 2-3 порядки нижчий за традиційне обладнання для диспергування. В роторно-пульсаційних апаратах в яких використовуються механізми ДІВЕ при обробці гетерогенних середовищ матеріал піддається механічному, гідродинамічному та гідроакустичному впливам, що практично недосяжно при використанні гомогенізаторів іншого типу. Ефективність цих апаратів обумовлена можливістю ініціювання в них явищ кавітації, порівнянних за інтенсивністю з тими, що створюються при ультразвуковій обробці. Локальні значення зсувних напружень у кавітаційній зоні вище, ніж у вузьких каналах клапанних гомогенізаторів та інших екструзійних пристроїв. Разом з тим вибір конструкції, геометричних параметрів і режимів роботи апарату дозволяє контролювати рівень інтенсивності, що важливо в технологіях отримання продукції з високим вмістом біологічно активних речовин [14, 15].

Вибраний апаратний метод і теплотехнологічні режими обробки мають значний вплив на теплофізичні (питому теплоємність, електропровідність та ін.), структурно-механічні (пластичність, густина, в'язкість та ін.), фізико-хімічні і органолептичні властивості сировини. При застосуванні роторно-пульсаційного апарату (РПА) під час гомогенізації руйнуються міцні клітинні оболонки рослинної сировини, що сприяє вивільненню і підвищенню біодоступності біологічно-активних речовин, таких як вітаміни, антиоксиданти, поліфеноли і флавоноїди. Ще однією перевагою використання РПА для гомогенізації і отримання гарбузового пюре є вилучення протопектинів з клітинної матриці і переведення їх в розчинний стан [16].

Дослідження структурно-механічних властивостей харчової і нехарчової продукції знаходять все більше застосування для характеристики відповідності показників на різних етапах виробництва у харчовій промисловості. Реологічні властивості продуктів переробки фруктово-овочевої продукції, в т.ч. пюре з їстівної частини м'якуша гарбуза, залежать від типу обладнання, потужності і тривалості впливу та ін. показників. Такі дослідження цікавили багатьох вчених, але все ще потребують уточнень стосовно конкретних умов обробки [17-19].

Метою роботи було дослідження впливу умов гідродинамічної обробки в РПА при проведенні процесу гомогенізації на реологічні властивості пюре із гарбуза.

Результати дослідження та їх обговорення. Для вивчення властивостей текучих багатофазних дисперсних систем, які характеризують реологічну поведінку харчових мас під дією гідромеханічних напружень, викликаних впливом робочих органів машин проводять ряд досліджень, одним з яких є дослідження динамічної в'язкості. Необхідність таких досліджень пов'язана з можливістю організації якісного поетапного технологічного контролю виробництва.

При дослідженнях динамічної в'язкості утворених суспензій було визначено вплив: кількості циклів обробки суспензії в РПА; температури суспензії; витримування впродовж 24 годин.

Для характеристики структурно-механічних властивостей складних дисперсних систем, отриманих в результаті змішування і диспергування методом ДІВЕ в РПА використовували метод вимірювання динамічної в'язкості за допомогою ротаційного віскозиметра Brookfield LVDV-E із використанням дискового шпинделя 63. Після підготовки зразків до вимірювань їх залишали на 5-10 хвилин для відновлення структурних міжмолекулярних зв'язків і вирівнювання температури проби.

Дослідження проводили при температурах термостатування продуктів: 40 ± 2 °С, 60 ± 2 °С і значеннях кутової швидкості від 0,21 рад/с до 10,5 рад/с. Результати досліджень показали, що дослідні зразки гарбузово-

го пюре за реологічною поведінкою відносяться до неньютонівських псевдопластичних матеріалів, в яких значення в'язкості непропорційно знижуються із збільшенням швидкості зсуву. Незважаючи на високу ефективність застосування РПА для гомогенізації фруктово-овочевої сировини, дослідні зразки гарбузового пюре отримані в результаті одного циклу оброблення характеризувались недостатньою однорідністю структури із великим діапазоном розмірів утворених частинок. Дослідження показали, що короткочасна обробка зразків впродовж 1 циклу в РПА призводить до утворення системи з досить стійким структурним каркасом і міцними міжмолекулярними зв'язками. Утворена дисперсна система в зоні практично незруйнованої структури на кривій течії матеріалу, при кутовій швидкості до $0,3 \text{ c}^{-1}$ показала дуже високі значення ефективної в'язкості – від 21000 мПа·с до 25 000 мПа·с для різних температур. Це можна пояснити високим вмістом жорстких ланцюгів харчових волокон (целюлози, геміцелюлози, пектинів) гарбузового пюре, які частково залишились незруйнованими. Виявлені особливості мікроструктури дослідної овочевої сировини вимагають продовження досліджень для визначення раціональних режимів і методів обробки. Використання раціональних режимів роботи РПА дозволить зберегти високу біологічну цінність фруктово-овочевої сировини, запобігти втратам вітамінів і інших термолабільних біологічно активних компонентів від посиленого гідромеханічного впливу і при цьому одержати необхідний ступень дисперсності, однорідності і в'язкості дисперсної системи для вирішення гідродинамічних завдань технологічного обладнання.

Для зменшення ступеня дисперсності частинок в гомогенізованому гарбузовому пюре було запропоновано посилення впливу гідромеханічної обробки на сировину за рахунок збільшення циклічності обробки дослідних зразків в РПА. На рис.1 наведені порівняльні результати досліджень ефективної в'язкості від кількості циклів обробки дисперсних систем в РПА. Представлені результати ефективної в'язкості наведені для зони гранично зруйнованої структури при кутовій швидкості $5,23 \text{ c}^{-1}$ при температурі досліджень $40 \pm 2^\circ\text{C}$ і $60 \pm 2^\circ\text{C}$.

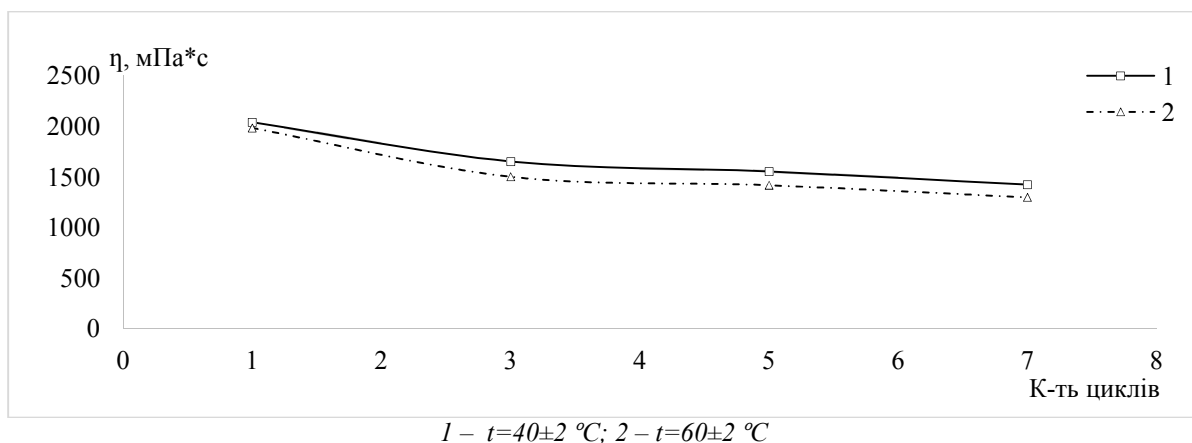


Рис. 1 – Значення ефективної в'язкості в зоні гранично зруйнованої структури дослідних зразків гарбузового пюре в залежності від кількості циклів обробки в РПА при температурі

Аналіз реологічної поведінки дослідних зразків гарбузового пюре, утворених в результаті гомогенізації в РПА під впливом механізмів ДІВЕ різної тривалості (рис.1) показав досить високі значення динамічної в'язкості в зоні гранично зруйнованої структури. Це пояснюється наявністю в сировині значної кількості харчових волокон, які утворюють розгалужений просторовий каркас і надають йому високої міцності. Під дією інтенсивного гідромеханічного впливу при диспергуванні методом ДІВЕ для отримання гарбузового пюре лінійні волокна клітин клітковини і інших речовин подрібнюються і утворюють нові міжмолекулярні структури із новими фізико-хімічними і фізико-механічними формами зв'язків. Поступове зниження дисперсності частинок призводить до їх рівномірного розподілення в дисперсійному середовищі з утворенням нових міжмолекулярних взаємодій через тонкий прошарок дисперсійного середовища. В результаті дослідні зразки набувають високої однорідності і стійкості консистенції. Вплив підвищених температур до призводить послаблення міжмолекулярних зв'язків, сприяє орієнтуванню міжмолекулярних і молекулярних структур дисперсної системи вздовж напрямку деформації і знижує значення ефективної в'язкості. При цьому посилюється значення величини дисперсності системи через збільшення тривалості гідромеханічної обробки зразків. Так, в результаті трьох циклів обробки значення в'язкості дослідного зразка при 40°C зменшуються майже на 20%, а після семи циклів – вже майже на 30%. Підвищення температури до 60°C призводить до зниження значень на 25% після трьох циклів і майже на 34% після семи циклів обробки. Це можна пояснити поступовим збільшенням ступеня руйнування структурного каркасу в утворених дисперсних системах і зменшення кількості міцних форм зв'язку вологи в результаті гомогенізації дослідних зразків. При посиленні інтенсивності впливу механізмів ДІВЕ за рахунок подовження тривалості гідромеханічної обробки і збільшення циклічності до 7 циклів обробки в РПА система переходить з макрөгетерогенного в мікрөгетерогенний колоїдний стан. Найменші значення динамічної в'язкості характерні для дисперсних систем

отриманих в результаті п'яти і семи циклів диспергування при температурах дослідження 40 °С і 60 °С. Обраний метод обробки для одержання пюре з гарбуза за допомогою використання механізмів ДІВЕ показав свою ефективність, але для покращення умов транспортування овочевої маси у відповідності до апаратних особливостей технологічного потоку необхідне додаткове регулювання властивостей дисперсної системи і зниження показників динамічної в'язкості за рахунок використання додаткових факторів впливу.

Важливим показником якості рідкої гетерогенної дисперсної системи є її стійкість і стабільність під час зберігання. У виробничих умовах промислових підприємств часто виникає необхідність тимчасового зберігання сировини і напівфабрикатів перед подальшою переробкою. Під час зберігання властивості отриманого напівфабрикату можуть суттєво змінюватись. Це має бути враховано при виборі відповідного обладнання для передачі трубопроводами. З метою визначення зміни показників в'язкості дослідних зразків гарбузового пюре після їх витримання до 48 год. в охолодженому стані при температурі 4 ± 1 °С були проведені відповідні дослідження. Результати досліджень динамічної в'язкості в зоні гранично зруйнованої структури при кутовій швидкості $5,23 \text{ с}^{-1}$ представлені на рис. 2. Результати наведені для зразків отриманих в результаті п'яти і семи циклів обробки дисперсних систем в РПА при температурі досліджень 40 ± 2 °С для максимального наближення до параметрів руху потоку рідини у трубопроводах і вузлах установок для розпилювального сушіння.

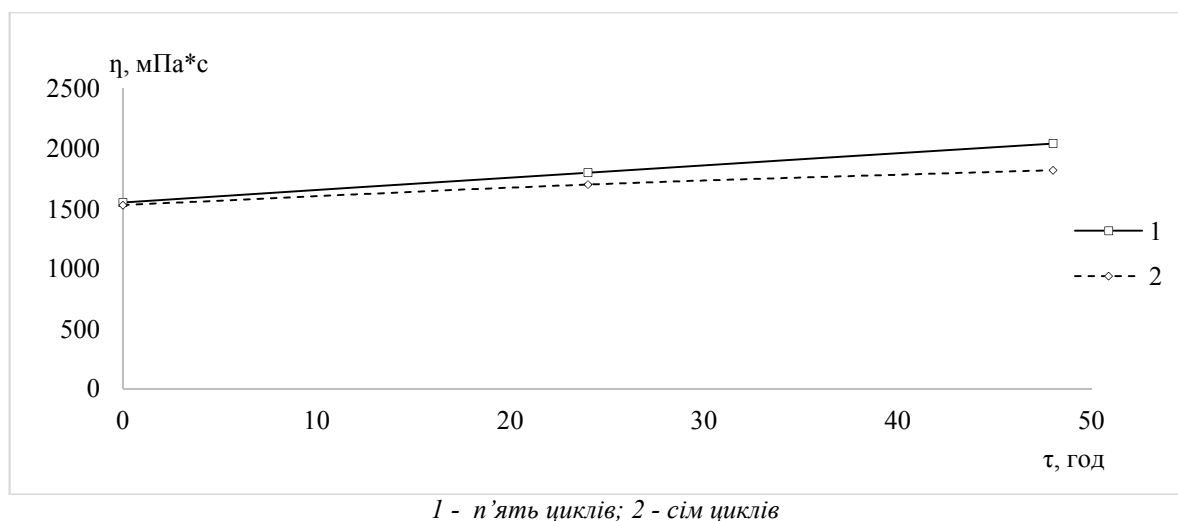


Рис. 2 – Залежність ефективної в'язкості від тривалості витримання дослідних зразків гарбузового пюре отриманих в результаті обробки в РПА

Отримані результати (рис.2) показали, що вибрані дослідні зразки утворені під дією інтенсивного багатофакторного гідромеханічного впливу ДІВЕ характеризуються все ще досить високими значеннями ефективної в'язкості в зоні гранично зруйнованої структури – 1550-1650 мПа·с. Збільшення ступеня дисперсності матеріалу і збільшення питомої площі поверхні частинок призводить до зростання надлишку вільної поверхневої енергії і збільшення термодинамічної нестабільності. У стані спокою при витриманні в таких системах відбувається їх стабілізація із укрупненням частинок дисперсної фази шляхом об'єднання атомів або молекул між собою під дією ван-дер-ваальсових сил без витрати енергії ззовні. В наслідок проходження цих процесів відбувається зміна структурно-механічних властивостей. Цим можна пояснити збільшення в'язкості дослідних зразків гарбузового пюре в процесі витримання. Дослідження зразків після 24 год. витримання показали, що їх в'язкість в зоні гранично зруйнованої структури збільшилась на 11-16%, а через 48 год. відповідне значення в'язкості збільшилось вже на 19-32% від початкового, що може свідчити про здатність молекул до утворення асоціатів для зниження значень надлишкової вільної енергії. Загалом, в результаті витримання обох зразків розділення фаз не спостерігалось, що свідчить про високу міцність міжмолекулярних зв'язків і стійкість утвореної в результаті гомогенізації структури.

Висновки. Дослідні зразки гарбузового пюре за реологічною поведінкою відносяться до неньютонівських псевдопластичних матеріалів, в яких значення в'язкості непропорційно знижуються із збільшенням швидкості зсуву. Короткочасна обробка зразків впродовж 1 циклу в РПА призводить до утворення системи з досить стійким структурним каркасом, міцними міжмолекулярними зв'язками і високими значеннями ефективної в'язкості – від 21000 мПа·с до 25 000 мПа·с для різних температур в зоні практично незруйнованої структури. Це можна пояснити високим вмістом жорстких ланцюгів харчових волокон (целюлози, геміцелюлози, пектинів) гарбузового пюре, які частково залишились незруйнованими. Під дією інтенсивного гідромеханічного впливу при диспергуванні методом ДІВЕ для отримання гарбузового пюре лінійні волокна клітин клітковини і інших речовин подрібнюються і утворюють нові міжмолекулярні структури із новими фізико-хімічними і фізико-механічними формами зв'язків. Найменші значення динамічної в'язкості харак-

терні для дисперсних систем отриманих в результаті п'яти і семи циклів диспергування при температурах дослідження 40 °C і 60 °C.

Збільшення ступеня дисперсності матеріалу і збільшення питомої площі поверхні частинок призводить до зростання надлишку вільної поверхневої енергії і збільшення термодинамічної нестабільності, що у стані спокою при витримуванні призводить до стабілізації системи із укрупненням частинок дисперсної фази і незначного підвищення динамічної в'язкості.

Загалом, обраний метод обробки за допомогою використання механізмів ДІБЕ показав свою високу ефективність для одержання пюре з гарбуза.

References

1. UNIDO. (n.d.). Small-scale fruit and vegetable processing and products [Electronic resource]. Retrieved from [https://www.unido.org/sites/default/files/2009-05/Small_scale_fruit_and_vegetable_processing_and_products_0.pdf] (accessed July 4, 2024).
2. Hui, Y. H. (Ed.). (2006). *Handbook of fruits and fruit processing* (1st ed.). Blackwell Publishing Professional.
3. UKAB. (n.d.). Infografika: rynek harbuziv v Ukraini [Infographic: The pumpkin market in Ukraine] [Electronic resource]. Retrieved from [https://ucab.ua/ua/pres_sluzhba/novosti/infografika_rinok_garbuziv_v_ukraini] (accessed July 4, 2024).
4. Kim, J., Park, D., Yoon, S., Lee, S., Kim, H., Song, S., Lee, M., & Lee, Y. (2012). Beneficial effects of kimchi on glycemic control in patients with type 2 diabetes mellitus. *Nutrition Research and Practice*, 6(1), 21-26. https://doi.org/10.4162/nrp.2012.6.1.21.
5. Ammar, A. S. M., El-Hady, E.-S.-A.-A., & El-Razik, M. M. A. (2014). Quality characteristics of low-fat meatballs as affected by date seed powder, wheat germ, and pumpkin flour addition. *Pakistan Journal of Food Sciences*, 24, 175-185.
6. Aziz, A., Noreen, S., Khalid, W., et al. (2023). Pumpkin and pumpkin byproducts: Phytochemical constituents, food application and health benefits. *ACS Omega*, 8(26), 23346-23357. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02176.
7. Farzana, T., Abedin, M. J., Abdullah, A. T. M., & Reaz, A. H. (2023). Exploring the impact of pumpkin and sweet potato enrichment on the nutritional profile and antioxidant capacity of noodles. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100849. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100849.
8. Verma, A. K., Banerjee, R., & Sharma, B. D. (2015). Quality characteristics of low-fat chicken nuggets: Effect of salt substitute blend and pea hull flour. *Journal of Food Science and Technology*, 52(4), 2288-2295. https://doi.org/10.1007/s13197-013-1218-1.
9. El-Dardiry, A., Abdelazez, A., El-Rhmany, A., & Kadoum, L. (2022). Functional dairy beverages production using certain dairy byproducts enriched with pumpkin (*Cucurbita Maxima L.*) pulp. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 11(2), 563-573.
10. Sharkova, N. O., Avdieieva, L. Yu., & Lopatin, O. O. (2006). Ustatkuvannya kharchovykh produktiv dlya vyrobnytstva pastopodibnykh. *Naukovi pratsi Odes'koyi natsional'noyi akademiyi kharchovykh tekhnolohiy*, 28(2), 74-75.
11. Ertugay, M. F., & Başlar, M. (2014). The effect of ultrasonic treatments on cloudy quality-related quality parameters in apple juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 226-231. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.06.013.
12. Pingret, D., Fabiano-Tixier, A.-S., & Chemat, F. (2013). Degradation during application of ultrasound in food processing: A review. *Food Control*, 31(2), 593-606. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.11.039.
13. Chemat, F., Zill-e-Huma, & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813-835. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023.
14. Dolinskyi, A. A., & Ivanytskyi, H. K. (2008). *Teplomasoobmen i hidrodynamika v parozhydkostnykh dyspersnykh sredakh*. Kyiv: Naukova dumka.
15. Dolinskyi, A. A., Avdieieva, L. Yu., & Makarenko, A. A. (2020). *Kavitatsiyni tekhnolohiyi dlya vyrobnytstva nanopreparativ*. Kyiv: Naukova dumka.
16. Avdieieva, L., Makarenko, A., Turchyna, T., Dekusha, H., & Kozak, M. (2023). Cavitation technology for intensification of plant raw materials extraction. *Food Science and Technology*, 17(1), 38-50. https://doi.org/10.15673/fst.v17i1.2559.
17. Evageliou, V., Ptitckina, N. M., & Morris, E. R. (2005). Solution viscosity and structural modification of pumpkin biopectin. *Food Hydrocolloids*, 19(6), 1032-1036. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.01.004.
18. Bekele, D. W., & Emire, S. A. (2023). Effects of pre-drying treatment and particle sizes on physicochemical and structural properties of pumpkin flour. *Heliyon*, 9(11), e21609. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21609.
19. Janowicz, M., Kadzińska, J., Ciurzyńska, A., Szulc, K., Galus, S., Karwacka, M., & Nowacka, M. (2023). The structure-forming potential of selected polysaccharides and protein hydrocolloids in shaping the properties of composite films using pumpkin purée. *Applied Sciences*, 13, 6959. https://doi.org/10.3390/app13126959.

THE INFLUENCE OF THE HOMOGENIZATION PROCESS ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF PUMPKIN PUREE

Avdieieva L.Yu., Dr. Sci. (Engin.), s.r.s, Makarenko A.A., PhD (Engin.),
Turchyna T.Ya., PhD (Engin.), s.r.s., Dekusha H.V., PhD (Engin.), s.r.
Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Sciences, Kyiv

Abstract. Fruit and vegetable products are valuable food raw materials with high biological value. A significant disadvantage is the seasonality and high susceptibility of fruit and vegetable raw materials to spoilage, which requires the use of special technologies and equipment for their processing. One of the proven methods for intensifying hydromechanical processes in dispersed systems while reducing unproductive energy consumption is the use of equipment that implements the principle of discrete-pulse energy input (DPEI). To increase the dispersity of the solid phase of the experimental system when obtaining pumpkin puree, homogenization of the samples was used in a flow-type cylindrical RPA with a gradual increase in hydromechanical impact by increasing the processing cycles. The dependence of the dynamic viscosity of pumpkin puree on the duration of hydromechanical impact was established. Studies have shown that with a decrease in dispersity as a result of prolonged hydromechanical treatment during the dispersion of pumpkin puree, the dynamic viscosity values decrease. At the same time, the homogeneity and uniformity of the distribution of the dispersed phase throughout the entire volume of the suspension increase. With an increase in temperature, the viscosity of all experimental dispersed systems decreases, which can be explained by a decrease in the energy of intermolecular interactions that hinder the movement of molecules. In a state of rest, when the system is held for 24 hours or more, the excess free surface energy of high-dispersity particles leads to the stabilization of the system with an increase in the size of the dispersed phase particles and a slight increase in dynamic viscosity. The conducted studies of rheological properties have proven that the treatment method using DPEI mechanisms is effective for obtaining homogeneous and stable pumpkin puree during storage.

Keywords: homogenization, rheology, pumpkin puree, rotary-pulsation apparatus, discrete-pulse energy input

Список використаної літератури

1. Small-scale fruit and vegetable processing and products [Електронний ресурс] / UNIDO. – Режим доступу: [https://www.unido.org/sites/default/files/2009-05/Small_scale_fruit_and_vegetable_processing_and_products_0.pdf] (дата звернення: 04.07.2024)
2. Handbook of Fruits and Fruit Processing / editor, Y.H. Hui; associate editors, J 'ozsef Barta .[et al.]. 1st ed. Blackwell Publishing Professional, USA. 2006. 697 p.
3. Інфографіка: ринок гарбузів в Україні [Електронний ресурс] / УКАБ. – Режим доступу: [https://ucab.ua/ua/pres_sluzhba/novosti/infografika_rinok_garbuziv_v_ukraini]. (дата звернення: 04.07.2024)
4. J. Kim, D. Park, S. Yoon, S. Lee, H. Kim, S. Song, M. Lee, and Y. Lee, "Beneficial Effects of Kimchi on Glycemic Control in Patients with Type 2 Diabetes Mellitus," Nutrition Research and Practice, vol. 6, no. 1, pp. 21-26, 2012. doi:10.4162/nrp.2012.6.1.21.
5. Ammar A. S. M., El-Hady E.-S.-A.-A., El-Razik M. M. A. Quality characteristics of low-fat meatballs as affected by date seed powder, wheat germ, and pumpkin flour addition // Pakistan Journal of Food Sciences. 2014. Vol. 24. P. 175–185.
6. Aziz A., Noreen S., Khalid W., et al. Pumpkin and Pumpkin Byproducts: Phytochemical Constitutes, Food Application and Health Benefits // ACS Omega. 2023. Vol. 8, No. 26. P. 23346-23357. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02176.
7. Farzana T., Abedin M. J., Abdullah A. T. M., Reaz A. H. Exploring the impact of pumpkin and sweet potato enrichment on the nutritional profile and antioxidant capacity of noodles // Journal of Agriculture and Food Research. 2023. Vol. 14. P. 100849. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100849.
8. Verma A. K., Banerjee R., Sharma B. D. Quality characteristics of low-fat chicken nuggets: effect of salt substitute blend and pea hull flour // Journal of Food Science and Technology. 2015. Vol. 52, No. 4. P. 2288–2295. DOI: 10.1007/s13197-013-1218-1.
9. El-Dardiry A., Abdelazez A., El-Rhmany A., Kadoum L. Functional Dairy Beverages Production Using Certain Dairy Byproducts Enriched With Pumpkin (Cucurbita Maxima L.) Pulp // Middle East Journal of Agriculture Research. 2022. Vol. 11, No. 02. P. 563–573.
10. Шаркова Н.О., Авдєєва Л.Ю., Лопатін О.О. Устаткування харчових продуктів для виробництва пасто-подібних. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Одеса: 2006. Вип. 28. Т. 2. С. 74-75.
11. Ertugay M.F., Başlar M. The effect of ultrasonic treatments on cloudy quality-related quality parameters in apple juice, Innovative Food Science & Emerging Technologies, Vol. 26, 2014, P. 226-231. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.06.013>.

12. Pingret D., Fabiano-Tixier A-S., Chemat F Degradation during application of ultrasound in food processing: A review, *Food Control*, Vol. 31, Is. 2, 2013, P. 593-606. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.11.039>.
13. Chemat F., Zill-e-Huma, Khan M.K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 18, Is. 4, 2011, P. 813-835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>.
14. Долинський А. А., Іваницький Г. К. Тепломасообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Київ: Наукова думка, 2008, 382 с.
15. Долінський А.А., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А. Кавітаційні технології для виробництва нанопрепаратів. Київ: Наук. Думка. 2020, 112 с.
16. Avdieieva L., Makarenko A., Turchyna T., Dekusha H., Kozak M. Cavitation technology for intensification of plant raw materials extraction. *Food science and technology*. 2023. Vol. 17, Is. 1. P. 38-50 <https://doi.org/10.15673/fst.v17i1.2559>
17. Evageliou, V., Ptitchkina, N. M., & Morris, E. R. . Solution viscosity and structural modification of pumpkin biopectin. *Food Hydrocolloids*, 2005. 19(6), 1032-1036. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.01.004>
18. Bekele, D. W., & Emire, S. A. . Effects of pre-drying treatment and particle sizes on physicochemical and structural properties of pumpkin flour. *Heliyon*, 2023. 9(11), e21609. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21609>
19. Janowicz, M., Kadzińska, J., Ciurzyńska, A., Szulc, K., Galus, S., Karwacka, M., & Nowacka, M. The Structure-Forming Potential of Selected Polysaccharides and Protein Hydrocolloids in Shaping the Properties of Composite Films Using Pumpkin Purée. *Appl. Sci.*, 2023. 13, 6959. <https://doi.org/10.3390/app13126959>

Отримано в редакцію 09.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.07.2024
Approved 25.09.2024

УДК 536.242, 621.643, 620.175
DOI <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2961>

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОАКУМУЛЯЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Коник А.В. к.т.н., с.н.с., Декуша Г.В. к.т.н., ст. досл.
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація. Застосування теплоаккумуляційних матеріалів (ТАМ) в системах акумуляції тепла та теплових акумуляторах дає поштовх до пошуку нових акумуляційних рідин з певними технічними характеристиками, що будуть відповідати індивідуальним умовам експлуатації. Пошук складових теплоаккумуляційного матеріалу та його технічні характеристики є актуальним предметом досліджень у сучасній тепловій енергетиці. Особлива увага приділяється ТАМ, що працюють з низькопотенційними джерелами енергії, що відповідає розвитку концепції безкарбонової енергетики.

У запропонованій статті представлено результати експериментальних досліджень водневого показника і густини теплоаккумуляційного матеріалу, що використовується у дослідному зразку мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт створеного за державним замовленням у Інституті технічної теплофізики НАН України. Теплоаккумуляційний матеріал складається з речовин, що широко представлені на ринку України, є не токсичними, вибухо- і пожежобезпечними та екологічними. Дослідження проведено за стандартними методиками.

Для досліджень відібрано чотири зразки – вода (контрольний зразок), ТАМ до застосування та після двох і чотирьох опалювальних сезонів, відібраних з акумулятора ємнісного типу дослідного зразка МТА-0,5МВт. Отримані результати зміни рН і густини свідчать про доцільність застосування теплоаккумуляційних матеріалів на основі багатофункціональних порошків у діапазоні температур від 20 до 90°C, оскільки рідини залишаються нейтральними, а зміни густини відбуваються в межах 1–2%.

Ключові слова: тепловий акумулятор ємнісного типу, теплоаккумуляційна матеріал, водневий показник, густина.

Теплоаккумуляційні матеріали (ТАМ) – акумуляційні рідини або матеріали з фазовим переходом [1, 2], що використовуються в системах акумуляції тепла та теплових акумуляторах, наразі широко застосовуються, а їх теплофізичні і експлуатаційні характеристики викликають інтерес та потребують відповідних досліджень [3, 4].

Однак, вибір такого матеріалу, як правило, це не універсальне рішення. ТАМ вибираються або створюються нові композиції в залежності від експлуатаційних характеристик системи – робочого діапазону температур, геометрії і конструктивних особливостей акумуляційної системи, економічних та екологічних параметрів тощо. Тому, інформація стосовно фізико-хімічних, теплофізичних характеристик та експлуатаційних параметрів акумуляційних матеріалів є актуальним предметом досліджень [5].

В Інституті технічної теплофізики НАН України було створено дослідний зразок мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт [6], в якому у якості одного з теплоносіїв було застосовано ТАМ на основі багатофункціональних порошків, опис яких представлено нижче.

Метою роботи є дослідити зміни водневого показника та густини теплоаккумуляційного матеріалу в робочому діапазоні температур від 20 до 90°C, а також встановити вплив строку експлуатації на вказані характеристики.

Для досягнення поставленої мети необхідно зразки ТАМ різних термінів використання в мобільному тепловому акумуляторі МТА-0,5МВт дослідити класичними методами описаними нижче. Провести оцінку їх працездатності у різні терміни експлуатації.

Склад і параметри досліджуваних зразків теплоаккумуляційного матеріалу. Для отримання складу теплоаккумуляційного матеріалу були проведені комплексні дослідження теплофізичних параметрів ТАМ, що детально описані і викладені у [7]. У результаті було отримано теплоаккумуляційний матеріал, що складається з 5 речовин у наступному співвідношенні компонентів, % [8]:

- антифриз на основі бішофіту (магнію хлориду гексагідрату $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	50–20
- ксантанова камедь $(\text{C}_{35}\text{H}_{49}\text{O}_{29})_n$	10–0,5
- карбоксиметилцелюлоза $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$	10–0,5
- консервуюча речовина	1–0,1
- вода	решта.

Оскільки багатофункціональні порошки мають особливості при їх застосуванні (розчинені), було розроблено технологічний комплекс для приготування ТАМ у промислових масштабах [9]. Хімічні та фізичні властивості багатофункціональних порошків на прикладі полісахаридів широко використовуються у багатьох галузях промисловості [10]. Основною перевагою природних рослинних полісахаридів є їх безпеч-

ність, екологічність та низька вартість. Хімічно модифіковані похідні полісахаридів набувають необхідних технологічних властивостей, що значно розширює сферу їх застосування. Розглянемо їх основні характеристики, оскільки вони безпосередньо визначають властивості ТАМ.

Ксантанова камедь ($C_{35}H_{49}O_{29}$)_n – природний полісахарид рослинного походження, у харчовій промисловості відноситься до групи стабілізаторів та загусників (E415). Добре розчинна у теплій та гарячій воді, утворює в ній близьку за структурою до гелю тримірну сітку, але меншої в'язкості. Водний розчин ксантану стійкий до дії кислот та лугів, високих (до 120°C) та низьких (до -18°C) температур, ферментів та спиртів. Своєрідні реологічні властивості ксантанової камеді та висока термостабільність обумовлюють її широке використання в якості стабілізуючого агенту у системах на водній основі у різних галузях промисловості [11].

Гуарова камедь – натуральний продукт виготовлений із бобів гуару, що на 70% складається з вищого гетерополісахариду галактоманнану (молекулярна маса >20000 Да). Широко використовується як стабілізатор, загусник, засіб для капсулювання та як речовина, що має здатність уповільнювати процес кристалізації води в продуктах (E 412) [12]. Водні розчини гуарової камеді проявляють буферні властивості та зберігають свою стабільність при pH 4,0–10,5. При температурах вище 100°C гуарова камедь менш термостабільна ніж ксантанова камедь.

Карбоксиметилцелюлоза (КМЦ) – продукт переробки целюлози, в молекулі якої карбоксиметильна група (-CH₂-COOH) з'єднана з гідроксильними групами глюкозних мономерів. КМЦ є одним із найперспективніших матеріалів у багатьох передових галузях завдяки високим технологічно-функціональним властивостям та недорогому процесу синтезу. Крім функції загусника у харчовій та косметичній галузях, вона входить до складу наповнювачів для акумуляторів холоду [13].

КМЦ і ксантанова камедь додаються у антифриз на основі бішофіту (магнію хлориду гексагідрату MgCl₂·6H₂O), що є типовою незамерзаючою речовиною представленою на ринку України. Основні параметри антифризу на основі бішофіту викладено у таблиці 1 [14]. У експериментах використовували антифриз, розрахований на температуру до -30°C.

Отже, для досліджень було відібрано і пронумеровано наступні зразки:

№1 – вода (контрольний зразок);

№2 – зразок ТАМ після 4 опалювальних сезонів, відібрано з теплового акумулятора ємнісного типу;

№3 – зразок ТАМ після 2 опалювальних сезонів, відібрано з теплового акумулятора ємнісного типу;

№4 – ТАМ до термоцикування, не використовувався у тепловому акумуляторі.

Прилади та методи вимірювань. Зміну водневого показника зразків ТАМ в діапазоні температур 20–100°C визначали за допомогою рН-метра HI 9321 HANNA Instruments, технічні характеристики якого наведені в таблиці 2.

Таблиця 1

Основні фізико-хімічні показники Defreeze

Показник	-30°C	-50°C
Зовнішній вигляд	світло-жовтий-	
Температура кипіння	+116°C	+116°C
Початок кристалізації	-21°C	-41°C
Температура замерзання	-30°C	-50°C
Густина (20°C)	1117–1250 кг/м ³	
Значення рН	7–8,9	
Спінювання	відсутнє	
Об'ємне розширення (100°C)	0,326×10 ⁻³ , 1/К	
Питома теплоємність (100°C)	3,23 кДж/(кг·К)	
Теплопровідність	0,518 Вт/(м·К)	
Клас небезпеки	4, не горить	

Нагрівання досліджуваних зразків ТАМ проводили у водяній бані, де поступово підвищували температуру у зазначеному діапазоні.

Зміну густини зразків ТАМ в залежності від температури (20–90°C) визначали за допомогою комплексу лабораторних ареометрів АОН-1 (ГОСТ 1848-81).

Таблиця 2

Основні технічні характеристики рН-метра HI 9321 HANNA Instruments

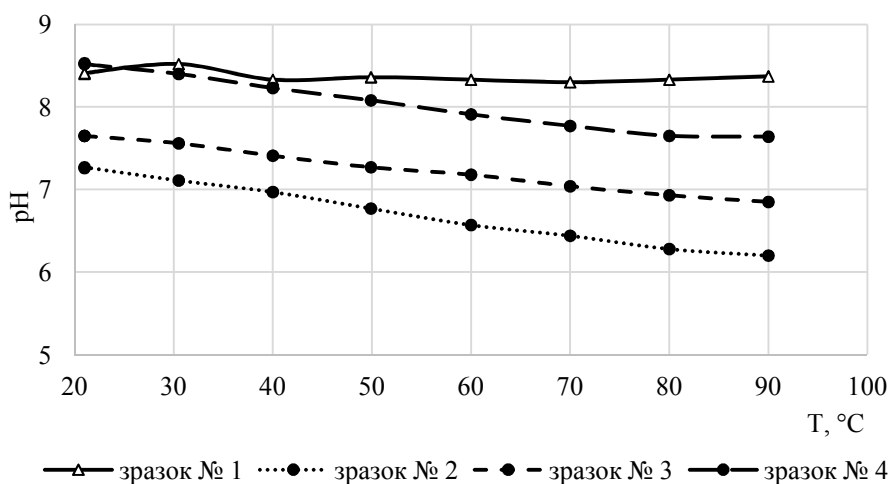
Технічні характеристики	рН	Температура, °C
Діапазон вимірювання	0–14	0–100
Точність (при 20°C)	± 0,01	± 0,5
Відхилення	± 0,02	± 2

Результати досліджень. Результати експериментальних досліджень зміни водневого показника зразків в залежності від температури представлено у таблиці 3 та на рисунку 1.

Таблиця 3

Дослідження pH ТАМ в залежності від температури експлуатації

Температура, °C	Зразок №1		Зразок №2		Зразок №3		Зразок №4	
	фактична T, °C	pH	фактична T, °C	pH	фактична T, °C	pH	фактична T, °C	pH
вихідна	21,0	8,40	23,0	7,26	22,6	7,65	22,2	8,52
20	21,0	8,41	22,5	7,27	20,0	7,65	20,2	8,52
30	30,5	8,52	30,2	7,11	30,4	7,54	30,0	8,40
40	40,0	8,33	40,0	6,97	40,6	7,41	40,0	8,23
50	49,9	8,36	50,1	6,77	50,0	7,27	50,0	8,08
60	60	8,33	60,7	6,57	60,0	7,18	60,5	7,91
70	70	8,30	70,4	6,44	70,0	7,04	70,0	7,77
80	80	8,33	80,1	6,28	80,0	6,93	80,0	7,65
90	90	8,37	85,3	6,20	87,7	6,85	85,3	7,64



№1 – вода (контрольний зразок); №2 – зразок ТАМ після 4 опалювальних сезонів;
 №3 – зразок ТАМ після 2 опалювальних сезонів;

№4 – ТАМ до термоцикування, не використовувався у тепловому акумуляторі.

Рис. 1 – Залежність водневого показника зразків ТАМ від температури експлуатації

В результаті проведених досліджень встановлено, що з зростанням температури значення pH всіх зразків ТАМ прямує в сторону зменшення в межах до 10–15%. Однак, незважаючи на термін експлуатації ТАМ досліджувані середовища залишаються нейтральними, на відміну від зразка №1 (води). Зразок 1 демонструє pH показник лужного середовища. Отже, водневий показник ТАМ не має обмежувального характеру на експлуатаційні характеристики теплоносія і може використовуватись до 4 опалювальних сезонів.

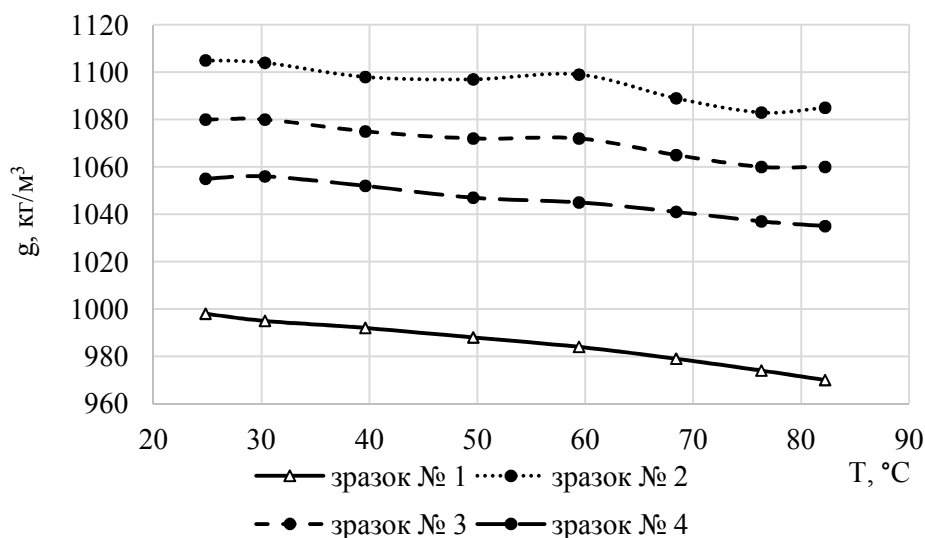
Дослідження густини ТАМ в залежності від температури представлено у таблиці 4 та на рисунку 2.

Таблиця 4

Дослідження густини ТАМ в залежності від температури експлуатації

Температура, °C	Зразок №1 [15]		Зразок №2*		Зразок №3		Зразок №4	
	фактична T, °C	густина ρ , кг/м ³	фактична T, °C	густина ρ , кг/м ³	фактична T, °C	густина ρ , кг/м ³	фактична T, °C	густина ρ , кг/м ³
вихідна	24,8	998	24,8	1105	24,8	1080	24,8	1055
30	30,3	995	30,3	1104	30,3	1080	30,3	1056
40	39,6	992	39,6	1098	39,6	1075	39,6	1052
50	49,6	988	49,6	1097	49,6	1072	49,6	1047
60	59,4	984	59,4	1099	59,4	1072	59,4	1045
70	68,4	979	68,4	1089	68,4	1065	68,4	1041
80	76,3	974	76,3	1083	76,3	1060	76,3	1037
90	82,2	970	82,2	1085	82,2	1060	82,2	1035

* – дані отримані аналітичним шляхом.



№1 – вода (контрольний зразок); №2 – зразок ТАМ після 4 опалювальних сезонів;
 №3 – зразок ТАМ після 2 опалювальних сезонів;
 №4 – ТАМ до термоцикування, не використовувався у тепловому акумуляторі.

Рис. 2 – Зміна густини ТАМ в залежності від температури експлуатації

Дослідження густини ТАМ свідчать про не суттєві зміни в процесі експлуатації. Так, при одному циклі підвищення температури від 20 до 90°C, зміни складають до 1–2%. Зміни густини ТАМ при тривалій експлуатації знаходяться також в межах 1–2%. Це свідчить про стабільність утворених структур в ТАМ і відсутність змін у вказаному параметрі. Отже, використання ТАМ не має обмежуючого впливу на експлуатаційні характеристики протягом 4 опалювальних сезонів.

Висновки. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що при експлуатації теплоаккумуляційного матеріалу на основі багатофункціональних порошків у діапазоні температур від 20 до 90°C протягом чотирьох опалювальних сезонів:

- водневий показник залишається нейтральним;
- густина змінюється в межах 1–2%.

Отже, досліджені показники не мають обмежуючого характеру при експлуатації мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт і теплоаккумуляційний матеріал не потребує заміни протягом, що найменше, 4 опалювальних сезонів. Це важливий економічний показник з огляду на вартість ТАМ і складність робіт по його заміні.

References

1. Du, K., Calautit, J., Eames, P., Wu, Y. (2021). A state-of-the-art review of the application of phase change materials (PCM) in Mobilized-Thermal Energy Storage (M-TES) for recovering low-temperature industrial waste heat (IWH) for distributed heat supply. *Renewable Energy*, 168, 1040–1057. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.057>
2. Zalba, B., Marín, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
3. Zayed, M.E., Zhao, J., Li, W., Elsheikh, A.H., Elbanna, A.M., Jing, L., Geweda, A.E. (2020). Recent progress in phase change materials storage containers: Geometries, design considerations and heat transfer improvement methods. *Journal of Energy Storage*, 30, 101341. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101341>
4. Demchenko, V., Konyk, A. (2020). Research of Heat Accumulation Capacity Binary Water Systems. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 13, 1-07. <https://doi.org/10.9790/5736-1306010107>
5. Quality Assurance RAL-GZ 896. Phase Change Materials (Phasenwechselmaterial). (2018). Gütesicherung. Deutsches Institut Für Gütesicherung und Kennzeichnung E. V.
6. Demchenko, V., Konyk, A. (2023). Mobile thermal energy storage (M-TES), *Journal of New Technologies in Environmental Science*, 91–96. <https://doi.org/10.53412/jntes-2022-3-2>
7. Demchenko, V., Konyk, A., Dekusha, H. (2023). Determination of components for heat storage material. *Proceedings of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technology, Social and Economic Matters (ICSF-2023), Ukraine, 1254. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012033>

8. Demchenko, V. G., Konyk, A. V., Falko Yu. (2021). Storage fluid for heating and cooling systems. UA Patent Application No. а 2021 07588 від 24.12.2021. Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations.
9. Demchenko, V.G., Konyk, A.V., Khomenko, M. (2022). Mobile technology complex for the preparation of water-soluble polymers. Scientific Works, 86, 1, 125–132. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2414>
10. Caballero, B. (Ed.). (2009). Guide to Nutritional Supplements. Academic Press.
11. Chaturvedi, S., Kulshrestha, S., Bhardwaj, K., Jangir, R. (2021). A Review on Properties and Applications of Xanthan Gum. In: Vaishnav, A., Choudhary, D.K. (eds) Microbial Polymers. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0045-6_4
12. Gupta, S., Variyar, P.S. (2018). Guar Gum: A Versatile Polymer for the Food Industry. In A. M. Grumezescu, A. M. Holban (Eds.), Handbook of Food Bioengineering. Biopolymers for Food Design, (pp. 383–407). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811449-0.00012-8>
13. Rahman, M.S., Hasan, M.S., Nitai, A.S., Nam, S., Karmakar, A.K., Ahsan, M.S., Shiddiky, M.J.A. et al. (2021). Recent Developments of Carboxymethyl Cellulose. Polymers (Basel). 20, 13(8), 1345. <https://doi.org/10.3390/polym13081345>
14. Dommax. dommax.com.ua. URL: https://www.dommax.com.ua/dokum/Defreeze_TDS_Ua_05-9-19.pdf (date of access: 27.06.2024).
15. Valves Instruments Plus Ltd. vip-ltd.co.uk. URL: https://www.vip-ltd.co.uk/Expansion/Density_Of_Water_Tables.pdf (date of access: 27.06.2024).

RESEARCH OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THERMAL STORAGE MATERIAL

Konyk A.V., PhD, s.r.s., Dekusha H.V., PhD, s.res.

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

Abstract. *The use of thermal storage materials (TSM) in heat storage systems and thermal accumulators gives impetus to the search for new storage fluids with certain technical characteristics that will meet individual operating conditions. The search for the components of heat-accumulating material and its technical characteristics is a current subject of research in modern thermal energy. Particular attention is paid to TSMs working with low-potential energy sources, which corresponds to the development of the carbon-free energy concept.*

The paper presents the results of experimental research of pH and density of heat-accumulating material used in a prototype of a mobile thermal accumulator MTA-0.5 MW, created by state order at the Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine. Thermal storage material consists of substances that are widely represented on the Ukrainian market, it is non-toxic, explosion- and fire-proof and environmentally friendly. The study was carried out using standard methods.

Four samples were selected for research: water (control sample), TSM before using and after two and four heating seasons, selected from a capacitive-type battery of the prototype MTA-0.5 MW. The obtained results of changes in pH and density indicate the feasibility of applying heat-accumulating materials based on multifunctional powders in the temperature range from 20 to 90°C, since liquids remain neutral and changes in density occur within 1-2%. Consequently, according to the obtained indicators, pH and density have no restrictions during the operation of mobile energy storage MTA-0.5 MW and the thermal storage material does not require replacement for at least 4 heating seasons.

Keywords: heat accumulator of capacitive type, heat storage material, pH, density.

Список використаної літератури

1. Du K., Calautit J., Eames P., Wu Y. A state-of-the-art review of the application of phase change materials (PCM) in Mobilized-Thermal Energy Storage (M-TES) for recovering low-temperature industrial waste heat (IWH) for distributed heat supply // Renewable Energy. 2021. Vol. 168. 1040–1057. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.057>
2. Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F. Mehling, H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications // Applied Thermal Engineering, 2003. Vol. 23, Iss. 3. P. 251–283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
3. Zayed M.E., Zhao J., Li W., Elsheikh A.H., Elbanna A.M., Jing L., Geweda A.E. Recent progress in phase change materials storage containers: Geometries, design considerations and heat transfer improvement methods // Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 30. 101341. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101341>
4. Demchenko V., Konyk A. Research of Heat Accumulation Capacity Binary Water Systems // IOSR Journal of Applied Chemistry. 2020. Vol. 13. P. 1-07. <https://doi.org/10.9790/5736-1306010107>

5. Quality Assurance RAL-GZ 896. Phase Change Materials (Phasenwechselmaterial). Gütesicherung. Deutsches Institut Für Gütesicherung und Kennzeichnung E. V. 2018. S. 47.
6. Demchenko V., Konyk A. Mobile thermal energy storage (M-TES) // Journal of New Technologies in Environmental Science. 2023. P. 91-96. <https://doi.org/10.53412/jntes-2022-3-2>
7. Demchenko, V., Konyk, A., Dekusha, H. Determination of components for heat storage material. Proceedings of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technology, Social and Economic Matters. 2023. (ICSF-2023), Ukraine, 1254. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012033>
8. Акумуляційна рідина для систем опалення та охолодження : патент України на винахід, заявл. а2021 07588 від 24.12.2021.
9. Demchenko V.G., Konyk A.V., Khomenko M. Mobile technology complex for the preparation of water-soluble polymers // Scientific Works. 2023. Vol. 86. Iss. 1, P. 125–132. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2414>
10. Caballero, B. (Ed.). (2009). Guide to Nutritional Supplements. Academic Press.
11. Chaturvedi S., Kulshrestha S., Bhardwaj K., Jangir R. A Review on Properties and Applications of Xanthan Gum. In: Vaishnav, A., Choudhary, D.K. (eds). Microbial Polymers. Springer, Singapore. Microbial Polymers. 2021. P. 87–107. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0045-6_4
12. Gupta S., Variyar P.S. A Versatile Polymer for the Food Industry. In: Grumezescu A. M., Holban A. M. (eds.). Handbook of Food Bioengineering. Biopolymers for Food Design. 2018. P. 383–407. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811449-0.00012-8>
13. Rahman M.S., Hasan M.S., Nitai A.S., Nam S., Karmakar A.K., Ahsan M.S., Shiddiky M.J.A. et al. Recent Developments of Carboxymethyl Cellulose // Polymers (Basel). 2021. Vol. 13. Iss. 8. 1345. <https://doi.org/10.3390/polym13081345>
14. Dommax // Dommax.com.ua: [Website]. URL: https://www.dommax.com.ua/dokum/Defreeze_TDS_Ua_05-9-19.pdf (viewed on: 27.06.2024).
15. Valves Instruments Plus Ltd. // vip-ltd.co.uk.: [Website]. URL: https://www.vip-ltd.co.uk/Expansion/Density_Of_Water_Tables.pdf (viewed on: 27.06.2024).

Отримано в редакцію 18.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 18.07.2024
Approved 25.09.2024

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОД РОЗРАХУНКУ ДИНАМІКИ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В ЗОНІ КОНДЕНСАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ

Сорокова Н.М. д.т.н., с.н.с., Половинкін К.О. аспірант

Національний технічний університет України “КПІ імені Ігоря Сікорського”

Анотація. Розроблена математична модель і чисельний метод розрахунку динаміки переносу теплоти в зоні конденсації циліндричної теплової труби з металоволокнистою капілярно-пористою структурою на внутрішній поверхні. Капілярна структура – гніт – забезпечує рециркуляцію робочого тіла з зони конденсації в зону випаровування незалежно від орієнтації теплової труби в просторі. Математична модель описує спряжену задачу дифузійно-фільтраційного тепломасопереносу і фазових перетворень в капілярно-пористому шарі, що контактує з насиченою парою робочого тіла, та теплопровідності в стінці труби, від зовнішньої поверхні якої теплота конденсації пари відводиться охолоджуючому теплоносію. Вміст інертних газів в теплової трубі є знехтувано малим. Відповідно система диференціальних рівнянь включає рівняння переносу енергії, масопереносу парової та рідкої фаз робочого тіла в капілярно-пористому шарі, і рівняння теплопровідності для металеві стінки труби, записаних для двовимірної розрахункової області. Система рівнянь замикається формулами для інтенсивності фазових перетворень, ефективних коефіцієнтів дифузії рідкої і парової фаз, коефіцієнту проникності гніту, тиску насичення, капілярного тиску, під дією якого відбувається відведення конденсату в зону випаровування. Результати чисельних експериментів свідчать про можливість застосування математичної моделі та методу розрахунку для управління процесами тепловідведення з метою організації ефективної термостабілізації термонапружених поверхонь в процесі експлуатації теплових труб, а також на етапі їх проєктування.

Ключові слова: теплова труба, капілярна структура, тепломасоперенос, математичне моделювання, конденсація пари, інтенсивність охолодження.

Формулювання проблеми і аналіз останніх досягнень. Теплові труби (ТТ) знаходять все більш широке та успішне застосування для забезпечення надійної роботи енергетичного обладнання, електричних двигунів, радіоелектронної апаратури, літальних і космічних апаратів, машин оборонної промисловості, де є потреба інтенсифікації термостабілізації термонапружених елементів або трансформування теплової енергії [1-5]. Це обумовлено тим, що ТТ володіють ефективною теплопровідністю на кілька порядків вищою, ніж у відомих високотеплопровідних матеріалів [2]. Крім того, ТТ зазвичай конструюють таким чином, що їх форма та продуктивність адаптовані до умов конкретного використання [3]. Проєктування або підбір ТТ з необхідними характеристиками теплопередачі передбачає проведення детальних досліджень, пов'язаних з оцінкою спроможності труби відводити необхідні теплові потоки, і факторів, які дозволяють управляти цим процесом. Ефективним способом впливу на теплопередавальні характеристики ТТ є інтенсивність тепловідведення в зоні конденсації. Використання методу математичного моделювання для таких випробувань дозволить значно прискорити вибір оптимальних умов охолодження, заощаджуючи час та матеріальні ресурси на проведення фізичного моделювання на відповідному лабораторному обладнанні.

Незважаючи на велику кількість публікацій в області створення, покращення характеристик та використання ТТ, досліджень на базі математичного моделювання процесів тепломасопереносу і фазових перетворень, які лежать в основі роботи ТТ дуже мало. В [6,7] проведено чисельне моделювання теплопередавальних процесів в пульсацийних ТТ, де відсутній гніт та основними механізмами теплопереносу розглядаються теплопровідність і конвекція. Для оцінки впливу фазових перетворень в [5] залучається емпіричне рівняння, яке впливає з рівності коефіцієнтів прихованої теплопередачі в зонах випаровування і конденсації, причому фізичного обґрунтування такого прийому в роботі не наводиться. В [8] запропонована математична модель теплопереносу в обертовій теплової трубі без пористої частини, яка включає рівняння нерозривності та рівняння переносу енергії та імпульсу. І хоча принцип роботи будь-яких ТТ базується на тепловому ефекті фазових перетворень, у [8] він явно не враховується.

Розробка математичної моделі в зоні конденсації. Процес тепломасообміну в зоні охолодження ТТ відбувається внаслідок конденсації сухої насиченої пари на капілярно-пористій структурі, розташованій коаксіально на внутрішній поверхні стінки ТТ (рис. 1), та передачі теплоти конденсації через стінку ТТ охолоджуючій рідині. Конденсат по капілярно-пористій структурі гніту під дією капілярних сил переміщується уздовж бічної поверхні ТТ в зону нагріву, де випаровується, відводячи теплоту від термонапруженої поверхні.

Якщо спрямувати ось O_u уздовж осі ТТ, а ось O_r уздовж радіусу



– Теплова труба з капілярно-пористою структурою [9]

r ТТ, в силу осової симетрії ТТ, і для того щоб обмежитись використанням циліндричної системи координат, приймемо розрахункову область такою, як представлено на рис.2. Парорідинна суміш, вміст рідини в якій буде безупинно зростати, та теплота конденсації в порах гніту переноситься уздовж осей Or і Oy шляхом дифузії і фільтрації. Ці процеси переносу описуються наступною системою диференціальних рівнянь:

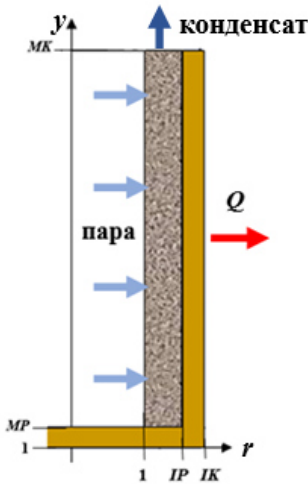


Рис. 2 – Вид розрахункової області

$$\frac{\partial U_p}{\partial t} + \frac{\partial(w_{pr}U_p)}{\partial r} + \frac{\partial(w_{py}U_p)}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_p r \frac{\partial U_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_p \frac{\partial U_p}{\partial y} \right) - I_V, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_p}{\partial t} + \frac{\partial(w_{pr}U_p)}{\partial r} + \frac{\partial(w_{py}U_p)}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_p r \frac{\partial U_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_p \frac{\partial U_p}{\partial y} \right) + I_V, \quad (2)$$

$$c_{ef} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + w_{efr} \frac{\partial T}{\partial r} + w_{efy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{ef} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{ef} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + L I_V. \quad (3)$$

Теплопровідність в циліндричній стінці ТТ розраховується за допомогою рівняння Фур'є

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (4)$$

Тут T — температура; c_p і λ — об'ємна теплоємність і теплопровідність металеві стінки; U_p і U_n — об'ємні концентрації рідини і пари; t — час; λ_{ef} , c_{ef} — ефективні коефіцієнти теплоємності і теплопровідності, $\lambda_{ef} = \lambda_T \Psi_T + \lambda_p \Psi_p + \lambda_n \Psi_n$, $c_{ef} = c_T \Psi_T + c_p \Psi_p + c_n \Psi_n$, Ψ_T — об'ємна доля твердої фази, $\Psi_T = 1 - \Pi$, Π — пористість, пористої структури, рідини Ψ_p та пари Ψ_n , які знаходяться по відношенням: $\Psi_T = 1 - \Pi$, $\Psi_p = U_p / \rho_p$ і $\Psi_n = 1 - \Psi_T - \Psi_p$, де ρ_p — густина рідини. L , I_V — питома теплота та інтенсивність фазових перетворень; w_{efr} — ефективна швидкість фільтрації парорідинної суміші уздовж координати r , $w_{efr} = (w_{pr} c_p U_p + w_{nr} c_n U_n) / c_{ef}$.

Швидкості фільтраційного руху парової w_n і рідкої w_p фаз визначаються за законом Дарсі: $w_\psi = -K \nabla P_\psi / \mu_\psi$, $\psi = n, p$, де K — ефективний коефіцієнт проникності; ∇P_ψ — градієнт тиску фази ψ ; μ_ψ — динамічний коефіцієнт в'язкості фази ψ . Для розрахунку проникності металоволокнистої капілярно-пористої структури ТТ у [10] запропоновано емпіричну залежність $K = 0,4 d_b^{2,75} \exp(8,4 \cdot 10^{-3} P d_b^{-0,22})$, де d_b — діаметр волокон, що утворюють капілярно-пористу структури у мкм. Тиски P_p і P_n розраховуються через відомі з рішення системи (1) – (3) функції U_p , U_n і T , що дозволяють визначити об'ємну частку Ψ_n , парціальну густину парової фази $\rho_n = U_n / \Psi_n$ і парціальний тиск $P_n = \rho_n R_y T / \mu_n$. Тиск рідини $P_p = P_n + P_k$, де капілярний тиск P_k розраховується за виразом, отриманим у [11], що є аналогічним формулі Лапласа

$$P_k = 2\sigma(T) \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\theta(r)}{r} F(r) dr / \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \theta(r) F(r) dr = \frac{2\sigma(T)}{r^*}, \quad r_{\min} < r^* < r_{\max}. \quad (5)$$

Тут $r_{\min}$ і $r_{\max}$ — мінімальний і максимальний радіуси пор; r^* — характеристичний параметр дисперсності розмірів пор; $\theta(r)$ — об'ємна доля капіляру, що заповнена рідиною; $F(r)$ — диференціальна функція розподілу пор по розмірах. Добуток $\theta(r) F(r) dr$ визначає об'єм рідини в капілярах з радіусами від r до $r+dr$ в одиничному об'ємі пористої структури. Функція $\theta(r, t)$ у капілярі радіуса r в момент часу t визначається виразом, який отримано як відношення площі перетину капіляра, зайнятого рідиною, до загальної площі його перетину $\theta(r, t) = \pi[r^2 - (r - \delta)^2] / \pi r^2 = 2\delta / r - \delta^2 / r^2 = 1 - (1 - \delta / r)^2$, δ — товщина шару рідини на стінках частково заповнених капілярів, яка визначалась за формулою для рівноважної товщини шару конденсату на твердій поверхні, отриманій в [12], $\delta = \delta^* \bar{\delta} = \delta^* (1 - \sqrt{1 - \phi})$, ϕ — відносна вологість парогазової суміші, $\phi = P_n / P_n(T)$, δ^* — середня довжина змішування активізованої частки в рідкому шарі, яка може розглядатись як товщина приграничного шару, що примикає до вільної поверхні досить масивного конденсованого тіла, в якому протікає процес випаровування, $\bar{\delta} = \delta / \delta^*$ при $0 < \delta < \delta^*$ и $\bar{\delta} = 1$ при $\delta > \delta^*$. Тиск насичення розраховувався по формулі Нікітенко Н.І. [12]:

$$P_n = N_p \sqrt{T} [\exp(A / RT) - 1]^{-1}, \quad N_p = 0,4361 \cdot 10^{10} \text{ кг/(м} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{К}^{0,5}), \quad A = 0,4206 \cdot 10^{15} \text{ Дж} \quad (5)$$

де значення A і N_p знайдені в результаті рішення системи з двох рівнянь (5), записаних для двох точок T_1, P_{n1} і T_2, P_{n2} , що взяті з таблиці насиченої пари і води в інтервалі температур $0 < T < 100$ °С.

Коефіцієнти дифузії рідини D_p і пари D_n в капілярах гніту знаходяться по формулам, які відображають активаційний характер дифузійних процесів: $D_p = \gamma_{Dp} [\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}$ [13], $D_n = \gamma_{Dn} T^{3/2} / P_n$ [11], де A_D — енергія дифузійної активації, R — універсальна газова стала, γ_{Dp} , γ_{Dn} — дифузійні коефіцієнти.

Інтенсивність фазових перетворень знаходиться як різниця потоків рідини, що випаровується, та пари, що конденсується. Для поверхні контакту пари, що надходить з зони нагріву з температурою T_c і відносною вологістю φ_c та гніту формула [12] має наступний вид

$$I = \gamma_c \left\{ \varphi_{\tau} \Big|_{v=0} \left(\exp \left[A / (RT) \Big|_{v=0} \right] - 1 \right)^{-1} - \varphi_c \left(\exp \left[A / (RT_c) \right] - 1 \right)^{-1} \right\}, \quad \gamma_c = \varepsilon \rho_p \delta^* / 4. \quad (6)$$

Тут γ_c — поверхневий коефіцієнт фазового перетворення, ε — коефіцієнт випромінювання; φ_{τ} — відносна вологість парогазової суміші, якій згідно ізотермі сорбції відповідає об'ємна концентрація U_p в даній точці поверхні; v — нормаль до граничної поверхні; A — енергія активації. Значення φ_{τ} може бути визначено з наведеної вище формули для товщини δ конденсованого шару: $\varphi_{\tau} = \bar{\delta}(2 - \bar{\delta})$.

Інтенсивність конденсації в капілярах гніту знаходиться по формулі, що впливає з (6) за умови локальної термодинамічної рівноваги, згідно з якою температури фаз в точці їх контакту є однаковими:

$$I_v = \gamma_c \left[\exp(A / RT) - 1 \right]^{-1} (\varphi_{\tau} - \varphi) S. \quad (7)$$

Тут φ — вологість парової фази, що міститься в капілярах; S — площа контакту рідкої і парової фаз в частково заповнених рідиною капілярах одиничного об'єму гніту, яка визначаються по формулі [7]:

$$S = \frac{2\sqrt{1-\varphi_{\tau}}}{\rho_p \delta^*} \frac{\partial U_p}{\partial \varphi_{\tau}}. \quad (8)$$

Для визначення похідної $\partial U_p / \partial \varphi_{\tau}$ доцільно залучити рівняння ізотермі сорбції, яке зазвичай має вигляд $U_p = U_{\max} \varphi_{\tau}^g$, де $g = \text{const}$. Тоді $\partial U_p / \partial \varphi_{\tau} = U_{\max} g \varphi_{\tau}^{g-1}$.

Граничні умови для розрахункової області (рис.2) формулюються наступним чином. На поверхні $r=1$, $MP \leq y \leq MK$ мають місце граничні умови третього роду:

$$-D_n \frac{\partial U_n}{\partial r} \Big|_{r=0} + \frac{\partial(w_{nr} U_n)}{\partial r} \Big|_{r=0} = -\gamma_{n,c} (U_n \Big|_{r=1} - \rho_{n,c} \Psi_n), \quad (9)$$

$$D_p \frac{\partial U_p}{\partial r} \Big|_{r=1} + \frac{\partial(w_{pr} U_p)}{\partial r} \Big|_{r=1} = I_c \Big|_{r=1}, \quad (10)$$

$$\lambda_{ef} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=1} + w_{efr} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=1} = \alpha(T_c - T \Big|_{r=1}) + L I \Big|_{r=1}. \quad (11)$$

На границях $r = IP$, $MP \leq y \leq MK$ та $y=MP$, $1 \leq r \leq IP$ масоперенос відсутній, але перенос теплоти відбувається. Для поверхні $r = IP$, $MP \leq y \leq MK$ граничні умови мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=IP} &= \lambda_{ef} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=IP} + w_{efr} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=IP}; & \frac{\partial U_p}{\partial r} \Big|_{r=IP} &= 0; & \frac{\partial U_n}{\partial r} \Big|_{r=IP} &= 0; \\ \frac{\partial w_{pr}}{\partial r} \Big|_{r=IP} &= 0; & \frac{\partial w_{nr}}{\partial r} \Big|_{r=IP} &= 0; & \frac{\partial w_{py}}{\partial y} \Big|_{MP \leq y \leq MP} &= 0; & \frac{\partial w_{ny}}{\partial y} \Big|_{MP \leq y \leq MP} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Для поверхні $y=MP$, $1 \leq r \leq IP$ граничні умови записуються аналогічно (12).

Через границю $1 \leq r \leq IP$, $y = MK$ конденсат безупинно відводиться під дією капілярних сил в зону транспорту, а зміною температури і об'ємної концентрації пари на цій границі можна знехтувати. Тоді граничні умови записуються у наступний спосіб:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=MK} &= 0; & -D_p \frac{\partial U_p}{\partial y} \Big|_{y=MK} + \frac{\partial(w_{py} U_p)}{\partial y} \Big|_{y=MK} &= \frac{K}{\mu_p} \frac{P \Big|_{y=MK} - P_{\kappa}}{\partial y} U_p \Big|_{y=MK}; & \frac{\partial U_n}{\partial y} \Big|_{y=MK} &= 0; \\ \frac{\partial w_{py}}{\partial y} \Big|_{y=MK} &= \frac{K}{\mu_p} \frac{P \Big|_{y=MK} - P_{\kappa}}{\partial y}; & \frac{\partial w_{nx}}{\partial x} \Big|_{v=0} &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

На границях з зовнішнім охолодним середовищем умови теплообміну можна записати у вигляді

$$A_0 \lambda \frac{\partial T}{\partial v} + A_1 T + A_2 = 0, \quad (14)$$

де v — нормаль до поверхні. При $A_0 = 0$ і $A_1 = 1$ (14) представляє граничну умову першого роду; при $A_0 = A_1 = 0$ — умову другого роду; при $A_0 = 0$, $A_1 = \alpha$ і $A_2 = \alpha T_c$ — третього роду.

Рішення системи істотно нелінійних рівнянь (1) – (4) при граничних умовах (9) – (14) може бути проведено кінцево-різницеvim чисельним методом. Різницеvі апроксимації диференційних рівнянь на рівномірній різницеvій сітці $r_i = R_0 + ih$, ($i = 1, 2, \dots, IP$; $h = \text{const}$, $R_0 > 0$), $y_m = mh_y$, ($m = MP, MP+1, \dots, MK$; $h_y = \text{const}$), $t_n = nl$ ($n = 0, 1, \dots, l > 0$) будувались на основі явної тришарової перерахункової різницеvої схеми Нікітенко М.І. [11], у відповідності до якої рівняння переносу маси пари (1) апроксимується двома різницеvими рівняннями

$$(\bar{U}_{n,i,m}^{n+1} - U_{n,i,m}^n)/l = -\left[\left((w_n U_n)_{i+1,m}^n - (w_n U_n)_{i,m}^n\right) - \left((w_n U_n)_{i,m}^n - (w_n U_n)_{i-1,m}^n\right)\right]/(2h^2) -$$

$$-\left[\left((w_n U_n)_{i,m+1}^n - (w_n U_n)_{i,m}^n\right) - \left((w_n U_n)_{i,m}^n - (w_n U_n)_{i,m-1}^n\right)\right]/(2h_y^2), \quad (15)$$

$$(1 + \Omega_n)(U_{n,i,m}^{n+1} - U_{n,i,m}^n)/l - \Omega_n(U_{n,i,m}^n - U_{n,i,m}^{n-1})/l = -\left[\left((w_n \bar{U}_n)_{i+1,m}^n - (w_n \bar{U}_n)_{i,m}^n\right) - \right.$$

$$\left. - \left((w_n \bar{U}_n)_{i,m}^n - (w_n \bar{U}_n)_{i-1,m}^n\right)\right]/(2h^2) - \left[\left((w_n \bar{U}_n)_{i,m+1}^n - (w_n \bar{U}_n)_{i,m}^n\right) - \right.$$

$$\left. - \left((w_n \bar{U}_n)_{i,m}^n - (w_n \bar{U}_n)_{i,m-1}^n\right)\right]/(2h_y^2) + \left[\left(D_{n,i+1,m} r_{i+1,m} + D_{n,i,m} r_{i,m}\right)(U_{n,i+1,m}^n - U_{n,i,m}^n) - \right.$$

$$\left. - \left(D_{n,i,m} r_{i,m} + D_{n,i-1,m} r_{i-1,m}\right)(U_{n,i,m}^n - U_{n,i-1,m}^n)\right]/(2r_{i,m} h^2) + \left[\left(D_{n,i,m+1} + D_{n,i,m}\right)(U_{n,i,m+1}^n - U_{n,i,m}^n) - \right.$$

$$\left. \left(D_{n,i,m} + D_{n,i,m-1}\right)(U_{n,i,m}^n - U_{n,i,m-1}^n)\right]/(2h_y^2) - I_V. \quad (16)$$

Аналогічним шляхом записуються різницеві апроксимації диференціальних рівнянь (2), (3). Погрішність апроксимації має порядок $O(l + h^2)$. Ваговий параметр $\Omega_\psi \geq 0$, (ψ відповідає індексам p, r, T), обирається з умов стійкості $l_\psi \leq \left\{ (w_{\psi r} / h + w_{\psi y} / h_y)^{-1}; (1 + 2\Omega_\psi) / \left[2D_\psi (h^{-2} + h_y^{-2}) \right] \right\}$. Розрахунковий крок по часу визначається з умови $l \leq \min(l_p; l_r; l_T)$.

На базі представленої математичної моделі проводився розрахунок процесу переносу теплоти, що вивільняється при конденсації пари на металоволокнистій пористій структурі в зоні конденсації (охладження) ТТ, зовнішньому охолодному середовищу. Корпус ТТ і гніт виконано з міді. Довжина зони конденсації ТТ приймалась $l = 0,25$ м, $\delta_{ст}$ товщина стінки $\delta_{ст} = 0,004$ м, товщина гніту $\delta_r = 0,012$ м, діаметр волокон металоволокнистої структури $d_b = 20$ мкм і її пористість $\Pi = 0,7$. В якості вихідних фізичних параметрів приймалися: $T_0 = 283$ К; $U_{p0} = 6,98$ кг/м³; $P_{n0} = 1,187$ кПа; $P_{n0} = 1,199$ кПа; $T_c = 353$ К; $T_{ок,с} = 283$ К; $P_c = 47$ кПа; $P_{nc} = 46,79$ кПа; $A = A_D = 0,4205 \cdot 10^8$ Дж/кмоль; $\lambda_t = 395$ Вт/(м·К); $c_t = 385$ Дж/(кг·К); $\rho_t = 8890$ кг/м³. Експериментально отримані криві ізотерм сорбції для пористої мідної структури в [14] доволі точно описуються рівнянням $W^{-1} = W_{max}^{-1} - 35,5 \ln \phi$, де максимальний вологовміст W_{max} відповідає значенню $\phi = 1$ і при температурі 20 °С дорівнює 0,45%, а $U_p = 0,01 W \rho_t$.

На рис.3 – 6 наведені результати чисельних експериментів тепломасопереносу в зоні конденсації ТТ від початку роботи ТТ до досягнення встановленого режиму, коли температура на зовнішній поверхні ТТ залишається сталою при незмінних умовах тепловідведення.

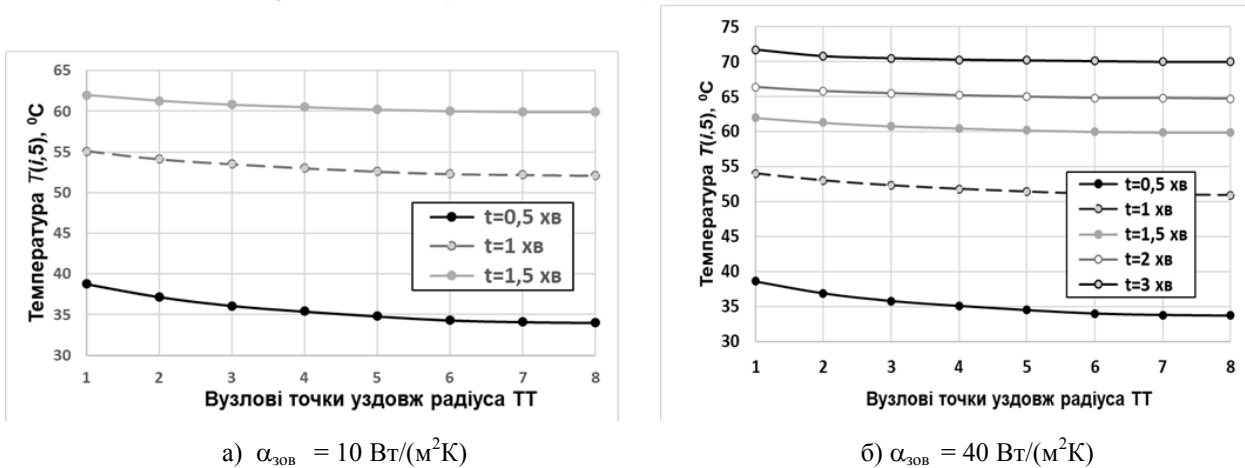


Рис. 3 – Зміна температури в деякі моменти часу уздовж осі Ox в гніті ($i=1, \dots, 6$) і стінці ($i=6, 7, 8$) ТТ у вузловій точці по координаті Oy $m=MP+2$ (рис. 2) при різних інтенсивностях тепловіддачі α_{30B} від наружної стінки ТТ

Перехід від вільної конвекції при охолодженні ТТ до примусового руху охолоджуючого повітря з температурою 10 °С (рис.3 а, б) не досить помітно відображається на розподілі температури в системі гніт-стінка ТТ, але все ж таки у випадку (2) температурний перепад у перетинах $i=1$ та $i=8$ на 1-2 градуси є більшим. При цьому швидкість заповнення капілярів пористого шару у випадку (б) дещо сповільнюється: наприклад, у вузловій точці $i=2$ концентрація рідкої фази U_p ($t=1,5$ хв) складає 169,7 кг/м³ для випадку (а) і 166,4 для випадку (б).

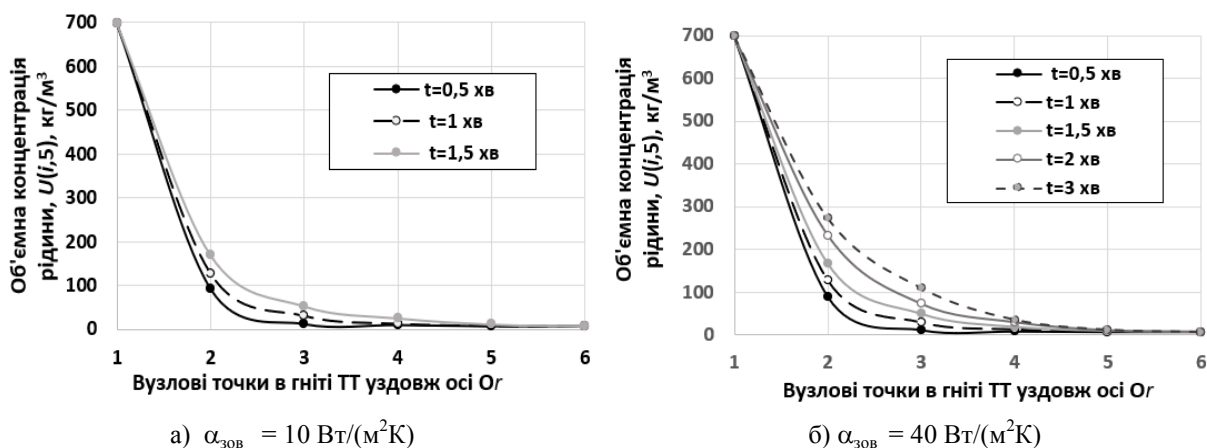


Рис. 4 – Зміна об'ємної концентрації конденсату в пористому гніті ($i=1, \dots, 6$) в деякі моменти часу уздовж осі Or ТТ у вузловій точці по координаті Oy $m=MP+2$ (рис. 2) при різних інтенсивностях тепловіддачі α_{30B} від наружної стінки ТТ

Незважаючи на досить значну товщину стінки ТТ, яка була обрана з міркувань збільшення розрахункового кроку по часу і зменшення тривалості кожного чисельного експерименту, перепад температури в стінці при невеликих коефіцієнтах тепловіддачі складає менше $0,5^\circ\text{C}$ (рис. 3 та рис. 5-а). Однак при збільшенні коефіцієнта тепловіддачі до $1000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, зміна температури по товщині стінки стає більш помітною (рис. 4 б). Результати розрахунку зміни в часі температури і об'ємної концентрації рідкої фази у деяких вузлових точках, де точка $m=5=MP+2$, а $m=12=MK-2$ (рис.2) для різних умов охолодження, представлені на рис. 5 і 6. Досягнення встановленого температурного режиму відбувається досить швидко, тоді як заповнення пористої структури конденсатом проходить вкрай нерівномірно, зменшуючись від перетину MK до перетину MP . Причому при інтенсивному тепловідведенні стінка ТТ швидко охолоджується, що сповільнює інтенсивність масопереносу і в капілярах гніту

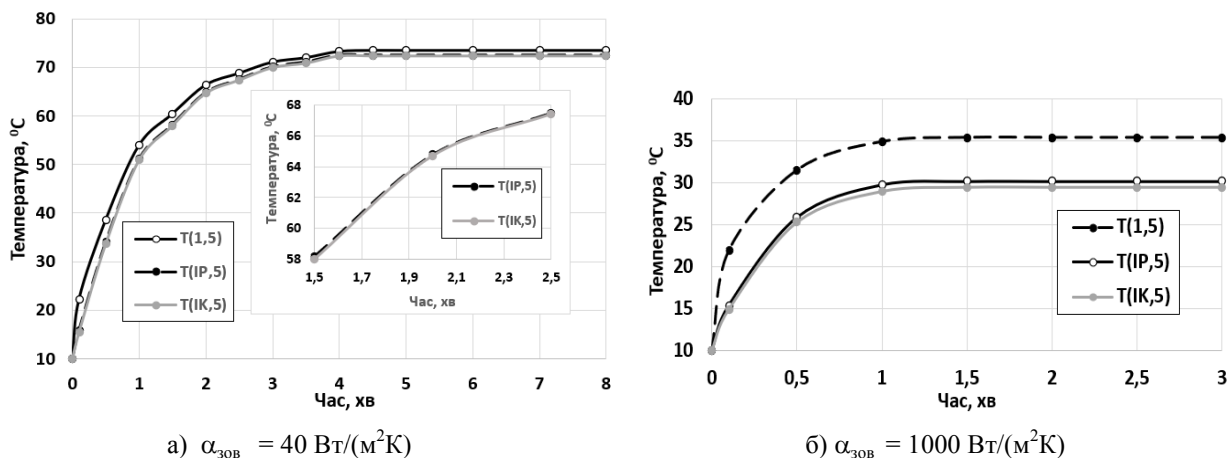


Рис. 5 – Зміна в часі температури в деяких вузлових точках системи гніт-стінка ТТ при різних інтенсивностях тепловіддачі α_{30B} від наружної стінки ТТ

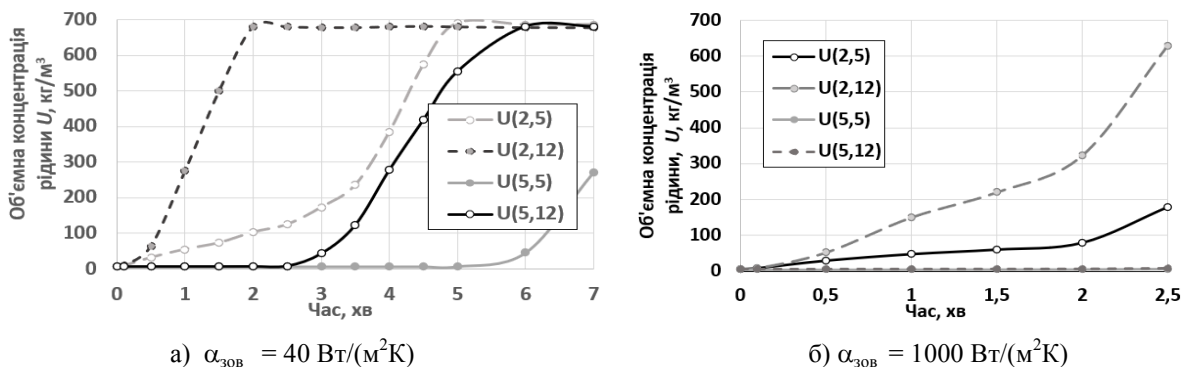


Рис. 6 – Зміна в часі об'ємної концентрації рідкої фази в деяких вузлових точках системи гніт-стінка ТТ при різних інтенсивностях тепловіддачі α_{30B} від наружної стінки ТТ

Висновки. Розроблена математична модель і метод її реалізації показують адекватні якісні результати і можуть бути корисними при аналізі різних впливових факторів на ефективність роботи ТТ при конструюванні або обранні режимів експлуатації ТТ. Для отримання надійних кількісних результатів динаміки тепломасопереносу в зоні конденсації необхідно уточнення коефіцієнтів масопереносних характеристик, що входять в математичну модель, в залежності від пористості гніту і природи теплоносія.

References

1. Wrobel R., Reay D. (2022). Heat pipe based thermal management of electrical machines. A feasibility study, *Thermal Science and Engineering Progress*, V.33, 101366 <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101366>.
2. Rassamakin B., Khairnasov S., Rassamakin A., Alpherova O. (2011). Space-Applied Aluminum Profiled Heat Pipes with Axial Grooves: Experiments and Simulation *Pipe Science and Technology International Journal*. № 1(4), 313–327. DOI: 10.1615/HeatPipeScieTech.v1.i4.20
3. Kravets V.Iu. (2018). *Protsesy teploobminu u miniatiurnykh vyparno-kondensatsiynykh systemakh okhlozhennia [Heat exchange processes in miniature evaporative-condensation cooling systems]*. Kh.: FOP Brovin O.V.
4. Serko M. V., Marynenko V. I., Rohachov V. A., Khairnasov S. M. (2014). Eksperymentalni doslidzhennia teploob-minnyka na osnovi teplovykh trub [Experimental studies of a heat exchanger based on heat pipes]. *Technology Audit and Production Reserves*, V.3, № 4, 26-30, doi:10.15587/2312-8372.2014.25325.
5. Nikolaenko Yu.Ie. (2009). *Zasoby teplozabezpechennia teplovykh rezhymiv na osnovi teplovykh trub dlia prystroiv obchysluvalnoi tekhniki ta keruvannia. [Means of heat supply of thermal regimes based on heat pipes for computing and control devices]*. Avtoref. dys. na здобuttia nauk. stupenia dokt. tekhn. nauk.: 05.14.06. Kyiv.
6. Ashutosh Kr Singh, Ashok Kumar Satapathy, Pooja Jhunjhunwala. (2014). Numerical analysis of performance of closed-loop pulsating heat pipe. *Heat Pipe Science and Technology*. V.5, Issue 1-4, 433-440 DOI: 10.1615/HeatPipeScieTech.v5.i1-4.490
7. Zhao, X.; Zhu, Y.; Li, H. (2022). Micro-Channel Oscillating Heat Pipe Energy Conversion Approach of Battery Heat Dissipation Improvement: A Review. *Energies*, 15, 7391-7422. <https://doi.org/10.3390/en15197391>
8. Jankowski, Todd A. *Numerical and experimental investigations of a rotating heat pipe*. No. LA-14324-T. Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 2007. 133 p. <https://www.osti.gov/servlets/purl/901587>
9. Electronsc resource: <https://pcrepairkharkov.blogspot.com/2013/11/blog-post.html>
10. Kravets Yu. V., Melnyk R.S., Chervoniuk A.A., Shevel E.V. (2020). Yssledovanye pronytsaemosti metallovolo- nystykh kapylliarnykh struktur teplovykh trub dlia okhlazhdeniya elektroniki [Investigation of the permeability of metal-fiber capillary structures of heat pipes for cooling electronics]. *Tekhnolohiya y konstruy-rovanye v elektronnoi apparature*, 3–4, 47-52. DOI: 10.15222/TKEA2020.3-4.47
11. Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N., Kolchik Yu.N. (2014) *Molekulyarno-radiatsionnaya teoriya i metodyi rascheta teplo- i massoobmena [Molecular radiation theory and methods for calculating heat and mass transfer]*. Kiev: Naukova dumka, 744 p.
12. Nikitenko, N.I. (2002). Investigation of dynamics of evaporation of condensed bodies on the basis of the law of spectral-radiation intensity of particles. *Inzh. Fiz. Zh.*, 75 (3), 128–134.
13. Nikitenko, N.I. (2000). Problems of the radiation theory of heat and mass transfer in solid and liquid media. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 73(4), 840–848.
14. Syrkov, A.H. Pleskunov Y.V., Kavun V.S., Taraban V.V., Kushchenko A.N. (2019). Yzmenenye sorbtsyonnykh svoistv dyspersnoi medy, soderzhashchei v poverkhnostnom sloe ammoniyevye soedyneniya, pry dlytelnom vzaymo-deistvyi s paramy vody. *Kondensirovannyye sredy y mezhfaznyie hranytsy.*, 21(1), 146–154.

MATHEMATICAL MODEL AND CALCULATING METHOD OF DYNAMICS HEAT AND MASS EXCHANGE IN THE CONDENSATION ZONE OF A HEAT PIPE

Sorokova N.M. ShD., s.r., Polovynkin K.O. postgraduate
The National Technical University of Ukraine "KPI named after Ihor Sikorskyi"

Abstract. A mathematical model and a numerical method for calculating heat transfer dynamics in the condensation zone of a cylindrical heat pipe with a metal-fibrous capillary-porous structure have been developed. The capillary structure - the wick - ensures recirculation of the working medium from the condensation zone to the evaporation zone, regardless of the orientation of the heat pipe in space. The mathematical model describes the

coupled problem of heat and mass transfer and phase transformations in the capillary-porous layer in contact with the moist saturated steam of the working body of the pipe, and thermal conductivity in the pipe wall, from the outer surface of which the heat of steam condensation is transferred to the cooling coolant. The content of inert gases in the heat pipe is negligibly small. The system of differential equations is written for a two-dimensional computational domain. It includes the energy transfer, vapor mass, and liquid mass equations written for the capillary-porous bed, and the heat conduction equation for the metal pipe wall. The system of equations is closed by formulas for the intensity of phase transformations, diffusion coefficients of liquid and vapor phases, saturation pressure, and capillary pressure, under the action of which condensate is removed to the evaporation zone. The results of numerical experiments testify to the adequacy of the mathematical model, the effectiveness of the calculation method, and the possibility of their application for managing heat removal processes to organize effective thermal stabilization of thermally stressed surfaces during the operation of heat pipes, and also at the stage of their design.

Keywords: heat pipe, capillary structure, heat and mass transfer, mathematical modeling, steam condensation, cooling intensity.

Список використаної літератури

1. Wrobel R., Reay D., Heat pipe based thermal management of electrical machines.//A feasibility study, Thermal Science and Engineering Progress, V.33, 2022, 101366, ISSN 2451-9049, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101366>.
2. Rassamakin B., Khairnasov S., Rassamakin A., Alpherova O. Space-Applied Aluminum Profiled Heat Pipes with Axial Grooves: Experiments and Simulation Pipe Science and Technology // International Journal. 2011. № 1(4). P. 313–327. DOI: 10.1615/HeatPipeScieTech.v1.i4.20
3. Кравець В.Ю. Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження. Х.: ФОП Бровін О.В., 2018. 288 с.
4. Серко М. В., Мариненко В. І., Рогачов В. А., Хайрмасов С. М. Експериментальні дослідження теплообмінника на основі теплових труб.// *Technology Audit and Production Reserves*, V.3, № 4, 2014, P. 26-30, doi:10.15587/2312-8372.2014.25325.
5. Ніколаєнко Ю.Є. Засоби теплозабезпечення теплових режимів на основі теплових труб для пристроїв обчислювальної техніки та керування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук.: 05.14.06. Київ, 2009. 36 с.
6. Ashutosh Kr Singh, Ashok Kumar Satapathy, Pooja Jhunjhunwala. Numerical analysis of performance of closed-loop pulsating heat pipe.// Heat Pipe Science and Technology. V.5, Issue 1-4, 2014, P. 433-440 DOI: 10.1615/HeatPipeScieTech.v5.i1-4.490
7. Zhao, X.; Zhu, Y.; Li, H. Micro-Channel Oscillating Heat Pipe Energy Conversion Approach of Battery Heat Dissipation Improvement: A Review. *Energies* 2022, V.15, P.7391-7422. <https://doi.org/10.3390/en15197391>
8. Jankowski, Todd A. Numerical and experimental investigations of a rotating heat pipe. No. LA-14324-T. Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 2007. 133 p. <https://www.osti.gov/servlets/purl/901587>
9. Electronsc resource: <https://pcrepairkharkov.blogspot.com/2013/11/blog-post.html>
10. Кравець Ю. В., Мельник Р.С., Червонюк А.А., Шевель Е.В. Исследование проницаемости металловолокнистых капиллярных структур тепловых труб для охлаждения электроники. // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 3–4. С. 47-52. DOI: 10.15222/ТКЕА2020.3-4.47
11. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н., Кольчик Ю.Н. Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена. Киев: Наукова думка, 2014. 744 с.
12. Nikitenko, N.I. Investigation of dynamics of evaporation of condensed bodies on the basis of the law of spectral-radiation intensity of particles. // *Inzh. Fiz. Zh.* 2002, V. 75, No 3. P. 128–134
13. . Nikitenko, N.I. Problems of the radiation theory of heat and mass transfer in solid and liquid media // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2000, V. 73, No 4. P. 840–848.
14. Сырков, А.Г. Плескунов И.В., Кавун В.С., Тарабан В.В., Кущенко А.Н. Изменение сорбционных свойств дисперсной меди, содержащей в поверхностном слое аммониевые соединения, при длительном взаимодействии с парами воды // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2019. Т.21, № 1. С. 146–154.

Отримано в редакцію 18.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 18.07.2024
Approved 25.09.2024

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА З БУРЯКОВОГО ЖОМУ

Івашук О.С. к.т.н., с.н.с., доцент, Атаманюк В.М. д.т.н., професор,

Чижович Р.А. аспірант, Манастирська В.А. студент,

Собечко І.Б. д.х.н., доцент

Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів

Анотація. У даній роботі представлено результати досліджень щодо можливості виготовлення альтернативного брикетованого твердого палива з бурякового жому, що сприятиме утилізації відходів цукрового виробництва та раціональному використанню природних ресурсів. Для збільшення терміну зберігання вторинної сировини та можливості подальшого формування альтернативного твердого палива, буряковий жом попередньо було осушено методом фільтраційного сушіння. За допомогою методу калориметричного спалювання було досліджено основні показники дослідного матеріалу: вміст води, вміст золи та теплота згорання. Визначено, що для несформованої рослинної сировини теплотворна здатність становить ≈ 15900 кДж/кг, вологість $< 1\%$ мас., зольність $\approx 4,3\%$ мас. Одержані результати показали доцільність подальших досліджень щодо створення брикетованих твердопаливних зразків із осушеного бурякового жому. Встановлено, що одержані за допомогою гідравлічного пресу брикети мають теплотворну здатність ≈ 16318 кДж/кг, вологість $< 1\%$ мас., зольність $\approx 4,8\%$ мас. Виготовлені твердопаливні брикети з бурякового жому за своїми параметрами близькі до існуючих європейських стандартів щодо твердого палива. Отримані результати вказують на перспективність використання бурякового жому як альтернативного твердого палива, що дозволить знизити залежність від традиційних повільновідновлювальних паливних ресурсів і забезпечити додаткове використання великих об'ємів відходів цукрової промисловості, що сприятиме раціональному використанню вторинної рослинної сировини.

Ключові слова: альтернативне тверде паливо, буряковий жом, біомаса, вторинна сировина, брикети, раціональне природокористування.

Вступ. Цукровий буряк є другим за значимістю джерелом цукру у світі після цукрової тростини і виробується приблизно в 57 країнах-виробниках цукру [1]. У 2009 році приблизно 20 % світового виробництва цукру (153,4 млн тон) було отримано з цукрового буряка [1].

Буряковий жом – це кормовий відхід цукробурякового виробництва, що утворюється після видалення соку з бурякової стружки, становить основну частину відходів цукрового виробництва. З однієї тони буряків на суху масу можна отримати приблизно 130 кг цукру та 50 кг сушеного жому [1]. Зважаючи на значні щорічні обсяги переробки цукрових буряків в Україні, обсяг бурякового жому є величезним – навіть під час російської збройної агресії, обсяги врожаю цукрового буряка були на рівні ≈ 10 млн. тон у 2023 році [2].

Буряковий жом, як і більшість відходів рослинного походження харчової промисловості [3–5], володіє надлишковою вологістю ($< 65\%$ мас.), що призводить до його швидкого псування. На сьогодні висушують приблизно 9 % від загального обсягу жому, і не всі цукрові заводи обладнані сушильними установками та пресами глибокого віджиму, тому більша його частина направляється у жомосховища. Тривале зберігання неосушеного жому не тільки призводить до втрати поживних речовин, але й погіршує екологічну ситуацію навколо заводу [6, 7].

Один із основних традиційних напрямків застосування свіжого бурякового жому – його використання як корм у тваринництві [6, 8]. На одну тону перероблених буряків можна отримати приблизно 50 кг сухого жому, що містить $48\div 50\%$ пектинових речовин, $22\div 25\%$ целюлози, $21\div 23\%$ геміцелюлози, $1,8\div 2,5\%$ азотистих речовин, $0,8\div 1,3\%$ золи, $0,15\div 0,20\%$ цукру, а також органічні кислоти, вітаміни та мікроелементи [9]. Пектинові речовини з бурякового жому можуть бути використані у виробництві харчових волокон, що додаються до хліба, печива, спагеті та м'ясних продуктів [10].

Після ензиматичної або хімічної обробки пектин з жому може бути перетворений на пектин-олігосахариди, які мають пребіотичні властивості [11]. Ще одним важливим вуглеводом у пектині буряка є арабінан, який також може використовуватись як пребіотик [12].

Буряковий жом є перспективною сировиною для виробництва біоетанолу, який є альтернативним джерелом відновлюваної енергії. Використання бурякового жому для біоетанолу не вимагає складної підготовки, оскільки цукровий буряк може бути безпосередньо перетворений в етанол. Це робить процес менш енергозатратним порівняно з іншими видами сировини, такими як крохмалісті або лігноцелюлозні матеріали [9, 13, 14].

Також існують дослідження щодо використання бурякового жому як зв'язуючого компонента у вугільних брикетах [15, 16]. Додавання жому підвищує міцність на стиск та зменшує вміст летких речовин. Отри-

мані брикети мають трохи меншу теплотворну здатність, ніж брикети без додавання рослинної сировини, але вона залишається в допустимих межах.

Загалом, буряковий жом як відхід цукрової промисловості вважається цінним ресурсом з погляду концепції циркулярної економіки [17].

З урахуванням позитивного результату використання відходів харчової промисловості рослинного походження [3–5] та свідчень про успішне застосування бурякового жому як в'язучого компонента у альтернативному твердому паливі [15, 16], доцільним було проведення досліджень з використання бурякового жому для виробництва альтернативного твердого палива.

Експериментальна частина. Об'єктом дослідження був буряковий жом, отриманий на виробничій лінії локального цукрового заводу у Львівській області України (рис. 1). Для збільшення терміну зберігання вторинної сировини та можливості подальшого формування альтернативного твердого палива, дослідний матеріал було осушено методом фільтраційного сушіння на експериментальній установці згідно методики [18], зважаючи на переваги даного методу [18] для збільшення тривалості зберігання сировини [3–5].

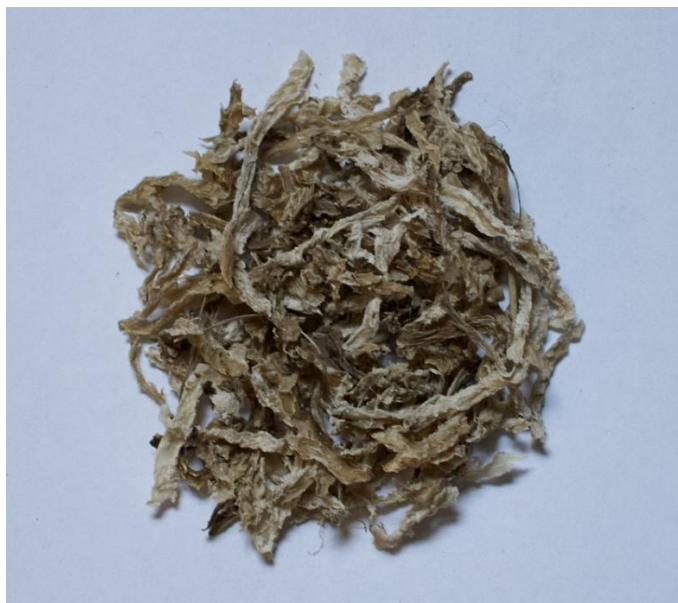


Рис. 1 – Осушений буряковий жом

Три основні показники дослідного матеріалу були визначені методом калориметричного спалювання: вміст води, вміст золи та теплота згорання. Всі ці вимірювання проводилися відповідно до Державних стандартів України [19–21]. Детально методику проведення калориметричних досліджень наведено у роботі авторів [4].

Формування твердопаливних брикетів з висушеного бурякового жому здійснювали за допомогою гідровлічного пресу марки П474А. Пресування дослідного матеріалу проводили за тиску 100 кгс/см² за температури 150 °С та рекомендаціями [3–5].

Результати та обговорення. Дослідні суміші для формування зразків твердого палива готували з попередньо висушеного бурякового жому з вмістом води ~9,81 % (рис. 1).

Враховуючи неоднорідність вторинної рослинної сировини для визначення середнього значення параметрів досліджуваного об'єкта проводили три паралельні експерименти. Результати калориметричних досліджень осушеного бурякового жому представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати експериментального визначення вищої теплотворної здатності осушеного бурякового жому

№ експ.	m^* , г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,		Зольність, % мас.
						кДж/кг	ккал/кг	
1	0,38585	0,59024	76,3	4,7	111,5	15908	3802	4,0
2	0,19735	0,29960	79,2	3,0	132,8	15965	3816	5,1
3	0,21821	0,33620	75,2	1,2	50,0	15826	3782	3,8
Середнє значення:						15900	3800	4,3

* m – маса речовини, яка згоріла за час досліді; q_n , q_{HNO_3} , q_c – кількість енергії, яка виділялась при згорянні бавовняної нитки (16704,2 Дж/г), утворенні розчину нітратної кислоти (59 Дж/г) та утвореної сажі (32800 Дж/г), відповідно; ΔT – істинне зростання температури у калориметричному досліді [4].

Порівнюючи отримані експериментальні дані калориметрії спалювання дослідних зразків бурякового жому (табл. 2), помітно, що значення вищої теплотворної здатності дещо менші за показники для енергетичної верби та міскантуса, які широко використовуються у промисловому виробництві твердопаливних брикетів з відновлювальної рослинної сировини [22, 23]. Також для порівняння наведені характеристики рослинної сировини, що була досліджена авторами раніше [3–5]. Незважаючи на це, буряковий жом залишається перспективною сировиною для виготовлення твердопаливних брикетів, оскільки його енергетичні характеристики знаходяться в межах європейських стандартів, що висуваються до твердого палива [24] і, таким чином, є достатніми для ефективного використання у паливній промисловості.

Таблиця 2

Значення вищої теплотворної здатності об'єктів дослідження та їх аналогів

Сировина рослинного походження	Осушений кавовий шлам	Осушена пивна дробина	Осушена кукурудзяна післяспиртова барда	Енергетична верба	Міскантус	Осушений буряковий жом
Теплотворна здатність, кДж/кг	≈ 21583	≈ 20005	≈ 19545	≈ 17600	≈ 17500	≈ 15900

Для формування зразків твердопаливних брикет було використано гідравлічний прес марки П474А. Приклад одержаного твердопаливного брикету з бурякового жому наведено на рис. 2. З урахуванням високого вмісту лігніну, пресування відбувалося без додавання додаткових в'язучих речовин, що є додатковою перевагою при формуванні твердого палива.

**Рис. 2 – Зразок брикетованого альтернативного твердого палива з осушеного бурякового жому**

Дані результатів дослідження вищої теплотворної здатності та зольності зразків, виготовлених із бурякового жому, наведено у табл. 3. Вологість усіх брикетованих зразків становила <1% мас.

Таблиця 3

Результати експериментального визначення вищої теплотворної здатності за даними калориметрії спалювання зразків твердопаливних брикет з осушеного бурякового жому

№ експ.	m, г	ΔT , В	$q_{нз}$, Дж	$q_{нз03}$, Дж	$q_{сз}$, Дж	Q,		Зольність, % мас.
						кДж/кг	ккал/кг	
1	0,66682	1,0450	77,5	7,7	168,9	16343	3906	4,7
2	0,58597	0,91697	83,9	5,9	144,3	16286	3892	5,0
3	0,93860	1,4664	76,8	8,9	234,5	16325	3902	4,8
Середнє значення:						16318	3900	4,8

Як видно з даних, наведених у табл. 1 та 3, значення вищої теплотворної здатності брикетованого палива з бурякового жому є дещо вищим, ніж у несформованого висушеного матеріалу. Це, найімовірніше, пов'язано зі збільшенням густини брикетів та додаткової втрати вологи під час пресування за підвищеної температури.

Одержані твердопаливні брикети з бурякового жому за своїми параметрами практично відповідають німецькому стандарту DIN 51731: вміст води (<12 %), вміст золи (<1,5 %), теплотворна здатність (15512÷19515 кДж/кг) [24]. В той час як вологість та вища теплотворна здатність зразків знаходяться у встановлених межах, значення зольності виготовлених зразків твердого палива з бурякового жому перевищують верхню межу стандарту. Невідповідність стандартам можна регулювати, створюючи композитні брикети – поєднуючи буряковий жом з іншими видами біомаси для досягнення оптимальних характеристик брикетів.

ваного твердого палива.

Висновки. В результаті досліджень було отримано готові до використання зразки твердого палива з бурякового жому, які характеризуються високою теплотворною здатністю, низькою зольністю та екологічною чистотою. За результатами дослідження теплотворна здатність складала ≈ 16318 кДж/кг, вологість < 1 % мас., а зольність — 4,8 % мас. Одержані зразки відповідають вимогам існуючих стандартів до твердого палива, за виключенням підвищеної зольності. Дану невідповідність можна регулювати шляхом створення композитних твердопаливних брикетів, поєднуючи буряковий жом з іншими видами біомаси для досягнення оптимальних характеристик.

Отримані результати вказують на перспективність використання бурякового жому як альтернативного твердого палива. Зокрема, це дозволить знизити залежність від традиційних повільновідновлювальних паливних ресурсів і покращити екологічну ситуацію.

Виготовлення альтернативного твердого палива з бурякового жому забезпечує додаткове використання великих об'ємів відходів цукрової промисловості, що сприяє раціональному використанню вторинної рослинної сировини. Додатковою перевагою є низька вартість вихідної сировини, що вказує на економічні перспективи. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку оптимальних композитних складів для досягнення відповідності стандартам, що висуваються до твердого палива, а також розрахунок енергозатрат на осушення бурякового жому для оцінки економічної ефективності.

References

1. Misra, V., & Shrivastava, A. K. (2022). Understanding the sugar beet crop and its physiology. *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing*, 11–25. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_2
2. Zhnyva-2023: V Ukraini namolocheno 71,5 mln tonn oliinykh ta zernovykh kultur. Ministerstvo ahraimoi polityky ta prodovolstva Ukrainy. [Harvest-2023: Ukraine harvested 71.5 million tonnes of oilseeds and grains. Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine.]. (2023, November 10). <https://minagro.gov.ua/news/zhnyva-2023-v-ukraini-namolocheno-715-mln-tonn-oliinykh-ta-zernovykh-kultur>
3. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Duleba, V. P., & Sobechko, I. B. (2022). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(2), 216–221. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.256749>
4. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Zhrebetskyi, R. R., & Sobechko, I. B. (2022). Preparation of an alternate solid fuel from alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 54–59. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-140-1-54-59>
5. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., & Sobechko, I. B. (2022). Using coffee production waste as a raw material for solid fuel. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(4), 588–594. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i4.265116>
6. Semenova, O. I., Bubliienko, N. O., & Vitiuk, O. I. (2013). Suchasni napriamky vykorystannia ta utylizatsii buriakovoho zhomu [Modern ways of using and utilising beet pulp]. *Efektivni Nastroje Modernich Ved – 2013 : Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*, 27.04. – 05.05.2013., 10–12. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/180c2d96-4ec7-4bfd-ad13-19349fc8aaaa/content>
7. Muir, B.M., Anderson, A.R. Development and Diversification of Sugar Beet in Europe. *Sugar Tech*, 24, 992–1009 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01036-9>
8. Joanna, B., Michal, B., Piotr, D., Agnieszka, W., Dorota, K., & Izabela, W. (2018). Sugar beet pulp as a source of valuable biotechnological products. *Advances in Biotechnology for Food Industry*, 359–392. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811443-8.00013-x>
9. Zheng, Y., Lee, C., Yu, C., Cheng, Y.-S., Zhang, R., Jenkins, B. M., & VanderGheynst, J. S. (2013). Dilute acid pretreatment and fermentation of sugar beet pulp to ethanol. *Applied Energy*, 105, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.070>
10. Yapo, B.M., Gnagri, D. (2015). Pectic Polysaccharides and Their Functional Properties. In: Ramawat, K., Mérillon, J.M. (eds) *Polysaccharides*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0_62
11. Prandi, B., Baldassarre, S., Babbar, N., Bancalari, E., Vandezande, P., Hermans, D., Bruggeman, G., Gatti, M., Elst, K., & Sforza, S. (2018). Pectin oligosaccharides from sugar beet pulp: Molecular characterization and potential prebiotic activity. *Food & Function*, 9(3), 1557–1569. <https://doi.org/10.1039/c7fo01182b>
12. Al-Tamimi, M. A. H. M., Palframan, R. J., Cooper, J. M., Gibson, G. R., & Rastall, R. A. (2006). In vitro fermentation of sugar beet Arabinan and Arabino-oligosaccharides by the human Gut Microflora. *Journal of Applied Microbiology*, 100(2), 407–414. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02780.x>
13. Mojovic, L., Pejin, D., Grujic, O., Markov, S., Pejin, J., Rakin, M., Vukasinovic, M., Nikolic, S., & Savic, D. (2009). Progress in the production of bioethanol on starch-based feedstocks. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 15(4), 211–226. <https://doi.org/10.2298/ciceq0904211m>
14. Gumienka, M., Szambelan, K., Jeleń, H., & Czarnecki, Z. (2014). Evaluation of ethanol fermentation parameters for bioethanol production from Sugar Beet Pulp and juice. *Journal of the Institute of Brewing*. <https://doi.org/10.1002/jib.181>

15. Zarringhalam-Moghaddam, A., Gholipour-Zanjani, N., Dorosti, S., & Vaez, M. (2011). Physical properties of solid fuel briquettes from bituminous coal waste and biomass. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 17(4), 434–438. <https://doi.org/10.1007/s12404-011-0415-7>
16. Zanjani, N. G., Moghaddam, A. Z., & Dorosti, S. (2013). Physical and chemical properties of beet pulp/mezino bituminous coal briquettes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(22), 2173–2180. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.532188>
17. Usmani, Z., Sharma, M., Diwan, D., Tripathi, M., Whale, E., Jayakody, L. N., Moreau, B., Thakur, V. K., Tuohy, M., & Gupta, V. K. (2022). Valorization of sugar beet pulp to value-added products: A Review. *Bioresource Technology*, 346, 126580. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126580>
18. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrskaya, V., Barabakh, S., & Hnativ, Z. (2024). Kinetic regularities of the filtration drying of barley brewer's spent grain. *Chemistry & Chemical Technology*, 18(1), 66–75. <https://doi.org/10.23939/chcht18.01.066>
19. State Standart of Ukraine "Solid biofuels. Determination of moisture content. Drying method in a drying oven. Total moisture" [Tverde biopalyvo. Vyznachennya vmistu vology. Metod vysushuvannya u sushilnij shafi. Zagalna vologa] (DSTU EN 14774-2:2013). (2013).
20. State Standart of Ukraine "Solid biofuels. Method for determination of ash content" [Biopalyvo tverde. Metod vyznachennya vmistu zoly] (DSTU ISO 18122:2017). (2017).
21. State Standart of Ukraine "Solid biofuels. Method for determining the calorific value" [Biopalyvo tverde. Metod vyznachennya teplotvirnoyi zdatsnosti] (DSTU EN 14918:2016). (2016).
22. Khivrych, O. B., Kvak, V. M., Kas'kiv, V. V., Mamajsur, V. V., & Makarenko, A. S. (2011). Energetychni roslyny yak alternatyva tradytsijnym vydam palyva [Energy plants as an alternative to traditional fuels]. *Agrobiologiya*, 6, 153–156. http://nbuv.gov.ua/UJRN/agr_2011_6_39
23. Malyovanyi, M.S., & Bat', R.Y. (2012). Hranuliuvannya pavyvnykh materialiv [Fuels pelleting]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/8(59), 10–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.4599>
24. Garcia-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for Pellet Quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537–3540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.013>

RESEARCH ON THE ALTERNATIVE SOLID FUEL PRODUCTION FROM BEET PULP

**Ivashchuk O.S. PhD, Senior Research Fellow, Associate Professor, Atamanyuk V.M. DSc, Professor,
Chyzhovych R.A. Post-graduate Student, Manastyrskaya V.A. Student,
Sobechko I.B. DSc, Associate Professor
Lviv Polytechnic National University, Lviv**

Abstract. This paper presents the results of studies on the possibility of producing alternative briquetted solid fuel from beet pulp, which will contribute to the utilization of sugar production waste and the rational use of natural resources. To increase the shelf life of secondary raw materials and the possibility of further forming an alternative solid fuel, beet pulp was pre-dried by filtration drying. Using the calorimetric combustion method, the main parameters of the experimental material were investigated: moisture content, ash content and calorific value. It was determined that for unformed plant material, a calorific value is about 15900 kJ/kg, a moisture content is less than 1% wt., and an ash content is about 4.3 % wt. The obtained results showed the feasibility of further research on the creation of briquetted solid fuel samples from the dried beet pulp. It was found that the produced with the hydraulic press briquettes have the calorific value of about 16318 kJ/kg, the moisture content less than 1% wt., and the ash content about 4.8 % wt. The developed solid fuel briquettes from beet pulp are close in their parameters to the existing European standards for solid fuels. The results obtained indicate the prospects of using beet pulp as an alternative solid fuel, which will reduce dependence on traditional slowly renewable fuel resources and ensure additional use of large volumes of sugar industry waste, which will contribute to the rational use of secondary plant materials.

Keywords: alternative solid fuel, beet pulp, biomass, secondary raw materials, briquettes, rational environmental management.

Список використаних джерел

1. Misra, V., & Shrivastava, A. K. (2022). Understanding the sugar beet crop and its physiology. *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing*, 11–25. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_2
2. Жнива-2023: В Україні намоложено 71,5 млн тон олійних та зернових культур. Міністерство аграрної політики та продовольства України. (2023, 10 листопада). <https://minagro.gov.ua/news/zhnyva-2023-v-ukraini-namolocheno-715-mln-tonn-oliinykh-ta-zernovykh-kulturn>
3. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Duleba, V.P., & Sobechko, I. B. (2022). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(2), 216–221. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.256749>

4. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Zhrebetskyi, R. R., & Sobechko, I. B. (2022). Preparation of an alternate solid fuel from alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 54–59. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-140-1-54-59>
5. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., & Sobechko, I. B. (2022). Using coffee production waste as a raw material for solid fuel. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(4), 588–594. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i4.265116>
6. Семенова, О. І., Бублиєнко, Н. О. & Вітюк, О. І. (2013). Сучасні напрямки використання та утилізації бурякового жому. *Efektivni Nastroje Modernich Ved – 2013: Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції*, 27.04. – 05.05.2013., 10–12. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/180c2d96-4ec7-4bfd-ad13-19349fc8aaaa/content>
7. Muir, B.M., Anderson, A.R. Development and Diversification of Sugar Beet in Europe. *Sugar Tech*, 24, 992–1009 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01036-9>
8. Joanna, B., Michal, B., Piotr, D., Agnieszka, W., Dorota, K., & Izabela, W. (2018). Sugar beet pulp as a source of valuable biotechnological products. *Advances in Biotechnology for Food Industry*, 359–392. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811443-8.00013-x>
9. Zheng, Y., Lee, C., Yu, C., Cheng, Y.-S., Zhang, R., Jenkins, B. M., & VanderGheynst, J. S. (2013). Dilute acid pretreatment and fermentation of sugar beet pulp to ethanol. *Applied Energy*, 105, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.070>
10. Yapo, B.M., Gnagri, D. (2015). Pectic Polysaccharides and Their Functional Properties. In: Ramawat, K., Mérillon, J.M. (eds) *Polysaccharides*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0_62
11. Prandi, B., Baldassarre, S., Babbar, N., Bancalari, E., Vandezande, P., Hermans, D., Bruggeman, G., Gatti, M., Elst, K., & Sforza, S. (2018). Pectin oligosaccharides from sugar beet pulp: Molecular characterization and potential prebiotic activity. *Food & Function*, 9(3), 1557–1569. <https://doi.org/10.1039/c7fo01182b>
12. Al-Tamimi, M. A. H. M., Palframan, R. J., Cooper, J. M., Gibson, G. R., & Rastall, R. A. (2006). In vitro fermentation of sugar beet Arabinan and Arabino-oligosaccharides by the human Gut Microflora. *Journal of Applied Microbiology*, 100(2), 407–414. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02780.x>
13. Mojovic, L., Pejin, D., Grujic, O., Markov, S., Pejin, J., Rakin, M., Vukasinovic, M., Nikolic, S., & Savic, D. (2009). Progress in the production of bioethanol on starch-based feedstocks. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 15(4), 211–226. <https://doi.org/10.2298/ciceq0904211m>
14. Gumienna, M., Szambelan, K., Jeleń, H., & Czarnecki, Z. (2014). Evaluation of ethanol fermentation parameters for bioethanol production from Sugar Beet Pulp and juice. *Journal of the Institute of Brewing*. <https://doi.org/10.1002/jib.181>
15. Zarringhalam-Moghaddam, A., Gholipour-Zanjani, N., Dorosti, S., & Vaez, M. (2011). Physical properties of solid fuel briquettes from bituminous coal waste and biomass. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 17(4), 434–438. <https://doi.org/10.1007/s12404-011-0415-7>
16. Zanjani, N. G., Moghaddam, A. Z., & Dorosti, S. (2013). Physical and chemical properties of beet pulp/mezino bituminous coal briquettes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(22), 2173–2180. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.532188>
17. Usmani, Z., Sharma, M., Diwan, D., Tripathi, M., Whale, E., Jayakody, L. N., Moreau, B., Thakur, V. K., Tuohy, M., & Gupta, V. K. (2022). Valorization of sugar beet pulp to value-added products: A Review. *Bioresource Technology*, 346, 126580. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126580>
18. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrsk, V., Barabakh, S., & Hnativ, Z. (2024). Kinetic regularities of the filtration drying of barley brewer's spent grain. *Chemistry & Chemical Technology*, 18(1), 66–75. <https://doi.org/10.23939/chcht18.01.066>
19. Державний стандарт України “Тверде біопаливо. Визначення вмісту вологи. Метод висушування в сушильній шафі” (ДСТУ EN 14774-2:2013). (2013).
20. Державний стандарт України “Біопаливо тверде. Метод визначення вмісту золи” (ДСТУ ISO 18122:2017). (2017).
21. Державний стандарт України “Тверде біопаливо. Метод визначення теплотворної здатності” (ДСТУ EN 14918:2016). (2016).
22. Хіврич, О. Б., Квак, В. М., Каськів, В. В., Мамайсур, В. В., & Макаренко, А. С. (2011). *Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива*. 6, 153–157. http://nbuv.gov.ua/UJRN/agr_2011_6_39
23. Мальований, М. С., & Бать, Р. Я. (2012). Гранулювання паливних матеріалів. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/8(59), 10–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.4599>
24. García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for Pellet Quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537–3540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.013>

Отримано в редакцію 16.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 16.07.2024
Approved 25.09.2024

ВИВЧЕННЯ БІОЕЛЕКТРИЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ ВОДНИХ ЕКСТРАКТІВ РОСЛИН

Дячок В.В. д. т. н. професор
Національний університет «Львівська Політехніка»

Анотація. На сьогоднішній день в Україні має місце суттєве недопостачання енергетичних ресурсів (зокрема електроенергії) на фоні різкого загострення екологічних проблем. Ця тенденція є актуальною і в глобальному масштабі, оскільки використання викопного палива, як основного джерела енергії, є причиною природних катаклізмів. Такий стан справ зумовлює необхідність широкого застосування так званих відновлювальних джерел енергії. Це стосується енергії сонця, вітру, геотермальної і таке інше. Розвиток відновлюваної енергетики нерозривно пов'язаний з розвитком біотехнологій, зокрема біоелектрики. Розробка цього напрямку в біотехнології передбачає вирішення актуальних завдань сьогодення, зокрема розроблення екологічно безпечних технологій генерації електричної енергії. Розвиток подій за таким сценарієм передбачає зменшення викидів парникових газів та інших забруднювачів у навколишнє середовище, гарантію енергетичної безпеки, а також розроблення підґрунтя для створення мережі стаціонарних джерел біоелектрики, як частини інфраструктури для автомобілів на паливно-коміркових елементах.

Електрична енергія відіграє важливу роль і у нашому повсякденному побутовому житті, а її споживання постійно зростає. Оскільки традиційне її виробництво на основі викопного палива має величезні економічні та екологічні проблеми, то подолання їх можливе за рахунок впровадження біотехнологій. Потреба в біоенергії стає невідомою для заміни викопного палива. Власне природний фотосинтез пропонує засоби і методи для цього і передусім через застосування рослин. Наземні рослини подекуди вже використовувалися як джерело біоенергії, і це використання буде тільки зростати в майбутньому, незважаючи на можливі супутні проблеми.

Дане дослідження стосується нової технології виробництва електроенергії, а саме, біотехнології, тобто використанням водних екстрактів різних рослинних ресурсів. Деякі рослини в природі мають властивості накопичувати в клітинах біологічно активні сполуки здатні до створення електролітичного середовища, власне вони придатні для виробництва електроенергії, які можна посилювати.

Keywords: біоелектрика, рослинна сировина, сукуленти, екстракт, акумуляторна батарея на біомасі.

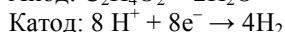
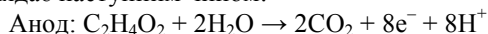
Постановка проблеми. Електроенергія є основною потребою в усіх секторах життєдіяльності людства і включає промисловість, транспорт, сільське та побутове господарство. Без енергії неможливий розвиток науки та технологій. Ліва частина електроенергії надходить з невідновлюваних джерел, включаючи спалювання вугілля, нафти та природного газу. Ці джерела з одного боку вичерпуються з високою швидкістю, з іншого є потужним джерелом забруднення навколишнього середовища із яких парникові гази є найбільш небезпечними. Викопне паливо є потужним чинником глобального потепління та забруднення атмосфери через збільшення парникових газів, летких і твердих речовин в атмосфері [1].

З метою запобігання цих недоліків, у всьому світі розвиваються екологічно чисті технології, які використовують відновлювані джерела енергії. Прикладом таких є сонячна енергія, енергія вітру, біопаливо тощо. Останнім часом все більше спостерігаються випадки залучення біотехнологій для одержання біоелектрики [2,3]. Біоелектричні елементи використовуються для зарядки мобільних акумуляторів, настінних годинників, гаджетів тощо. Перспективним напрямком на сьогоднішній день для одержання енергії є застосування біомаси. Проведені дослідження з використанням різних видів рослинних екстрактів засвідчують перспективність цього напрямку в техніці та біотехнологіях, оскільки є потенційним джерелом енергії для порівняно дешевого виробництва біоелектрики [4,5]. Виробництво біоелектрики з водних екстрактів певних видів та морфологічних органів рослинної сировини, як моделі гальванічних елементів з використанням гальванічних електродів (цинкових, мідних, вуглецевих та інших) зменшило б використання невідновлюваних ресурсів, зокрема викопного палива. Це в свою чергу призвело б до зменшення загрози глобального потепління [6,7].

Різні морфологічні органи рослини, такі як листя, корені, квіти, плоди тощо є природною біоелектричною системою, яка містить йони органічного та неорганічного походження. Контрольований і регульований йонний рух у рослинах робить специфічну біосистему, яка відрізняється від звичайної фізичної чи електролітичної системи. Таким чином, певні морфологічні органи рослини можна назвати «біоелектролітичними системами» або «біоенергопровідними системами». Власне йонна провідність є основним чинником виникнення біоелектрики. Специфічна електролітична система, виявлена в живих рослинах, має велике значення, як джерело енергії малої потужності [7,8]. Тому використання рослинної сировини як нового нетрадиційного матеріалу для розробки джерел біоенергії є актуальним завданням.

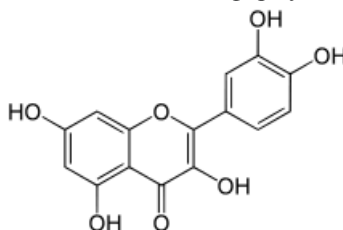
Мета роботи полягає у вивченні біоелектричних потенціалів водних екстрактів деяких рослин (сукулентів).

Теоретична частина. Найважливіша відмінність між біоелектричними струмами в живих організмах і типом електричного струму, який використовується для виробництва світла, тепла чи енергії, полягає в тому, що біоелектричний струм - це потік йонів, органічного та неорганічного походження, що несуть електричний заряд, тоді як стандартна електрика - це рух електронів. Біоелектрику можна генерувати, коли два електроди з різним потенціалом занурюють у біомасу створюючи тим самим умови для руху йонів. Йони, як правило, течуть від нижчого потенціалу до вищого потенціалу, тобто від катода до анода. Основна біохімічна реакція, яка описує процес виробництва біоелектрики, за участі органічних речовин (оцтової кислоти) виглядає наступним чином:



Різні морфологічні органи рослини, такі як листя, корені, квіти, плоди тощо є природною біоелектричною системою, яка містить йони органічного та неорганічного походження. Контрольований і регульований йонний рух у рослинах робить специфічну біосистему, яка відрізняється від звичайної фізичної чи електролітичної системи. Таким чином, певні морфологічні органи рослини можна назвати «біоелектролітичними системи» або «біоенергопровідними системи» [2,7,8]. Власне йонна провідність є основним чинником виникнення біоелектрики. Специфічна електролітична система, виявлена в живих рослинах, має велике значення, як джерело енергії малої потужності. Тому використання рослинної сировини як нового нетрадиційного матеріалу для розробки джерел біоенергії є актуальним завданням.

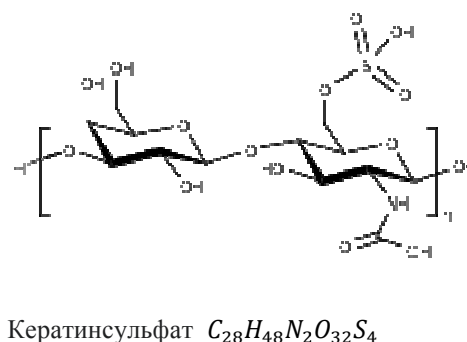
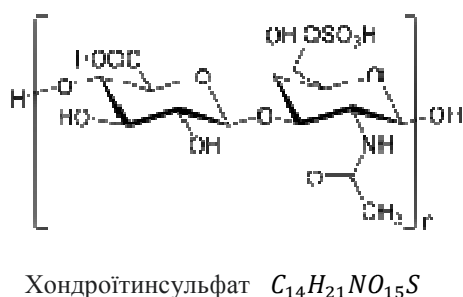
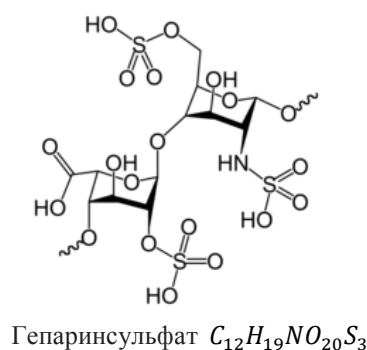
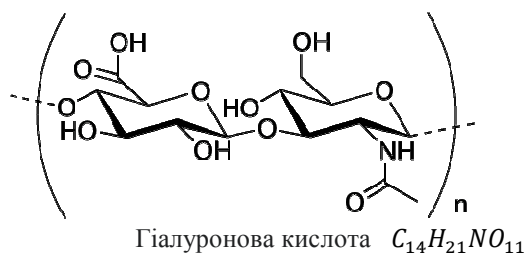
Опис рослини. Всі рослини, що використовувались у дослідженні відносять до лікарських рослин та належать до сукулентів. Сукуленти - це рослини, в яких сформовано особливі тканини призначені для накопичення вологи. Анатомічна будова цих рослин має характерні особливості, зокрема епідерміс потовщений та вкритий товстою плівкою воску. Площа листя, стебла організовані таким чином, щоби мінімально випаровувати вологу. В той час сукуленти можуть поглинати та запасати вологу та інші гетероатоми необхідні для формування тканин із повітря. Для цього у них сильно розвинута структура ворсинок. Особливістю метаболізму цих рослин є те, що вони тривалий час можуть перебувати в посушливих умовах завдяки раціональному використанню вологи накопиченої за вологий період. Спільними рисами цих рослин є і те, що в листях містяться флавоноїди. Флавоноїди - фізіологічно активні сполуки, які представляють собою конденсовані ароматичні цикли, і можуть бути представлені загальною формулою:



Флавоноїди накопичуються майже у всіх рослинах в тому числі і в хлорофілмісних мікроводоростях, зустрічаються також і в деяких видах мікроорганізмів. Локалізуються в основному у всіх морфологічних органах - листі, квітах, стеблі та коренях з кореневищами. Кількісний вміст їх може знаходитись від 0,1 до 20 %. Максимального значення досягається в залежності від фази вегетації. Зазвичай під час цвітіння рослини досягається пік накопичення, в подальшому їх кількість зменшується [9].

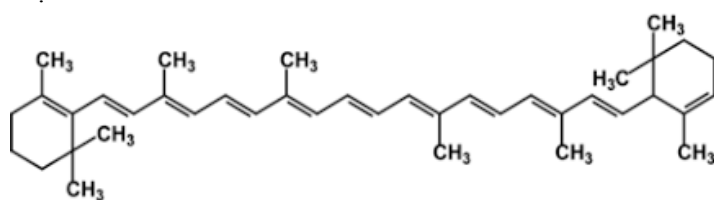
Красула яйцеподібна (*Crassula portulaca*), в народі її називають грошове або нефритове дерево. Походження ця рослина має з південної Африки. Також першопочаткове розповсюдження її знаходилось в Мозамбіку. В Європейській частині материка рослина позиціонується здебільшого як кімнатна. Як і більшість сукулентів це вічно зелена рослина з масивними гілками та листям в переважній більшості заокругленої форми. За певних обставин зелений колір може змінюватись на жовтуватий аж до оранжевого. Причиною зміни кольору є інтенсивність світлового опромінення. За умов інтенсивного ультрафіолетового опромінення в листі накопичується велика кількість флавоноїдів, які з одного боку захищають рослину від палючого сонця, а з іншого флавоноїди є причиною утворення великої кількості вільних радикалів, тим самим покращують біоелектричний потенціал водних екстрактів рослини. Квітне красула як правило у прохолодний період року, відносно темний та сухий. В цей період також спостерігається значне накопичення флавоноїдів.

Красула також накопичує миш'як та дев'ятнадцять інші хімічних елементів. Споміж них найбільше калію (K^+) до 25,80 мг/г, силіцію (Si^{+4}) 11,20 мг/г, кальцію (Ca^{+2}) - 10,0 мг/г. В листі, як і всіх представників сукулентів міститься велика кількість вологи, клітковини та слизу представленого мукополіцукрами. Окрім того присутні наступні органічні сполуки:

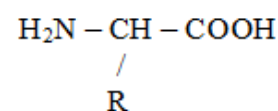


Наявність великої кількості мінеральних солей та функціональних груп в органічних сполуках є причиною утворення йонів [9].

Алоє (Aloe) – батьківщина цієї рослини Африка. На сьогоднішній день алоє розповсюджене у всіх регіонах планети. Рослина не вибаглива та пристосовується у будь якому кліматичному поясі. Зараз нараховується сотні різновидів алоє в тому числі і генетично модифікованих. За хімічним складом є досить різноманітна. Багата макро та мікроелементами. Це і пояснює її цілющі властивості в медицині і корисні в техніці та технологіях продукування біоелектрики. Серед макроелементів у складі листя алоє найбільше міститься кальцію (Ca^{+2}) - 79,1 мг/г, – барію (Ba^{+2}) 14,90 мкг/г, селену (Se^{+2}) -11,90 мкг/г та стронцію (Sr^{+2}) 17,64 мкг/г. Особливу увагу привертає значний вміст літію (Li^{+}) -162,00 мкг/г та бору (B^{+3}) 94,00 мкг/г. Крім мінеральних речовин алоє включає і органічні сполуки, а саме амінокислоти, каротиноїди, аскорбінову кислоту, вітамінами групи В, багата вітаміном Е тощо [9].



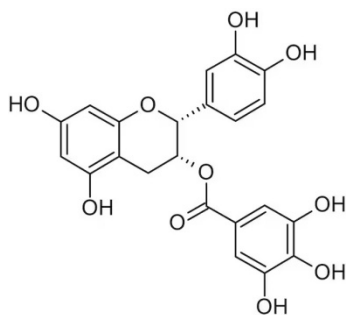
каротиноїди



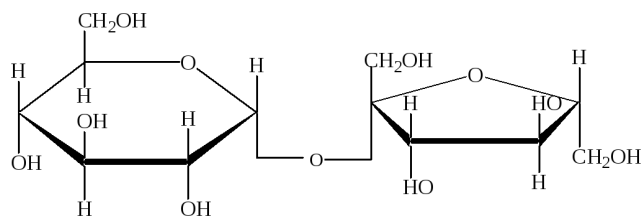
амінокислоти

Каланхоє перисте (Kalanchoe pinnata) – це типовий представник сукулентів. Відповідно, як і більшість сукулентів це вічно зелена багаторічна трав'яниста рослина. Батьківщиною каланхоє є тропіки а також тропічні райони суходолу. В Європейській частині як правило його вирощують у кімнатних умовах. За останній час з'явилися повідомлення про можливість культивування його у напівпромислових умовах (фермах). За таких умов рослина може квітнути протягом тривалого проміжку часу. Зазвичай в період цвітіння накопичується найбільша кількість флавоноїдів, що має немаловажне значення в продукуванні біоелектрики.

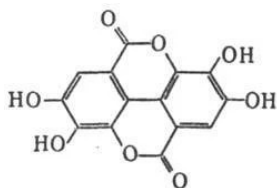
Що стосується хімічного складу рослини то тут слід звернути увагу на значний вміст органічних кислот та інших супутніх органічних сполук таких як катехіни, поліцукри, таніни, дубильні речовини тощо. Серед органічних кислот – щавелеву, оцтову, яблучну, аскорбінову та інші. Каланхоє має багатий мінеральний склад, зокрема містить мікро- та макроелементи такі як залізо (Fe^{+2}), магній (Mg^{+2}), алюміній (Al^{+3}), мідь (Cu^{+2}), кальцій (Ca^{+2}), манган (Mn^{+3}), кремній (Si^{+4}) та інші [9].



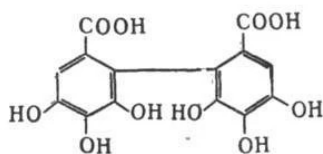
Катехін



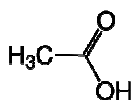
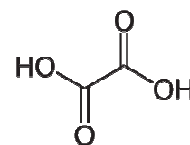
Поліцукри



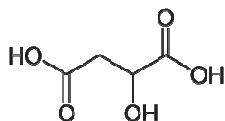
Таніни



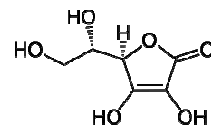
Щавлева кислота



Оцтова кислота

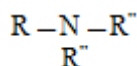


Яблунева кислота

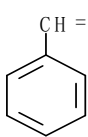


Аскорбінова кислота

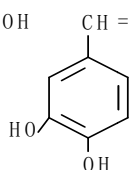
Валеріана (*Valeriana L.*) – відносять до роду багаторічних рослин. На Європейській території нараховується понад тридцять різновидів рослин. Місцем локалізації фізіологічно активних речовин у рослині є корені з кореневищами – *Rhizomata cum radicibus Valerianae*. Валер'яна багата як органічними сполуками так і мінеральними солями. В першу чергу слід зазначити велику кількість у коренях та кореневищах ефірних олій – 0,2-3,5%. Валопотріати містяться у живій рослині. При сушінні та зберіганні рослинної сировини валопотріати розкладаються до простіших органічних сполук. Серед інших органічних сполук у коренях з кореневищами присутні похідні фенолкарбонових кислот та алкалоїди. Алкалоїди за хімічною будовою представляють собою похідні аміаку в якому гідрогени заміщені органічними радикалами:



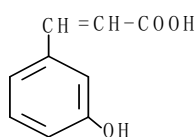
Основні органічні сполуки приведено нижче:



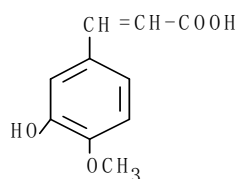
корична кислота



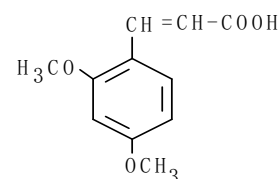
кофейна кислота



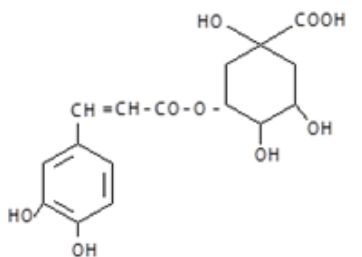
кумарова кислота



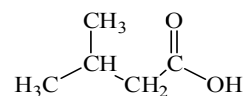
ферулова кислота



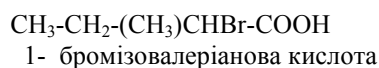
синапова кислота



хлорогенова кислота



ізовалеріанова кислота



Крім органічних сполук присутні такі основні катіони металів: K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+3} , Mn^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} , Cr^{+3} , Al^{+3} , Ba^{+2} , V^{+3} , Se^{+2} , Ni^{+} , Sr^{+2} , I^- , Br^- , B^{+3} [9].

Приготування водного екстракту. Свіже листя після промивання дистильованою водою розкладали на фільтрувальний папір, щоб видалити краплі води. Потім листя подрібнювали за допомогою лабораторної траворізки і товкачика на дрібні фрагменти і зважували. Екстракцію проводили в скляній ємності де моделювали роботу апарату з турбінною мішалкою. Екстракти фільтрували за допомогою фільтрувального паперу і об'єми доводили до кінцевої величини, шляхом промивання осаду дистильованою водою. Співвідношення фаз т.т. – р. становило 1-5.

Динаміку накопичення органічних кислот в екстракті досліджувальної рослинної сировини вивчали в скляній ємності в якій моделювали роботу апарату з турбінною мішалкою. Кількісний вміст органічних кислот в екстракті визначали кондуктометричним методом за методикою [10].

Вимірювання провідності. Екстракти кожного зразку піддавали вимірюванню провідності (рис. 1) за допомогою вимірювальної комірки. Відбирали встановлений об'єм екстракту, приблизно 40 мл і визначали провідність, занурюючи електроди в екстракти.

Вимірювання напруги та струму. Екстракт кожного зразка піддавали вимірюванню напруги та сили струму за допомогою мультиметра, як показано на рисунку 1. Підключені до мультиметра електроди занурювали у розчин екстракту. Зчитування значень мультиметра проводили кожні п'ять хвилин. Отримували залежність напруги від часу.

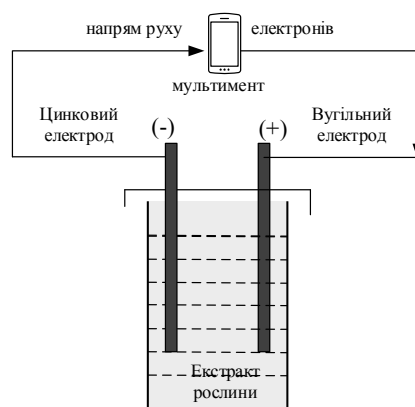


Рис. 1 – Вимірювання провідності рослинних екстрактів

Біоелектричний елемент включав два види електродів, цинковий та вугільний встановлені у скляній ємності – комірці. Об'єм комірки становив 50 мл. Такі три гальванічні елементи були окремо з'єднані в послідовний і паралельний ланцюг для подальшого дослідження. Окремі набори були підготовлені для різних трьох типів рослинних екстрактів рисунок 2 і рисунок 3. Потужність розраховували як добуток сили струму і напруги $P=VI$.

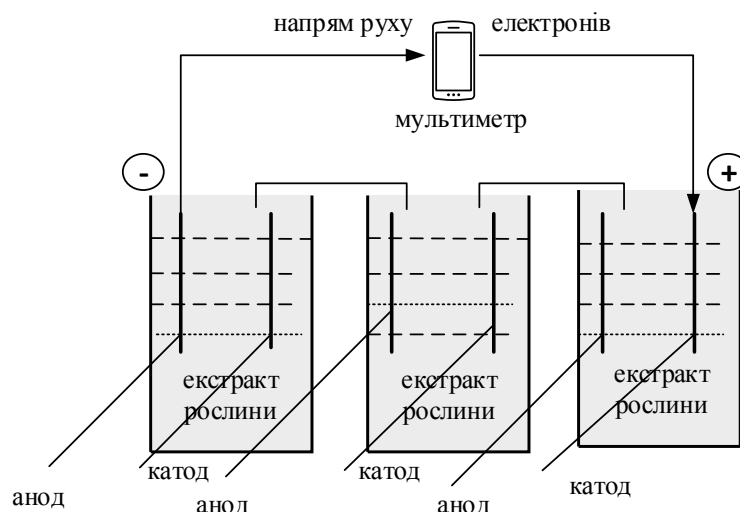


Рис. 2 – Принципова схема гальванічних елементів, з'єднаних послідовно для вимірювання напруги та струму рослинних екстрактів

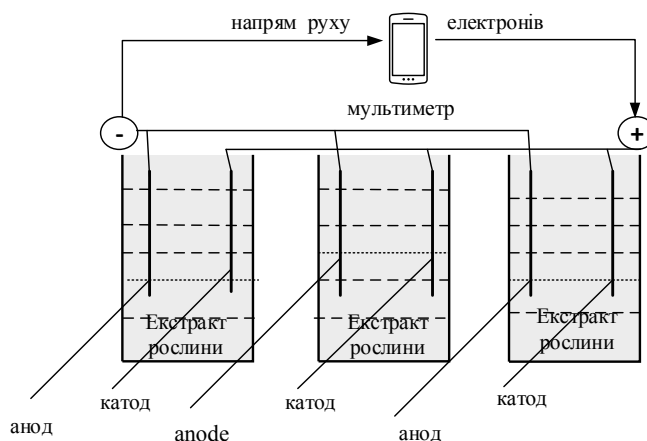


Рис. 3 – Принципова схема гальванічних елементів, з'єднаних паралельно для вимірювання напруги та струму рослинних екстрактів

Експериментальна частина. Біоенергія як чисте та стійке паливо одержане за використання відновлюваних джерел енергії, таких як біомаса, набуває широкого розвитку [11]. Розроблення концепції застосування водних екстрактів деяких видів рослинної сировини із соковитим листям, генерувати електроенергію є важливим завданням. Оскільки внаслідок традиційного використання акумуляторної батареї в техніці чи побуті найбільш поширені електроліти спричиняють загрозу навколишньому середовищу. В той же час водні екстракти певних видів рослин можна використовувати як електроліти, оскільки всі рослинні матеріали містять різні типи неорганічних і органічних електролітичних сполук, які легко поглинаються кореневою системою традиційних рослин та метаболізують без шкоди навколишньому середовищу. У цьому дослідженні водні екстракти Красули яйцеподібної (*Crassula portulacea*), Алое (*Aloe*), Каланхоє перистого (*Kalanchoe pinnata*), Валер'яна (*Valeriana*) корені з кореневищами використовувалися для дослідження властивостей електричного потенціалу, зокрема провідності, сили струму і напруги. Було помічено, що найбільшу провідність порівняно з іншими екстрактами має водний екстракт коренів з кореневищами Валер'яни (*Valeriana*). Як показано в таблиці 1, *Valeriana* має провідність (3.98 мСм/см) тоді листя *Aloe* (3.9 мСм/см). *Kalanchoe pinnata* має меншу провідність (2.65 мСм/см) порівняно з *Aloe* і *Crassula portulacea* (2.84 мСм/см). Це пояснюється хімічним складом рослинної сировини, зокрема значною кількістю мінеральних солей та органічних сполук. *Valeriana* зареєструвала вищу напругу порівняно з іншими трьома рослинами, як показано в таблиці 1. Екстракти *Crassula portulacea* продемонстрували найменший потенціал напруги.

Таблиця 1

Отримані біоелектричні параметри досліджуваних екстрактів

Назва сировини	К-ть. комірок	σ мСм/см провідність	Послідовне з'єднання			Паралельне з'єднання		
			U (В) напруга	I (мА) струм	P (мВт) потужність	U (В) напруга	I (мА) струм	P (мВт) потужність
Алое (<i>Aloe</i>)	1	3.9	0.91	1.25	1.14	0.91	1.26	1.14
	2		1.79	1.23	2.26	0.90	2.48	2.23
	3		2.73	1.26	3.43	0.92	3.63	3.33
Каланхоє (<i>Kalanchoe pinnata</i>)	1	2.65	0.88	1.82	1.60	0.88	1.82	1.60
	2		1.63	1.83	2.98	0.87	2.93	2.54
	3		2.25	1.81	4.07	0.89	4.98	4.43
Красула (<i>Crassula portulacea</i>)	1	2.84	0.81	0.80	0.64	0.81	0.81	0.65
	2		1.51	0.83	1.25	0.80	1.52	1.21
	3		2.39	0.79	1.88	0.82	2.27	1.86
Валер'яна (<i>Valeriana</i>)	1	3.98	0.92	1.31	1.21	0.93	1.32	1.22
	2		1.81	1.30	2.35	0.92	2.58	2.38
	3		2.94	1.29	3.79	0.92	3.76	3.46

Окрім цього, результати дослідження показали, що напруга ланцюга послідовно з'єднаних комірок збільшувалася зі збільшенням кількості гальванічних чи паливних елементів. Відповідно збільшуються і значення вихідної потужності, а сила струму ланцюга залишається практично постійною.

За паралельного з'єднання елементів ланцюга напруга залишається постійною майже на значенні, отриманому в одній комірці, однак струм зростає зі збільшенням числа гальванічних чи паливних елементів на відміну від послідовної схеми, де напруга збільшується зі збільшенням числа гальванічних чи паливних

елементів, а струм в ланцюзі залишається майже постійним (табл. 1). Крім того, порівняння вихідної потужності показало, що екстракт *Valeriana* показав найвищі значення вихідної потужності серед інших досліджуваних екстрактів, за паралельного з'єднання комірок ланцюга, за ним ідуть алое тоді красула відповідно.

Результати спостереження за досягненням максимального значення зміни біопотенціалу в умовах відкритого контуру з часом наведено в рисунку 4. З рисунку видно, що максимальне значення біопотенціалу досягається за 16 хвилин в однокімровій моделі, для двокімрової цей час становить шість хвилин, в той час як в трьохкомірковій досягається за чотири хвилини за умови послідовного з'єднання комірок.

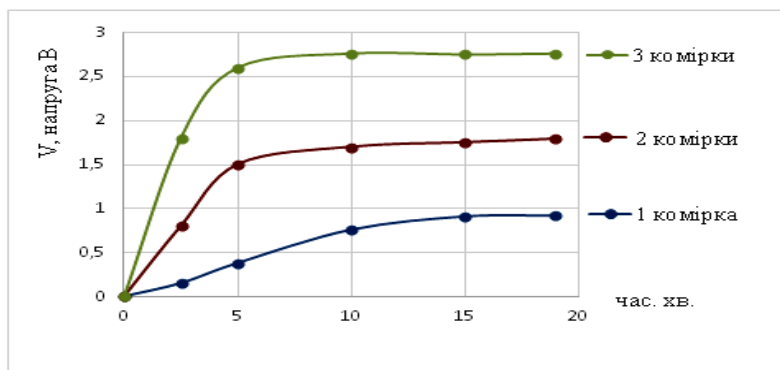


Рис. 4 – Зміна напруги від часу в одно, дво та трьох коміровій моделі водного екстракту листа алое (*Aloe*)

Важливо зауважити, що такі біобатареї не піддаються підзарядці. Ці пристрої разового використання.

Висновок. Недоліки невідновлюваних чи звичайних джерел енергії, таких як викопне паливо, є вичерпним і створює серйозну загрозу глобальному потеплінню та забрудненню навколишнього середовища.

Проведенні дослідження різних рослинних екстрактів щодо виробництва біоелектроенергії так встановлені основні параметри, такі як провідність, напруга, сила струму та розрахована потужність досліджуваних біосистем.

Показано, що рослинний екстракт має помітний потенціал для генерування електроенергії завдяки наявності мінеральних солей та біомолекул таких як ліпіди, білки, вуглеводи, поліфенольні сполуки, а їх метаболіти спричиняють електролітичні властивості водних розчинів які можуть слугувати в ролі природних електролітів.

Подальші дослідження в цьому напрямку дозволять знайти ефективні способи відновлюваного та екологічно чистого виробництва біоелектрики.

References

1. Hlobalne potepplinnia. Yak Zemlia zminiue svoje oblychchia. Spetsproekt TSN.ua. <https://tsn.ua/special-projects/warming/>. – vid 25 bereznia 2017.
2. Datta P. (2003). A Vegetative Voltaic Cell. *Current Science*, 85(3), 244 – 245.
3. Rusyn, I. B., Medvediev, O. V. (2016) Sposib otrymannia biolohichnoi elektryky z hlybynnykh shariv gruntu Patent UA 112093.
4. Eshel, A., Beeckman T. (2013). *Plant Roots: The Hidden Half*. Boca Raton: CRC Press.
5. Rusyn, I. B., Hamkalo, Kh. R. (2019). Bioelectricity production in an indoor plant-microbial biotechnological System with *Alisma plantago-aquatica*. *Acta Biologica Szegediensis*, 62(2), 170–179. <https://doi.org/10.14232/abs.2018.2.170-179>.
6. Sudhakar K, Anathakrishnan R and Goyal A. (2015). Comparative Analysis on Bioelectricity Production from Water Hyacinth, cow Dung and Their Mixture Using a Multi-Chambered Biomass Battery. *International Journal of Agriculture Innovation and Research*, 1(4), 102-106.
7. B. K. Pandey, V. Mishra, and S. Agrawal, (2011). Production of bio-electricity during waste water treatment using a single chamber microbial fuel cell,” *Inter. J. Engg., Sci. & Tech.*, 3(4), 42 - 47.
8. Carvalho, J., Ribeiro, A., Castro, J., Vilarinho, C. and Castro, F. (2015). Biodiesel production by microalgae and macroalgae from north littoral Portuguese coast, *WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities: 1st International Conference*, 1-6.
9. Chernykh V.P., Avrvmenko N.M. (2016). *Farmatsevtichna entsyklopediia*. Morion.
10. Diachok I.L., Piniashko O.R. (2016). Rozroblennia metodu kilkisnogo vyznachennia orhanichnykh kyslot v Kompleksnomu fitopoliekstrakti. *Aktualni pytannia farmatsevtichnoi i medychnoi nauky ta praktyky*, 2, 52-57.
11. Carlos A. Martínez-Huitle, Manuel A. Rodrigo, Ignasi Sirés, Onofrio Scialdone. (2023). A critical review on latest innovations and future challenges of electrochemical technology for the abatement of organics in water *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 328 (13-14):122430

THE STUDY OF BIOELECTRIC POTENTIALS OF AQUEOUS EXTRACTS FROM PLANTS

Vasil Dyachok, Doctor of Engineering Science, Professor
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Abstract. To date, there is a significant undersupply of energy resources (in particular, electricity) in Ukraine against the background of a sharp exacerbation of environmental problems. This trend is also relevant on a global scale, since the use of fossil fuels as the main source of energy is the cause of natural disasters. This state of affairs necessitates the widespread use of so-called renewable energy sources. This applies to energy from the sun, wind, geothermal, and so on. The development of renewable energy is inextricably linked with the development of biotechnologies, particularly bioelectricity. The development of this direction in biotechnology involves the solution of today's urgent problems, in particular, the development of environmentally safe technologies for the generation of electrical energy. The development of events under such a scenario involves the reduction of emissions of greenhouse gases and other pollutants into the environment, the guarantee of energy security, as well as the development of the basis for the creation of a network of stationary sources of bioelectricity, as part of the infrastructure for cars on fuel cells

Electric energy plays an important role in our everyday life, and its consumption is constantly increasing. Since its traditional production based on fossil fuels has huge economic and environmental problems, overcoming them is possible at the expense of introduced biotechnologies. The need for bioenergy becomes inevitable to replace fossil fuels. Actually, natural photosynthesis offers means and methods for this, primarily through the use of plants. Land plants have already been used as a source of bioenergy in some places, and this use will only increase in the future, despite the possible attendant problems.

This study concerns a new technology of electricity production, namely, biotechnology, that is, the use of aqueous extracts of various plant resources. Some plants in nature have the ability to accumulate in their cells biologically active compounds capable of creating an electrolytic environment, in fact they are suitable for the production of electricity, which can be amplified.

Keywords: bioelectricity, vegetable raw materials, succulents, extract, biomass battery

Список використаної літератури

1. Глобальне потепління. Як Земля змінює своє обличчя. Спецпроект ТСН.уа. <https://tsn.ua/special-projects/warming/>. – від 25 березня 2017.
2. Datta P. (2003). A Vegetative Voltaic Cell. Current Science. 85(3), 244 – 245.
3. Русин, І. Б., Медведєв, О. В. Спосіб отримання біологічної електрики з глибинних шарів ґрунту / О.В. Патент України 112093, Опубл. 12 грудня 2016 р.
4. Eshel, A., Beeckman, T. (2013). Plant Roots: The Hidden Half. Boca Raton: CRC Press.
5. Rusyn, I. B., Hamkalo, Kh. R. (2019). Bioelectricity production in an indoor plant-microbial biotechnological system with *Alisma plantago-aquatica*. Acta Biologica Szegediensis, 62(2), 170–179. <https://doi.org/10.14232/abs.2018.2.170-179>.
6. Sudhakar K, Anathakrishnan R and Goyal A. (2013). Comparative Analysis on Bioelectricity Production from Water Hyacinth, cow Dung and Their Mixture Using a Multi-Chambered Biomass Battery. International Journal of Agriculture Innovation and Research ISSN (online). 1(4), 102-106.
7. B. K. Pandey, V. Mishra, and S. Agrawal, Production of bio-electricity during waste water treatment using a single chamber microbial fuel cell // Inter. J. Engg., Sci. & Tech., vol. 3, issue 4, 2011, pp. 42 - 47.
8. Carvalho, J., Ribeiro, A., Castro, J., Vilarinho, C. and Castro, F. (2015). Biodiesel production by microalgae and macroalgae from north littoral Portuguese coast, WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities: 1st International Conference, 1-6.
9. Черних В.П., Аврвменко Н.М. (2016). Фармацевтична енциклопедія. Моріон. 1632 с.
10. Дячок І.Л., Піняжко О.Р. (2016). Розроблення методу кількісного визначення органічних кислот в комплексному фітополіекстракті // Актуальні питання фармацевтичної і медичної науки та практики. №2, С. 52-57.
11. Carlos A. Martínez-Huitle, Manuel A. Rodrigo, Ignasi Sirés, Onofrio Scialdone.(2023). A critical review on latest innovations and future challenges of electrochemical technology for the abatement of organics in water Applied Catalysis B: Environment and Energy, 328(13-14):122430

Отримано в редакцію 16.06.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 16.06.2024
Approved 25.09.2024

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ КУКУРУДЗИ В УМОВАХ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ВІДЦЕНТРОВИХ ПОЛІВ

Коцур І. О., аспірант

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Розглянуто експорт зернових продуктів, як ключовий фактор для економіки України. Процес дегідратації зернових продуктів є одним із важливих при перевалці сировини, в сьогоденні використовується конвективне сушіння з використанням енергії спалювання природного газу. Дослідження зосереджені на пошуку інноваційних методів зневоднення для підвищення ефективності цього процесу. Проведено аналіз літератури на сучасні методи дегідратації сировини, зокрема харчової та фармацевтичної, з акцентом на потенціал на комбінованих методів сушіння, зокрема з використанням мікрохвильового поля, що забезпечує швидку дегідратацію, збереження поживних речовин та покращення якості продукту. Побудовано параметричну модель для комбінованого процесу зневоднення з використанням комбінованої дії електромагнітного та відцентрових полів. Об'єктами експериментальних досліджень була кукурудза. Експериментальний стенд включав центрифугу та джерело електромагнітної енергії. Отримано кінетику зневоднення з використанням трьох режимів експериментальних досліджень. Аналіз експериментів показав, що підвищення частоти обертів центрифуги знижує енергетичні витрати, режим обробки сировини в мікрохвильовому полі при 25 секундах забезпечує ефективну дегідратацію без утворення водяної плівки, яка перешкоджає проникненню енергії. Експериментальні дослідження показали, що зневоднення кукурудзи у мікрохвильовому та відцентровому полях при потужності 4300 Вт/кг і частоті 1000-3000 об/хв дозволяє витратити лише 1,67...2.7 МДж/кг волози, тоді як традиційні технології витрачають понад 4 МДж/кг. Стаття підкреслює перспективність використання мікрохвильового поля та відцентрових сил для покращення ефективності процесів дегідратації.

Ключові слова: зневоднення, дегідратація, комбіновані дії, електромагнітне поле, відцентрове поле.

Вступ. Експорт зернових продуктів є важливим для України з кількох причин. По-перше, це один з головних експортних товарів, що приносить значний обсяг валютних надходжень, оскільки пшениця, кукурудза, ячмінь та інші зернові продукти користуються великим попитом на світовому ринку. По-друге, експорт підтримує аграрний сектор, який є однією з найбільших галузей економіки України і забезпечує зайнятість мільйонів людей, особливо у сільських районах.

Процес дегідратації зернових продуктів є одним із важливих при перевалці сировини та має важливе значення для харчової промисловості. В більшості випадків, сушіння сировини в світі відбувається традиційними методами сушіння. Основним способом - це використання конвективних теплових сушарок, які використовують енергію спалювання природних копалин, наприклад природний газ для підігрівання сушильного агенту – повітря [ЕСУ]. Тому предметом дослідження є інноваційні методи зневоднення зернопродуктів. Дослідити способи підвищення [1, 2] ефективності, де об'єктом дослідження, являють процеси зневоднення харчової сировини.

Аналіз літературних даних і формулювання проблеми. Тема дегідратації сировини є затребуваною в світі, багато науковців досліджували, як комбіновані методи дегідратації так і окремі на різній сировині, а саме від харчової до фармацевтичної. Наразі, динамічно зростає інтерес до інноваційних методів сушіння в умовах електромагнітних полів. John Smith, Maria Johnson визначили потенціал мікрохвильової енергії у поєднанні з вакуумним середовищем для швидкої дегідратації продуктів. Цей метод забезпечує рівномірне видалення вологи та збереження поживних речовин [5]. Li Zhang, Wei Wang проаналізували та оптимізували системи комбінованого сушіння картоплі гарячим повітрям та мікрохвильовим полем. Дослідження показало значне покращення якості кінцевого продукту [6]. Michael Brown визначив виборку покращень гібридних методів сушіння, які дозволяють значно скоротити час сушіння та енергоспоживання при збереженні поживних та сенсорних якостей продуктів [7]. Sarah Lee, David Green дослідили комбінації осмотичного та мікрохвильового сушіння, що дозволяє покращити процес видалення вологи та зберегти якість продукту [8]. Helen White, Thomas Black визначили виборку нових технологій дегідратації, включаючи гібридні методи, які сприяють сталому розвитку та покращенню якісних характеристик продуктів [9]. Chun Li, Fang Liu дослідили умови сушіння цитрусових продуктів з використанням мікрохвиль та гарячого повітря, спрямоване на оптимізацію процесу для досягнення найкращих результатів [10]. Kimberly Brown зробив огляд мікрохвильового піролізу опадів, що розглядає механізми, обладнання та перспективи використання цього методу для ефективного видалення вологи та переробки відходів [11]. Rajesh Kumar, Emily Davis проаналізували методи мікрохвильового екстрагування біоактивних сполук з рослинних матеріалів, який дозволяє значно

прискорити процес та покращити якість кінцевого продукту [12].

А. N. Other та EnWave Corporation досліджували процес видалення ефірних олій із апельсинової шкірки за допомогою комбінації мікрохвильового нагріву та центрифуги. Це дозволяє значно прискорити та покращити процес дегідратації в порівнянні з традиційними методами [3],[4].

Таким чином, проведений аналіз дозволяє визначити наступні науково-технічні протиріччя.

1. Традиційні методи конвективного сушіння енергоємні та не забезпечують необхідної якості продукту, не виключають можливість канцерогенного забруднення.
2. Дослідження процесів зневоднення при дії електромагнітних джерел енергії обмежуються лабораторними стендами.
3. Перспективними є методи комбінованої дії процесів із різними рушійними силами, особливо мікрохвильовими та механічними.

Вирішення визначених протиріч пропонується на основі науково – технічній гіпотези комбінованої системи дегідратації. Пропонується зняти з повітря задачу теплоносія, а залишити тільки завдання дифузійного середовища. А в якості джерела енергії використати електромагнітні та відцентрові поля. Зниження енерговитрат в зневодненні зернових продуктів можливо досягти при поетапній організації процесів: використання мікрохвильових джерел енергії дозволить, вологу із об'єму твердої фази, доставляти на поверхню продукту; на другому етапі – залучати інерційні поля для вилучення вологи з поверхні продукту.

Предмети та методи досліджень. Предметом досліджень були процеси зневоднення кукурудзи. Порядок проведення серії експериментів (рис. 1).

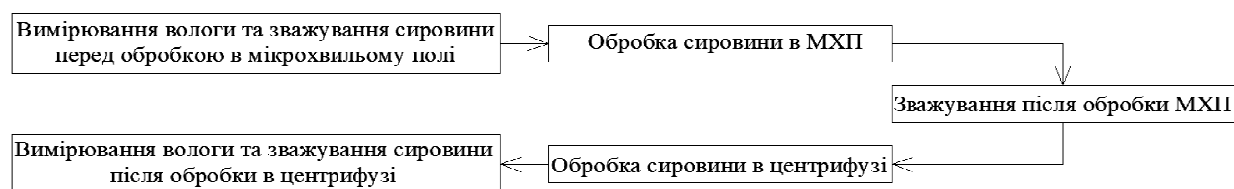


Рис. 1 – Цикл експериментального дослідження

В експериментальних дослідженнях температура сировини вимірювалася пірометром марки «FLIR TG54», витрати енергії для обладнання – енергоміром марки «Feron TM55», вологу кукурудзи – вологоміром марки «Wile 66». За допомогою цифрових ваг марки «Техноваги ТВЕ 2.1» визначали втрату вологи.

Основні результати досліджень. На основі гіпотези процесу зневоднення сировини з поетапним використанням дії мікрохвильових та відцентрових полів, було розроблено параметричну модель (рис. 2). Модель визначила, що потрібно виділити, та які задачі потрібно вирішити для мікрохвильового об'єкту та відцентрової системи.

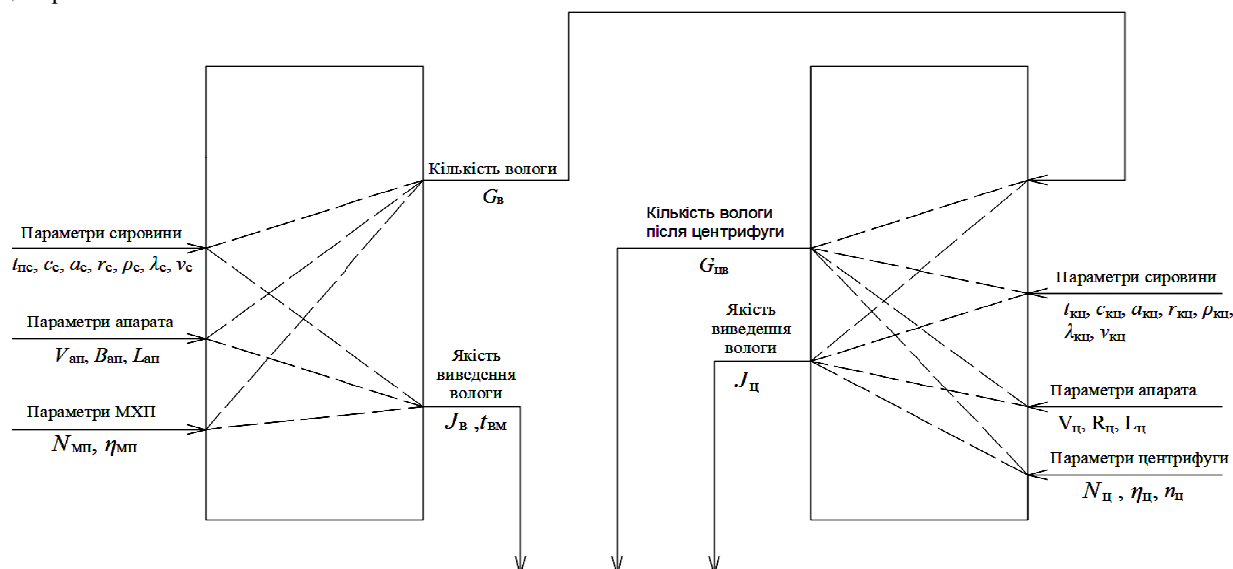


Рис. 2 – Параметрична модель

З параметричної моделі слідує, що є певні вхідні параметри, які впливають на вихідні параметри якості етапу мікрохвильової обробки і певні вхідні параметри, які впливають на етап обробки відцентровим полем.

Для етапу обробки мікрохвильового поля є важливими параметри, а саме потужність ($N_{мп}$) та ККД ($\eta_{мп}$) магнетрону, а також час роботи (τ) цієї ділянки. Змінюючи параметр часу, ми будемо мати різний результат обробки сировини, а саме різну кількість виведеної вологи на поверхню сировини.

Для етапу обробки відцентровим полем є важливими вхідними параметри, це параметр сировини з кількістю вологи, який успадковується від етапу обробки в МХП. Та основний параметр центрифуги - це швидкість обертів барабану.

Проведені лабораторні експерименти, під різними впливами вхідних параметрів для етапів МХП і відцентрової сили. На першій серії дослідження для етапу обробки кукурудзу в МХП були вхідні параметри магнетрону $N_{\text{мп}} = 215$ Вт, $\eta_{\text{мп}} = 85\%$ та час обробки $\tau = 20$ с, а для обробки в другому етапі за допомогою центрифуги вхідні параметри швидкості $n_{\text{ц}} = 2000$ Об/хв, $n_{\text{ц}} = 3000$ Об/хв та $n_{\text{ц}} = 4000$ Об/хв. (рис. 3).

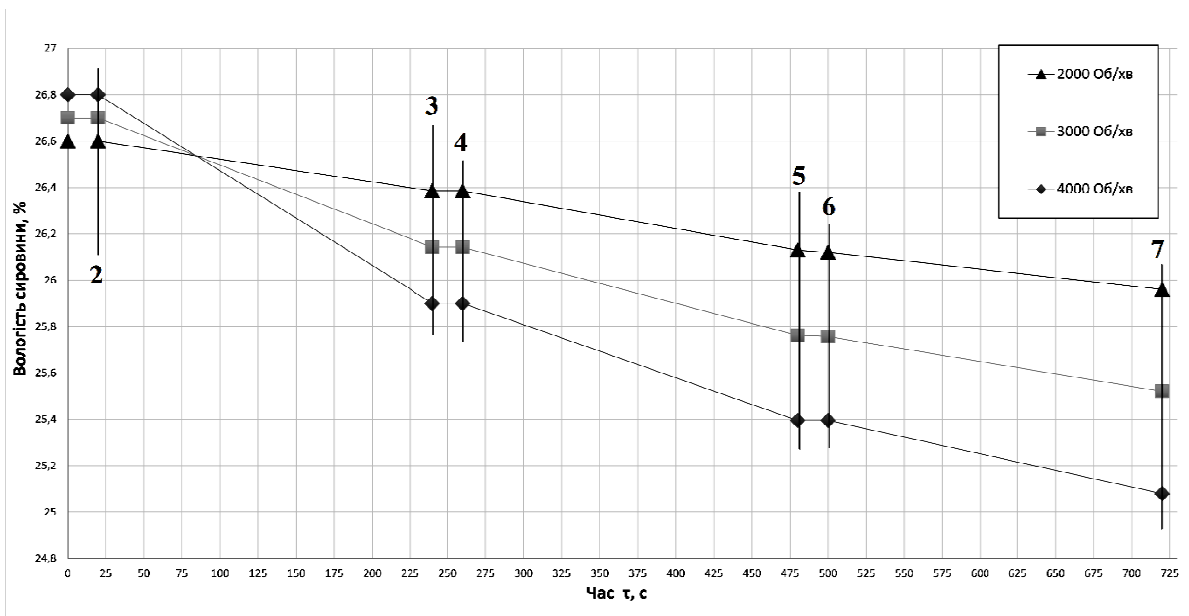


Рис. 3 – Кінетика зневоднення кукурудзи при використанні першого комбінованого режиму

На рис. 2, 3, 4 прийнято позначення: (1 – 2, 3-4, 5-6 – обробка в МХ полі; 2-3, 4-5, 6-7 – обробка у центрифугі)

Друга серія експериментів для етапу обробки в МХП були вхідні параметри магнетрону $N_{\text{мп}} = 215$ Вт, $\eta_{\text{мп}} = 85\%$ та час обробки $\tau = 25$ с, а для обробки в другому етапі за допомогою центрифуги вхідні параметри швидкості $n_{\text{ц}} = 2000$ Об/хв, $n_{\text{ц}} = 3000$ Об/хв та $n_{\text{ц}} = 4000$ Об/хв. (рис. 4).

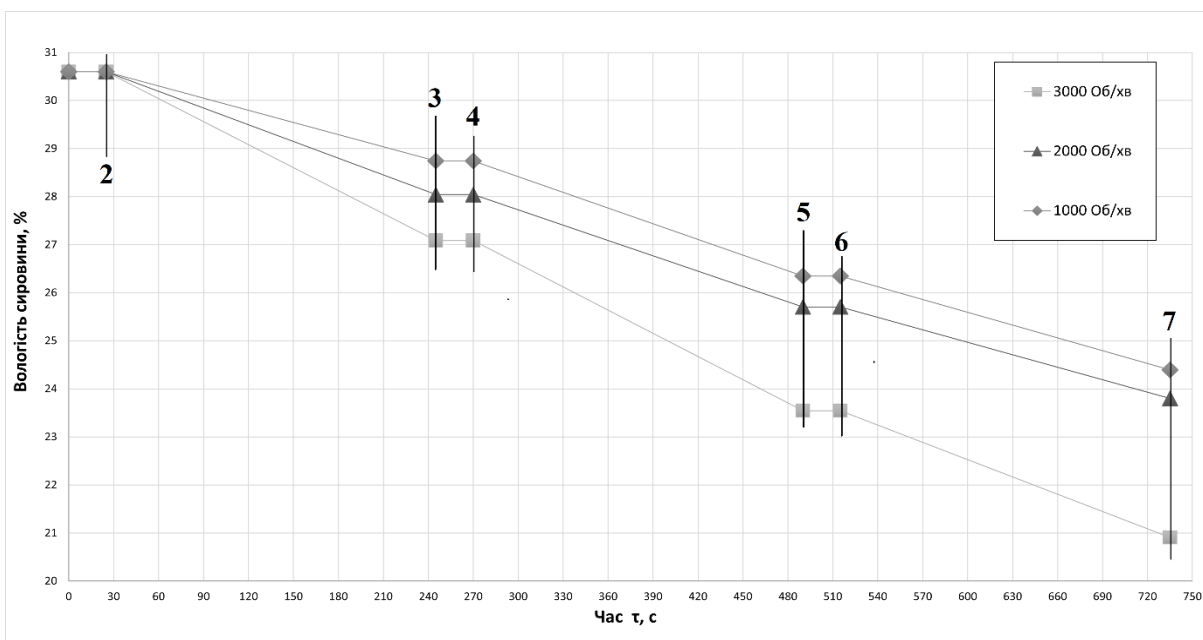


Рис. 4 – Кінетика зневоднення кукурудзи при використанні другого комбінованого режиму

Для етапу обробки в МХП були вхідні параметри магнетрону $N_{\text{мп}} = 215$ Вт, $\eta_{\text{мп}} = 85\%$ та час обробки $\tau = 30$ с, а для обробки в другому етапі за допомогою центрифуги вхідні параметри швидкості $n_{\text{ц}} = 2000$ Об/хв, $n_{\text{ц}} = 3000$ Об/хв та $n_{\text{ц}} = 4000$ Об/хв. (рис. 5).

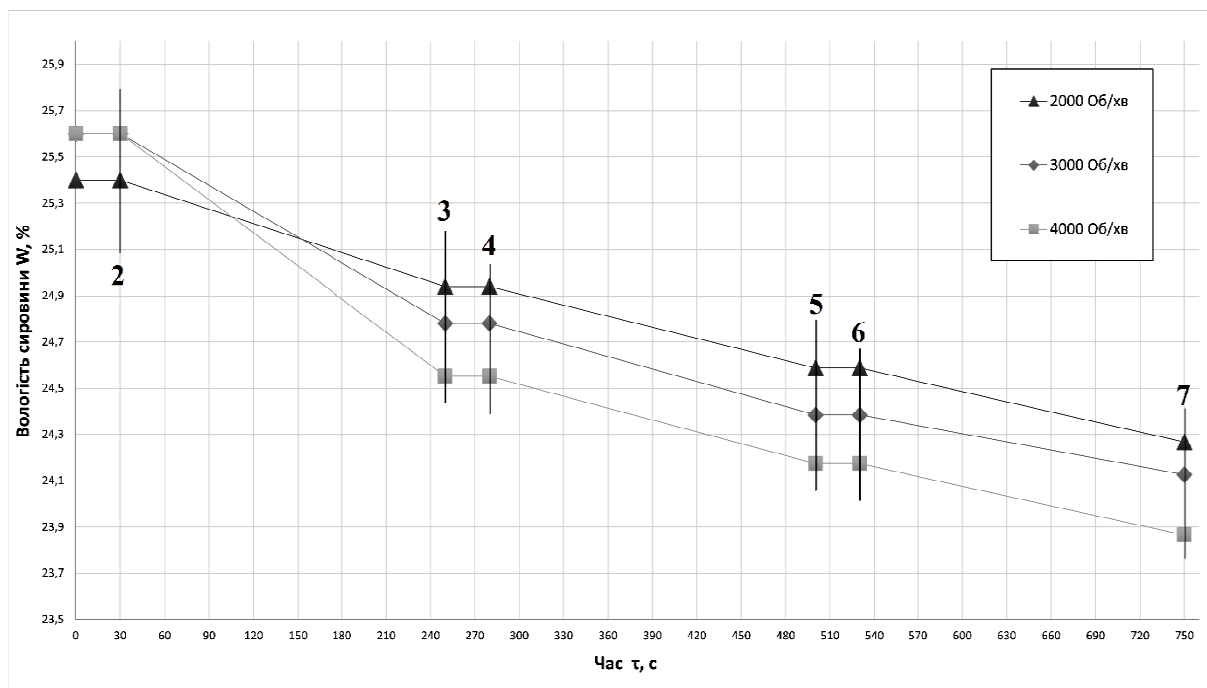


Рис. 5 – Кінетика зневоднення кукурудзи при використанні другого комбінованого режиму

Енерговитрати досліджень трьох режимів обробки сировини в МХП, та по три режими видалення вологи за допомогою відцентрового поля з різною швидкістю наведено в рис. 6.

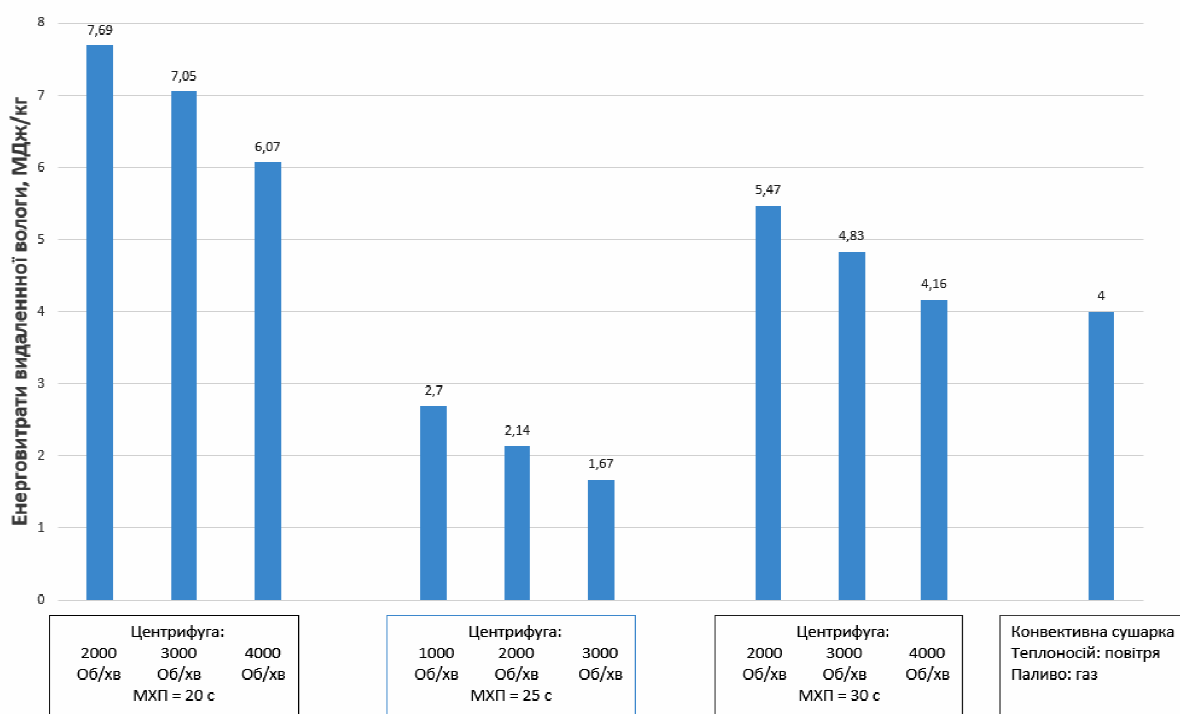


Рис. 6 – Енергетика процесів зневоднення кукурудзи

Аналіз результатів експериментів (рис.6) показує, що підвищення частоти обертів центрифуги в усіх режимах приводить до зниження сумарних енергетичних витрат. Вплив режиму обробки у МХП має більш складний характер. Якщо сировина оброблялась 20 с, то недостатньо вологи вилучалось на поверхню, менш ефективно йшла обробка у центрифугі. При обробці у МХП 30 с, на поверхні зерен формувалась плівка води, яка ставала бар'єром для проникнення електромагнітної енергії у глибину зернівки. Енергія стала витрачатися на випаровування вологи у самому електромагнітному апараті. Рациональні режими обробки МХП при вибраній потужності магнетрона – 25 с.

Висновки

1. Традиційні методи конвективного сушіння зернових потребують забагато енергії та не виключають канцерогенного забруднення продукту.

2. В останні роки динамічно зростає інтерес до використання електромагнітних джерел енергії в процесі зневоднення сировини.

3. Розвиваються технології комбінованої дії на сировину при її зневодненні різними джерелами енергії із різними рушійними силами. Оптимізація таких технологій потребує узгодження часу та потужностей із розходом сировини та її типом.

4. Найбільші резерви по зменшенню загальних енергетичних витрат мають комбінації «мікрохвильових та механічних джерел».

5. Експериментальні дослідження зневоднення кукурудзи послідовно у мікрохвильовому та відцентровому полях при питомій потужності 4300 Вт/кг, в діапазоні 1000...3000 обертів в хвилину, за різним часом обробки у МХП дали змогу витратити 1,67 МДж/кг вологи. Для зрівняння традиційні технології витрачають 4 МДж/кг та більше.

6. Параметрами оптимізації комбінованої системи «мікрохвильове поле – відцентрове поле» є питома потужність, частота обертів, час обробки у мікрохвильовому полі та у відцентровому полі.

References

1. Burdo O.G. (2010). *Evolutsiya sushyl'nyh ustanovok [Evolution of dryers]*. Odessa, Poligraf.
2. Burdo O.H., Trishyn F.A., Yarovyi I.I. (2020). *Enerhetychnyi monitorynh kharchovykh ta pererobnykh vyrobnystv [Energy monitoring of food and processing industries]*, Odesa, Madzhenta
3. A. N. Other (2021). Dehydration by coupling centrifuge drainage with microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 120. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2021.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
4. EnWave Corporation. (2023). What is REV? Vacuum Microwave Dehydration Technology. EnWave Corporation, 1. DOI 10.3390/enwave.2023.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
5. John Smith, Maria Johnson. (2019). Combined Microwave Vacuum Drying. *Food Science and Technology International*, 25. DOI 10.1016/j.foodsci.2019.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
6. Li Zhang, Wei Wang. (2020). Optimization of hot-air microwave combined drying control system based on potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*, 55. DOI 10.1016/j.ijfst.2020.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
7. Michael Brown, et al. (2023). Recent Developments in the Hybridization of the Freeze-Drying Technique in Food Dehydration. *Foods (MDPI)*, 12. DOI 10.3390/foods12183437. [MDPI](<https://doi.org/10.3390/foods12183437>)
8. Sarah Lee, David Green. (2019). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot air drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42. DOI 10.1111/jfpp.12578. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
9. Helen White, Thomas Black. (2022). The use of emerging dehydration technologies in developing sustainable systems. *Sustainable Food Systems*, 8. DOI 10.1016/j.susfs.2022.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
10. Chun Li, Fang Liu. (2019). Study on operating conditions of orange drying processing with microwave and hot air. *Drying Technology*, 35. DOI 10.1080/07373937.2017.1300789. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
11. Kimberly Brown. (2021). Microwave pyrolysis of sludge: a review. *Environmental Engineering Science*, 38. DOI 10.1089/ees.2021.0109. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
12. Rajesh Kumar, Emily Davis. (2019). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials using microwave energy. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 15. DOI 10.1016/j.jarmap.2019.100231. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)

RESEARCH OF THE DEHYDRATION PROCESSES OF CORN UNDER THE CONDITIONS OF THE COMBINED EFFECT OF ELECTROMAGNETIC AND CENTRIFUGAL FIELDS

Kotsur I.O., graduate student
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. The export of grain products is considered as a key factor for the economy of Ukraine. The process of dehydration of grain products is one of the important ones in the transshipment of raw materials, nowadays convective drying is used using the energy of burning natural gas. Research is focused on finding innovative methods of dehydration to improve the efficiency of this process. An analysis of the literature on modern methods of dehydra-

tion of raw materials, in particular food and pharmaceutical, was carried out, with an emphasis on the potential of combined methods of drying, in particular using a microwave field, which ensures rapid dehydration, preservation of nutrients and improvement of product quality. A parametric model for the combined process of dehydration using the combined action of electromagnetic and centrifugal fields was built. Corn was the object of experimental research. The experimental stand included a centrifuge and a source of electromagnetic energy. Dehydration kinetics were obtained using three modes of experimental research. The analysis of experiments showed that increasing the frequency of rotation of the centrifuge reduces energy costs, the mode of processing raw materials in the microwave field at 25 seconds provides effective dehydration without the formation of a water film that prevents the penetration of energy. Experimental studies have shown that dehydration of corn in microwave and centrifugal fields at a power of 4300 W/kg and a frequency of 1000-3000 rpm allows to consume only 1.67...2.7 MJ/kg of moisture, while traditional technologies consume more than 4 MJ/kg. The article emphasizes the perspective of using a microwave field and centrifugal forces to improve the efficiency of dehydration processes.

Keywords: dehydration, combined actions, electromagnetic field, centrifugal field.

Список використаних джерел

1. Burdo O.G. *Evolutsiya sushyl'nyh ustanovok*. Odessa, Poligraf, 2010. 368 p.
2. Бурдо О. Г. Енергетичний моніторинг харчових і переробних виробництв : підручник / Олег Григорович Бурдо, Федір Анатолійович Трішин, Ігор Іванович Яровий. – Одеса : Маджента, 2020. – 244 с.
3. A. N. Other. (2021). Dehydration by coupling centrifuge drainage with microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 120. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2021.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
4. EnWave Corporation. (2023). What is REV? Vacuum Microwave Dehydration Technology. EnWave Corporation, 1. DOI 10.3390/enwave.2023.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
5. John Smith, Maria Johnson. (2019). Combined Microwave Vacuum Drying. *Food Science and Technology International*, 25. DOI 10.1016/j.foodsci.2019.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
6. Li Zhang, Wei Wang. (2020). Optimization of hot-air microwave combined drying control system based on potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*, 55. DOI 10.1016/j.ijfst.2020.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
7. Michael Brown, et al. (2023). Recent Developments in the Hybridization of the Freeze-Drying Technique in Food Dehydration. *Foods (MDPI)*, 12. DOI 10.3390/foods12183437. [MDPI](<https://doi.org/10.3390/foods12183437>)
8. Sarah Lee, David Green. (2019). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot air drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42. DOI 10.1111/jfpp.12578. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
9. Helen White, Thomas Black. (2022). The use of emerging dehydration technologies in developing sustainable systems. *Sustainable Food Systems*, 8. DOI 10.1016/j.susfs.2022.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
10. Chun Li, Fang Liu. (2019). Study on operating conditions of orange drying processing with microwave and hot air. *Drying Technology*, 35. DOI 10.1080/07373937.2017.1300789. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
11. Kimberly Brown. (2021). Microwave pyrolysis of sludge: a review. *Environmental Engineering Science*, 38. DOI 10.1089/ees.2021.0109. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
12. Rajesh Kumar, Emily Davis. (2019). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials using microwave energy. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 15. DOI 10.1016/j.jarmap.2019.100231. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)

Отримано в редакцію 12.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 12.08.2024
Approved 25.09.2024

HYDRO-MECHANICAL PROCESSING OF RAW BEEF BY MASSAGING: THEORETICAL BASICS AND PRACTICAL APPROACHES

Verbytskyi S., PhD, Engineering
Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine

Abstract. Upgrading of the equipment for hydro-mechanical processing of raw meats is important both in terms of ensuring the proper profitability of production and in terms of providing consumers with valuable protein meat products of excellent taste. Salting of raw meats, which is related to hydro-mechanical processing, is a complex process embracing mass exchange, transformations of protein and other substances, changes in the water-holding capacity of meat, changes in its microstructure, etc. There are different approaches to the machine and apparatus design and technological modes of hydro-mechanical processing of raw meats. Meat massagers / tumblers used in industry are equipped with devices for cooling and vacuuming the working space. Active research is being conducted to determine the rational duration of work / standstill during processing of raw materials in a drum. For beef, it is recommended to use the mode of alternating 30 min of work with 30 min of standstill for 8-12 h or other modes. The purpose of the article is to present and logically substantiate the results of studies of massaging the processing of meat raw materials in the drum of the massager under different modes of technological processing. Massaging of raw meats was carried out using a laboratory unit for wet salting of meat raw materials (drum massager) Ya5-FMS of our own design. Rheological characteristics were determined using an electromechanical universal testing machine SANS CMT2503. The duration of salting of raw meats depends on their type and quality characteristics, morphological composition, pH, degree of autolysis, mass and shape of meat cuts, quantity, quality and temperature of brine, as well as on the efficiency of the equipment used. Even more effective penetration of curing ingredients is achieved by using a pulsating vacuum, in which the processed meat raw materials are exposed to alternating loads: atmospheric pressure – vacuum. An increase in the intensity of hydro-mechanical processing of raw meats causes corresponding changes in the structure of muscle fibers – their swelling, the occurrence or increase of transverse-slit integrity violations, disruption of membrane structures, loosening and swelling of myofibril proteins. All of the above indicates that the use of pulsating vacuum and drum cooling not only improves, but also significantly accelerates the process of wet salting of raw meats raw materials in the production of ham products. The use of vacuuming in general and pulsating vacuuming in particular contributes to the intensification of the process of wet salting of raw meats. Therefore, the use of massagers with cooling and a pulsating vacuum system is an optimal design solution in terms of product quality and acceptable production profitability for meat processing enterprises.

Key words: raw meats, brine, salting, maceration, vacuuming.

Definition of the problem. Permanent tasks of the domestic food manufacturing industry of Ukraine consists in producing and provision of high quality foodstuffs to the population which is of uppermost importance for the socio-economic development of society [1], the same is completely true with the Ukrainian meat industry [2]. In the European cultural tradition, in the paradigm of which Ukraine and its people are developing, the consumption of meat products was and remains a sign of well-being and prosperity. And numerous minced meat products, and, especially, delicacies made from whole-muscle raw materials, not only served as a utilitarian source of protein and fat, but also represented the core of national cuisine. Accordingly, the entire meat industry, including its personnel and machine-technological base, have always responded more quickly to various innovations in technical progress, reflected in new technologies and advanced specialized production equipment. Of course, in this area there are still problems that require an effective solution [3].

The above also fully applies to equipment for the production of gourmet whole-muscle meat products. It should be noted that it is not easy to provide meat products with a high delicacy status, since it is difficult to obtain a product from tough muscle tissue that is acceptable in terms of sensorial properties and meets consumers' expectations – this is especially true for beef ham products [4]. A wide range of specialized technological equipment facilitates the effective implementation of this technological process – these are knife and wringer tenderizers, devices for preparing brines and for static salting of raw meat, various brine injectors, meat massagers/tumblers, as well as auxiliary equipment for the meat salting. Further upgrading of equipment for hydro-mechanical processing of raw meats is therefore important both in terms of ensuring the proper profitability of production and in terms of providing consumers with valuable protein meat products of excellent taste. Salting of raw meats, which is related to hydro-mechanical processing, is a complex process of various natures: mass exchange, transformation of proteins and other substances, changes in the water-holding capacity of meat, changes in its microstructure, etc. Understanding the theoretical basics of the salting process allows for the rational organization of the production of the above-mentioned meat products by using new technological methods and special equipment to improve the consistency

and texture of finished products, as well as to reduce the time of technological processing [5].

Analysis of recent achievements and publications. Salting of raw meats aims at protecting it from microbiological spoilage, as well as achieving the appropriate properties of finished products: subjective sensorial characteristics – taste, aroma, color and consistency as well as objective physical and chemical characteristics – texture, chemical composition, etc. [6]. The most common, cheap and well-studied salting agent is sodium chloride [5].

Long-term practice shows that combining salting of meats with mechanical effects on them promotes the intensification of biochemical processes in muscle tissue. The term "hydro-mechanical processing of raw meat" is used to define the said combined processing. As a rule, meat is first saturated with curing brine using portable manual or automatic multi-needle brine injectors, after which, together with the additional amount of brine, it is processed in meat massagers [7]. As a result, muscle tissues acquire elasticity, and the meat absorbs the curing brine in an amount of up to 10 – 12% of the original mass of the raw material. Due to mechanical processing, the integrity of the meat cell membranes is disrupted, and the penetration of the brine is facilitated as a result of the destruction of the connective tissue shell around the muscle fibers, which swell under the action of curing substances. At the same time, the yield of the finished product increases, which acquires a soft and delicate consistency [8]. The devices used to perform this technological operation, meat massagers, are cylindrical rotating drums in which pieces of meat rub against each other, as well as against the walls, rise up and fall inside the working container. These machines are also called meat tumblers (from the English word "to tumble" – to turn over, to somersault) [9,10].

Technologies that involve only injection of meat raw materials or only massaging are also used. For example, large-sized cuts are salted without subsequent massaging, using hand-held injectors with one or more needles. Among technologists, there are supporters of using only injection when salting all types of meat and bone raw materials, since, in their opinion, pieces of meat are excessively damaged by collisions and falls in the rotating drum of the massager. According to the same specialists, when implementing the sequence of injection + massaging operations, mechanical processing may not provide the expected increase in weight by 12%, since with excessively intensive massaging, proteins remain in the brine, since they are washed out of the raw materials, which is observed, for example, when massaging pork for more than 5.5 h [5,11]. At the same time, when using viscous multi-component brines that clog the injector needles, it is not recommended to inject meats and to use only the mechanical processing in the drum of the massager [5,12].

The modes of massaging raw meats, due to their diversity and the technological goals pursued, continue to remain the focus of attention of meat science specialists as the said process facilitates the distribution of the previously injected pickling solutions within meat cuts. The protein contained in muscle fibers tends to be extracted and solubilized thus promoting the water binding in meats and adhesion of pieces when a restructured product is treated thermally [13-17]. The longer is the massaging process the lower is exudate's viscosity and, consequently, a meat product is more palatable [18], but there is also the evidence that a longer tumbling time results in the harder texture of a product [16]. Rational modes of massaging raw materials for the production of the South African national product from beef are substantiated in [19]. Experiments to determine the influence of massaging modes on the physical and chemical characteristics of meat products are described in [19] and the main three factors of the process are identified. According to [20], the first factor is the tumbling mode (for instance "strong tumbling" at 8 rpm in a 180 L tumbler filled to 50% and "soft tumbling" at 10 rpm in a lab tumbler of $\varnothing$ 0,1 m intended to treat a single meat cut); the second factor is the treatment time (15 min and 60 min); the third factor is partial vacuum (residual pressure $2 \cdot 10^{-4}$ N/m²) – being or not being applied. Miscellaneous messaging methods with the use of electrical stimulation are characterized in [21]: new processing technologies such as ultrasound, high-pressure processing, pulsed electric field, new tumbling technology and alkaline electrolyzed water can modify the structure of muscle proteins and improve the textural quality of meat products, reducing the amount of phosphates added in meat products without adding other clean label ingredients.

In the meat industry, massaging of meat raw materials in interval mode is widely used, when the rotation of the drum alternates with its standstills. During a standstill, meat pieces loosen up, these beginning to suck the pickling solution in when the drum is rotating. Such treatment modes are considered to be practical: meats with bones – from 24 to 36 h, 8 rpm, rotation from 10 to 20 min, pause – 50 min; meats without bones – from 24 to 36 h, 16 rpm, rotation from 20 to 30 min, pause – 1 h; smoked and boiled fillet in a casing – from 24 to 48 h, 16 rpm, rotation – from 15–20 min, pause from 45 to 60 min [22]. Beef is recommended to be treated for 16 h alternating rotation from 20 to 40 min and pause of the same duration, pork – 12 h, rotation 15 to 30 min, a pause – from 30 to 45 min [23]. Beef can also be treated for 12h (at 20 rpm) and 8 h (at 5 rpm) – a drum shall be 70% full, 30 min of operation with 30 min of pause shall be altered [24]. The following modes of pork processing are considered appropriate: fill factor 0.7; total number of strokes 2400, drum rotation speed 6 rpm [25].

Since the extraction of salt-soluble proteins occurs most intensively at a temperature of 2.2 °C to 3.3 °C, the internal space of the working drum of the massager with the brine and meat raw materials being massaged is cooled by directly introducing carbon dioxide or by feeding the cooled medium into the heat exchange jacket of the drum. Massaging very fatty raw materials requires the use of higher temperatures so that the fat and connective tissue become more plastic - then the whole-muscle meat products produced from such raw materials are softer. The internal space of the drum is vacuumed in order to limit the foaming of the exudate, while more effective penetration of curing substances into the cuts is achieved by vacuuming in a pulsating mode, when the processed meat raw materi-

als are exposed to alternating loads in the vacuum – atmospheric pressure cycle. Due to this processing mode, the water-holding capacity of the meat increases, and the meat products acquire the necessary soft and juicy consistency acceptable to consumers [23].

The purpose of the article – to present and logically substantiate the results of the studies of massaging the processing of raw meats in the drum of the massager within different modes of technological processing.

Materials and methods. Massaging of raw meats was carried out using a laboratory unit for wet salting of meat raw materials Ya5-FMS (Fig. 1), on the frame of which a working sealed drum of geometric capacity 0.1 m³ with radially located hollow ribs, into which a coolant can be supplied, is installed in a bearing support. The loading / unloading door of the drum is equipped with a sealed lid with a device for vacuum intake and discharge. The unit is also equipped with a drive, a vacuum system and a control system.



Fig. 1 – Laboratory setup for wet salting of meat raw materials Ya5-FMS

The water-holding capacity was determined according to Grau and Hamm [26].

To determine the shear stress [27], the standard measuring functions of the electromechanical universal testing machine SANS CMT2503 manufactured by Shenzhen SANS Testing Co. Ltd. (PRC) were used.

Also, dial scales RN-3Ts3U and glass thermometer TTP 4 260/103 0+100C/1C were used to perform the experiments.

Results and discussion. It is known that the duration of salting of raw meats depends on its type and quality characteristics, morphological composition, pH, degree of autolysis, mass and shape of meat cuts, quantity, quality and temperature of brine, as well as on the efficiency of the equipment used [28]. The stable effect of the curing brine contributes to a better, more uniform coloring of the meats, however, the consequence of their massaging may be lightening due to the reduction in the time of action on the fatty tissue during vacuuming. Therefore, a more effective method is the penetration of curing substances in the case of using pulsating vacuum generation systems. This has been confirmed by experiment.

The effect of pulsating vacuum on the rate of hydro-mechanical processing of raw meats and on the quality indicators of the finished product was studied on the laboratory massager Ya5-FMS. The results of the studies are given in Tables 1–3 and Figures 2–4.

Таблиця 1

Change in the mass raw meats after holding in a massager under vacuum and under the action of pulsating vacuum depending on the processing time

Processing modes	Processing duration, min								
	60			90			120		
	Mass of cut, g			Mass of cut, g			Mass of cut, g		
	before processing	after processing	%	before processing	after processing	%	before processing	after processing	%
Vacuum	1340	1660	124	1485	2420	160	1450	2330	158
Pulsating vacuum	1420	2010	141	1640	2510	163	1100	1650	160
Control (without vacuum)	1220	1450	119	1150	1400	122	1180	1530	130

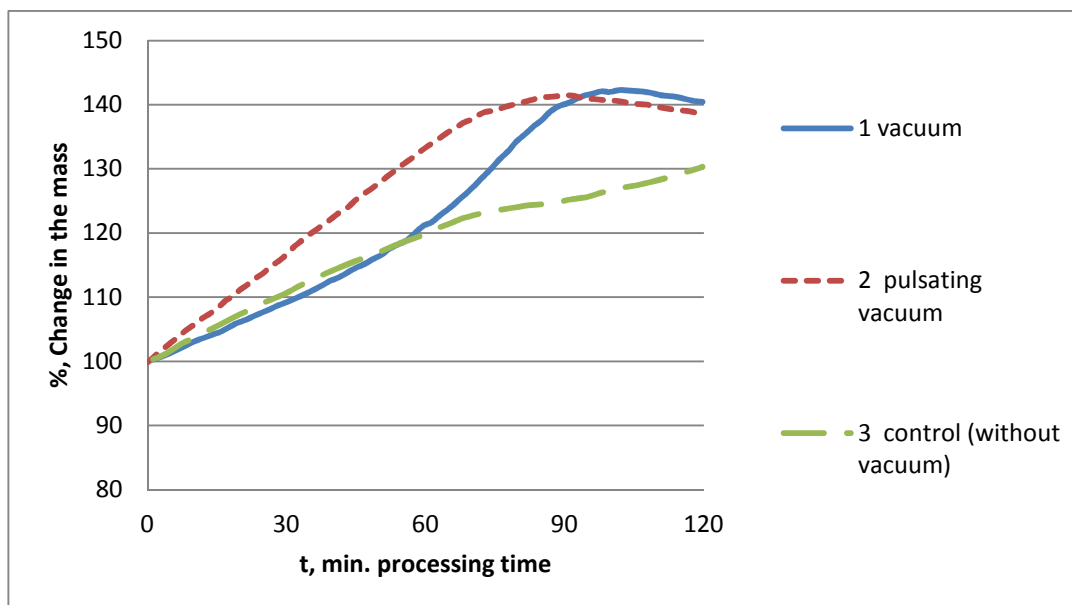


Fig. 2 – Change in the mass of raw meats after holding in a massager under vacuum and under the action of a pulsating vacuum depending on the processing time

Table 2
Change in the NaCl content, % in the finished product after holding in a massager under vacuum and under the action of a pulsating vacuum depending on the processing time

Processing modes	Processing duration, min		
	60	90	120
Vacuum	1. 27	1. 76	1. 79
Pulsating vacuum	1. 43	2. 0	2. 1
Control (without vacuum)	0. 78	0. 90	0. 93

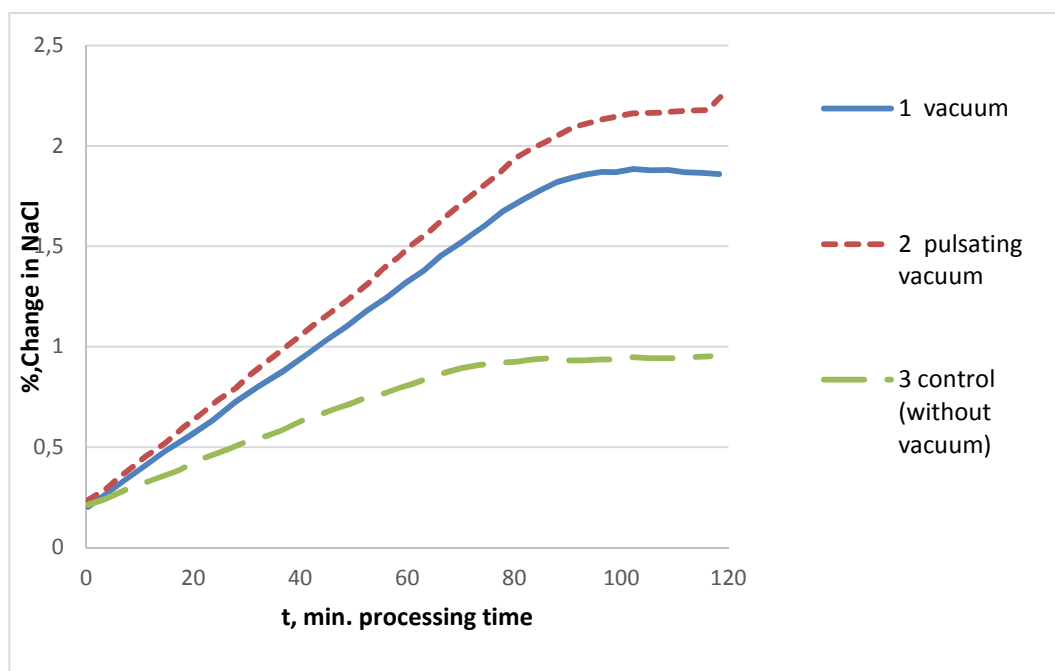


Fig. 3 – Change in NaCl content in the finished product after holding in a massager under vacuum and under the action of a pulsating vacuum depending on the processing time

Table 3

Shear stress of the finished product after holding in a massager under vacuum and under the action of a pulsating vacuum depending on the processing time (1 – vacuum, 2 – pulsating vacuum, 3 – control, without vacuum)

Parameters	Processing duration, min								
	60			90			120		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Shear work, J/m ²	3.11×10^5	2.28×10^5	3.48×10^5	1.54×10^5	1.24×10^5	2.66×10^5	1.44×10^5	1.21×10^5	2.58×10^5
Shear stress, N/m ²	1744	1570	2592	1244	980	2090	1229	920	1927
Shear force, N	21×10^2	17.5×10^2	29.4×10^2	14×10^2	10.3×10^2	22.9×10^2	12.9×10^2	10.2×10^2	21.7×10^2

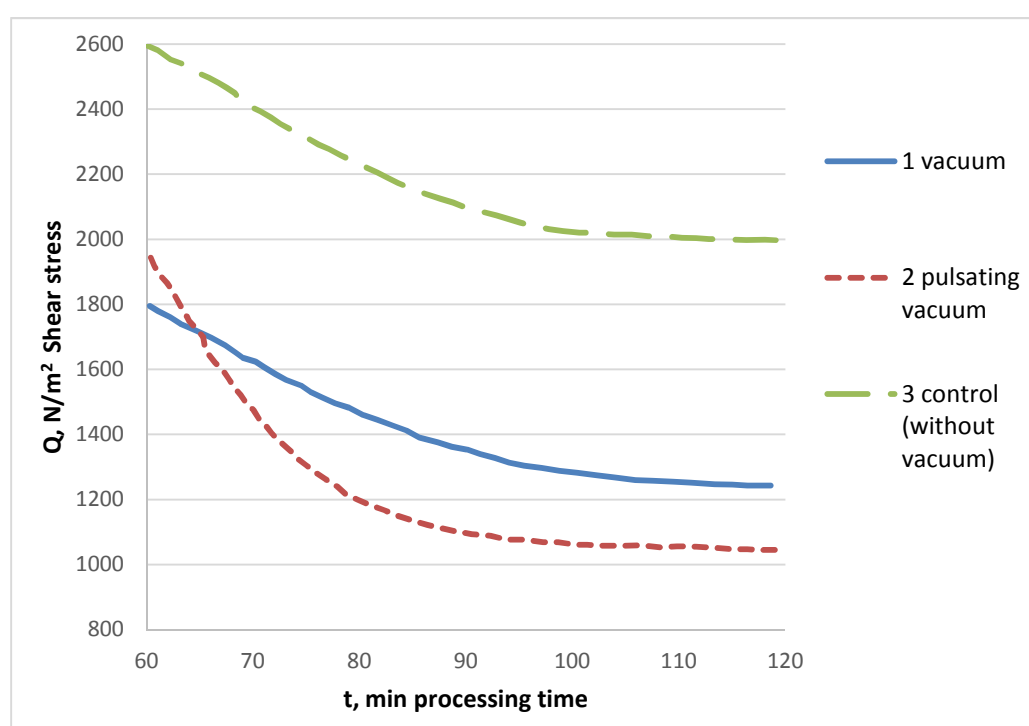


Fig. 4 – Shear stress of the finished product after holding in a massager under vacuum and under the action of a pulsating vacuum depending on the processing time

Thus, the duration of salting of raw meats depends on the type of product, quality characteristics of raw materials, morphological composition, pH, degree of autolysis, weight and shape of meat pieces, quantity, quality and temperature of brine, equipment used, etc. In addition, stable penetration of injection brine contributes to better, more uniform coloring. During hydro-mechanical processing, lighter color of meats is observed, since vacuuming reduces the time of oxygen exposure to lean tissue, and the result is a stable color during salting and the absence of air pockets in the finished product. Even more effective penetration of curing ingredients is achieved by using a pulsating vacuum, in which the processed meat raw materials are exposed to alternating loads: atmospheric pressure – vacuum. The research results show that an increase in the intensity of hydro-mechanical processing of meat raw materials causes corresponding changes in the structure of muscle fibers – their swelling, the occurrence or increase of transverse – slit integrity violations, disruption of membrane structures, loosening and swelling of myofibril proteins. All of the above indicates that the use of pulsating vacuum and drum cooling not only improves, but also significantly accelerates the process of wet salting of meat raw materials in the production of ham-like products. Therefore, the work carried out within the reporting period, namely the refinement of the design of massagers with a cooling jacket regarding the possibility of using pulsating vacuum, for which the automatic control system of massagers has been modernized, should be continued further.

The results of the studies may well serve as confirmation of the opinion of the authors [29] that the combination of modern technological methods, involving the use of complex multi-component brines, effective hydro-

mechanical processing modes and the corresponding technological equipment (devices for the preparation, supply and purification of brine, needle injectors and meat massagers) makes it possible to produce meat delicacies, including those of beef, with a good yield, stable sensorial characteristics and high nutritional value.

Conclusion and prospects for further research. The use of vacuuming in general and pulsating vacuuming in particular promotes intensifying the process of wet salting of raw meats in the production of salted meat and ham products. Therefore, the use of massagers with cooling and a pulsating vacuum system is an optimal design solution in terms of product quality and acceptable production profitability for meat processing plants.

The information obtained as a result of the experiments may be used for the development of new machines for massaging / tumbling raw meats and technical enhancing of the modes of implementation of the specified process, which will contribute in equipping meat processing plants with progressive efficient specialized equipment, the majority of which is now imported.

It seems appropriate to focus further research on a comprehensive study of the process of hydro-mechanical processing of raw meats in the entire set of its constituent technological operations: tenderization, needle injection and massaging/tumbling in order to determine rational processing modes that ensure excellent sensorial traits of the finished product and an output acceptable in terms of technology and profitability.

References

1. Cherednichenko, O. (2020). An analysis of the current state of the food industry of Ukraine and determining the prospects for its development. *Modern Management Review*, 27(1), 13-20. <https://doi.org/10.7862/rz.2020.mmr.2>.
2. Antoniv, A., Adamchuk, L., Ivanišová, E., Chlebo, R., & Topal, E. (2023). Analysis of the market of meat products in Ukraine. *Scientific Journal 'Animal Science & Food Technologies'*, 14(2), 9-27. <https://doi.org/10.31548/animal.2.2023.9>.
3. Vlasenko, I., Semko, T., & Ivanisheva, O. (2021). Functioning analysis of meat processing industry in modern conditions on the example of Ukraine. *Technology audit and production reserves*, (2/4), 58, 12-15. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.229693>.
4. Verbytskyi, S., & Patsera, N. (2022). Dry and wet tenderization of meats: basic features and technological equipment. *Food Resources*, 10(19), 7-17. <https://doi.org/10.31073/foodresources2022-19-01>
5. Verbytskyi S. B. (2020). Inyetsirovanie y massirovanie miasnogo syria [Injecting and massaging of raw meats]. *Miasnoy biznes [Meat Business]*, 10, 42-46.
6. Pospiech, M., Tremlová, B., & Javůrková, Z. (2020). The microstructure of whole-muscle meat products. *Maso International*, 2, 155-159.
7. Krzywdzińska-Bartkowiak, M., Gajewska-Sczcerbal, H., Dolata, W. (2010). Wpływ nastrzykiwania na solanką pelującą i masowania na zmiany mikrostruktury dwóch części mięśnia najdłuższego grzbietu świń. *Nauka Przyroda Technologie, Nauki o Żywności i Żywieniu, Tom 4, Zeszyt 2*, 1-9.
8. Tumenova, G., Sadupova, T., Dauletkhankyzy, A., Abilda, A., & Kudrenova, L. (2020). Biokhimicheskie aspekty posola tselnomyshechnykh miasnykh produktov [Biochemical aspects of salting process of whole-muscle meat products]. *Food Resources*, 8(14), 175-188. <https://doi.org/10.31073/foodresources2020-14-18>.
9. Cáceres, J. C., & Sanabria, C. J. (2021). *Evaluación de salmueras para mejoramiento de las características físicoquímicas en el lomo (M. Longissimus dorsi) de vacas de descarte de la unidad de Ganado Lechero de Zamorano* (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana).
10. Verbytskyi, S., Kuts, O., Kozachenko, O., & Patsera, N. (2024). Challenges and practical considerations in translating legal and technical texts in the food production industry. *Germanic Philology. Journal of Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University*, (848), 50-55. <https://doi.org/10.31861/gph2024.848.50-58>.
11. De Mey, E., D. Telleir, D., Neyrinck, E., Raes, K., Paelinck, H., Fraeye, I. (2015). Influence of the raw ham quality and tumbling time on yield and product quality of cooked ham. *Proceedings of 61st International Congress of Meat Science and Technology*, 23-28th August 2015, Clermont-Ferrand, France.
12. Pinto Neto, M. (2004). Tombamento ou injeção: qual a melhor opção? *Revista Nacional da Carne*, Edição № 330.
13. Sharedeh, D., Venien, A., Favier, R., Chekrar, F., Gatellier, P., Astruc, T., & Daudin, J. D. (2012). Incidence of mechanical action during tumbling of meat on mass transfer, tissue structure and protein solubilization.
14. Sharedeh, D. (2015). Analyse du transfert de matière et des modifications biochimiques et structurales du tissu musculaire lors du marinage, saumurage et malaxage des viandes. *Alimentation et Nutrition. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II*.
15. Steen, L., Neyrinck, E., De Mey, E., De Grande, A., Telleir, D., Raes, K., ... & Fraeye, I. (2020). Impact of raw ham quality and tumbling time on the technological properties of polyphosphate-free cooked ham. *Meat science*, 164, Article 108093. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108093>.
16. Pancrazio, G., Cunha, S. C., De Pinho, P. G., Loureiro, M., Ferreira, I., & Pinho, O. (2015). Physical and chemical characteristics of cooked ham: Effect of tumbling time and modifications during storage. *Journal of Food Quality*, 38(5), 359–368. <https://doi.org/10.1111/jfq.12153>.

17. Pioselli, B., Paredi, G., & Mozzarelli, A. (2011). Proteomic analysis of pork meat in the production of cooked ham. *Molecular BioSystems*, 7(7), 2252–2260.
18. Lachowicz, K., Sobczak, M., Gajowiecki, L., & Zych, A. (2003). Effects of massaging time on texture, rheological properties, and structure of three pork ham muscles. *Meat Science*, 63(2), 225–233. [https://doi.org/10.1016/s0309-1740\(02\)00073-6](https://doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00073-6).
19. Jones, M., Arnaud, E., Gouws, P., Hoffman, L.C., 2017. Processing of South Africa biltong – a review. *S. Afr. J. Anim. Sci.* 47 (6), 743–757. <http://dx.doi.org/10.4314/sajas. v47i6>.
20. Mirade, P. S., Portanguen, S., Sicard, J., De Souza, J., Ndob, A. M., Hoffman, L. C., Goli, T. & Collignan, A. (2020). Impact of tumbling operating parameters on salt, water and acetic acid transfers during biltong-type meat processing. *Journal of Food Engineering*, 265, 109686. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109686>.
21. Zhao Honglei, Chang Jingyao, Liu Meiyue, Xin Ying, Yang Le, Kong Baohua, Liu Qian. (2021). Recent development in the application of novel processing technologies based on the clean label concept in low phosphate meat products [J]. *Meat Research*, 35(1): 83-91. <https://doi.org/10.7506/rlyj1001-8123-20201218-293>.
22. Verbytskyi, S. (2022). Some technological features of hydro-mechanical processing of beef. Processes, machines, and equipment of agricultural and industrial production: issues of theory and practice: Proceedings of the International scientific-practical conference dedicated to the 90th anniversary of Professor Rybak Tymofij Ivanovych's birth and the 60th anniversary of the Engineering Mechanics and Agricultural Machines Department, (Ternopil, 29–30 September 2022.) / Ministry of Science and Education of Ukraine, Ternopil I. Puluj National Technical University [and others]. – Ternopil: PE Palianytsia V. A., 89,90.
23. Verbytskyi, S. B. & Shevchenko, V. V. (2011). Nuzhno by pointensivnee (Igolnye inyektory i massazhery miasa) [You should do it in more intensive way (Needle injectors and meat tumblers)]. *Myasnoy biznes [Meat Business]*, 4, 49-52.
24. Lachowicz, K., Gajowiecki, L., Zych, A., Żochowska, J., Sobczak, M., & Kotowicz M. (2003). Effects of massaging time and drum speed on texture and structure of two beef muscles. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Food Science and Technology, Volume 6, Issue 2*.
25. Dolata, W., Krzywdzińska-Bartkowiak, M., & Wajdzik, J. Technological effect of plastification on changes in the macrostructure of meat. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Food Science and Technology, 2005, Volume 8, Issue 3*.
26. Grau, R., Hamm, R. (1957). Über das Wasserbindungsvermögen des Säugetiermuskels. II. Mitteilung. Über die Bestimmung der Wasserbindung des Muskels. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 105(6), 446–460. <https://doi.org/10.1007/BF01884725>.
27. Erdemir, E., & Karaoğlu, M. M. (2021). Et ve et ürünlerinin tekstürel özelliklerini enstrümantal olarak tespit etme yöntemleri ve tekstür profil analizi üzerine bir derleme. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(4), 2836- 2848. <https://doi.org/10.782149/jist.782149>.
28. Bal-Prylypko, L. V., Cherednychenko, O. O., Slobodaniuk, N. M., Leonova, B. I., & Riabovol, M. V. (2020). *Naukovi osnovy ta ekonomichna dotsilnist stvorennia kompleksu tekhnolohii vyrobnytstva miasnykh produktiv tryvaloho terminu zberihannia [Scientific foundations and feasibility of creating a complex of technologies for the production of long-shelf life meat products]: Monograph*. Kyiv: NUBIP of Ukraine, 381 p..
29. Kyshenko, I., Kryzhova, Y., & Gontovyi, M. (2014). Multi brines in the production of beef ham. *Ukrainian Food Journal, Volume 3, Issue 4*, 540-549.

ГІДРОМЕХАНІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ СИРОВИНИ З ЯЛОВИЧНИИ ШЛЯХОМ МАСУВАННЯ: ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА ПРАКТИЧНІ ПІДХОДИ

Вербицький С., к.т.н.

Інститут продовольчих ресурсів НААН, м. Київ, Україна

Анотація. Удосконалення обладнання для гідромеханічного оброблення м'ясної сировини є важливим і в сенсі забезпечення належної рентабельності виробництва, і в сенсі забезпечення споживачів цінною білковою м'ясною продукцією відмінного смаку. Соління м'ясної сировини, що належить до гідромеханічної обробки, є складним комплексним процесом масообміну, перетворень білкових та інших речовин, зміни вологоутримувальної здатності м'яса, зміни його мікроструктури та ін. Існують різні підходи до машинно-апаратного оформлення та технологічних режимів гідромеханічного оброблення м'ясної сировини. Масажери/тумблери м'яса, що застосовуються в промисловості, забезпечують пристроями охолодження та вакуумування робочої порожнини. Активні дослідження ведуться щодо визначення раціональної тривалості роботи/вистою при обробленні сировини в барабані. Для яловичини рекомендують застосовувати режим чергування роботи тривалістю 30 хв та вистою тривалістю 30 хв впродовж 8 – 12 год, а також інші режими. Мета статті – викласти та логічно обґрунтувати результати досліджень масування обробки м'я-

сної сировини в барабані масажера за різних режимів технологічного оброблення. Масування м'ясної сировини здійснювали за допомогою лабораторної установки для мокрого посолу м'ясної сировини (барабанного масажера) Я5-ФМС власної розробки. Реологічні характеристики визначали за допомогою універсальної електромеханічної випробувальної машини SANS CMT2503. Тривалість посолу м'ясної сировини залежить від її виду та характеристик якості, морфологічного складу, рН, ступеня автолізу, маси та форми відрубів м'яса, кількості, якості та температури розсолу, а також від ефективності обладнання, що застосовується. Ефективніше проникнення посолювальних інгредієнтів досягається завдяки застосуванню пульсуючого вакуумування, коли оброблювана м'ясна сировина перебуває під впливом знакозмінних навантажень: атмосферний тиск — вакуум. Збільшення інтенсивності гідромеханічного оброблення м'ясної сировини спричиняє відповідні зміни у структурі м'язових волокон — їх набухання, виникнення чи збільшення поперечно — цілинних порушень цілісності, порушення мембранних структур, розпушування та набухання міофібрилярних білків. Застосування пульсуючого вакууму і охолодження барабана не тільки покращує, але і значно прискорює процес вологого посолу м'ясної сировини при виробництві шинкових виробів. Вакуумування взагалі та пульсуюче вакуумування зокрема сприяють інтенсифікації процесу вологого соління м'ясної сировини. Тому застосування масажерів з охолодженням та системою забезпечення пульсуючого вакууму є оптимальним конструктивним рішенням у сенсі належної якості продукції та прийнятної для м'ясопереробних підприємств рентабельності виробництва.

Ключові слова: м'ясна сировина, розсіл, соління, м'якшення, вакуумування.

Список використаної літератури

1. Cherednichenko O. An analysis of the current state of the food industry of Ukraine and determining the prospects for its development. *Modern Management Review*. 2020. № 27(1). P. 13–20. <https://dx.doi.org/10.7862/rz.2020.mmr.2>.
2. Antoniv A., Adamchuk L., Ivanišová E., Chlebo R., Topal E. Analysis of the market of meat products in Ukraine. *Scientific Journal 'Animal Science & Food Technologies'*. 2023. № 14(2). P. 9–27. <https://doi.org/10.31548/animal.2.2023.9>.
3. Vlasenko I., Semko T., Ivanisheva O. Functioning analysis of meat processing industry in modern conditions on the example of Ukraine. *Technology audit and production reserves*. 2021. 2(4) 58)). P. 12–15. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.229693>.
4. Verbytskyi S., Patsera N. Dry and wet tenderization of meats: basic features and technological equipment. *Food Resources*. 2022. № 10(19). P. 7–17. <https://doi.org/10.31073/foodresources2022-19-01>.
5. Вербицький С. Б. Ін'єктування та масування м'ясної сировини. *М'ясний бізнес*. 2020. № 10. С. 42–46.
6. Pospiech M., Tremlová B., Javůrková, Z. The microstructure of whole-muscle meat products. *Maso International*. 2020. № 2. P. 155–159.
7. Krzywdzińska-Bartkowiak M., Gajewska-Sczcerbal H., Dolata W. Wpływ nastrzykiwania na solankę pelującą i masowania na zmiany mikrostruktury dwóch części mięśnia najdłuższego grzbietu świń. *Nauka Przyroda Technologie, Nauki o Żywności i Żywieniu*. 2010. Tom 4, Zeszyt 2. S. 1–9.
8. Туменова Г., Садупова Т., Даулетханкизи А., Абілда А., Кудренова Л. Біохімічні аспекти процесу посолу цілном'язових м'ясних продуктів. *Продовольчі ресурси*. 2020. № 8(14). С. 175–188. <https://doi.org/10.31073/foodresources2020-14-18>.
9. Cáceres J. C., Sanabria C. J. Evaluación de salmueras para mejoramiento de las características fisicoquímicas en el lomo (M. *Longissimus dorsi*) de vacas de descarte de la unidad de Ganado Lechero de Zamorano. 2021. Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana. 38 p.
10. Verbytskyi S., Kuts O., Kozachenko O., Patsera N. Challenges and practical considerations in translating legal and technical texts in the food production industry. *Germanic Philology. Journal of Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University*. 2024. № 848. P. 50–55. <https://doi.org/10.31861/gph2024.848.50-58>.
11. De Mey E., Telleir D., Neyrinck E., Raes K., Paelinck H., Fraeye, I. Influence of the raw ham quality and tumbling time on yield and product quality of cooked ham. *Proceedings of 61st International Congress of Meat Science and Technology*, 23–28th August 2015. Clermont-Ferrand. 2015.
12. Pinto Neto M. Tombamento ou injeção: qual a melhor opção? *Revista Nacional da Carne*. 2004. № 330.
13. Sharedeh D., Venien A., Favier R., Chekrar F., Gatellier P., Astruc T., Daudin J. D. Incidence of mechanical action during tumbling of meat on mass transfer, tissue structure and protein solubilization. Paper presented at the EFFoST on 20–23 November 2012. Montpellier. 2012.
14. Sharedeh D. Analyse du transfert de matière et des modifications biochimiques et structurales du tissu musculaire lors du marinage, saumurage et malaxage des viandes. *Alimentation et Nutrition*. Clermont-Ferrand: Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand. 2015.
15. Steen L., Neyrinck E., De Mey E., De Grande A., Telleir D., Raes K., Paelinck H., Fraeye I. Impact of raw ham quality and tumbling time on the technological properties of polyphosphate-free cooked ham. *Meat science*. 2020. № 164, Article 108093. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108093>.
16. Pancrazio G., Cunha S. C., De Pinho P. G., Loureiro M., Ferreira I., Pinho, O. Physical and chemical characteristics of cooked ham: Effect of tumbling time and modifications during storage. *Journal of Food Quality*.

2015. № 38(5). P. 359–368. <https://doi.org/10.1111/jfq.12153>.
17. Pioselli B., Paredi G., Mozzarelli A. Proteomic analysis of pork meat in the production of cooked ham. *Molecular BioSystems*. 2011. № 7(7). P. 2252–2260.
18. Lachowicz K., Sobczak M., Gajowiecki L., Zych A. Effects of massaging time on texture, rheological properties, and structure of three pork ham muscles. *Meat Science*. 2003. № 63(2). P. 225–233. [https://doi.org/10.1016/s0309-1740\(02\)00073-6](https://doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00073-6).
19. Jones M., Arnaud E., Gouws P., Hoffman L. C., Processing of South African biltong – a review. *South African Journal of Animal Science*. 2017. № 47(6). P. 743–757. <http://dx.doi.org/10.4314/sajas.v47i6>.
20. Mirade, P. S., Portanguen S., Sicard J., De Souza J., Ndob A. M., Hoffman L. C., Goli T. Collignan A. Impact of tumbling operating parameters on salt, water and acetic acid transfers during biltong-type meat processing. *Journal of Food Engineering*. 2020. № 265. 109686. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109686>.
21. Zhao Honglei, Chang Jingyao, Liu Meiyue, Xin Ying, Yang Le, Kong Baohua, Liu Qian. Recent development in the application of novel processing technologies based on the clean label concept in low phosphate meat products. *Meat Research*. 2021. № 35(1). P. 83-91. <https://doi.org/10.7506/rlyj1001-8123-20201218-293>.
22. Verbytskyi S. Some technological features of hydro-mechanical processing of beef. Processes, machines, and equipment of agricultural and industrial production: issues of theory and practice: Proceedings of the International scientific-practical conference dedicated to the 90th anniversary of Professor Rybak Tymofij Ivanovych's birth and the 60th anniversary of the Engineering Mechanics and Agricultural Machines Department, Ternopil, 29–30 September 2022. Ternopil: PE Palianytsia V. A., 2022. P. 89–90.
23. Вербицький С. Б., Шевченко В. В. Необхідно інтенсивніше (Голкові ін'єктори та масажери м'яса). *М'ясний бізнес*. 2011. № 4. С. 49-52.
24. Lachowicz K., Gajowiecki L., Żych A., Żochowska J., Sobczak M., Kotowicz M. Effects of massaging time and drum speed on texture and structure of two beef muscles. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Food Science and Technology*. 2003. № 6(2).
25. Dolata W., Krzywdzińska-Bartkowiak M., Wajdzik J. Technological effect of plastification on changes in the macrostructure of meat. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Food Science and Technology*. 2005. № 8(3).
26. Grau R., Hamm R. Über das Wasserbindungsvermögen des Säugetiermuskels. II. Mitteilung. Über die Bestimmung der Wasserbindung des Muskels. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*. 1957. № 105(6). S. 446–460. <https://doi.org/10.1007/BF01884725>.
27. Erdemir E., Karaoğlu M. M. Et ve et ürünlerinin tekstürel özelliklerini enstrümantal olarak tespit etme yöntemleri ve tekstür profil analizi üzerine bir derleme. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 2021. № 11(4). S. 2836–2848. <https://doi.org/10.782149/jist.782149>.
28. Баль-Прилипко Л. В., Чередніченко О. О., Слободянюк Н. М., Леонова Б. І., Рябовол М. В. Наукові основи та економічна доцільність створення технологій виробництва м'ясних продуктів тривалого терміну зберігання: Монографія. Київ: НУБіП України, 381 с., 2020.
29. Kyshenko I., Kryzhova Y., Gontovyi M. Multi brines in the production of beef ham. *Ukrainian Food Journal*. 2014. № 3(4). P. 540-549.

Отримано в редакцію 20.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 20.08.2024
Approved 25.09.2024

ОСНОВНІ ПІДХОДИ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ТЕПЛОТИ І МАСИ ПРИ СУШІННІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Ощипок І. М. д-р техн. наук, професор

Львівський національний університет ім. І. Франка, м. Львів

Анотація. В статті розвинута термовологомеханіка сушіння харчових продуктів на основі систем диференціальних рівнянь тепло- та масопереносу та описані різні аналогічні процеси. Розглянута задача покращення процесу теплового сушіння продуктів у примусовому режимі, яка полягає у визначенні співвідношень між параметрами процесу: температурою сушильного агента на кожній ступені, часом витримки, початковою температурою сушіння і початковою, і кінцевою вологістю продукту, які дозволять без зниження якості готового продукту провести процес з мінімальним сумарним часом сушіння при мінімальних енергозатратах. Побудовані ізотерми адсорбції та десорбції води в харчових продуктах, які залежать від вмісту води і температури. Показана крива десорбції, яка розділена на 3 зони. Зона 1 ($0 \leq 0,2$): характеризується утворенням молекулярного моношару на поверхні продукту (сили Ван-дер-Ваальса між гідрофільними групами та молекулами води). Зона 2 ($0,2 \leq 0,6$): Адсорбція молекул водню відбувається на вихідному моношарі або включенням молекул води капілярним шляхом. Зона 3 ($> 0,6$): вода, присутня в рідкому стані в порах матеріалу. Мікрокапілярна вода є безперервною фазою. Дана оцінка застосування моделі дифузійної теорії для біологічних матеріалів, які регулюються рівнянням дифузії. Досліджено в даному контексті положення теорії капілярності в якій потік вологи визначається капілярними силами, а не градієнтом концентрації вологи. На основі випаровувально-конденсаційної теорії випаровування і конденсації розглянули як сполучний механізм перенесення маси та внутрішньої теплоти, де маса переходить у пароподібний стан, а теплота обмінюється з середовищем шляхом конденсації пари або випаровування води. Показані механізми перенесення вологи всередині харчових продуктів у формі твердого тіла.

Ключові слова: сушіння, волога, харчовий продукт, ізотерма, адсорбція, десорбція, модель

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями Сушіння є складною операцією, що включає одночасно явище перенесення теплоти і маси, а також фізичні або хімічні перетворення, які можуть викликати зміни якості харчової продукції. Фізичні зміни, які відбуваються включають геометричні зміни (усадку), набухання, кристалізацію та інші фазові переходи. У деяких випадках хімічні або біохімічні реакції можуть бути потрібними або небажаними, що призводить до зміни кольору, текстури, запаху або інших властивостей харчового виробу. При виробництві харчової продукції каталізаторами, наприклад, можуть стати умови сушіння, які викликають значні зміни в їх активності шляхом зміни внутрішньої площі поверхні або пористості.

Чим більша різниця температур між теплоносієм і продуктом, тим більшою буде швидкість передачі теплоти в продукт; це забезпечить необхідну рушійну силу для видалення вологи. Коли теплоносієм є повітря, температура відіграє іншу важливу роль. Оскільки вода виділяється з харчових продуктів у вигляді водяної пари, її потрібно відвести, в іншому випадку вона створює вологу насичену пару на поверхні харчового продукту, яка сповільнює швидкість подальшого видалення води. Чим гарячіше повітря, тим більше вологи воно утримуватиме, перш ніж відбудеться насичення. Очевидно, і те що більший об'єм повітря також може поглинати більше вологи, ніж менший об'єм. Нагріте повітря не тільки поглинає більше вологи, ніж прохолодне, але й процес його видалення залежить від швидкості руху, тобто повітря з достатньою швидкістю, усуває її з поверхні продукту, що висушується, не даючи волозі створити насичену водяну пару.

Волога вільно видаляється з поверхні, якщо тиск її пари перевищує тиск атмосферної пари над нею. Але в міру висихання сировини і поступового видалення вільної вологи тиск пари з одиниці площі продукту зменшується. Тому, що не тільки залишається менше води на одиницю об'єму та на одиницю площі, а ще й тому, що частина води утримується або зв'язується хімічними та фізичними силами з твердими складовими продукту.

Вільну вологу найлегше видалити, вона першою випаровується. Додаткова вода може нещільно утримуватися силами адсорбції твердих речовин продукту. Важче видалити воду, яка утворює колоїдні гелі, наприклад, коли присутні крохмаль, пектин або інші в'язучі. Ще складніше видалити хімічно зв'язану воду у вигляді гідратів (наприклад, моногідрату глюкози або гідратів неорганічних солей). Ці явища також сприяють вирівнюванню нормальних кривих висихання продукту з часом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання вологості харчової сировини при висушуванні має дуже важливе значення. Теорія деформації у вологих та ненасичених пористих середовищах була розвинена у роботі [1]. Подальший розвиток теорії з урахуванням багатозфазного транспортування вологи з використанням опису сумішей виконано в різних дослідженнях (огляд у роботі [6]). Можливий опис процесу в мік-

ромасштабі або з урахуванням усереднення макромасштабу [8]. В обох підходах базові співвідношення описуються як на основі дослідних даних, так і на основі другого закону термодинаміки через нерівність ентропії (нерівноважної термодинаміки). Детальний порівняльний аналіз цих теорій представлений у роботі [5]. Ця теорія широко застосовувалася до непродовольчих матеріалів, і зовсім недостатньо прикладів всебічного поромеханічного підходу для харчових продуктів.

Більшість існуючих моделей перенесення вологи в науковій літературі харчових продуктів являють собою припасовування (підгонки результатів моделювання до отриманих експериментальних даних) кривих, або, у трохи покращеній версії, просто приймають теплопровідність для перенесення енергії та дифузійне перенесення для вологості [9]. При цьому вирішуються рівняння нестационарної теплопровідності (або дифузії), які використовуються для визначення за експериментальними даними ефективної теплопровідності (або коефіцієнтів дифузії). Відмінною рисою є використання опису перенесення через границю, що рухається (завдання Стефана), що дозволяє відстежити поверхню розділу рідина-пара, де відбувається внутрішнє випаровування. При прийнятті такої моделі поверхня розділу рідина-пара, де здійснюється випаровування, відокремлюються повністю насичені та абсолютно сухі області продовольчої сировини. Детальний опис механізмів перенесення в пористих середовищах включає випаровування і утворення, при цьому, керованого тиском потоку під час обробки інтенсивним нагріванням [3]. У роботі [7], базуючись на нерівноважній термодинаміці, було запропоновано гібридний підхід теорії суміші до дифузії. Надалі застосування теорії Flory-Rehner дозволило передбачати розширювальний тиск, що діє на перенесення вологи у матеріалі.

Опис деформації у продовольчих матеріалах є особливим порівняно з всебічним описом безпосереднього перенесення. Зазвичай використовуються два різні підходи: експериментальні дані про стиснення, які описуються функцією вмісту вологи, або адитивності об'ємів різних компонентів використовуваних для передбачення деформації з наявних втрат вологості [4]. Моделювання перенесення в нежорстких продовольчих матеріалах як проблема механіки твердого тіла та рішення лінійного балансу імпульсу для твердої матриці використовується рідко, хоча цей підхід часто застосовується, щоб вивчити сушіння деяких інших матеріалів, таких як деревина та кераміка. Детальний огляд моделей сушіння, які включають ефекти стиснення, представлений у роботі [4], включаючи фундаментальні роботи.

Постановка завдання. З урахуванням представленої характеристики стану проблеми, в даному дослідженні планується здійснити спробу розвинути термовологомеханіку сушіння харчових продуктів на основі систем диференціальних рівнянь тепло- та масопереносу та описати різні такі процеси. Особливого технологічного значення набуває гістерезис кривих ізотерм адсорбції-десорбції, які корисні для прогнозування терміну придатності їжі, контролю висихання та запобігання певним негативним явищам, таким як прилипання або злежування порошкоподібних харчових продуктів, а також ризиків псування харчових продуктів в залежності від a_w (активність води) Задача покращення процесу теплового сушіння продуктів у примусовому режимі зводиться до визначення співвідношень між параметрами процесу: температурою сушильного агента на кожній ступені, часом витримки, початковою температурою сушіння і початковою, і кінцевою вологістю продукту, які дозволять без зниження якості готового продукту провести процес з мінімальним сумарним часом сушіння при мінімальних енергозатратах. Важливо також оцінити для біологічних матеріалів, застосування моделі дифузійної теорії, яка регулюється рівнянням дифузії. Дослідити в даному контексті положення теорії капілярності в якій потік вологи визначається капілярними силами, а не градієнтом концентрації вологи. На основі випаровувально-конденсаційної теорії випаровування і конденсацію необхідно розглянути як сполучний механізм перенесення маси та внутрішньої теплоти, де маса переходить у пароподібний стан, а теплота обмінюється з середовищем шляхом конденсації пари або випаровування води.

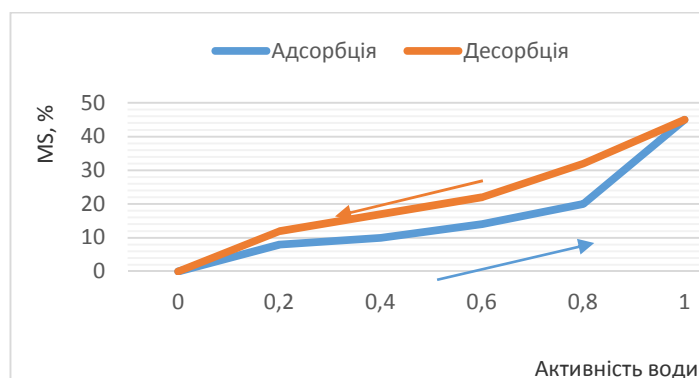


Рис. 1 – Ізотерма адсорбції та десорбції води

ординат: вміст води в продукті, виражений у г води на 100 г сухої речовини MS (% сухої речовини) (рис. 1).

Ці дві криві, як правило, відрізняються оскільки висихання продукту (від $a_w = 1$ до $< 0,6$) призводить до незворотних змін у структурі та пористості. Під час сушіння нас особливо цікавить крива десорбції, яку можна розділити на 3 зони (рис. 1).

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо ізотерми адсорбції та десорбції води. В харчовому продукті вологість в основному залежить від вмісту води і температури. Крива, що представляється для даної температури як функція вмісту вологи в продукті має значення активності води ($A_w = a_w$).

Ізотерма адсорбції, визначається експериментально, починаючи з сухого продукту. Ізотерма десорбції, визначається експериментально, починаючи з продукту, насиченого водою. Графічно зобразимо ці криві. На осі абсцис: відкладемо активність води A_w в продукті, на осі

Зона 1 ($0 \leq 0,2$): характеризується утворенням молекулярного моношару на поверхні продукту (сили Ван-дер-Ваальса між гідрофільними групами та молекулами води). Адсорбція відбувається поступово до утворення моношару, що покриває зовнішню поверхню і пори продукту. Вода знаходиться у зв'язаному стані (жорсткі, міцні водневі зв'язки). Перехід до наступної зони відбувається, коли вся поверхня насичена.

Зона 2 ($0,2 \leq 0,6$): Адсорбція молекул водню відбувається на вихідному моношарі або включенням молекул води капілярним шляхом. Ізотерма в цій зоні лінійна. Це проміжний стан між твердим і рідким.

Зона 3 ($> 0,6$): вода, присутня в рідкому стані в порах матеріалу. Мікрокапілярна вода є безперервною фазою.

Аналіз ізотерми адсорбції та десорбції показує, що дві криві не накладаються. При розгляданому вмісті води рівновага десорбції нища, ніж рівновага адсорбції. Це пов'язано з тим, що процес адсорбції зазвичай більш енергетично вигідний, ніж десорбція, особливо якщо молекули води міцно зв'язані з поверхнею, а явище гістерезису з'являється для значень $> 0,2$.

Гістерезис можна пояснити двома спостереженнями:

Пори харчових продуктів зазвичай менші на поверхні, ніж у глибині. Тиск водяної пари, необхідний для заповнення, вищий, ніж тиск, при якому пори зневоднюються;

Гістерезис особливо виражений у фруктах і овочах, оскільки цукри в цих продуктах утворюють перенасичені розчини, які не випадають в осад при зневодненні.

Ізотерми адсорбції-десорбції в харчових технологіях представляють значний інтерес. З термодинамічної точки зору ізотерми адсорбції дають інформацію про ентальпію «сорбції» і про тип зв'язку води з сухою речовиною продукту.

Зі структурної точки зору вони дозволяють краще зрозуміти роль розміру частинок, аморфного стану і питомої поверхні в явищах десорбції або адсорбції водяної пари;

З технологічної точки зору вони корисні для прогнозування терміну придатності їжі, контролю висихання та запобігання певним негативним явищам, таким як прилипання або злежування порошкоподібних харчових продуктів. Саме відносний склад білків, крохмалю, мінеральних солей і сахарози визначає ізотерми адсорбції. Завдання полягає в тому, щоб їх ослабити; для цього можемо використати різні добавки, такі як сіль, цукор, щоб знизити вміст води без зміни стану продукту. Ці добавки цінні для харчових продуктів із середньою вологістю $< 35\%$ і $A_w 0,6 \leq 0,8$. У герметичній упаковці (сушені ковбаси, сухофрукти, печиво тощо) зберігають свою стабільність протягом кількох тижнів.

Крім того, стан сполук продукту впливає на швидкість фіксації води; наприклад, за певної вологості аморфна сахароза утримує більше води, ніж кристалізована сахароза, оскільки перехід з одного фазового стану в інший викликає видалення води, коли кристал стає впорядкованим. Ця трансформація пов'язана як з вологістю, так і з температурою. Під час кристалізації вода, що виділяється, розчиняє кристали у зовнішніх шарах, тоді як внутрішні шари закріплюють свою кристалізацію та перетворюються в масу. Вода, видалена з кристала, також може повторно локалізуватися на інших компонентах і утворювати липку масу.

Чим менше в харчових продуктах води, тим краще вони зберігаються, оскільки розмноження мікробів і хімічні реакції обмежені (рис. 2).

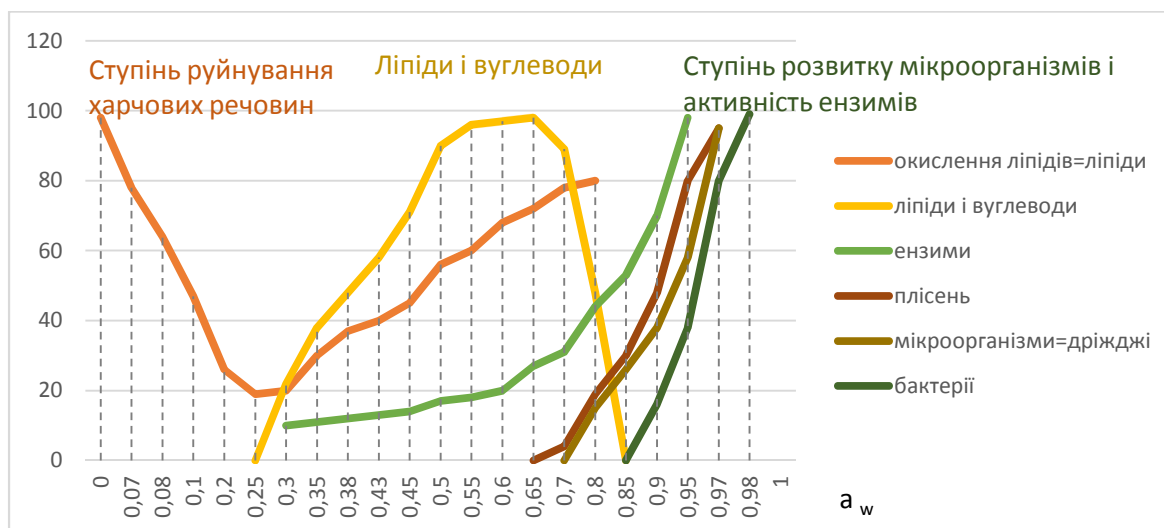


Рис. 2 – Ризик псування харчових продуктів на основі a_w

Ізотермічні криві корисні для прогнозування поведінки харчових продуктів після технологічної обробки та умов зберігання. Структуру моделювання термовологомеханіки сушіння включає опис процесів перенесення теплоти та вологи, а також деформації, на основі теорії розширення поромеханіки [5]. Для опису перенесення теплоти та маси використовуються класичні закони як у масовому транспортуванні (закони Дарсі

та Фіка), і у теплопровідності (закон Фур'є). Для вирішення таких задач приймаються такі припущення рис.3:



Рис. 3 – Припущення в моделюванні термовологомеханіки сушіння

Біологічні матеріали показують нелінійну поведінку "Напруження-деформація" для великих деформацій (на 30-70 %).

Сушіння є результатом випаровування води спочатку з рідкого стану, яка утворюється від нагрівання вологого продукту. Як відомо отримання теплоти можна забезпечити конвекцією (прямі сушарки), кондукцією (контактні сушарки або непрямі сушарки) і шляхом випромінювання. Перенесення вологи всередині харчових продуктів у формі твердого тіла може відбуватися будь-яким з наведених нижче механізмів масообміну рис. 4.

Різницею гідростатичного тиску, коли внутрішні швидкості випаровування відсутні і не перевищують швидкості переносу пари через тверду речовину в навколишнє середовище та загальний градієнт тиску діє як рушійна сила для перенесення речовини (порівняно з передачею Дарсі).

Дифузією рідини, якщо вологе тверде тіло має температуру нижчу за точку кипіння рідини

Дифузією пари, якщо рідина випаровується всередині продукту

Дифузією Кнудсена, якщо сушіння відбувається при температурах і тисках дуже низьких, наприклад, у процесі сублімаційного сушіння

Поверхневою дифузією (можливою, але не доведеною)

Однією або кількома комбінаціями вказаних механізмів

Рис. 4 – Механізми перенесення вологи всередині харчових продуктів у формі твердого тіла

Перенесення вологи в харчовому продукті залежить як від структури пор та взаємодія вологи з харчою матрицею. На сьогоднішній день розроблено багато моделей одночасного тепло- та масообміну при сушінні. Вони ґрунтуються або на перенесенні вологи при ефективній дифузії, або на розділенні дифузії рідини та дифузії пари. Розглянемо огляд цих моделей з деякими припущеннями (Srikatden & Roberts, 2007).

Розглянемо модель дифузійної теорії яка регулюється рівнянням дифузії. Вперше цю модель запропонував використовувати – Льюїс і Шервуд з його співробітниками, які застосували цю ідею і отримали розв'язки рівняння дифузії які добре узгоджувалися з експериментальними даними. Шервуд зауважив, що поведінка основних параметрів моделі є складною і було важко передбачити зменшення дифузії з концентрацією води (Remache & Belhamri, 2008).

Дифузія відбувається в межах тонкої структури твердого тіла, а також у капілярах, порах і дрібних порожнинах, насичених водяною парою. Ця пара дифундує назовні, доти, доки є відкритий кінець капілярної трубки, який втягується в потік повітрям.

На жаль, теорія дифузії не враховує усадку, зміцнення, або явища ізотермічної сорбції/десорбції (Gustavo & Humberto, 1996). Вона добре підходить до продуктів безперервної структури (Шаро і Кавайе, 1995).

Ця теорія припускає, що рух води до поверхні твердого тіла регулюється законом Фіка, який відображає явище міграції водяної пари з навколишнього середовища висушуваного тіла з більш сильною концентрацією води до середовища найнижчої концентрації води, іншими словами, від центру матеріалу, який потрібно висушити, до його поверхні. Потім відбувається випаровування води на поверхні продукту який є результатом зовнішнього джерела енергії.

Міграція води шляхом дифузії пропорційна градієнту концентрації води:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \nabla(D_{eff} \nabla W), \quad (1)$$

де W - вміст води, % db (dry basis) (вміст води обчислений у відсотках від сухої маси матеріалу;

D_{eff} - коефіцієнт дифузії, $m^2 s^{-1}$;

t : час, с.

Температурну залежність ефективного коефіцієнта дифузії D_{eff} можна описати за допомогою рівняння Ареніуса.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) \quad (2)$$

де E_a - енергія активації, Дж моль $^{-1}$;

T - абсолютна температура, К;

D_0 - еталонний коефіцієнт дифузії, $m^2 s^{-1}$;

R_g - універсальна газова стала, Дж моль $^{-1}$ К $^{-1}$.

Дослідимо в даному контексті положення теорії капілярності. Капілярний потік - це рух рідини через капіляри, пори взаємозв'язку в твердому тілі або на поверхні твердого тіла за рахунок молекулярного притягання між ними рідини та твердого тіла (Srikiatden & Roberts, 2007).

Теорію капілярності застосовують як основний механізм міграції води при сушінні сипких матеріалів. У цій теорії потік вологи визначається капілярними силами, а не градієнтом концентрації вологи. Тому потік може бути спрямований у бік збільшення концентрації води.

Отже деякими дослідниками підтримане це спостереження та модель сушіння пористих матеріалів на основі капілярності як механізму обмеження швидкості передачі вологості на початку сушіння, потім дифузія пари як явище, домінуюче в завершальній стадії сушіння (Srikiatden & Roberts, 2007). Ця теорія добре застосовується до пористих продуктів або до гранульованих продуктів (в останньому випадку проміжки або проміжки між частинками мають поведінку, подібну до поведінки матеріалу з порами) (Chateau & Cavaillé, 1995).

У капілярній теорії рушійною силою є капілярний потенціал. Капілярний потенціал або всмоктування ϕ - це різниця тиску між водою та повітрям на вигнутій межі капіляру повітря-вода. Кривизна межі розділу є результатом поверхневого натягу води. Потік рідини в капілярній теорії визначається так:

$$J_c = -K_h \nabla \phi, \quad (3)$$

де J_c - потік рідини через капілярність, кг м $^{-2}$ с $^{-1}$;

K_h - ненасичена гідравлічна провідність, м с $^{-1}$;

ϕ - капілярний тиск або потенціал всмоктування, кг м $^{-2}$;

В ізотермічних умовах капілярний потенціал пропорційний концентрації рідини в твердому тілі. Тоді градієнт цієї концентрації є основною рушійною силою.

При випаровувально-конденсаційній теорії випаровування і конденсацію можна розглядати як сполучний механізм перенесення маси та внутрішньої теплоти, де маса переходить у пароподібний стан, а теплота обмінюється з середовищем шляхом конденсації пари або випаровування води.

Розроблена модель для опису механізмів теплопередачі коли вода випаровується з твердого тіла або коли водяна пара конденсується в твердому середовищі. Таким чином, модель Генрі зазвичай називають моделлю випаровування-конденсації (Srikiatden & Roberts, 2007). Баланси енергії та маси наведені (Bossart, 2006) нижче:

Масоперенос

$$D \nabla^2 \rho_d - \frac{\partial \rho_d}{\partial t} = m_p \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (4)$$

Дифузія тепла

$$D_{ch} \nabla^2 T - \frac{\partial T}{\partial t} = -C_T \frac{\partial W}{\partial t} \quad (5)$$

Рівняння балансу

$$\frac{\partial w}{\partial \rho_d} = a_1 \quad i \quad \frac{\partial w}{\partial T} = -a_2 \quad (6)$$

Вважається, що пара в порах знаходиться в рівновазі з парою, адсорбованою на стінках.
де D - коефіцієнт молекулярної дифузії, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$;

ρ_d : концентрація речовини, що дифундує, у твердій речовині, кг м^{-3} ;

$m_p = \frac{1-\psi}{\psi} \rho_{sol}$ - маса твердої речовини, що містить одиницю пор, кг м^{-3} ;

Ψ – пористість;

D_{ch} - коефіцієнт дифузії теплоти, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$;

T – температура, К ;

C_T - константа, що стосується підвищення температури внаслідок адсорбції вологості що виникає в твердому тілі, К ;

W : Маса дифундуючої речовини в твердому тілі, кг кг^{-1} ;

a_1, a_2 : константи.

При розгляді моделі дифузії водяної пари допускається, що переважаючим механізмом висушування є внутрішня дифузія пари. Кінг, вивчаючи десорбцію води в пористій їжі, встановив математичну модель, засновану на припущенні, що передача маси всередині твердого тіла відбувається в основному в паровій фазі. Передача теплоти розглядається поряд з масопередачею. У будь-який час вологість у фазі конденсації більша, ніж у паровій фазі, тому перенесення вологи здійснюється шляхом дифузії через парову фазу. Зв'язок між сорбційною вологістю і тиском пари в газовій фазі частково описується ізотермою десорбції.

Рівняння, що виражає швидкість зміни вмісту вологи в пористому гігроскопічному матеріалі, за словами Кінга, має наступну форму (Bossart, 2006):

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad (7)$$

$$D_{eff} = \frac{D p_{vsat}}{\rho_{sul} R T} \frac{P_T}{P_T - P_W} \left(\frac{\partial a_w}{\partial X} \right)_T \left(\frac{a}{1+a} \right) \quad (8)$$

де

$$a = \frac{\lambda_{th} R^2 T^3}{q_s^2 D a_w p_{vsat}} \quad (9)$$

W - абсолютна вологість твердого тіла, кг води кг^{-1} сухої твердої речовини;

D_{eff} : ефективний коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$;

t : час, с ;

x – відстань, м ;

D - коефіцієнт дифузії водяної пари, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$;

p_{vsat} - парціальний тиск водяної пари при насиченні, Па ;

ρ_{sul} - щільність сухої твердої речовини, кг м^{-3} ;

R - універсальна газова стала, $\text{Дж кг}^{-1} \text{К}^{-1}$;

T - температура, К ;

P_T - загальний тиск, Па ;

P_W - парціальний тиск пари води, Па ;

a_w - активність води;

λ_{th} – теплопровідність, $\text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$;

q_s - теплота сорбції, Дж кг^{-1} .

Коли м'який матеріал висихає, відбуваються два важливі явища – пори стискаються, і модуль пружності матеріалу збільшується, перетворюючи м'який, пружний продукт у твердий, склоподібний стан. Для однорідного розподілу вологості зміна об'єму дорівнює обсягу втраченої води. Матеріал припинить стискатися, коли в матриці рідина утворює меніски пари і, зі збільшеним модулем пружності, напруження твердої матриці зможуть врівноважити тиск, що стискає капіляри. До цього моменту скелет твердої матриці занадто м'який, щоб дозволити меніску переміщатися всередині і створювати тиск, що стискає. Припускаючи, що скелет твердої матриці є пружним, нормальне ефективне напруження може бути пов'язане з зміною об'єму.

Висновок. За результатами досліджень показані вагомні методи та раціональні технологічні моделі сушіння продуктів харчування. Розглянуті моделі слід застосовувати індивідуально для кожного окремого виду сировини з урахуванням показника активності води наведеного в роботі. Перенесення вологи в харчових продуктах залежить як від структури пор так і взаємодії вологи з продуктовою матрицею. З точки зору термодинаміки ізотерми адсорбції дають інформацію про ентальпію «сорбції» і про тип зв'язку води з сухою речовиною продукту. Комплексні рішення цих проблем мають широкі перспективи впровадження при сушінні харчової сировини і готової продукції. Проявляються перспективні системи для зниження енергоспоживання, які підвищують енергоефективність процесу виробництва харчових продуктів.

Зниження енергоспоживання не тільки підвищує енергоефективність процесів виробництва, але знижує рівень теплового впливу на продукти у результаті чого продукція стає більш біологічно цінною. В результа-

ті, в продукті зберігаються термочутливі та біологічно активні компоненти харчових інгредієнтів, що значно підвищує ефективність харчування і харчових технологій. У наслідку виробничі процеси підпорядковуються суворим правилам безпеки виробництва харчової продукції. Удосконалюються специфічні показники енерговитрат у застосовуваній технології, значно підвищуються ефективність та позитивно враховуються екологічні міркування.

References

1. Biot, M.A. (1965). *Mechanics of Incremental Deformations: Theory of Elasticity and Viscoelasticity of Initially Stressed Solids and Fluids, Including Thermodynamic Foundations and Applications to Finite Strain*, New York: Wiley.
2. Burdo O.G., Sit M.L., Zikov A.V., Reznichenko D.N., Juravleov A. A. (2016). Energy Address Delivery Technologies and Thermal Transformations in Food Production. *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE* 2 (31), 55-69
3. Halder A., Dhall A., Datta A.K. (2007). An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying – part I: model development and input parameters, *Food Bioprocess Technology*, 85 (3), 209-219.
4. Katekawa M.E., Silva M.A. (2006). A review of drying models including shrinkage effects / // *Drying Technology*, 24(1), 5–20.
5. Lewis, R.W., Shreffler, B.A. (1998). *The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media*, New York: John Wiley and Sons
6. Schreffler, B.A. (2002). Mechanics and thermodynamics of saturated / unsaturated porous materials and quantitative solutions, *Applied Mechanics Reviews*, 55(4), 351–388.
7. Singh, P.P. (2002). Effect of Viscoelastic Relaxation on Fluid and Species Transport in Biopolymeric Materials Indiana, United States: Ph.D. Purdue University,.
8. Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying *Advances in Heat Transfer*, 13, 114–203
9. Williams, R., Mittal, G.S. (1999). Low-fat fried foods with edible coatings: modeling and simulation / R. Williams, *Journal of Food Science*, 64(2), 317–322.

BASIC APPROACHES IN RESEARCH OF THERMOMECHANIC PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER POTENTIAL DURING FOOD DRYING

Oshchypok I.M. Dr. Sciences, Professor
Lviv National University named after I. Franko, Lviv, Ukraine

Abstract. The article develops the thermo-moist mechanics of drying food products based on systems of differential equations of heat and mass transfer and describes various such processes. The task of improving the process of thermal drying of products in the forced mode is considered, which consists in determining the relationships between the process parameters: the temperature of the drying agent at each stage, the exposure time, the initial drying temperature and the initial and final moisture content of the product, which will allow without reducing the quality of the finished product to carry out the process with the minimum total drying time with minimum energy consumption. Adsorption and desorption isotherms of water in food products, which depend on water content and temperature, were constructed. The desorption curve is shown, which is divided into 3 zones. Zone 1 ($0 \leq 0.2$): characterized by the formation of a molecular monolayer on the surface of the product (van der Waals forces between hydrophilic groups and water molecules). Zone 2 ($0.2 \leq 0.6$): Adsorption of hydrogen molecules occurs on the initial monolayer or by the inclusion of water molecules by capillary action. Zone 3 (> 0.6): water present in a liquid state in the pores of the material. Microcapillary water is the continuous phase. This evaluation of the application of the diffusion theory model for biological materials governed by the diffusion equation. In this context, the position of the theory of capillarity, in which the flow of moisture is determined by capillary forces, and not by the moisture concentration gradient, was studied. On the basis of the evaporation-condensation theory, evaporation and condensation were considered as a connecting mechanism of mass transfer and internal heat, where the mass goes into a vapor state, and heat is exchanged with the environment by condensation of steam or evaporation of water. The mechanisms of moisture transfer inside food products in the form of a solid body are shown.

Keywords: drying, moisture, food product, isotherm, adsorption, desorption, model

Список використаної літератури

1. Biot, M.A. *Mechanics of Incremental Deformations: Theory of Elasticity and Viscoelasticity of Initially Stressed Solids and Fluids, Including Thermodynamic Foundations and Applications to Finite Strain* / M.A.

- Biot. – New York: Wiley. – 1965
2. Burdo O.G. , Sit M.L. , Zikov A.V. , Reznychenco D.N. , Juravleov A. A. Energy Address Delivery Technologies and Thermal Transformations in Food Production. PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 2 (31) 2016 TERMOENERGETICĂ. - 55-69
 3. Halder, A. An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying – part I: model development and input parameters / A. Halder, A. Dhall, A.K. Datta // Food Bioproducts Process. – 2007. – № 85 (C3). – P. 209-219.
 4. Katekawa, M.E. A review of drying models including shrinkage effects / M.E. Katekawa, M.A. Silva // Drying Technology. – 2006. – Vol. 24. – Issue 1. – P. 5–20.
 5. Lewis, R.W. The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media / R.W. Lewis, B.A. Schrefler. – New York: John Wiley and Sons, 1998.
 6. Schrefler, B.A. Mechanics and thermodynamics of saturated / unsaturated porous materials and quantitative solutions / B.A. Schrefler // Applied Mechanics Reviews. – 2002. – Vol. 55. – Issue 4. – P. 351–388.
 7. Singh, P.P. Effect of Viscoelastic Relaxation on Fluid and Species Transport in Biopolymeric Materials / P.P. Singh. - Indiana, United States: Ph.D. Purdue University, 2002.
 8. Whitaker, S. Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying / S. Whitaker // Advances in Heat Transfer. – 1977. – № 13. – P. 114–203
 9. Williams, R. Low-fat fried foods with edible coatings: modeling and simulation / R. Williams, G.S. Mittal // Journal of Food Science. – 1999. – Vol. 64. – Issue 2. – P. 317–322.

Отримано в редакцію 11.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 11.07.2024
Approved 25.09.2024

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ОБЛАДНАННЯ ШНЕКОВИХ ПРЕСІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ОЛІЇ

Хоменко А. Д., аспірант, Осадчук П.І., д-р техн. наук
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Олійно-жирова промисловість відіграє важливу роль у світовій харчовій індустрії. Численні дослідники зосереджували увагу на підвищенні ефективності, скороченні енергоспоживання та поліпшенні якості отриманої олії. У рамках цього дослідження запропоновано використання додаткової модуляції для регулювання частоти обертання шнеків у пресовому обладнанні, що сприяє підвищенню енергоефективності та покращенню кінцевої якості продукту. Оптимізація роботи шнекових гвинтів дозволяє досягти високого рівня продуктивності, одночасно зменшуючи непродуктивні витрати енергії. Крім того, така система підвищує чутливість і адаптивність обладнання до змін у процесі роботи. Вона також забезпечує можливість реєстрації та аналізу даних, що сприяє якісному моніторингу та ефективному технічному обслуговуванню електромеханічних компонентів. Програмне забезпечення системи містить інтелектуальні алгоритми та логіку управління, які аналізують інформацію від датчиків і створюють точні сигнали для управління приводами. Це дозволяє підтримувати основні робочі параметри, такі як швидкість і крутний момент, з максимальною точністю. Алгоритми враховують навантаження, умови довкілля та показники енергоефективності, що дозволяє оптимізувати процеси управління і скоротити споживання енергії. Крім цього, система може використовувати сучасні методи машинного навчання для постійного вдосконалення своїх алгоритмів. Це сприяє підвищенню точності налаштувань і забезпечує високу енергоефективність. Автоматизоване управління має низку переваг: воно дозволяє шнековим гвинтам працювати на максимальній продуктивності з мінімальними втратами енергії, підвищує адаптивність обладнання до зміни умов експлуатації та навантажень, а також забезпечує якісний моніторинг і належне технічне обслуговування через аналіз даних.

Ключові слова: енергоефективність, шнековий, автоматизація, форпрес.

Вступ. Виробництво харчових олій є ключовим сектором світової економіки, адже попит на різні види олій у сфері харчової промисловості та інших галузях залишається високим. Скорочення витрат у цій сфері приносить значну економічну вигоду, збільшуючи прибутки виробників та створюючи передумови для зниження цін на олію для кінцевих споживачів. Досягти таких результатів можливо за рахунок підвищення ефективності роботи електромеханічного обладнання для виробництва олій та шнекових пресів, шляхом вдосконалення автоматизованого управління ними. Тому актуальним є питання підвищення енергоефективності електромеханічного обладнання шнеків за рахунок удосконалення автоматичного керування.

У цьому напрямі здійснено огляд літератури з питання автоматизації керування шнековими пресами, визначено мету та сформульовано завдання наукового дослідження.

Мета дослідження полягає в аналізі та розробці підходів до оптимізації енергоефективного обладнання, вдосконалення автоматизованих систем управління електромеханічними пристроями та раціонального розподілу навантаження в роботі шнекових пресів. Робота спрямована на визначення шляхів підвищення продуктивності, зниження рівня енергоспоживання та оптимізації розподілу навантажень у шнекових пресах через застосування інноваційних технологій автоматизації.

Для досягнення цієї мети необхідні [3]:

- конкретизація задачі дотримання процедур управління технологічним процесом пресування, розробка і реалізація його моделей комплексу як об'єкта регулювання в імітаційному середовищі;
- конкретизація задачі і розробка алгоритмів логічного керування технологічним процесом;
- вибір технічних засобів реалізації керуючих впливів та отримання інформації про змінні процесу;

Методи і матеріали дослідження

В дослідженні використано методи оптимізації енергоефективного обладнання і систем управління в процесі виробництва соняшникової олії, які включають в себе різноманітні підходи з метою досягнення максимальної ефективності енергоспоживання та оптимізації виробничих процесів. Серед таких методів можна виділити наступні:

1. Використання ефективних електродвигунів: Установка високоєфективних електродвигунів, зокрема з високим коефіцієнтом корисної дії, може сприяти зменшенню втрат енергії, пов'язаних з термічним випромінюванням та іншими негативними факторами. Це сприятиме вибору оптимальних електродвигунів для насосів, підтримуючи тенденцію до зменшення споживання енергії та підвищення продуктивності.

2. Впровадження систем моніторингу та управління енергетикою: Застосування системи Ethernet для підключення елементів технологічної лінії до ПК-серверу дозволяє моніторити енергоспоживання та стан процесу. Це надає можливість збирати та аналізувати дані про використання енергії, виявляти можливі

проблеми та витрати, а також вживати заходів для їх усунення.

3. Режим роботи та їх оптимізація: Детальний аналіз ключових технологічних параметрів, зокрема рівня навантаження, тиску насосів і швидкості подачі сировини, дозволяє встановити оптимальні режими функціонування шнекового пресу. Запровадження енергоощадного режиму роботи для преса та його системи управління сприяє ефективному використанню енергоресурсів і зменшенню надмірного споживання енергії. Це досягається шляхом точного налаштування параметрів частотних перетворювачів.

4. Регулярна перевірка та технічне обслуговування: Своєчасна діагностика і регулярне обслуговування обладнання дозволяють виявляти потенційні несправності на ранніх етапах, а також запобігати енергетичним втратам. Такі заходи підтримують високу ефективність роботи обладнання і допомагають уникнути непередбачених зупинок чи пошкоджень.

5. Використання сучасних матеріалів: Використання інноваційних теплоізоляційних та теплопровідних матеріалів сприяє ефективній ізоляції обладнання, зменшуючи перепади температур. Це забезпечує оптимальне використання енергії і сприяє підвищенню загальної ефективності виробничих процесів [2].

Ці методи спрямовані на досягнення більшої енергоефективності та сталого розвитку виробництва соняшникової олії, що включає в себе зниження енергоспоживання, ефективність ресурсів та мінімізацію впливу на довкілля [1].

Отримані результати дослідження здатні позитивно вплинути на промислову сферу, сприяючи зменшенню витрат енергії та підвищенню ефективності виробництва та скороченню загальних витрат. Вони також відкривають перспективи для впровадження інноваційних підходів у роботі шнекових пресів. У статті представлено ретельний аналіз ефективності запропонованих рішень для оптимізації, визначено напрями подальших досліджень та можливості вдосконалення енергоефективного обладнання й автоматизованих систем управління екстракційними установками.

У рамках аналізу була розглянута загальна структурна схема запропонованої системи у вигляді блочної діаграми (рис. 1), а у майбутньому планується деталізація технічних характеристик і подальша оптимізація шнекового пресу з метою забезпечення його ефективної та стабільної роботи. Система орієнтована на підвищення енергоефективності гвинтового обладнання через впровадження сучасних автоматизованих рішень управління. Інтеграція інноваційних технологій дозволяє забезпечити точне та оптимізоване регулювання роботи шнеків, що сприяє зменшенню енергоспоживання та підвищенню загальної продуктивності.



Рис. 1 – Структурна схема керування

Для досягнення енергоефективності система поєднує апаратну частину з програмними рішеннями. У її складі повинні бути датчики та виконавчі механізми, які забезпечують контроль і налаштування параметрів роботи шнеків.

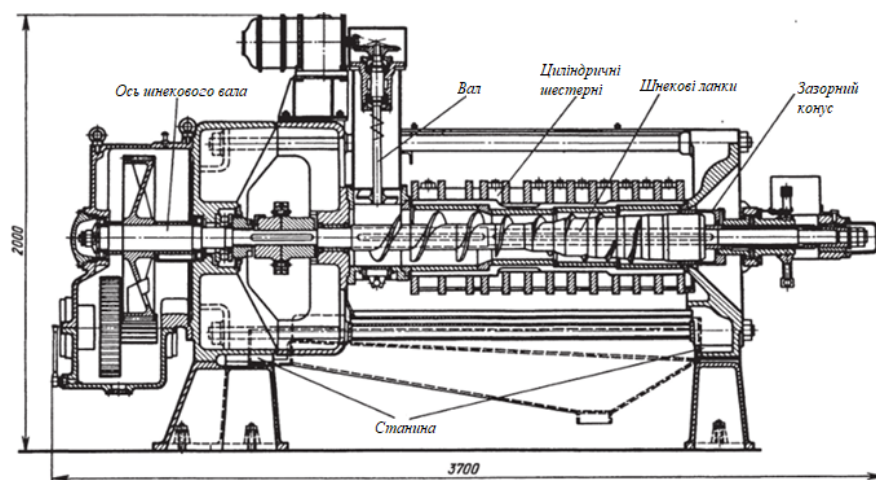


Рис. 2 – Схема Форпресу шнекового

нали для керування приводами. Це забезпечує точне підтримання необхідних параметрів, таких як крутний момент, швидкість обертання та інші робочі характеристики шнеків. Як об'єкт регулювання розглянутий форпрес шнековий, приклад його реалізації (рис 2).

Опис процесу роботи шнекових пресів. Матеріал, що пресується, з завантажувального бункера за допомогою дозувального шнека(працює зі змінною швидкістю), транспортується в пресувальне відділення. Пресувальне відділення - це в основному великий міцний шнек і зовнішній фільтруючий каркас. Завдяки звуженню каркасу зазор між поверхнею каркасу і шнеком зменшується в напрямку потоку. Тиск, що зростає внаслідок зменшення зазору, змушує олію виходити через прогалини міжпрусами каркасу. Олія потрапляє в бункер рекуперації, де робота шнека видаляє дрібні фракції у відсівальний резервуар. Залишок пресованого шроту виходить на кінці шнека. Шрот зі шнекових пресів потрапляє в відділення охолодження шроту.

Додатково, процес роботи шнекових пресів включає інтеграцію систем моніторингу для виявлення змін технологічних параметрів у реальному часі. Застосування датчиків дозволяє визначати рівень тиску, температуру та швидкість руху матеріалу. Це сприяє забезпеченню стабільності процесу пресування, мінімізуючи ризики перегріву чи перевантаження обладнання.

Сучасні шнекові преси також обладнуються системами адаптивного управління, які автоматично налаштовують швидкість роботи шнека залежно від щільності матеріалу та його вологості. Це дає змогу досягти більшої продуктивності та зменшити енерговитрати.

Крім того, важливим етапом є обслуговування обладнання. Регулярна перевірка стану фільтруючого каркасу, шнеків та бункерів забезпечує довговічність роботи і знижує ризик поломок. Використання сучасних матеріалів для виготовлення шнеків, таких як високоміцні сплави, дозволяє зменшити зношуваність і збільшити ефективність роботи обладнання.

Важливим аспектом є утилізація залишків шроту, які після пресування можуть бути використані у якості корму для тварин або сировини для виробництва біопалива. Це додає екологічної цінності процесу та сприяє більш ефективному використанню ресурсів.

Аналіз енергетичних проблем та можливих вдосконалень. Шнекові преси є важливим елементом у багатьох промислових процесах, таких як переробка біомаси, видобування олії та обробка відходів. Для розуміння їх переваг і обмежень було створено таблицю з характеристиками кількох популярних моделей пресів. У табл. 1 враховано параметри продуктивності, керування, використання датчиків та основні сфери застосування.

Таблиця 1

Характеристики шнекових пресів ключові особливості та відмінності

Модель	Виробник	Рік випуску	Продуктивність (т/год)	Система керування	Використані датчики	Основне застосування
Vincent CP-4	Vincent Corporation (США)	2010	3	Релейна	Швидкості	Харчова промисловість, переробка фруктових залишків
Kumera K2-500	Kumera (Фінляндія)	2008	5	Релейна	Температури, рівня	Харчова промисловість, виробництво олії
Atlas SP-350	Atlas-Stord (Норвегія)	2005	4	Релейно-контактна	Рівня вхідного матеріалу, аварійного зупину	Харчова промисловість, виробництво олії, переробка біомаси

Vincent CP-4 [5]

- Виробник: Vincent Corporation (США).
- Рік випуску: 2010.
- Продуктивність: До 3 тонн на годину залежно від типу матеріалу.
- Система керування: Релейна, забезпечує базовий контроль роботи преса.
- Використані датчики: Контроль швидкості обертання гвинта.
- Основне застосування: Призначений для переробки органічних залишків, таких як фрукти, цитрусові або інші вологонасиченні продукти. Використовується в харчовій промисловості.
- Особливості: Міцна конструкція, проста у використанні система керування. Рекомендовано для підприємств середнього масштабу.

Kumera K2-500 [6]

- Виробник: Kumera Corporation (Фінляндія).
- Рік випуску: 2008.
- Продуктивність: До 5 тонн на годину.

- Система керування: Релейна, забезпечує регулювання температури, тиску та рівня вхідного матеріалу.
- Використані датчики: Температури для запобігання перегріву, датчики рівня для стабільного подавання сировини.
- Основне застосування: Використовується в харчовій промисловості. Підходить для обробки пастоподібних матеріалів, включаючи виробництво харчових добавок. Також може використовуватись в виробництві олії.
- Особливості: Надійність, підходить для роботи у важких промислових умовах. Висока ефективність у переробці міксових продуктів.

Atlas SP-350 [7]

- Виробник: Atlas-Stord International (Норвегія).
- Рік випуску: 2005.
- Продуктивність: 4 тонни на годину.
- Система керування: Релейно-контактна, передбачає автоматичне регулювання процесу пресування.
- Використані датчики: Рівень матеріалу в камері пресування, датчики аварійного зупину для запобігання пошкодженням при перевантаженні.
- Основне застосування: Харчова промисловість, переробка вологої біомаси для отримання гранул чи органічних добрив, видобуток олії з насіння.
- Особливості: Висока надійність у роботі з великими обсягами біомаси, легке обслуговування.

Порівняльний аналіз керування шнековими пресами. Для того щоб оцінити ефективність різних підходів до керування шнековими пресами, було проведено порівняння між релейним і контролерним керуванням. Результати аналізу представлені в табл. 2, яка висвітлює ключові аспекти продуктивності, енергоспоживання, надійності та гнучкості цих двох систем.

Таблиця 2

Порівняння релейного та контролерного керування шнековими пресами

Параметр	Релейне керування	Контролерне керування
Продуктивність	До 2-4 тонн/год залежно від сировини, потребує ручного налаштування.	До 5-10 тонн/год із можливістю автоматичного регулювання продуктивності.
Точність регулювання	Обмежена через мінімальну кількість датчиків.	Висока, завдяки інтеграції датчиків температури, тиску тощо.
Енергоспоживання	Витрати енергії не оптимізовані, значна кількість втрат.	До 20-30% економії енергії завдяки оптимізації процесів.
Швидкість реакції системи	Затримка через механічну природу реле, підходить лише для стабільних умов роботи.	Миттєва реакція завдяки використанню програмованих логічних контролерів.
Стійкість до перевантажень	Низька, можливість аварій при раптових змінах у подачі матеріалу.	Висока, автоматична зупинка при перевантаженні та адаптація до змін.
Обслуговування	Просте, але вимагає частого втручання через механічне зношення.	Складніше, але потребує менше обслуговування завдяки високоякісним електронним компонентам.
Гнучкість застосування	Обмежена, підходить для роботи лише з вузьким спектром сировини.	Універсальна, адаптується до різних типів матеріалів (олія, біомаса, комбіновані суміші).
Довговічність	Механічна зношуваність компонентів вища, середній термін служби 5-7 років.	Довший термін служби (10-15 років) завдяки сучасним матеріалам і електроніці.

Під час виробництва соняшникової олії було виявлено низку проблем, пов'язаних із енерговитратами. Основні труднощі стосуються таких аспектів процесу, як коефіцієнт корисної дії двигунів. Використання застарілих або малоефективних електродвигунів часто спричиняє значні енергетичні втрати в системі. Низька продуктивність може бути наслідком зносу обладнання, морального старіння його компонентів або нерационального управління роботою двигунів. Шнекові преси потребують стабільного забезпечення сировиною та електроенергією. Разом із тим витрати енергії, пов'язані з роботою насосів і живильників, часто є нерентабельними, особливо якщо ці системи функціонують безперервно або за несприятливих умов. Нерівномірне розподілення навантаження призводить до зниження загальної ефективності обладнання та створює труднощі у досягненні оптимальної продуктивності. Крім того, відсутність автоматизованого управління процесами може спричиняти нерациональне використання ресурсів і надмірні енерговитрати через відсутність

контролю над роботою обладнання. Енергетичні витрати під час пресування олії можуть збільшуватися через недоліки у технологічних процесах, що призводить до неефективного використання енергії та підвищення собівартості переробки сировини.

Гіпотеза. Запропоноване нове програмне забезпечення для контролера здатне зменшити затримки у подачі продукту та забезпечити рівномірний розподіл матеріалу в живильнику. Очікується, що впровадження цього рішення сприятиме оптимізації роботи шнекового пресу, підвищуючи енергоефективність процесу виробництва соняшникової олії. Передбачається, що це дозволить точніше контролювати та налаштовувати ключові параметри, такі як швидкість роботи живильника, рівень завантаження і розподіл матеріалу, що в свою чергу сприятиме зменшенню енергоспоживання та підвищенню ефективності виробничих процесів.

Оптимізація функціонування обладнання включає адаптивне регулювання швидкості двигунів, що дозволяє скоротити витрати електроенергії під час роботи з низькими навантаженнями. Крім того, важливим аспектом є впровадження систем управління навантаженням, які забезпечують оптимальний розподіл між живильниками та процесом пресування олії, що дозволяє досягти максимальної продуктивності обладнання.

Покращення автоматизації процесу може передбачати використання автоматичних систем контролю та управління, що забезпечують стабільну роботу обладнання та зменшують витрати електроенергії. Крім того, корисно впроваджувати системи моніторингу та діагностики, які дозволяють вчасно виявляти несправності та запобігати їх появі [4].

В даному контексті основною метою є зниження енергетичних витрат та підвищення продуктивності системи шляхом застосування ефективних методів управління обладнанням. Це сприятиме підвищенню конкурентоспроможності підприємства та забезпеченню сталого розвитку.

Зменшення енергетичних витрат у процесі виробництва соняшникової олії має кілька важливих аспектів. По-перше, це дозволяє знизити виробничі витрати, що підвищує конкурентоспроможність підприємства. Оптимізація енергоспоживання веде до зменшення собівартості продукції, роблячи її доступнішою для споживачів.

По-друге, це сприяє збереженню ресурсів та зниженню викидів парникових газів. Енергоефективне обладнання та оптимізовані процеси дозволяють зменшити споживання електроенергії та інших ресурсів, що сприяє зменшенню забруднення довкілля.

По-третє, це зміцнює енергетичну безпеку країни та сприяє сталому розвитку. Зниження енергетичних витрат зменшує залежність від імпорту енергоносіїв, покращує енергетичну незалежність та зберігає природні ресурси для майбутніх поколінь.

Отже, зниження енергетичних витрат у виробництві соняшникової олії сприяє підвищенню конкурентоспроможності, збереженню ресурсів, зниженню забруднення, зміцненню енергетичної безпеки та сталому розвитку.

Висновки. Існує значний потенціал для підвищення енергоефективності обладнання, що використовується у шнекових пресах для виробництва соняшникової олії. Аналіз сучасного стану таких пресів та їх енергетичних характеристик виявив низку чинників, які впливають на споживання енергії.

Дослідження показало, що певні технологічні параметри та процеси можуть бути оптимізовані з метою підвищення продуктивності та зменшення енерговитрат. Одним із важливих напрямків вдосконалення є впровадження новітнього обладнання та спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє здійснювати контроль і регулювання технологічних процесів у шнекових пресах. Такий підхід сприяє більш ефективному використанню ресурсів і підвищенню продуктивності виробництва.

Реалізація запропонованих методів оптимізації є ключовим кроком до досягнення сталого розвитку та раціонального використання енергетичних ресурсів. Інтеграція сучасних технологій, інноваційного програмного забезпечення та удосконалених підходів до управління забезпечує точність, прогнозованість і оптимізацію робочих процесів. Це сприяє зменшенню витрат, зниженню споживання енергії та скороченню кількості відходів.

Таким чином, застосування запропонованих рішень є стратегічно важливим для досягнення сталого розвитку та збереження природних ресурсів. Поєднання інноваційних технологій і сучасних методів управління сприяє точнішому налаштуванню робочих параметрів, що забезпечує економію енергії, зниження витрат і мінімізацію обсягів відходів

References

1. Popov M. O. (2013). Assessment and directions for improving the efficiency of energy use at enterprises of the oil and fat industry *Bulletin of the National technical university XIII: Technical progress and production efficiency*, 67 (1040), 148-152.
2. Indartono, Y.S.; Heriawan, H.; Kartika, I.A. (2019). Innovative and flexible single screw press for the oil extraction of Calophyllum seeds. *Res. Agric. Eng.*, 65, 90–97.
3. Ministry of Education and Science of Ukraine, Tavriysk State Agro-Technological University named after Dmytro Motorny http://www.tsatu.edu.ua/nauka/wp-content/uploads/sites/49/didur-v.v._compressed.pdf
4. Tsygankov D. E. (2021). Justification of waste-free technology for processing sunflower cake to obtain oil in order to increase the yield of the finished product: master's thesis: 181, Food technologies Dnipro State

Agrarian and Economic University, Faculty of Engineering and Technology, Department of Storage and Processing Technologies of Agricultural Products, Dnipro.

5. Vincent Corporation Official website of the company manufacturing screw presses, including the CP-4 model. <https://www.vincentcorp.com>
6. Kumera Products Official website of Kumera Corporation, producer of screw press models like the K2-500. <https://kumera.com>
7. Atlas-Stord International Website of the company specializing in screw press manufacturing, such as the Atlas SP-350 model. <https://www.stord-intl.com>

ENERGY-EFFICIENT USE OF SCREW PRESS EQUIPMENT FOR OIL PRODUCTION

Khomenko A., graduate student, Osadchuk P.I., SciD
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. *The oil and fat industry plays an important role in the global food industry. Numerous researchers have focused on increasing efficiency, reducing energy consumption and improving the quality of the oil obtained. This study proposes the use of additional modulation to regulate the speed of screws in press equipment, which contributes to increasing energy efficiency and improving the final product quality. Optimizing the operation of screw screws allows you to achieve a high level of productivity, while reducing unproductive energy consumption. In addition, such a system increases the sensitivity and adaptability of the equipment to changes in the work process. It also provides the ability to record and analyze data, which contributes to high-quality monitoring and effective maintenance of electromechanical components. The system software contains intelligent algorithms and control logic that analyze information from sensors and create precise signals for controlling the drives. This allows you to maintain basic operating parameters, such as speed and torque, with maximum accuracy. The algorithms take into account the load, environmental conditions and energy efficiency indicators, which allows you to optimize control processes and reduce energy consumption. In addition, the system can use modern machine learning methods to continuously improve its algorithms. This helps to increase the accuracy of settings and ensures high energy efficiency. Automated control has a number of advantages: it allows auger screws to operate at maximum performance with minimal energy loss, increases the adaptability of the equipment to changing operating conditions and loads, and also provides high-quality monitoring and proper maintenance through data analysis.*

Ключові слова: energy efficiency, screw, automation, prepress.

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. Indartono, Y.S.; Heriawan, H.; Kartika, I.A. Innovative and flexible single screw press for the oil extraction of Calophyllum seeds. Res. Agric. Eng. 2019, 65, 90–97.
3. Міністерство освіти і науки України Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного http://www.tsatu.edu.ua/nauka/wp-content/uploads/sites/49/didur-v.v._compressed.pdf
4. 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.
5. Vincent Corporation Офіційний сайт компанії, яка виготовляє шнекові преси, такі як модель CP-4. <https://www.vincentcorp.com>
6. Kumera Products Офіційний сайт Kumera Corporation, виробника моделей шнекових пресів, таких як K2-500. <https://kumera.com>
7. Atlas-Stord International Сайт компанії, яка спеціалізується на виробництві шнекових пресів, таких як Atlas SP-350. <https://www.stord-intl.com>

Отримано в редакцію 07.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 07.08.2024
Approved 25.09.2024

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Яровий І.І., к.т.н., доцент, Маренченко О.І., к.т.н., Алі В.П., аспірантка
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Сушіння є одним з найбільш енерговитратних процесів в харчовій та переробній промисловості. Вчені та інженери багатьох країн постійно працюють над вдосконаленням технологій сушіння проводячи пошук нових способів видалення вологи з сировини та харчової продукції. Для традиційного, конвективного способу сушіння розроблено та впроваджено велику кількість його варіацій. Проте обмеження конвективного сушіння пов'язані з фізикою процесів тепло і масопередачі не дозволяють розраховувати на суттєве збільшення енергоефективності та продуктивності конвективних технологій сушіння. Одним з конкурентів конвективного способу сушіння є мікрохвильове сушіння, яке використовує відмінні від конвективного способу принципи підведення теплової енергії до вологи, що міститься в матеріалі. Технології мікрохвильового сушіння поступово переходять з розряду інноваційних високотехнологічних способів вологовидалення до розряду спеціалізованих але доступних виробнику процесів. В роботі представлено узагальнений аналіз мікрохвильового способу сушіння вологих матеріалів та його основних переваг. Розглянуто розвиток мікрохвильового способу сушіння шляхом його комбінування з фільтраційним сушінням. Приведено переваги такого комбінованого способу сушіння. Приведено аналіз актуальних технічних та технологічних обмежень в дизайні мікрохвильового обладнання для сушіння рослинної сировини. Приведено перелік конструктивних та технологічних задач, які слід вирішити в процесі створення стрічкових мікрохвильових сушарок. Представлено короткий огляд типового для галузі технологічного обладнання для мікрохвильової обробки рослинної сировини та вологих матеріалів в цілому. Запропоновано модульну конструкцію мікрохвильової сушильної установки та описано її основні складові частини. Представлено узагальнені результати експериментального моделювання процесу видалення вологи в мікрохвильовій стрічковій сушарці. Надано висновки щодо перспектив впровадження технологій мікрохвильового сушіння в існуючі технологічні процеси харчової та переробної промисловості.

Ключові слова: мікрохвильове сушіння, комбіноване сушіння, бародифузія, конструкція мікрохвильових сушильних апаратів.

Постановка проблеми. Сушіння рослинної сировини є найдавнішим і найбільш поширеним, завдяки своїй простоті та доступності, способом консервування харчової сировини, зокрема для більшості видів сировини рослинного походження. Способів та методів реалізації сушіння та відповідно конструкцій сушильних апаратів винайдено багато, оскільки в кожному конкретному випадку при розробці технології сушіння та конструкції сушильного обладнання технологам і конструкторам доводилось вирішувати цілий комплекс задач пов'язаних з необхідністю досягнення цільових характеристик процесу сушіння конкретної сировини чи матеріалу.

Для видалення вологи з сировини рослинного походження, в більшості видів сушильного обладнання, використовується нагрівання цієї сировини (вологого матеріалу) до допустимих для матеріалу температур з метою ініціювання та інтенсифікації процесів випаровування (зміни агрегатного стану) вологи в матеріалі і подальшої евакуації утвореного водяного пару від поверхні матеріалу. Процес сушіння шляхом нагрівання вологого матеріалу реалізовано у великій кількості конструкцій сушильних апаратів [1], які відрізняються, в першу чергу, способами підведення та розподілу теплової енергії адаптованими до видів та станів вологих матеріалів. Інші способи сушіння (такі як механічне, сублімаційне чи акустичне), що не використовують нагрівання вологи в матеріалі для зміни її агрегатного стану, мають місце в процесах харчової галузі, проте їх загальна доля порівняно з технологіями теплового сушіння відносно невелика.

Найбільше варіантів використання та конструктивних реалізацій має конвективний спосіб сушіння, який використовує гаряче повітря в якості агента для передачі тепла вологому матеріалу та одночасного для віднесення від нього видаленої (випареної) вологи. Процеси сушіння з використанням конвективного теплообміну достатньо добре вивчені, описані та адаптовані під актуальні задачі галузі [2]. Добре відомі як переваги так і недоліки конвективних технологій сушіння. На сьогодні залишається проблемою віднайти інший спосіб енергопідведення який би так само легко адаптувався та масштабувався до різнопланових задач сушіння харчової сировини та продукції як конвективний. Проте для локальних задач невеликої продуктивності такі недоліки конвективних технологій сушіння як висока енергоємність, недостатні екологічність та енергоефективність, можуть бути достатньо суттєвими, щоб для такого сегменту ринку сушильних технологій вести активний пошук нових способів видалення вологи. Аналізуючи конкурентні до конвективного

способи вологовидалення, одним з перших слід розглянути мікрохвильове (МХ) сушіння [3] та комбіновані способи сушіння на його основі [4].

Метою роботи є проведення узагальненого аналізу технічних та технологічних задач які слід вирішити проектувальнику сушильного обладнання в разі прийняття рішення про розробку мікрохвильового апарату з заданими параметрами.

Аналіз результатів досліджень. Провідні експерти вважають [5,6,7], що саме мікрохвильове сушіння та комбіновані способи на його основі, мають всі шанси відвоювати значну частину ринку сушильних технологій запропонувавши такі переваги МХ сушіння як значне збільшення продуктивності процесу, покращення якості висушеного продукту внаслідок більш повного збереження його первинних вигляду, структури та біохімічного складу, збільшення однорідності висушених партій продукту. Слід враховувати також супутні переваги та можливості МХ сушіння: можливість стерилізації матеріалу який висушується, високу точність та простоту керування процесом, екологічність процесу та відсутність «карбонowego сліду», компактність та механічна простота (легкість інтеграції) сушильного обладнання, можливість його масштабування. Кожен з вищезазначених факторів може проявлятися (використовуватись) в конкретній реалізації процесу сушіння різною мірою, в залежності від цілей розробників сушильного МХ обладнання та режимів на які буде розраховано конструкцію МХ сушарки. Проте основні переваги (продуктивність, якість та рівномірність характеристик готового продукту, екологічність) буде притаманна усім варіантам конструктивних реалізацій процесу МХ сушіння.

В основі **мікрохвильового способу** сушіння вологих матеріалів лежить фізичний ефект безпосереднього впливу електромагнітного поля високої частоти на вологу, що міститься в матеріалі, який піддається обробці. Тепловий ефект від такої взаємодії визначається ступенем поглинання енергії надвисокочастотного (мікрохвильового) випромінювання вологими шарами матеріалу. Для матеріалів рослинного походження, ступінь поглинання ними енергії випромінювання визначається рядом характеристик, але основними є кількість води, що міститься в матеріалі та діелектричні властивості самого матеріалу. Внаслідок інтенсивного зовнішнього впливу електромагнітного МХ поля молекули води, які є диполями, та інші іонізовані частинки в матеріалі змінюють свою фізичну орієнтованість з довільної на задану лініями зовнішнього електромагнітного поля. Результатом такого обертального (тремтячого) руху молекул, є виділення тепла, що і приводить до розігріву вологих шарів матеріалу. Потужність, що виділяється в даному процесі можна розрахувати за формулою

$$N \approx E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \sigma \quad (1)$$

де, E – напруженість електромагнітного поля в матеріалі; f – частота поля;

ε – діелектрична стала матеріалу; σ – кут діелектричних втрат в матеріалі.

Відповідно до залежності (1) величина виділеної потужності залежатиме від напруженості та частоти електромагнітного поля і характеристик самого вологого матеріалу, які до речі змінюються по мірі зменшення в ньому кількості води. Можливість використання в процесах сушіння генераторів електромагнітного поля (магнетронів) з різними частотами генеруемого випромінювання обмежені законодавством про розподіл частотного діапазону між системами зв'язку. Практично доступним є діапазон 2450 МГц в якому і працюють більшість магнетронів побутового та промислового призначення. Окрім того із збільшенням частоти генеруемого поля зменшується його проникність в глибину матеріалу, яка для більшості біологічних (рослинних) матеріалів є невеликою і складає від декількох міліметрів до декількох сантиметрів, в залежності від типу матеріалу та його поточного стану (ε і σ не є сталими і залежать від температури та кількості води в матеріалі).

Найбільш суттєвим параметром, що визначає потужність генерування теплового потоку у вологому матеріалі є напруженість електромагнітного поля, яка визначається і обмежуються технічними характеристиками генераторів МХ поля – магнетронів, режимом роботи яких можливо керувати простим вмиканням та вимиканням генерації.

Буде невірним стверджувати, що потужність (напруженість) МХ поля є єдиним важливим параметром, що визначає роботу мікрохвильових систем (сушіння, нагрівання, стерилізації). В залежності від технологічного завдання, конструктивна реалізація (а рівно і режим роботи) МХ установки можуть бути різними: періодичної чи безперервної дії, одно чи багатокамерною, з сушінням в тонкому шарі або при частковому заповненні сушильних камер. Вимоги та обмеження технологічного завдання приводять до конкретних конструктивних рішень, які в свою чергу впливають на ефективність процесу енергопідведення та цільові параметри технологічного процесу.

Таким чином **для конкретної технологічної задачі** та заданого типу вологого матеріалу, цілком можливо розглянути перспективу впровадження технології сушіння в системах з мікрохвильовим енергопідведенням за умови відповідності майбутнього процесу декільком початковим умовам: очікувана продуктивність установки (обмежується в основному конструктивними характеристиками наявних на ринку магнетронів), може складати, в залежності від типу обробляемого матеріалу, в діапазоні від десятків до сотень кг/год.; процес обробки можливий як поточний так і «порційний»; величина шару частинок вологого матеріалу в зоні МХ сушіння складатиме 15-50 мм. (в залежності від характеристик матеріалу); підприємство во-

лодіє достатніми ресурсами для експлуатації високотехнологічного обладнання. Технологічні вимоги та обмеження мають бути деталізовані в залежності від характеристик цільової вологої сировини (матеріалу, що оброблятиметься).

Основні переваги мікрохвильового сушіння витікають зі способу взаємодії МХ електромагнітного поля з вологою в матеріалі [8]. Генеруючи тепловий потік безпосередньо у вологих шарах матеріалу, МХ випромінювання електромагнітного поля мало впливає на сухі (вже висушені) області матеріалу, тобто тепловий вплив електромагнітного поля буде цільовим (адресним), направленим на вологі осередки чи шари в матеріалі який обробляється і буде зменшуватись та перерозподілятися між ними по мірі висушування матеріалу.

Такий спосіб нагрівання суттєво відрізняє мікрохвильовий нагрів від конвективного, в якому для нагрівання вологи матеріалу слід розігріти до цільової температури увесь об'єм матеріалу разом з вологою в ньому. Особлива кінетика процесу МХ сушіння визначає його високу енергоефективність, селективність та здатність до вирівнювання вологості в матеріалі. Ті ж причини визначають вищу, порівняно з конвективним, ефективність МХ сушіння для матеріалів з середньою та малою вологістю, так як із збільшенням вологості (~60% і вище) вищезазначені переваги МХ сушіння пропорційно зменшуються. Також слід враховувати те, що в разі нерегульованої, постійної обробки МХ полем, внаслідок зменшення кількості вологи в матеріалі, буде нелінійно зростати співвідношення кількості підведеної енергії та залишку вологи в матеріалі, що це випромінювання сприймає. Наслідком такого режиму енергопідведення буде швидкий локальний перегрів в окремих областях об'єму матеріалу. Як правило такі області перегріву важко контролювати, вони визначаються наявністю в сушильних камерах зон з підвищеною щільністю електромагнітного поля, розташування, величина та кількість яких визначаються конструктивними особливостями камер нагріву та поточними характеристиками вологого матеріалу в камері, тобто їх конфігурація може змінюватись в ході процесу МХ сушіння. Основним та найпростішим шляхом вирішення даної проблеми є рух матеріалу в камері МХ нагріву, в такому випадку кожна точка об'єму вологого матеріалу не буде стаціонарною відносно МХ впливу, а загальний вплив МХ поля буде інтегральним та достатньо рівномірним. Регулювання потужності підведеного до вологого матеріалу МХ поля здійснюють, як правило, за принципом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), тобто простим регулюванням тривалості періодичного ввімкнення магнетрона.

Під дією електромагнітного МХ поля вологі області шару чи об'єму матеріалу будуть інтенсивно розігріватись а тиск в капілярах та міжклітинному просторі частинок рости. В результаті такого впливу на вологу, в шарах частинок матеріалу утворюються градієнти температури та тиску направлені від більш вологих внутрішніх шарів частинок матеріалу до їх зовнішньої поверхні. Співнаправлений вплив цих рушійних сил і є основним процесом який забезпечує високу продуктивність видалення вологи в установках МХ сушіння. На поверхню частинок волога матеріалу витискається з внутрішніх шарів (просочується) у рідкому стані і частково у вигляді пару (співвідношення залежить від інтенсивності нагріву), звідки продовжує випаровуватись у пришаровий простір під впливом вже інших рушійних сил: різниці температур та парціальних тисків над поверхнею шару та в повітряному просторі сушильної камери. Комплекс тепло та масообмінних процесів, що виникають при цьому складно описати аналітично на рівні узагальненої математичної моделі [9], з цієї причини основним способом дослідження процесів МХ сушіння все ще залишається експериментальний.

Одним з **перспективних режимів** видалення вологи при МХ сушінні рослинної сировини є «механодифузійний» [10]. Такий режим видалення вологи може бути ініційований і залишатись сталим в поточних процесах при обробці рослинної сировини з розвинутою капілярно пористою будовою та за умови достатньої кількості вільної вологи в капілярах матеріалу. Суть явища механодифузії полягає в тому, щоб шляхом інтенсивного впливу МХ полем нагріти вільну вологу матеріалу (таку, що знаходиться в капілярах та порах частинок матеріалу і слабо зв'язана з структурою матеріалу) до появи в капілярах бульбашок випареної вологи. Поява парових бульбашок в капілярах приводить до різкого посилення градієнту тиску вздовж капіляру і тим самим ініціює механічний рух вологи в капілярах в напрямі їх відкритої сторони, як правило до поверхні частинок. Ініціювання та утримання механодифузійного режиму видалення вологи з матеріалу є достатньо складною технологічною задачею, проте при її вирішенні та реалізації в промислових установках стає можливим досягнення високоенергоефективних режимів сушіння, як наслідку того, що значна частина вологи з матеріалу буде видалятись не у вигляді пару, а в стані рідини, тобто без зміни агрегатного стану вологи і без відповідних витрат енергії на таке перетворення.

Режим механодифузійного видалення вологи з рослинного матеріалу найбільш ефективно використовувати на першому етапі сушіння, в подальшому, коли кількість вільної вологи в матеріалі зменшиться, механодифузійний ефект мінімізується і видалення вологи проходитиме тільки у вигляді випареної вологи.

Як наслідок високої продуктивності процесу масопередачі вологи між внутрішніми шарами частинок матеріалу та їх поверхнею, при умовах близьких до режиму механодифузійного вологовидалення, швидкість перенесення вологи між центром та поверхнею частинок перевищує швидкість випаровування вологи з поверхні. За умови стабільного бародифузійного процесу, такий дисбаланс погіршує умови протікання процесу видалення вологи та призводить до збільшення його тривалості і зменшує енергоефективність МХ сушіння. Запобігти проблемі, збільшити продуктивність та енергоефективність МХ сушіння можливо шляхом поєднання (комбінування) МХ способу сушіння з іншими способами [4].

Основним завданням більшості комбінованих з МХ способів сушіння є створення додаткових рушійних сил для збільшення потоку відведеної від поверхні частинок матеріалу вологи. МХ нагрівання при цьому виступає основним «драйвером» процесу масоперенесення вологи у внутрішніх шарах частинок а комбінований з ним додатковий процес дозволяє збільшити потік вологи, що відводиться від поверхні частинок в атмосферу. За таким принципом працюють декілька основних комбінацій: МХ + інфрачервоне сушіння, МХ + конвективне сушіння, МХ + фільтраційне сушіння, та інші. Кожна з комбінацій має свої переваги та недоліки, так перші два способи виділяються тим, що використовують додатковий потік енергії у вигляді інфрачервоного випромінювання або нагрітого повітря. У обох випадках додатковий нагрів поверхні матеріалу збільшує потік випареної з поверхні частинок матеріалу вологи, проте суттєве збільшення загальної кількості енергії, що використовується для сушіння матеріалу значно погіршує енергетичний баланс такого способу. Комбінація МХ та фільтраційного сушіння передбачає переважно механічне «здування» вільної (витиснутої) вологи з поверхні частинок матеріалу, атмосферним повітрям (без додаткового нагрівання). При такому способі сушіння загальний енергетичний баланс процесу змінюється не критично, так як питомі витрати енергії на короткочасне продування шару матеріалу потоком повітря не є суттєвими [11]. Цілком очевидно, що найбільш ефективним такий спосіб сушіння буде в поєднанні з механо дифузійним режимом вологивидалення (перший період сушіння), в подальшому, через зменшення кількості вільної вологи на поверхні частинок, ефективність фільтраційної складової даного способу буде зменшуватись.

Таким чином, виходячи з переваг та обмежень мікрохвильового способу сушіння, при прийнятті основних композиційних рішень з дизайну мікрохвильових сушильних апаратів для обробки рослинної сировини, доцільно враховувати наступне:

- обробку (сушіння) вологого матеріалу слід проводити в тонкому шарі величина якого буде визначатись діелектричними характеристиками (глибиною проникнення МХ поля) для цільового матеріалу та на конкретному етапі сушіння (по мірі зменшення вологості матеріалу товщину шару доцільно збільшувати);
- при розрахунку показників продуктивності сушильної установки слід враховувати, що плоский рухомий шар, який оброблятиметься МХ полем буде обмежений розмірами сушильної МХ камери, потужністю МХ поля та тривалістю знаходження частинок шару матеріалу в межах дії МХ поля сушильної камери;
- основні параметри функціонування робочих зон (МХ камер) сушарки будуть суттєво змінюватись в залежності від вхідних параметрів матеріалу, що обробляється та в процесі сушіння, на жорстких режимах обробки можливе стрімке розвинення локальних перегрівів аж до пошкодження матеріалу;
- мікрохвильові апарати є багатофункціональним обладнанням і можуть також використовуватись для знезараження або стерилізації матеріалів і навіть для додаткової обробки готової продукції (в т.ч. запакованої) з метою збільшення терміну придатності.

Мікрохвильове сушіння та конструктивні обмеження способу. До недоліків мікрохвильових апаратів можна віднести декілька технічних особливостей пов'язаних з процесом генерації електромагнітного поля, і відповідно характерних для МХ способів сушіння.

Першим можна вважати відносно низький коефіцієнт перетворення електричної енергії в енергію електромагнітного МХ випромінювання, який (усереднено) складає 0,4-0,8 в залежності від конкретної моделі генератора мікрохвильового електромагнітного випромінювання – приладу під назвою «магнетрон». Так для поширених в побутових МХ печах магнетронів цей показник складає близько 0,6, тобто для магнетрона з потужністю генерації 0,9 кВт до 0,6 кВт спожитої електричної енергії, в процесі її перетворення в електромагнітне поле, витрачається на нагрівання самого приладу та на супутні втрати.

Так як магнетрони використовують в різних галузях техніки, є обґрунтовані сподівання [12], що прогрес в галузі пристроїв генерації електромагнітного поля надвисокої частоти дозволить використовувати в майбутніх мікрохвильових апаратах більш ефективні генератори МХ поля. Проте, на сьогодні, використання магнетронів з частотою генерації 2450 МГц є найбільш доцільним конструктивним рішенням для створення мікрохвильового сушильного обладнання.

Окрім відносно невисокого коефіцієнту перетворення енергії слід зважати на обмеження в потужності магнетронів. Для генераторів «побутового» класу, що використовуються в мікрохвильових печах, цей параметр становить 0,7-1,0 кВт, що в більшості випадків буде недостатнім для промислового використання, навіть за умови створення генеруючих масивів. Для промислового використання більш доцільне використання магнетронів з потужністю 2,0-3,0 кВт. Такі прилади представлені на ринку [13], проте їх вартість може складати до 800 USD за один прилад (без блоку живлення та іншої оснастки), що в рази перевищує питому вартість магнетронів «побутового» класу. Слід зазначити, що таке ціноутворення визначається як кращими характеристиками магнетронів промислового рівня, так і особливостями їх конструкції (водяне охолодження, допустимі режими використання, тощо).

Ще одним параметром, який слід враховувати при розробці МХ обладнання є обмежений ресурс мікрохвильових генераторів, що складає для більшості зразків від 2000 до 6000 годин роботи. Таке обмеження переводить магнетрони, як конструктивну складову мікрохвильової сушарки, до переліку «витратних компонентів», що зважаючи на їх вартість та складність контролю використаного ресурсу (різні режими генерації, умови роботи, тощо), суттєво впливатиме на вартість експлуатаційних витрат МХ обладнання.

Конструктивним обмеженням в дизайні конструкцій МХ сушарок є розміри сушильної камери. Для створення рівномірної (наскільки це можливо) напруженості електромагнітного поля в сушильній камері такі її характеристики як геометричні розміри, тип внутрішньої поверхні, розміщення входу хвилеводу магнетрона відносно об'єкту нагріву, слід обирати відповідними до параметрів як генераторів так і об'єкту сушіння. Для магнетронів з частотою випромінювання 2450 МГц довжина електромагнітної хвилі складає 12,24 см, тому для забезпечення рівномірності поля в обсязі камери та менших втрат внаслідок перевідбиття хвиль, внутрішні розміри сушильної (резонансної) камери слід обирати кратними цій довжині. З тих же міркувань обираються точки встановлення магнетронів, відносно шару вологого матеріалу та площини розміщення шару матеріалу в камері. Для зменшення втрат потужності випромінювання при перевідбитті хвиль, внутрішні поверхні камери мають бути рівними та полірованими. Для вирішення подібних задач доцільно скористатись спеціальним програмним забезпеченням на зразок CST Microwave Studio [14].

Виходячи зі згаданих вище конструктивних особливостей та обмежень МХ способів сушіння, при виборі загального дизайну сушильного апарату, окрім вирішення основної технологічної задачі, продиктованої характеристиками сировини та готового продукту, доцільно розглянути наступні рекомендації:

- мікрохвильову сушарку доцільно розглядати як багатокамерну, модульну установку стрічкового типу, в якій число резонаторних (сушильних) камер обирають виходячи з розрахункової продуктивності та характеристик самих сушильних камер;
- параметрами, що визначають продуктивність МХ сушарки за конкретним типом рослинної сировини є продуктивність транспортної системи та встановлена потужність випромінювання генераторів МХ поля всіх сушильних камер;
- зважаючи на необхідність «пом'якшення» режиму обробки (зменшення потужності поля) в ході процесу сушіння, доцільно розглядати кожен модуль сушарки як окрему ланку, режим роботи якої (швидкість руху шару матеріалу, потужність нагріву МХ полем, характер продування шару повітрям) визначатимуться та регулюватимуться індивідуально, відповідно до обраної програми обробки;
- конструкцію модулів сушильних камер доцільно оптимізувати до типових блоків, що монтуються в єдину конструкцію через фланцеві з'єднання і мають власний програмний керуючий модуль, який шляхом конфігурування керуючих сигналів інтегрується в програму керування процесом;
- конструкція сушильних модулів має дозволити проводити оперативну заміну генераторів (магнетронів) з мінімальною витратою часу та, по можливості, без наступного налагодження.

Обладнання для мікрохвильової обробки матеріалів. Ринок мікрохвильового обладнання для сушіння та обробки рослинної сировини активно росте за рахунок азієцьких, в основному китайських, виробників. Кількість пропозицій на відомому сайті онлайн торгівлі за запитом «microwave tunnel drying machines» легко перевищує дві сотні позицій, більша частина яких відповідає розглянутим в попередніх розділах критеріям. В якості прикладу можна привести вироби компаній, що спеціалізуються на виготовленні та супроводі мікрохвильового обладнання [15].



Рис. 1 – Установка для сушіння харчових продуктів MiD-80

Обладнання для сушіння харчових продуктів виробництва Zhengzhou Dingli призначене для нагрівання, сушіння, випікання та стерилізації різних харчових продуктів у невеликих упаковках, продуктів у пляшках,

тістечок, печива, консервованих фруктів, соєвих продуктів, готової їжі, приправ, борошна, тощо. Також можна використовувати для сушіння морепродуктів (ламінарія, морська капуста, запікання креветок).

Лінійка обладнання включає тунельні МХ установки зі споживаємою електричною потужністю від 20 до 80 кВт. Установки побудовані на основі стрічкового приводу з кількома зонами сушіння, розміри (ШхВ) модулів установки 1.4х1.7 м та довжиною від 8.2 до 14.8 м. в залежності від кількості сушильних камер. Продуктивність установок лінійки декларується в межах від 150-200 до 500-600 кг./годину. Матеріал виготовлення – нержавіюча сталь.

Установку для сушіння харчових продуктів MiD-80 показано на рис. 1. Можна вважати типовою за конструктивним виконанням для мікрохвильових апаратів подібного класу. Для таких апаратів є характерною компоновка у вигляді послідовності резонаторних камер, через які за допомогою стрічкового приводу переміщається потік матеріалу у вигляді плоского шару. Режим обробки визначається швидкістю транспортування потоку (експозицією обробки) та встановленим рівнем інтенсивності обробки матеріалу в кожній з камер. Зважаючи на кількість конструкцій створених різними виробниками за аналогічним дизайном, його можна вважати оптимальним для потокової обробки сипких матеріалів а також (враховуючи обмеження по висоті транспортного тунелю) для деяких видів штучних та попередньо упакованих продуктів.

Модульна конструкція мікрохвильової стрічкової сушильної установки. Модульний принцип в конструкції мікрохвильової сушильної установки розглядався авторами в роботах [16, 17], такий підхід до конструкції МХ сушарки дозволить вирішити питання адаптації її характеристик до конкретних технологічних вимог, шляхом нарощування кількості сушильних модулів установки. Зважаючи на високу вартість самих генераторів мікрохвильового випромінювання доцільно передбачити можливість вибору з декількох типів модулів з різною потужністю (кількістю) встановлених в модулі магнетронів. Загальний вигляд сушильного модуля приведено на рис. 2. Модуль складається з прямокутної резонаторної (сушильної) камери, габарити якої обирають відповідно до призначення установки, наприклад (г/ш/в): 570х520х580.

Зі сторін входу та виходу транспортної стрічки в резонаторній камері вбудовано фланці для з'єднання камери з транспортними тунелями або іншою камерою. Висота вікна має відповідати типу (висоті шару) сировини, що обробляється. Збільшення висоти тунелю надасть можливість обробляти більш габаритні ніж тонкий шар сипучої сировини матеріали, наприклад - стерилізувати упаковані продукти. Мінімальна висота вікна може становити 30...40 мм, максимальна визначається вимогами безпеки для персоналу та можливостями вхідного та вихідного шлюзів установки. Внутрішній простір камери – рівна, гладка поверхня, матеріал камери – нержавіюча сталь. У верхній частині камери знаходяться один або два магнетрони, їх хвилеводи спрямовані по нормалі до стрічки конвеєра. Для мінімізації взаємного впливу магнетронів вони взаємно орієнтовані під кутом 90°. Для реалізації комбінованого (МХ + фільтраційного) режиму сушіння в нижній площині камери виконано перфорацію у вигляді масиву отворів діаметром 2-3 мм до якого приєднується вхідний дифузор витяжної аспіраційної системи установки.

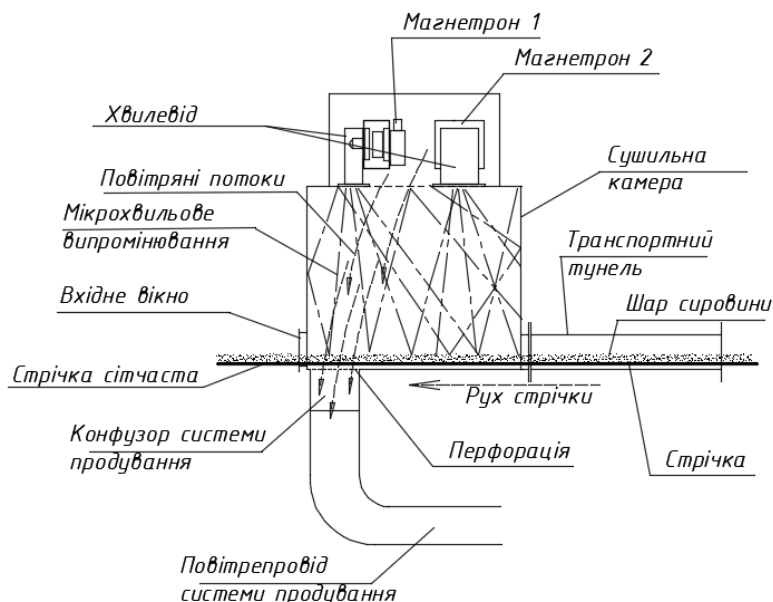


Рис. 2 – Загальний вид сушильного модуля (вид збоку)

Загальний вид мікрохвильової модульної стрічкової сушильної установки для сипучої рослинної сировини приведено на рис. 3.

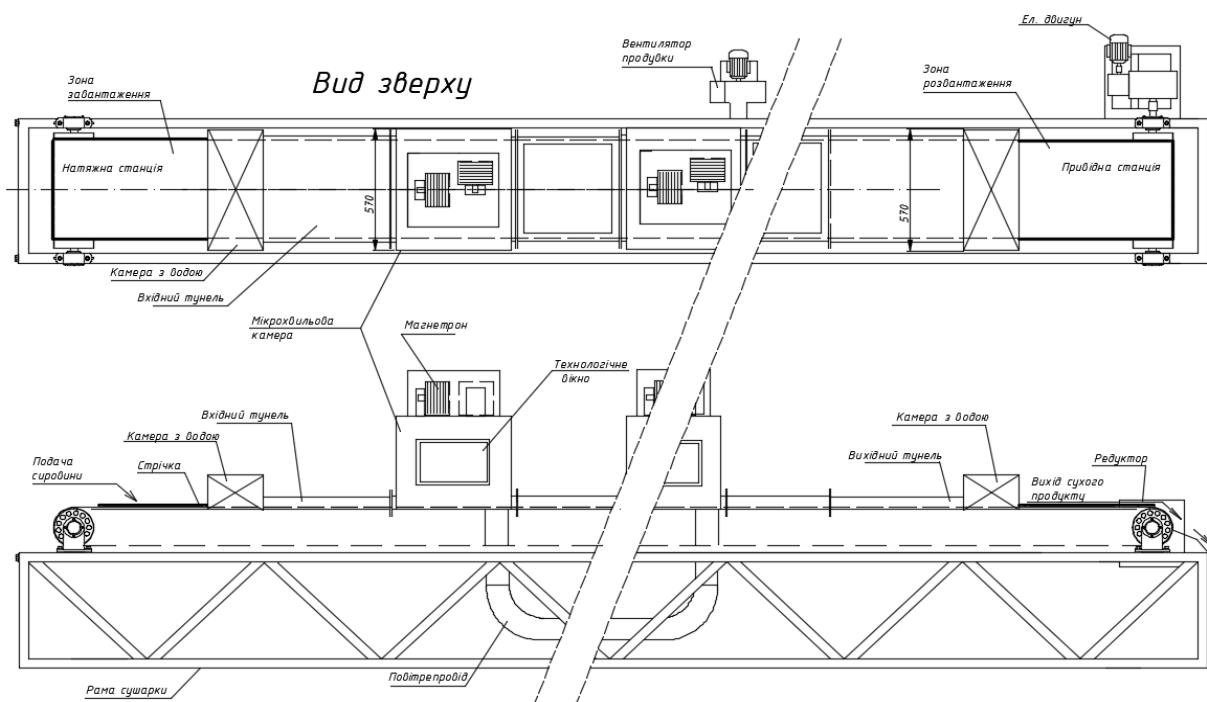


Рис. 3 – Загальний вид модульної мікрохвильової стрічкової сушильної установки

Конструкція модульної стрічкової сушарки передбачає розміщення на зварній рамі заданої кількості типових сушильних модулів, з'єднаних транспортними тунелями та доповнених входними шлюзами у вигляді водяних затворів – пластикових ємностей з водою, призначених для мінімізації випромінювання з камер сушарки. На кінцях опорної рами встановлено натяжну та привідну станції стрічкового приводу сушарки. Конфузори фільтраційної частини сушильних камер об'єднані в одну аспіраційну мережу, швидкість потоку повітря в кожній камері встановлюється окремо, регулюванням ширини фільтраційної зони в нижній площині камери. Для реалізації комбінованого способу сушіння має використовуватись перфорована або сітчаста стрічка, розмір комірок перфорації якої обирається пропорційно меншим до розміру частинок матеріалу, що обробляється.

Висновки. Основним параметром проектуемого сушильного апарату, як правило, є його продуктивність, визначена в одиницях обробленої у цільовому режимі вологої сировини – базовий параметр, що визначає рамки для більшості залежних від нього характеристик проектуемого апарату. Слідуючи конструктивним обмеженням мікрохвильового способу сушіння та завдяки відносній технічній простоті конструкції мікрохвильової сушильної установки можливо розробити та виготовляти мікрохвильове сушильне обладнання з широким спектром призначення, варіюючи лише окремі його параметри. А використання модульного принципу будови таких апаратів дозволить створювати мікрохвильові сушильні установки у великому спектрі продуктивності шляхом вибору відповідної кількості та потужності МХ сушильних модулів. Варіювання швидкості транспортної стрічки зробить можливим оперативне керування інтенсивністю обробки матеріалу а вибір габаритних розмірів транспортного тунелю установки дозволить адаптувати установку до розмірів шару матеріалу або висоти деталей чи упаковки продукції.

З огляду на складність аналітичного моделювання процесів, що визначають інтенсивність масопереносу на всіх етапах вологовидалення в МХ апаратах та враховуючи універсальність їх конструкції і широкий діапазон можливих режимів обробки сировини, можливо найкоротшим шляхом до впровадження МХ технологій в реальні процеси є експериментальне дослідження режимів МХ сушіння тестових зразків цільового матеріалу в дослідних сушильних установках. І в разі отримання позитивних результатів, побудова (придбання) установки, що має достатню установлену потужність випромінювачів та прийнятні для конкретного користувача капітальні та експлуатаційні витрати.

References

1. Merko I.T. (2001). *Scientific foundations and technology of grain processing*, Odesa.
2. Stankevich, H. M., Strakhova T. V., Borta A. V. (2021). *Grain drying: a textbook*, Odesa: KP UMD.
3. Shutyuk, V. V. (2015). The use of microwave radiation for drying food products *Scientific works of the National Technical University of Ukraine*, 21(3), 133-140.
4. Bezbakh, I., Yarovy, I., & Voitenko, O. (2019). Combined methods of energy supply in the processes of drying plant raw materials. *Scientific Works*, 83(2), 71-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1532>
5. Burdo, O. G. (2010). *Evolution of drying plants* Odessa: Polygraph.

6. Guzik, P., Kulawik, P., Zajac, M., & Migdal, W. (2021). 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>
7. Luis González-Cavieres, Mario Pérez-Won, Gipsy Tabilo-Munizaga, Erick Jara-Quijada, Rodrigo Díaz-Álvarez, Roberto Lemus-Mondaca (2021). Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products, *Trends in Food Science & Technology*, 116, 626-638, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.005>.
8. Yarovy I. I., Kashkano M. A., Marenchenko O. I., Pylypenko Ye. O. (2019). Innovative methods of energy supply in the drying processes of heat-labile raw materials. *Innovative energy technologies -: coll. Ave. VII International science and practice Conference, Odesa, September 9–13.*, 17–23
9. Burdo O. G., Marenchenko E. I., Pylypenko E. A., Balagura V. M. (2017). Mathematical model of a microwave belt dryer *Innovative energy technologies: coll. Ave. VI International science and practice conference, Odesa, September 4-8.*, 381–389.
10. Burdo O. G., Alkhuri Y., Syrotyuk I. V., et al. (2018). The use of the mechano-diffusion effect in the production of concentrated polyextracts *Food science and technology*, 12(3), 97-108.
11. Atamanyuk V.M., Humnytskyi Y.M. (2013). *Scientific basis of filtration drying of dispersed materials*: monograph, Lviv: Publishing House - Lviv Polytechnic.
12. Description of solid-state microwave generators [Electronic resource] Solid State Generator - Fricke und Mallah
13. Characteristics of industrial microwave generators 2M290 [Electronic resource] 2M290 Original LG water cooled 3000w industrial microwave magnetron
14. Manufacturer of software for modeling microwave devices [Electronic resource] www.cst.com
15. Microwave Equipment Manufacturers [Electronic Resource] <https://www.joyangmachine.com> Shandong Joyang Machinery Co., Ltd. (Jinan, China); <https://loyal-microwavedryer.com> Shandong Loyal Industrial Co., Ltd <https://www.microwave-dryers.com> Zhengzhou Dingli, Henan Zhongji Huayuan Mechanical Engineering Co., Ltd.
16. Bandura, V., Yarovy, I., Marenchenko, O., & Pylypenko, E. (2019). Apparatus for drying vegetable raw materials by an electromagnetic field. *Scientific Works*, 82(2), 123-129. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i2.1242>
17. Yarovy, I., & Ali, V. (2021). Complex processing of raw materials using Addressable Energy Delivery technologies in the production of pectins. *Scientific Works*, 85(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2072>

TECHNICAL IMPLEMENTATION OF THE PROCESS OF VEGETABLE RAW MATERIALS COMBINED DRYING

**Yaroyvi I.I., PhD, Associate Professor, Marenchenko O.I., PhD, Ali V.P., graduate student
Odesa National University of Technology, Odesa**

Abstract. Drying is one of the most energy-consuming processes in the food and processing industry. Scientists and engineers of many countries are constantly working on improving drying technologies, searching for new ways to remove moisture from raw materials and food products. For the traditional, convective drying method, a large number of its variations have been developed and implemented. However, the limitations of convective drying related to the physics of heat and mass transfer processes do not allow counting on a significant increase in energy efficiency and productivity of convective drying technologies. One of the competitors of the convective drying method is microwave drying, which uses principles different from the convective method of bringing heat energy to the moisture contained in the material. Microwave drying technologies are gradually moving from the category of innovative high-tech methods of moisture removal to the category of specialized but available to the manufacturer processes. The paper presents a generalized analysis of the microwave method of drying wet materials and its main advantages. The development of the microwave drying method by combining it with filtration drying is considered. The advantages of this combined method of drying are given. An analysis of current technical and technological limitations in the design of microwave equipment for drying vegetable raw materials is presented. Here is a list of structural and technological problems that should be solved in the process of creating belt microwave dryers. A brief overview of industry-typical technological equipment for microwave processing of vegetable raw materials and wet materials in general is presented. A modular design of a microwave drying unit is proposed and its main components are described. Generalized results of experimental modeling of the moisture removal process in a microwave belt dryer are presented. Conclusions on the prospects of introducing microwave drying technologies into the existing technological processes of the food and processing industry are provided.

Keywords: microwave drying, combined drying, barodiffusion, construction of microwave drying devices.

Список використаної літератури

1. Мерко І.Т. Наукові основи і технологія переробки зерна. Одеса, 2001. 348с.

2. Станкевич, Г. М. Сушіння зерна : підручник. / Г. М. Станкевич, Т. В. Страхова, А. В. Борта. — Вид. 2-ге, перероб. і допов. — Одеса : КП ОМД, 2021. — 248 с.
3. Шутюк, В. В. Застосування мікрохвильового випромінювання для сушіння харчових продуктів / В. В. Шутюк // Наукові праці НУХТ. — К. : НУХТ, 2015. — Т. 21, № 3. - С.133-140.
4. Безбах, І., Яровий, І., & Войтенко, О. (2019). Комбіновані способи енергопідведення в процесах сушіння рослинної сировини. *Scientific Works*, 83(2), 71-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1532>
5. Бурдо, О. Г. Эволюция сушильных установок [Текст] : монография / Бурдо Олег Григорьевич. - Одесса : Полиграф, 2010. - 368 с. : табл., рис. - Библиогр.: 122 назв. - ISBN 978-966-8788-98-7.
6. Guzik, P., Kulawik, P., Zając, M., & Migdał, W. (2021). 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>
7. Luis González-Cavieres, Mario Pérez-Won, Gipsy Tabilo-Munizaga, Erick Jara-Quijada, Rodrigo Díaz-Álvarez, Roberto Lemus-Mondaca, Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products, *Trends in Food Science & Technology*, Volume 116, 2021, Pages 626-638, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.005>.
8. Інноваційні способи енергопідводу у процесах сушіння термолабільної сировини / І. І. Яровий, М. А. Кашкано, О. І. Маренченко, Є. О. Пилипенко // Інноваційні енерготехнології – 2019: зб. пр. VII Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 9–13 верес. 2019 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій ; – Одеса, 2019. – С. 17–23
9. Математическая модель микроволновой ленточной сушилки / О. Г. Бурдо, Е. И. Маренченко, Е. А. Пилипенко, В. В. Балагура // Інноваційні енерготехнології - 2017: зб. пр. VI Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 4-8 верес. 2017 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. - Одеса, 2017. – С. 381–389.
10. Використання механодифузійного ефекту при виробництві концентрованих поліекстрактів [Текст] / О. Г. Бурдо, Ю. Альхурі, І. В. сиротюк etc. // Харчова наука і технологія : наук.-вироб. журн. — Одеса : ОНАХТ, 2018. — Т. 12, № 3. — С.97-108.
11. Атаманюк В.М., Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів : монографія / В.М. Атаманюк, Я.М. Гумницький - Львів: Видавництво - Львівська політехніка, 2013. – 276 с.
12. Опис твердотільних мікрохвильових генераторів [Електронний ресурс] [Solid State Generator - Fricke und Mallah](#)
13. Характеристики промислових мікрохвильових генераторів 2М290 [Електронний ресурс] 2М290 Original LG water cooled 3000w industrial microwave magnetron
14. Виробник програмного забезпечення для моделювання НВЧ пристроїв [Електронний ресурс] www.cst.com
15. Виробники мікрохвильового обладнання [Електронні ресурси] <https://www.joyangmachine.com> Shandong Joyang Machinery Co., Ltd. (Jinan, China); <https://loyal-microwavedryer.com> Shandong Loyal Industrial Co., Ltd <https://www.microwave-dryers.com> Zhengzhou Dingli, Henan Zhongji Huayuan Mechanical Engineering Co., Ltd.
16. Бандура, В., Яровий, І., Маренченко, О., & Пилипенко, Є. (2019). Апарати для сушіння рослинної сировини електромагнітним полем. *Scientific Works*, 82(2), 123-129. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i2.1242>
17. Яровий, І., & Алі, В. (2021). Комплексна переробка сировини з використанням технологій Адресної доставки енергії у виробництві пектинів. *Scientific Works*, 85(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2072>

Отримано в редакцію 09.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.08.2024
Approved 25.09.2024

ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОЦЕСІВ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ

Мординський В. П., к.т.н., доцент, Бурдо А. К., к.т.н., доцент, Фатєєва Я. О., аспірантка,
Грещук В. П., аспірант
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. В роботі проведено аналіз установок блочного виморожування. Проаналізовано основні методи вилучення води з харчових рідин. Обґрунтовано шляхи зменшення витрат енергії та інтенсифікації процесу формування блоку льоду. Запропоновано основні підходи до спрощення цього процесу з енергетичної точки зору та з точки зору витрат часу. Досліджено кінетику утворення крижаної брили. Виявлено основні недоліки процесу заморозжування. Запропоновано шляхи удосконалення блокових морозильних установок, які допоможуть вирішити ці проблеми. Показано, що енергетична ефективність збільшується при рециклінгу льоду, використанні його енергії для переохолодження холодильного агента перед дроселюванням. Інтенсифікація процесу кристалізації проходить за ефектом «термічного парадоксу». Констатовано, що при певних узгоджених конструктивних і робочих параметрах відбувається зниження теплового опору в ланцюжку «холодоагент – поверхня кристалізатора – розчин». Запропонована методика розрахунку установок блочного виморожування для задач опріснення води. В основі алгоритму розрахунку число фазового переходу та дифузійне число Фруда. Систематизовано дані з моделювання процесів низькотемпературного опріснення води. Визначено основні завдання розрахунку, експерименту та оптимізації процесу заморозжування блоку. Наведено результати експериментального та аналітичного моделювання процесів опріснення води. Наведено результати досліджень, які дозволяють визначити раціональні режими організації процесів опріснення солоної води в блокових морозильних установках.

Ключові слова: блочне виморожування, водопідготовка, блок льоду, низькотемпературний процес, інтенсифікація, ефективність, кристалізація, розчин, опріснення, розділення, енергетичні витрати, параметри, холодильний агент, установка, моделювання, зменшення витрат, питна вода, рідина, сепарування, кристали льоду, технологічна схема, конструкція.

Вступ. Багато років водопідготовка не визначалась як галузь техніки й ще менше як галузь хімічної та харчової технології. Наразі, ключовим етапом багатьох харчових технологій є процеси вилучення води з рідких харчових систем. Задачі розділення багатокомпонентних розчинів необхідно вирішувати при їх концентруванні, доочищенні питної води, підготовці технологічної води, очищенні стічних вод та ін. За останні 30 років загальна продуктивність опріснювальних систем зросла більше, ніж у 50 разів. Принципово є три шляхи часткового вилучення води із харчових систем. Перший – це перевести воду в стан пару, другий – в тверду фазу, третій – здійснити механічне розділення рідкої системи. Економіка процесів зневоднення в значній мірі визначається рівнем енергетичних витрат. Відомо, що менша робота витрачається при переводі речовини у більш організовану структуру. Тому технології виморожування відрізняються меншими енергетичними витратами. В напрямку низькотемпературних процесів знесолення води проводились дослідження, наведені у статті.

Аналіз літературних джерел та формулювання наукової гіпотези. Низькотемпературні системи для опріснення води включають 2 процеси: кристалізацію та сепарування [1]. В останні роки все більше уваги приділяється знесоленню морської води [2]. Для традиційних технологій характерно, що процес формування кристалів льоду проходить інтенсивно, а сепарування є довгим та потребує значних витрат енергії [3]. Системний аналіз показує, що можна отримати загальний виграв у часі та енергетичних витратах, якщо інакше організувати процеси. Необхідно узгодити інтенсивність процесів генерації та сепарування льоду [3]. Така ідея є основою технології блочного виморожування [4, 5, 6]. Для реалізації ідеї блочного виморожування сформульовано ряд принципів:

- вилучити з технологічної схеми допоміжне обладнання (насоси, проміжні ємності та інш.);
- організувати на утворення поверхні блоку льоду з щільною упаковкою кристалів;
- проводити формування блоку льоду з постійним ростом поверхні розділу «тверда фаза - розчин».

Для чого процес кристалізації проводити на голчатих випарниках.

Такий підхід значно спростить етап сепарування та дозволить вилучити із технологічної схеми спеціальні апарати для розділення льоду та розчину. Також слід проводити розділення в умовах гравітаційного сепарування розчину з об'єму блоку льоду. Така організація процесу дозволила суттєво спростити технологічну схему та створити просту і надійну конструкцію установки. Основні переваги технології блочного виморожування у відсутності схемних втрат енергії у допоміжних вузлах та перехід від машинного принципу сепарування до апаратного. Організація спрощених методів кристалізації та сепарування дозволила сут-

тево зменшити витрати енергії [7]. Подальше удосконалення технології блочного виморожування пов'язано із використанням рециклінгу льоду [8]. Холодильний агент після конденсатора подавався у плавитель льоду де він охолоджувався до нульової температури. Це суттєво підвищувало питому холодильну продуктивність та холодильний коефіцієнт. Досліджувався вплив ультразвуку на процес кристалізації [9], визначено режими, при яких утворюється максимально щільна структура льоду.

Таким чином, нова реалізація установок блочного виморожування свідчить про перспективність технології. Недоліками розробки є періодичність, невелика продуктивність та ручне завантаження і вивантаження компонентів. Подальше удосконалення процесу має вирішити ці проблеми. Пропозиції авторів базуються на гіпотезі про те, що «перехід низькотемпературних опріснювачів із рециклінгом льоду до установок безперервної дії можливий за умови послідовної організації на поверхнях теплопередачі процесів кристалізації, сепарування та плавлення». Варіантом реалізації даної ідеї є система електромагнітних клапанів на лініях холодильного агента та води за допомогою яких керується послідовність і час етапів процесу та температура льоду.

Моделювання низькотемпературних процесів опріснення води. Технічна ідея установки з рециклінгом льоду наведена на (рис.1).

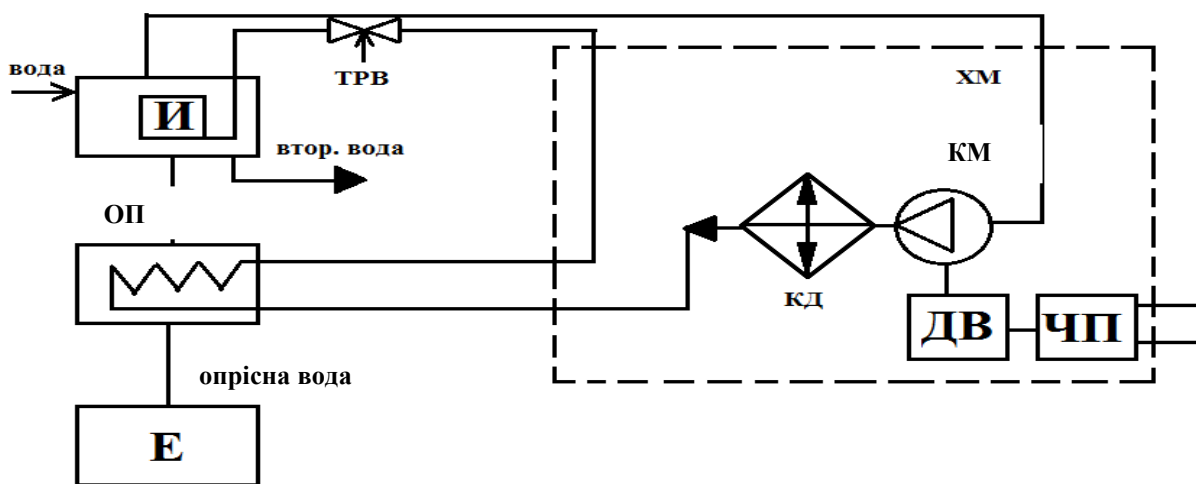


Рис. 1 – Схема опріснювача з рециклінгом льоду та частотним управлінням потужності

Основними елементами опріснювача є: холодильна машина з компресором (КМ), конденсатором (КД), випарником (И), терморегулюючим вентилем (ТРВ) та охолоджувач холодильного агента (ОП). Прісна вода збирається у ємність (Е). Двигун компресора (Д) управляється частотним перетворювачем (ЧП), який забезпечує відповідну холодопродуктивність ХМ при запуску установки (без льоду в системі) та в штатному режимі з рециклінгом льоду. Реально охолоджувати холодильний агент після конденсації до 1 ... 3 °С.

Подальше математичне моделювання доцільно проводити на основі теорії подібності при наступних припущеннях:

- тепломасоперенесення здійснюється на поверхні випарників, кристалізація в об'ємі відсутня;
- процес проходить в умовах природної конвекції, а температура поверхні льоду визначається кріоскопічними умовами $t_{\text{л}} = t_{\text{с}}$;
- всі сухі речовини розглядаються як один компонент;
- зміна ентальпії льоду незначна порівняно з теплотою кристалізації.

Загальне рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q = c_p * V_p * \rho_p \frac{\Delta t_p}{\Delta \tau} + \Omega F_{\text{л}} \frac{\Delta r_{\text{л}}}{\Delta \tau} + Q_{\text{пот}} \quad (1)$$

З урахуванням прийнятих припущень для безрозмірної координати $x = (r_{\text{л}} - r_{\text{и}})/(r_{\text{к}} - r_{\text{и}})$ визначається безрозмірний час виморожування:

$$F_0 = \frac{Ph}{2(n+1)} \left(1 + \frac{2}{Bi_T} \right) \quad (2)$$

де Bi_T – число Біо теплове:

$$Bi_T = \alpha_{\chi} * r_T \left(\frac{\ln r_{\text{к}}}{r_T} + \frac{\ln r_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}} \right), \quad (3)$$

Ph – число фазового переходу:

$$Ph = \frac{\rho_p \Omega}{\rho c_{p_l}(t_p - t_k)} \quad (4)$$

В рівняннях (1 - 4) n - константа, яка залежить від форми блоку льоду, (для циліндра $n = 1$); α_x - коефіцієнт тепловіддачі від холодильного агенту до стінки кристалізатора, Вт/(м²К); r_t - внутрішній радіус стінки кристалізатора, м; r_k - радіус концентратора, м; r_l - радіус блоку льоду, м; λ_k - теплопровідність стінки кристалізатора, Вт/(мК); λ_l - теплопровідність льоду, Вт/(мК); ρ_p , ρ_l - щільність розчину та льоду, кг/м³; Ω - питома теплота кристалізації, Дж/кг; C_{pl} - питома теплоємність льоду, Дж/(кг К).

З урахуванням змін ентальпії твердої фази та особливостей масоперенесення на границі «льоду та розчину» дійсний час процесу буде:

$$\tau = \tau_0 \psi_1 \psi_2 \quad (5)$$

де ψ_1 - коефіцієнт, що враховує зміну ентальпії льоду:

$$\psi_1 \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Bi_T}{Bi_T + 1} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\sqrt{1 + 2 \frac{F r_l}{Ph V_l}} - 1 \right) \quad (6)$$

де F - площа поверхні блоку льоду, м²; V_l - об'єм блоку льоду, м³.

$$\psi_2 = A(Bi_o)^k; \quad (7)$$

число Біо дифузійне:

$$Bi_o = \frac{\beta r_l \ln(r_l/r_k)}{D} \quad (8)$$

де β - коефіцієнт інтенсивності масоперенесення від розчину до блоку льоду, м/с; D - коефіцієнт дифузії, м²/с.

Урахування умов стиснення проводиться за значенням кільцевого зазору $\Delta r = r_c - r_l$.

Основні витрати енергії приходяться на процес кристалізації:

$$-Q = \rho_l \Omega \frac{dV_l}{dr_l} * \frac{dr_l}{d\tau} \quad (9)$$

Їх має забезпечити поверхня кристалізаторів F :

$$Q = \frac{F(t_p - t_k)}{R_\Sigma} \quad (10)$$

при відповідному значенню суми термічних опорів:

$$R_\Sigma = \frac{1}{\alpha_x d_k} + \frac{\ln(r_k/r_t)}{\lambda_T} + \frac{\ln(r_l/r_k)}{\lambda_l} + \frac{1}{\alpha_p d_l} \quad (11)$$

Мінімально необхідний час для формування льоду безрозмірного шару X визначається з числа Фур'є:

$$F_0 \rightarrow no X = \frac{r_l - r_u}{r_k - r_l} \quad (12)$$

в межах $r_u < r_l < r_k$. За умовою $Bi \rightarrow \infty$

$$\tau = \frac{F_0 \rho_l c_p (r_l - r_u)^2}{\lambda_l} \quad (13)$$

Таким чином, результати моделювання визначають задачі експериментальних досліджень.

Обговорення результатів досліджень. Об'єктом досліджень є вода із масою G_l та температурою t_l . Концентрація солі на вході $C_1 = 0,325$, а на виході $C = 0,1$. Задачами розрахунку, експерименту та оптимізації є: кінетика формування блоку льоду, кінетика зміни концентрації розчину, визначення продуктивності установки та її енергетичних характеристик. Задача оптимізації вирішується шляхом варіантних розрахунків, цільовою функцією приймаються економічні показники, а параметрами — температура кипіння холодильного агенту.

Ключовим елементом розрахунку є число фазового переходу (Ph), яке визначається для ідеальних умов ($Bi \rightarrow \infty$). Знаходиться мінімально необхідний час ідеального процесу (τ), для якого визначається об'єм блоку льоду (V_l), його маса (M_l), об'єм розчину (V_{sol}) та його концентрація (C_l). Послідовно, з шагом ΔX змінюється значення границі розділу фаз. Поправку, яка враховує дійсне значення числа Bi знайдено по результатах експериментального моделювання. Ця поправка встановить вплив сукупності конструктивних, та режимних параметрів на розвиток теплових та дифузійних процесів в апараті. Блок - схему розрахунку наведено на рис.2.

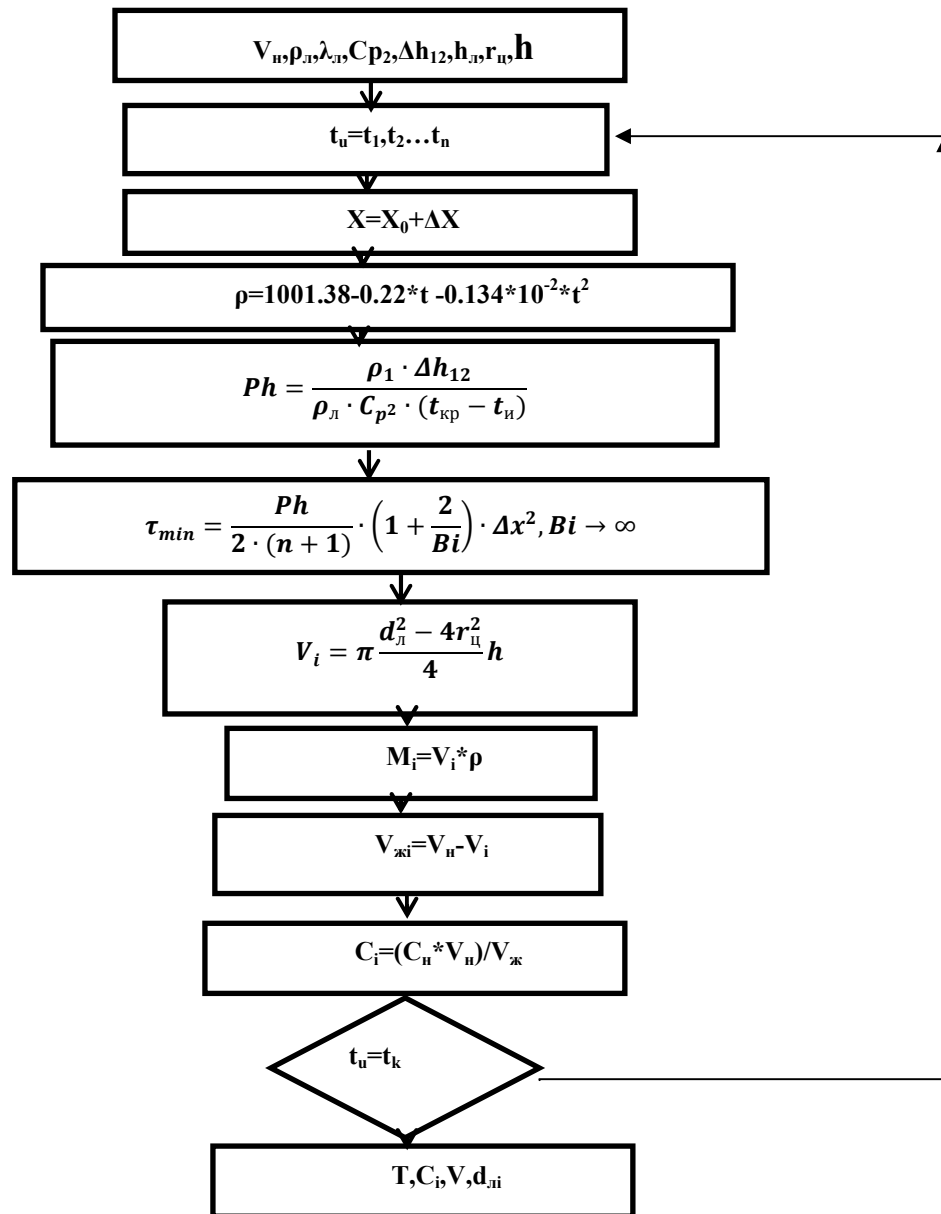


Рис. 2 – Алгоритм розрахунку опріснювача блочного типу

В розрахунках прийняті значення щільності льоду $\rho_{\text{л}} = 917 \text{ кг/м}^3$, його теплопровідності $\lambda_{\text{л}} = 2 \text{ Вт/мК}$, прихованої теплоти фазового переходу при кристалізації води в лід $\Delta h_{1-2} = 333 \text{ кДж/кг}$, питома теплоємність льоду $C_{p2} = 2,05 \text{ кДж/кгК}$. Товщина шару льоду задається з кроком $\Delta X = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Для першого кроку $X = \Delta X$. Розрахунок проводять при постійній криоскопічній температурі (t_k), а при розрахунку щільності розчину (ρ) враховують його температуру (t). Для кожного значення X і температури кипіння (t_o) визначають число фазового переходу Ph , яке дає можливість встановити час процесу (τ_{min}), діаметр блоку льоду ($d_{\text{л}}$), його об'єм ($V_{\text{л}}$) і масу (M). З матеріального балансу розраховують об'єм ($V_{\text{жi}}$) розчину і його концентрацію (C_i). Методика передбачає розрахунок числа (Ph) для умов $Bi \rightarrow \infty$.

Результатом розрахунку для кожного аналізованого моменту часу за рис.2 є: об'єм блоку льоду (V), час процесу (τ) для умов ($Bi \rightarrow \infty$) і поточне значення концентрації розчину (C).

Поправку, яка враховує дійсне значення числа Bi необхідно визначити за результатами експериментального моделювання. Така поправка встановить вплив сукупності конструктивних і режимних параметрів на розвиток теплових і дифузійних процесів в досліджуваному апараті.

Розрахунки та експеримент проведено для апарата, який мав змієвиковий кристалізатор діаметром $0,006 \text{ м}$, загальною довжиною $h = 7 \text{ м}$. Об'єм води складав $V_{\text{н}} = 4 \text{ л}$.

Результати визначення ключового параметра (числа Ph) наведено в табл.1. Оцінка проведена для трьох рівнів температур кипіння в кристалізаторі.

Залежність числа Ph від температури

Параметри	$t_x = -8^\circ\text{C}$				$t_x = -12^\circ\text{C}$			$t_x = -15^\circ\text{C}$		
$\tau, \text{с}$	1385	3116	5540	8656	2077	3693	5771	1662	2981	4620
Ph	22.159	22.159	22.159	22.159	14.772	14.772	14.772	11.818	11.818	11.818

Порівняння даних розрахунку з результатами експериментів (рис. 2) показало, що поправочний коефіцієнт $\psi = 2,5$. Тому, $\tau = \psi \tau_{\min}$.

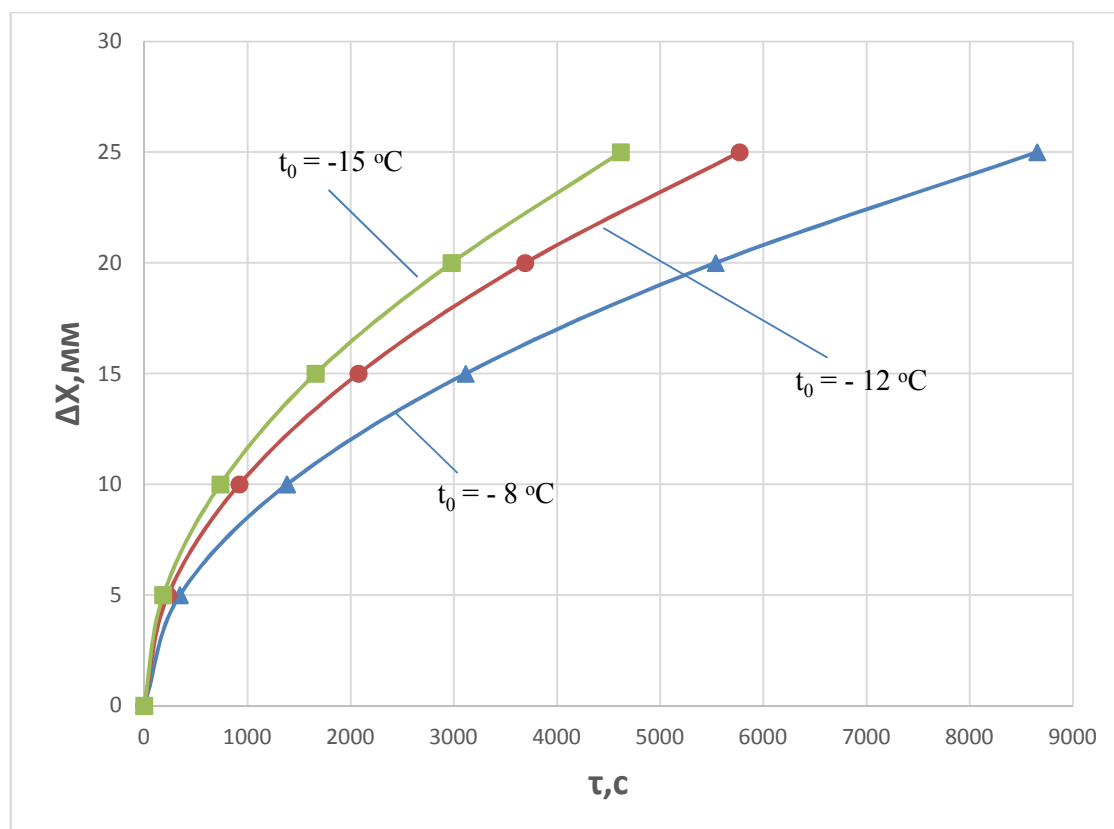


Рис. 3 – Кінетика формування блоку льоду

Наведені результати дозволяють визначати раціональні режими організації процесів опріснення солоної води в апаратах блочного виморожування.

Висновки. Актуальність організації енергоефективних процесів розділення багатоконпонентних водних розчинів динамічно зростає. При цьому, особливе місце займають проблеми опріснення солоної води. Серед багатьох принципів знесолення низькотемпературні апарати блочного виморожування вигідно відрізняються своєю енергоефективністю. В порівнянні із традиційними дистильаторами вони витрачають у 7 разів менше енергії на фазові перетворення. В останні роки зростає інтерес до розробок ОНТУ – апаратів блочного виморожування, які добре себе зарекомендували як кріоконцентратори. В роботі розвинуто наукові основи цих апаратів для задач опріснення. Досліджено кінетику та енергетику процесів опріснення в апаратах блочного виморожування. Аналітичне та експериментальне моделювання показало, що кінетика формування блоку льоду має вигляд експоненти.

Зниження темпів росту товщини блоку льоду (рис.3) та, маси льоду свідчить за те, що необхідна холодильна потужність з часом знижується. Тому, енергетично ефективні системи блочного виморожування мають враховувати таку специфіку. Пропонується регулювати та узгоджувати холодильну потужність за допомогою частотного перетворювача.

References

- <http://aqua-technolog.od.ua/content/Belikov.pdf>
- http://www.o8ode.ru/article/answer/pnanetwater/Review_of_methods_of_desalination_of_sea_water

3. Burdo O.H., Trishyn F.A., Yarovy I.I. Enerhetychnyi monitorynh kharchovykh ta pererobnykh vyrobnytstv. (Energy monitoring of food and processing industries) – Odesa: Madzhenta, 2020. – 246 s.
4. Burdo O.H., Svetlichnyi P.I., Milinchuk S.I. Sposib kontsentrivannia ridkykh kharchovykh produktiv (Method of concentration of liquid food products) Patent Ukrainy UA 35222. A23L2/08.
5. Burdo O.H. Kholodylni tekhnolohii v systemi APK (Refrigeration technologies in the agribusiness system) – Odesa: Polihraf, 2009 .
6. Burdo O.G., Terziev S.G., Mordynskiy V.P., Sirotyuk I.V. (2022) Development of Low-Temperature Block Type Facility for Sea Water Desalination. *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 54. Is. 2. pp. 13–25.
7. <http://nanofood.com.ua>
8. Trishyn F.A., Trach O.R., Orlovskaya Yu.V. (2018) Management of Energy Flows in Low-temperature Separation Units. *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 36. Is. 1. pp. 72–86.

RESEARCH OF LOW TEMPERATURE PROCESSES OF WATER DESALINATION

Mordynskiy V.P., Burdo A.K., Fateeva Ya. O., Greschuk V.P.
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. The work shows the relevance of the problem of separation of multicomponent solutions both in the processes of water preparation and water purification, as well as in food technologies. The main methods of extracting water from food liquids are analyzed. The main approaches to simplifying this process from the energy point of view and in terms of time costs are proposed. An analysis of block freezing installations was carried out. The kinetics of ice block formation was studied. The main shortcomings of the freezing process were revealed. Ways of improving block freezing units that will help solve these problems are proposed. Ways of reducing energy consumption and intensifying the process of ice block formation are substantiated. It is shown that energy efficiency increases when recycling ice, using its energy to supercool the refrigerant before throttling. The intensification of the crystallization process takes place due to the effect of the "thermal paradox". It is stated that with a certain agreed design and operating parameters, there is a decrease in thermal resistance in the chain "refrigerant - surface of the crystallizer - solution". A method of calculating block freezing units for water desalination problems is proposed. The calculation algorithm is based on the phase transition number and the diffusion Froude number. Data on modeling of low-temperature water desalination processes have been systematized. The main tasks of calculation, experiment and optimization of the block freezing process were identified. The results of experimental and analytical modeling of water desalination processes are given. The results of research that allow determining rational modes of organization of salt water desalination processes in block freezing devices are presented.

Keywords: block freezing, water preparation, ice block, low-temperature process, intensification, efficiency, crystallization, solution, desalination, separation, energy costs, parameters, refrigerant, installation, simulation, cost reduction, drinking water, liquid, ice crystals, flow chart, construction.

Список використаної літератури

1. <http://aqua-technolog.od.ua/content/Belikov.pdf>
2. http://www.o8ode.ru/article/answer/pnanetwater/Review_of_methods_of_desalination_of_sea_water
3. Бурдо О.Г., Трішин Ф.А., Яровий І.І. Енергетичний моніторинг харчових та переробних виробництв. – Оdesa: Маджента, 2020. – 246 с.
4. Бурдо О.Г., Светлічний П.І., Мілінчук С.І. .Спосіб концентрування рідких харчових продуктів Патент України UA 35222. A23L2/08.
5. Бурдо О.Г. Холодильні технології в системі АПК – Оdesa: Поліграф, 2009 .
6. Burdo O.G., Terziev S.G., Mordynskiy V.P., Sirotyuk I.V. Development of Low-Temperature Block Type Facility for Sea Water Desalination. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. Vol. 54. Is. 2. pp. 13–25.
7. <http://nanofood.com.ua>
8. Trishyn F.A., Trach O.R., Orlovskaya Yu/ V. Management of Energy Flows in Low-temperature Separation Units. *Problemele Energeticii Regionale*. 2018. Vol. 36. Is. 1. pp. 72–86.

Отримано в редакцію 09.08.2024

Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.08.2024

Approved 25.09.2024

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ШНЕКОВОГО ЕКСТРАКТОРУ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

Всеволодов О.М., к.т.н., доцент, Аль-Хамад І. М., аспірант, Терзієв С.Г., д.т.н, доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Проведено критичний аналіз джерел з індустрії харчової промисловості та проблематику розвитку сфери виготовлення фітоекстрактів. Визначено наукові протиріччя традиційного обладнання для екстрагування рослинної сировини. На кафедрі ПОЕМ було сформовано науково-технічну гіпотезу для процесу екстрагування з використанням мікрохвильового випромінювання. Використання мікрохвильової енергії для екстрагування біологічно-активних речовин дозволить значно підвищити ефективність процесу за рахунок інтенсивного впливу МХ на матеріал та руйнування клітинних структур (за рахунок бародифузії), що збільшить вихід цільових фітохімічних речовин, знизить енерговитрати та скоротить час екстрагування порівняно з традиційними методами. Спираючись на параметричну модель процесу екстрагування у мікрохвильовому полі методами теорії подібності, було отримано структуру критеріальної моделі для шару сировини. Основним матеріалом для проведення серії експериментів, була рослинна сировина соя. Експериментальний стенд включав резонаторну камеру, шнековий транспортер, джерела електромагнітної енергії, завантажувальний і розвантажувальний бункери, система подачі екстрагенту, елементи керування установкою. Дуже важливими результатами дослідження є залежності кінцевої концентрації екстракту від потужності магнетрону та від гідромодуля. Аналіз даних експериментальних досліджень показав перевагу мікрохвильового екстрагування, порівняно із традиційними методами екстрагування. Підвищення потужності МХ-енергії може суттєво підвищити кінцеву концентрацію і істотно знизити тривалість, тим самим, знизити витрати енергії на процес екстрагування. Гідромодуль і потужність мікрохвильового поля є найбільш важливими параметрами при виборі раціонального режиму роботи екстракційного обладнання. Узгодження цих параметрів дозволяє збільшити значення коефіцієнта масовіддачі при екстрагуванні.

Ключові слова: екстрагування біологічно активних речовин, МХ-екстрагування, рослинна речовина, шнекові екстрактори, бародифузія.

Вступ. Наразі, динамічно зростає інтерес у фармацевтичній, косметичній та харчовій промисловості до фітоекстрактів [1]. У фармацевтиці вони використовуються як активні складники у лікарських препаратах. Косметична промисловість застосовує фітоекстракти у виробництві природних косметичних засобів, оскільки вони мають здатність покращувати стан шкіри, волосся та нігтів [2]. У харчовій промисловості фітоекстракти використовуються як натуральні добавки до харчових продуктів, забезпечуючи їм певні смакові та корисні властивості. Зростаючий попит на фітоекстракти в цих галузях свідчить про важливість оптимізації процесів та розробки відповідного обладнання для їх ефективного та якісного виробництва [3].

Екстракційне обладнання переважно це апарати періодичної дії [4]. Проблема таких екстракторів полягає в тому, що вони не ефективні у виробничих масштабах бо вимагають часу на завантаження, розвантаження та очищення, що суттєво уповільнює процес екстракції. Крім того, цей тип екстракторів може призвести до значних втрат продукту та розчинника [5]. Переваги екстракторів безперервної дії полягають у їх високій продуктивності, більш ефективному очищенні продукту та розчинника, а також покращеної стабільності та контрольованості процесу екстракції [6].

У роботі пропонується використовувати мікрохвильове випромінювання у процесах екстракції що дозволяє прискорити процес руйнування клітинних стінок, скоротити час екстрагування, збільшити ефективність вилучення та знизити енерговитрати на процес. Крім того, екстрагування з використанням мікрохвильового випромінювання дозволяє отримувати цільові сполуки високої чистоти та зберігати їх біологічну активність, що підвищує якість продукту та його конкурентоспроможність на ринку. Всі ці переваги роблять безперервні екстрактори з використанням мікрохвильового випромінювання перспективною технологією в процесах отримання фітоекстрактів [7].

Аналіз проблематики та останніх досліджень. Сучасні тенденції у сфері медицини, фармакології та харчової промисловості підкреслюють важливість використання натуральних джерел біологічно активних речовин (БАР), таких як поліфеноли, флавоноїди, антиоксиданти та інші природні сполуки [8]. Ці речовини мають широкий спектр корисних властивостей, зокрема протизапальні, антибактеріальні, протипухлинні, що робить їх цінними для розробки нових препаратів і функціональних продуктів.

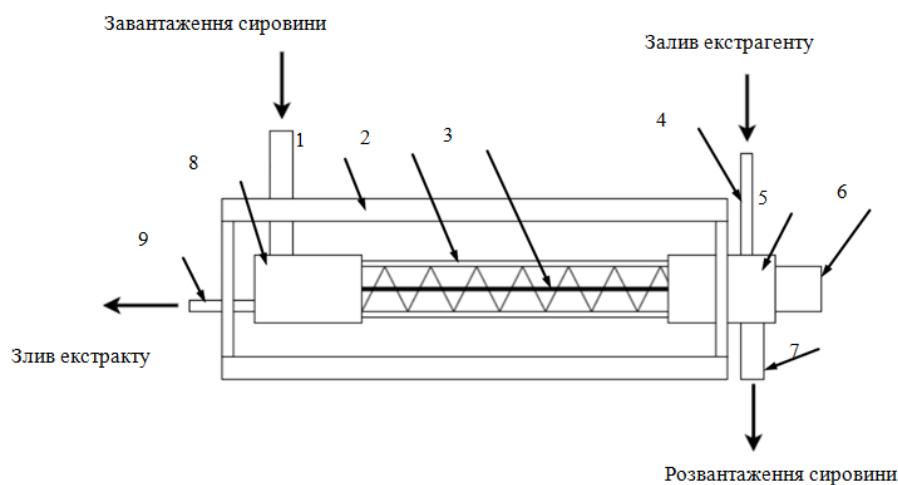
Екстрагування БАР є складним процесом, що потребує ефективних технологій для збереження максимальної активності та біодоступності сполук [9]. Застосування мікрохвильової енергії для екстрагування стає дедалі більш популярним завдяки своїм численним перевагам: швидкість процесу, зниження потреби у

розчинниках, підвищена селективність, та мінімізація впливу температури на нестабільні сполуки. Цей метод дозволяє зменшити витрати енергії та часу, підвищуючи вихід БАР з рослинної сировини [10].

Прогнози на майбутнє українського продукту фітопрепаратів є позитивними, оскільки спостерігається зростаючий інтерес до природних, екологічно чистих продуктів і збільшується свідомість людей про користь рослинних компонентів для здоров'я і добробуту [11]. Проведемо аналіз конструкції, принципів дій, переваг та недоліків традиційних апаратів для екстрагування. Етап екстракції включає в себе вибір розчинника, співвідношення розчинник-сировина, температуру та час екстракції.

Таким чином у доступній літературі не знайдено інформації стосовно екстракторів безперервної дії з мікрохвильовими інтенсифікаторами.

Методи та результати досліджень. Метою роботи є розробка та дослідження мікрохвильового екстрактору безперервної дії. Розробка базується на наступній гіпотезі: «Організація завантаження, розвантаження та транспортування твердої сировини за допомогою шнеку, який розташований у радіо прозорому реакційному об'ємі, формування протитечійного руху сировини та екстрагенту, обробка їх у резонаторній камері мікрохвильовим полем дозволить створити енергоефективний екстрактор безперервної дії». Обмеження у такому апарата – наявність в екстрагенті полярних молекул. Принципова схема такого апарата наведена на рис.1.



1- корпус екстрактора; 2- скляна труба; 3- шнек; 4- система подачі екстрагенту; 5- корпус підшипників; 6- двигун; 7- розвантажувальний бункер для сировини; 8- завантажувальний бункер для сировини; 9- патрубок для зливу екстракту.

Рис. 1 – Схема установки

При розробці апарата залучались методи математичного моделювання та експерименту. Ключові параметри, що впливають на процес, визначено за допомогою параметричної моделі (рис.2).

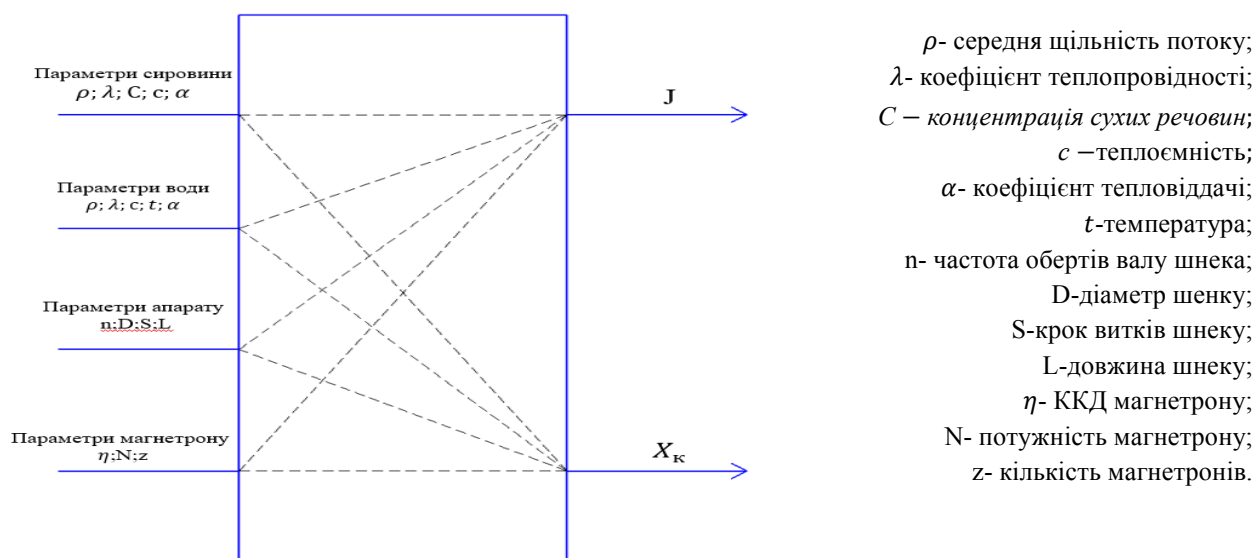


Рис. 2 – Параметрична схема процесу екстрагування у мікрохвильовому полі

Характеристика параметрів наведена в табл.1.

Таблиця 1

Характеристика параметрів процесу екстрагування у мікрохвильовому полі

Назва	Позначення	Розмірність	
Потужність мікрохвильового поля	N	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$
Середня щільність потоку	ρ	$\text{кг} / \text{м}^3$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Середня в'язкість потоку	μ	$\text{Па} \cdot \text{с}$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
Розмір часток	d	м	м
Різниця концентрацій	ΔC	$\text{кг} / \text{м}^3$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Середня витрата сировини	G_c	$\text{кг} / \text{с}$	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$
Гравітаційна константа	g	$\text{м} / \text{с}^2$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Коефіцієнт дифузії	D	$\text{м}^2 / \text{с}$	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
Питома теплота пароутворення	r	$\text{Дж} / \text{кг}$	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
Середня витрата екстрагенту	$G_{\text{э}}$	$\text{кг} / \text{с}$	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$
Ефективний коефіцієнт масовіддачі	β	$\text{м} / \text{с}$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$

Складання математичної моделі проводилось на основі спрощеної фізичної моделі (рис. 3).

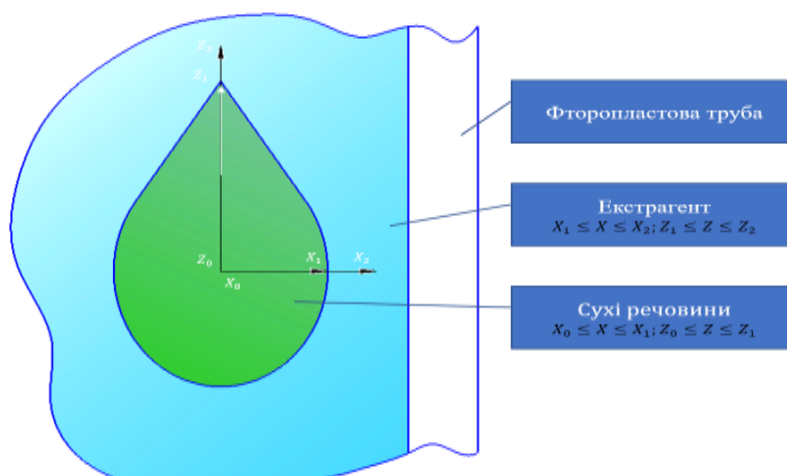


Рис. 3 – Фізична схема процесу екстрагування

Для двовірної моделі записано рівняння енергії (1)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Система доповнюється універсальними рівняннями сплошності, Наве-Стокса, відповідними умовами однозначності. Рівняння конвективного масоперенесення (зміни концентрації екстракту) визначається рівнянням (2).

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial c}{\partial x} + w_z \frac{\partial c}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

В результаті визначено ключові параметри, що впливають на кінетику процесу екстрагування.

Вплив температури та інтенсивності енергопідведення. Досліди проводились на експериментальному стенді «Електродинамічний екстрактор», який складається з баку для екстрагента (води) з гнучким патрубком що з'єднує бак з робочим модулем, і ємністю для злива екстракту. Металевий резонаторний корпус, в якому розміщуються блоки масообмінних модулів, оснащений генератором мікрохвильового випромінювання. Система керування дозволяє регулювати потужність випромінювання установки. При проведенні досліджень сировини використовували наступне устаткування:

1. Мікрохвильовий екстрактор ;
2. Ваги фірми “Techno wagu” моделі TBE-6 з максимально допустимою вагою до 6 кг, точністю в одну цифру після крапки і допустимою похибкою до 0,1 г;
3. Пірометр фірми “Benetech” моделі GM320, діапазон вимірювальних температур пірометра складає від -50°C до 380°C.

Досліджувана сировина завантажувалося в ємність, розташовану всередині корпусу, і знаходилася нерухомо відносно стінок. Сировиною для проведення експериментальних досліджень використовувалася необроблена соя, як екстрагент – вода. Основна частина дослідів була орієнтована на дослідження кінетики екстрагування із соєвої сировини.

Сою екстрагували водою при комбінованому електромагнітному впливі в умовах проточного проведення процесу.

У процесі екстрагування в імпульсному електромагнітному полі параметр температури безпосередньо пов'язаний з потужністю випромінювання, тому серія дослідів вивчала не роздільне, а спільний вплив цих параметрів на основний кінетичний параметр - коефіцієнт масовіддачі (β). Експеримент проводився під впливом імпульсного електромагнітного поля різної потужності (рис.4).

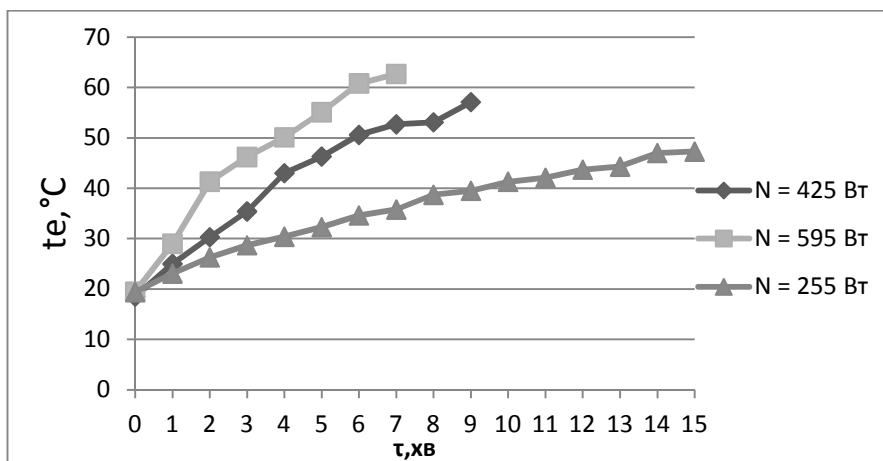


Рис. 4 – Залежність температури від потужності магнетрону

За результатами дослідів (рис. 4) можна дійти висновку, що з підвищенні потужності МВ-енергії вдвічі температура екстрагента підвищується майже 2 рази.

Спостереження показали (рис. 5), що підвищення потужності МВ-енергії може підвищити вихід екстрактивних речовин із соєвої сировини та знизити тривалість, а, отже, знизити енергоємність процесу виробництва екстрактів сої із соєвої сировини.

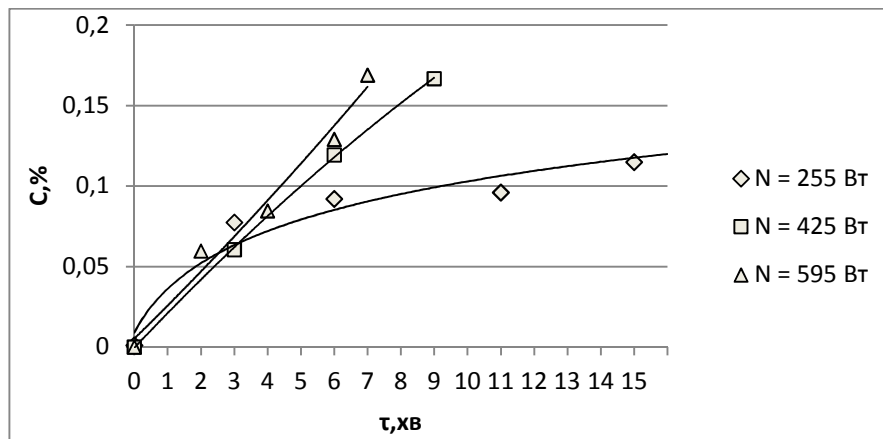


Рис. 5 – Залежність концентрації від потужності магнетрону

Вплив температури та гідромодуля. У цій серії експериментів стояло завдання визначити вплив гідромодуля на інтенсивність процесу екстрагування під впливом мікрохвильового електромагнітного поля. Гідромодуль сої змінювався у співвідношеннях 1:3, 1:5, 1:10 при постійних параметрах мікрохвильової потужності 425 Вт, що підводиться, режимній температурі 60 °С.

За результатами дослідження (рис. 6) видно, що при гідромодулі 1:5 продукту, що обробляється, спостерігається найбільша концентрація речовин.

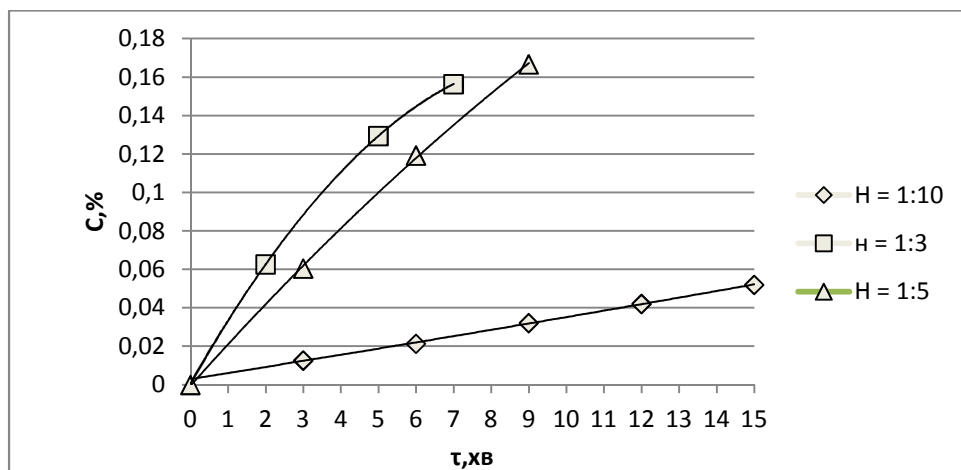


Рис. 6 – Залежність концентрації від гідромодуля

Визначення транспортних характеристик шнеку. Вплив таких характеристик, як частота обертання та кут нахилу екстрактора наведено на рис. 7 та рис. 8.

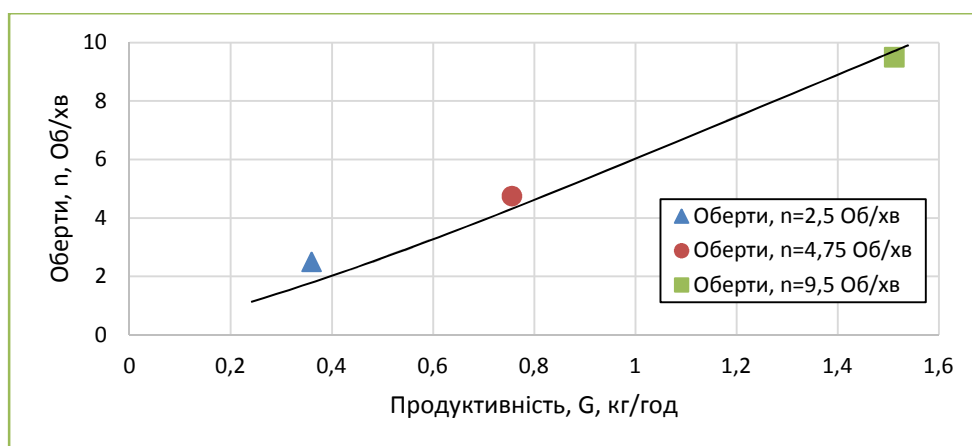


Рис. 7 – Вплив частоти обертання валу шнеку на продуктивність екстрактора

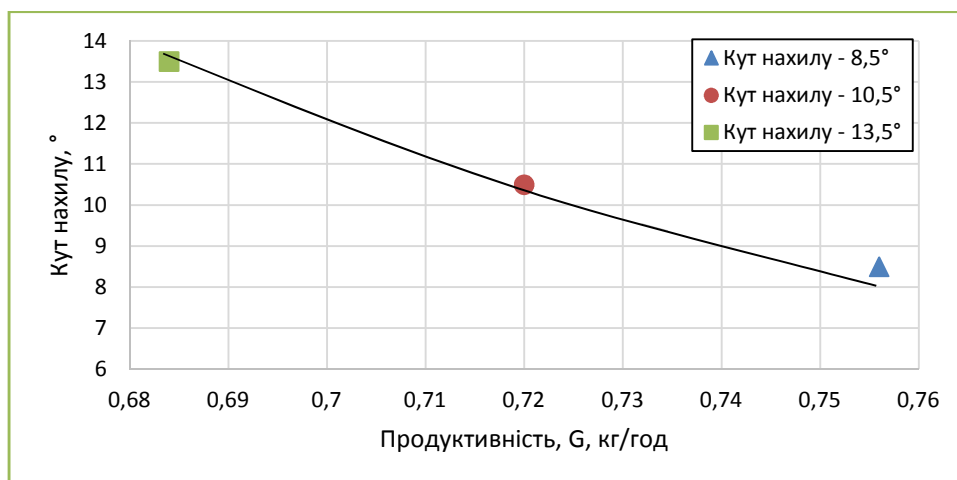


Рис. 8 – Вплив кута нахилу на продуктивність екстрактора

Висновки

1. Підвищення потужності МХ-енергії може суттєво підвищити кінцеву концентрацію і істотно знизити тривалість, тим самим, знизити витрати енергії на процес екстрагування.
2. При зміні гідромодуля в ході серії експериментів виявили, що найбільша концентрація спостерігається при співвідношенні 1:5
3. Гідромодуль і потужність мікрохвильового поля є найбільш важливими параметрами при виборі раціонального режиму роботи екстракційного обладнання. Узгодження цих параметрів дозволяє збільшити значення коефіцієнта масовіддачі при екстрагуванні.

References

1. Gavamukulya, Y., Abou-Elella, F., Wamunyokoli, F., & AEI-Shemy, H. (2017). Phytochemical Screening, Antioxidant, and Antimicrobial Activities of the Extracts from *Carica papaya* Seeds. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, 12(4), 344-353.
2. Ferreira, I. C. F. R., Barros, L., Abreu, R. M. V., & Oliveira, M. B. P. P. (2018). *Plant Phytochemicals in Food Applications: Extraction, Techniques, and Applications*. CRC Press.
3. Kumar, P., & Mishra, A. (2019). Innovative Extraction Techniques for Herbal Extracts: A Review. *Journal of Food Science and Technology*, 56(10), 4733-4748.
4. Oliveira, R. B., Braga, M. E. M., de Sousa, H. C., & Franca, A. S. (2021). Extraction Technologies for High-Value Compounds from Medicinal Plants: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(3), 378-399.
5. Bhattacharya, S., & Mehta, P. (2018). Modern Extraction Techniques for Botanicals and Medicinal Plant Phytochemicals. In *Advances in Plant Bioactive Compounds* (pp. 109-130). Elsevier.
6. Singh, A., & Sharma, O. P. (2021). Recent Advances in Extraction Techniques of Phytochemicals from Medicinal Plants. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 95, pp. 1-41). Academic Press.
7. Ivanova N. A. (2018). Fitopreparaty: vplyv na zdorovia i zachyst roslyn [Phytopreparations: impact on health and protection of plants]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 2, 23-29.
8. Patel, V. R., Patel, P. R., & Kajal, S. S. (2018). Pharmaceutical Extraction Techniques and Their Applications: A Review. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 10(12), 3071-3078.
9. Karimi, E., & Jaafar, H. Z. (2018). Phytochemical Extraction from Medicinal Plants: A Review. *International Journal of Engineering Research and Reviews*, 6(6), 157-163.
10. Jyoti, B., & Kumar, A. (2021). Recent Advancements in Extraction Techniques for Phytochemicals from Medicinal Plants. In *Recent Advancements in Plant Biotechnology* (pp. 111-131). Springer.
11. Shapovalov O. V., Dibrova V. AND. (2018). Production of phytopreparations: technologies and prospects. *Chemistry for Sustainable Development*, 26(1), 17-27.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MICROWAVE SCREW CONTINUOUS ACTION EXTRACTOR

**Vsevolodov O.M., PhD, Al-Hamad I.M., graduate student, Terziev S.G., d.t.s., associate professor
Odesa National University of Technology, Odesa**

Abstract. A critical analysis of the issues related to the grub industry and the development of the sphere of production of phytoextracts was carried out. The scientific method of using traditional technology for the extraction of rosemary is indicated. At the Department of POEM, a scientific and technical hypothesis was formed for the process of extracting from the microbial vip production. The use of microbial energy for the extraction of biologically active substances can significantly improve the efficiency of the process for the intensive infusion of MX onto the material and the restructuring of tissue structures (for the scale barodifusion), in order to increase the yield of target phytochemical substances, reduce energy consumption and shorten the hour of extraction in a manner similar to traditional methods. By relying on a parametric model of the extraction process in the microwine field using the methods of the theory of similarity, the structure of the criterion model for the cheese ball was determined. The main material for conducting a series of experiments was high-altitude soybean. An experimental stand including a resonator chamber, a screw conveyor, electromagnetic energy generators, vanishing and dissolving bunkers, an extractant supply system, elements of a ceramic installation. Very important results were obtained from the study of the final concentration of the extract under the pressure of the magnetron and the hydromodule. Analysis of these experimental studies has shown the superiority of microwilt extraction compared to traditional extraction methods. Increases in the intensity of MX-energy can significantly increase the terminal concentration and ultimately reduce waste, thereby reducing energy consumption for the extraction process. The hydraulic module and the tightness of the microfiber field are the most important parameters when choosing a rational operating mode for extraction equipment. Using these parameters allows you to increase the value of the mass yield coefficient during extraction.

Keywords: extraction of biologically active substances, MW extraction, plant matter, screw extractors, barodifuia.

Список використаної літератури

1. Gavamukulya Y., Abou-Elella F., Wamunyokoli F., AEI-Shemy H. Phytochemical Screening, Antioxidant, and Antimicrobial Activities of the Extracts from Carica papaya Seeds // *Journal of Taibah University Medical Sciences*. 2017. Vol. 12, No. 4. P. 344–353.
2. Ferreira I. C. F. R., Barros L., Abreu R. M. V., Oliveira M. B. P. P. *Plant Phytochemicals in Food Applications: Extraction, Techniques, and Applications*. CRC Press, 2018.
3. Kumar P., Mishra A. Innovative Extraction Techniques for Herbal Extracts: A Review // *Journal of Food Science and Technology*. 2019. Vol. 56, No. 10. P. 4733–4748.
4. Oliveira R. B., Braga M. E. M., de Sousa H. C., Franca A. S. Extraction Technologies for High-Value Compounds from Medicinal Plants: A Review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021. Vol. 61, No. 3. P. 378–399.
5. Bhattacharya S., Mehta P. Modern Extraction Techniques for Botanicals and Medicinal Plant Phytochemicals // *In Advances in Plant Bioactive Compounds*. Elsevier, 2018. P. 109–130.
6. Singh A., Sharma O. P. Recent Advances in Extraction Techniques of Phytochemicals from Medicinal Plants // *In Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press, 2021. Vol. 95. P. 1–41.
7. Іванова Н. А. Фітопрепарати: вплив на здоров'я і захист рослин // *Вісник аграрної науки*. 2018. №2. С. 23–29.
8. Patel V. R., Patel P. R., Kajal S. S. Pharmaceutical Extraction Techniques and Their Applications: A Review // *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2018. Vol. 10, No. 12. P. 3071–3078.
9. Karimi E., Jaafar H. Z. Phytochemical Extraction from Medicinal Plants: A Review // *International Journal of Engineering Research and Reviews*. 2018. Vol. 6, No. 6. P. 157–163.
10. Jyoti B., Kumar A. Recent Advancements in Extraction Techniques for Phytochemicals from Medicinal Plants // *In Recent Advancements in Plant Biotechnology*. Springer, 2021. P. 111–131.
11. Шаповалов О. В., Діброва В. А. Виробництво фітопрепаратів: технології та перспективи // *Хімія в інтересах сталого розвитку*. 2018. Т. 26, №1. С. 17–27.

Отримано в редакцію 09.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.08.2024
Approved 25.09.2024

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАКЦІЇ СОНЯШНИКОВОЇ МАКУХИ В СЕРЕДОВИЩІ CO₂

Безбах І. В.¹, д.т.н., доцент, Бандура В. М.², д.т.н., професор, Безбах С. В.¹, аспірант,
Тараненко Є. Ю.¹, аспірант, Казани В. З.¹, аспірант

¹Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

Анотація. Зростання населення у світі та Європі, збільшення потреби в їжі та зростаюча тенденція не-м'ясного харчування, створюють умови для сталого попиту на рослинні білки. По амінокислотному складу білки соняшникового шроту перевершують інші рослинні білки і можуть використовуватися в харчових технологіях, що становить величезний практичний інтерес.

Соняшниковий шрот багатий поліфенольними сполуками, серед яких хлорогенова кислота, яка займає близько 70 % від інших поліфенолів. Хлорогенова кислота утворює комплекси з білками і її важко відокремити повною мірою.

Використання надкритичної екстракції з CO₂ соняшникової макухи обмежено.

Мета дослідження: дослідити процес надкритичної екстракції CO₂ та отримати з соняшникової макухи білковий концентрат нейтрального смаку і кольору з низьким вмістом поліфенолів.

Ядро насіння соняшника було віджато із застосуванням технології холодного віджиму (температура продукту не вище 45°C). Протестовано біомасу у вигляді подрібненої макухи (розмір частинок різних фракцій $d_4 = 1...5$ мм) та пелюсток соняшникової макухи (пелюстки до 10 см). Екстракцію проводили чистим CO₂, та з етанолом (96 %) як співрозчинником.

Досліджено кінетику при екстрагуванні соняшникової макухи в середовищі надкритичного CO₂. Отримано білковий концентрат (вміст білку 56,2...57,2 %) високої якості з нейтральним запахом та кольором. Використання низькотемпературних режимів екстрагування дає можливість зберегти нативні властивості білку.

Вміст хлорогенової кислоти в сухому залишку: при екстракції чистим CO₂ – 34 мг/100 г; при екстракції зі співрозчинником – 14 мг/100 г.

Ключові слова: білковий концентрат, надкритична екстракція, соняшникова макуха

Вступ. Зростання населення у світі та Європі, збільшення потреби в їжі та зростаюча тенденція не-м'ясного харчування, створюють умови для сталого попиту на рослинні білки.

Потреба світового ринку в білках та амінокислотах у 2013 році становила близько 7,8 мільйонів тонн на рік з очікуваним зростанням 5,5...6,0 % на рік як мінімум до 2025 року. Рослинні білки займають близько 14 % ринку, а амінокислоти – 25 %.

У 2014 році світовий ринок рослинних білків оцінювався приблизно в один мільйон тонн і \$7,7 мільярдів з очікуванням зростання до \$10 мільярдів у 2020 році. Соеві продукти домінують із 78 % ринку.

Через серйозну нестачу білка в багатьох частинах світу насіння олійних культур все ширше використовується в харчуванні людини.

Як відомо з класифікації: макуха – механічно пресоване ядро, вміст олії 7...20 %; шрот – хімічно знежирена макуха, вміст протеїну до 40 %; концентрат – шрот зі вмістом протеїну 40...80 %; ізолят – концентрат зі вмістом протеїну вище 80 % [1].

Шрот соняшнику зазвичай використовується як білкова добавка для тварин. Багаторічні дослідження соняшникового шроту показали, що по амінокислотному складу білки шроту перевершують інші рослинні білки і можуть використовуватися в харчових технологіях, що становить величезний практичний інтерес. Спроби отримання харчового білка із соняшникового шроту зіткнулися з багатьма проблемами.

По-перше, для харчових цілей з соняшника потрібно максимально видалити лушпиння, по-друге, соняшниковий шрот багатий не тільки білками, а й поліфенольними сполуками, серед яких хлорогенова кислота, яка займає близько 70 % від інших поліфенолів. Деякі фахівці відносять хлорогенову кислоту до антиживильних сполук. Хлорогенова кислота утворює комплекси з білками і її важко відокремити повною мірою. Хлорогенова кислота у лужному середовищі швидко окислюється і набуває зеленого кольору, що є першою перешкодою при отриманні харчового білку.

Процеси екстракції у парфумерній, косметичній, фармацевтичній, харчовій промисловості значною мірою залежать від розчинників, більшість з яких мають нафтове походження.

Проблеми при екстрагуванні наступні: величезне споживання енергії та значні витрати розчинників, низькі виходи цільового компоненту.

Розчинники для екстракції – переважно леткі органічні сполуки, одержані з невідновлюваних ресурсів, в основному на основі нафти, шкідливі як для здоров'я людини, так і для навколишнього середовища. Одним із таких широко використовуваних розчинників є н-гексан, продукт фракційної перегонки нафтових сумішей. Основною перевагою таких розчинників є простота виробництва та хімічні властивості. Тим не менш, гексан виробляється з викопних джерел і нещодавно був класифікований як CMR 3, що означає, що він є репротоксичною речовиною категорії 2 відповідно до Європейських директив і правилами реєстрації, оцінки, дозволу та обмеження хімічних речовин (REACH).

Проведені дослідження авторами [2] свідчать, що екстрагування олії з ріпаку в умовах мікрохвильового поля має перевагу при застосуванні в якості розчинника етилового спирту, як полярного, нетоксичного та більш безпечного (на відміну від гексану).

У роботі [3] досліджувалися можливості скорочення тривалості процесу екстракції насіння сої етанолом. Одержали більший вихід цільового компоненту, збільшилась кількість токоферолу в готовому продукті.

Тому необхідно розглядати альтернативні розчинники, такі як зріджені гази або їх комбінацію зі співрозчинниками.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Одна з проблем, яку мають вирішити інноваційні методи і технології екстрагування це максимально вилучити корисні продукти із сировини [4].

Зріджені гази є селективними екстрагентами в відношенні каротиноїдів, жирних і ефірних олій, терпеноїдів і інших з'єднань ліпофільної природи. Використовування зріджених газів дозволяє здійснювати процес без термічного впливу і зберегти в нативному стані термолабільні з'єднання, підвищити вихід цільових компонентів.

Перспективними для екстрагування компонентів з рослинної сировини є зріджені гази: діоксид вуглецю, пропан, бутан, рідкий аміак, хладони (хлорфторпохідні вуглеводнів) і ін. Зріджений діоксид вуглецю добре витягує ефірні олії і гірше жирні олії та інші гідрофобні речовини.

Хладон 11 (CCl_3F), хладон 12 (CCl_2F_2) і хладон 22 (CHClF_2) вилучають ефірні і жирні олії, каротиноїди, терпеноїди і інші природні речовини [5]. Більшість зріджених газів має властивості неполярних розчинників, хоча самі є гідрофільними з'єднаннями. Гідрофільні речовини гарно екстрагуються зрідженими газами з високою діелектричною проникністю (аміак, метил хлористий, метиленоксид і ін).

У ІТТФ НАН України розроблено установку [6] для екстрагування БАР (біологічно активних речовин) з рослинної сировини зрідженими газами. У якості екстрагента використовується хладон R12. Такий вибір екстрагента обумовлений тим, що одним з цільових продуктів екстрагування є жирні олії. Крім того, критична температура розчинення для хладону R12 достатньо низька, що дозволяє працювати на менших температурах і тисках в системі екстрагування.

У основі принципу дії експериментальної установки для вилучення БАР лежить циркуляційне екстрагування. На установці проводили екстракцію з плодів шипшини. В результаті було отримано масло шипшини.

Але в роботі не було поставлено задач по екстрагуванню з соняшнику олії та хлорогенової кислоти. Крім того для хладонів не зрозуміло, коли вони будуть відмінені чи дозволені законодавством, наскільки вони шкідливі для організму людини. Залишаються питання по масштабуванню таких установок.

Надкритичні флюїди (НКФ) є альтернативою, що добре зарекомендувала себе в порівнянні з традиційним методом екстракції органічними розчинниками [7]. Вуглекислий газ (CO_2) є найбільш широко використовуваною надкритичною рідиною, оскільки він інертний, нетоксичний, негорючий, дешевий, поширений, легко видаляється з продукту і має помірні критичні властивості (надкритична точка $T=31,1^\circ\text{C}$, $P=7,39\text{ МПа}$).

Дослідники [8] порівняли екстракти, отримані при екстракції майорану з використанням надкритичного CO_2 (50 $^\circ\text{C}$ /45 МПа) та екстракції етанолом в апараті Сокслета. Виходи екстракції склали 9,1 та 3,8 % відповідно. У надкритичному екстракті міститься 21 % ефірної олії, а в спиртовому екстракті всього 9 % летких масляних речовин.

В роботі [9] описується здатність бутанолу видаляти феноли кольору (хлорогенову і кавову кислоти) і олігосахариди зі шроту соняшнику без помітної денатурації білка. Подальше осадження білкового екстракту при pH 5,0 дало безбарвний ізолят білка (93,5 %). Амінокислотний склад соняшникового шроту, концентрату та ізоляту був подібним. Але бутанол є пожежонебезпечною та токсичною речовиною, тому використання його для екстракції в харчовій промисловості обмежене.

Пошук нових розчинників відродив інтерес до використання зріджених газів як екстракційних розчинників, таких як н-пропан [10], н-бутан [11] та диметиловий ефір [12]. Цим газам потрібен відносно низький тиск (<1 МПа), щоб залишатися в рідкому стані. Але вони є вибухонебезпечними тому використання для екстракції в харчовій промисловості обмежене.

У дослідженні [13] вивчалася надкритична CO_2 екстракція хлорогенової кислоти з ядер соняшникового насіння з використанням етанолу як співрозчинника. Визначено вплив режимних параметрів на процес. Ядра висушували (до 5 мас. %), що може призводити до додаткових витрат енергії на процес екстрагування. Авторами не проводилося попереднє механічне знежирення. Ядра подрібнювали до 0,841...0,507 мм, що може ускладнювати проходження екстрагента через шар продукту. Завдання отримати білковий концентрат та збереження нативних властивостей білка дослідниками не ставилося.

Використання надкритичної екстракції з CO_2 таких продуктів як соняшникова макуха обмежено. Але цей метод потребує подальшого розвитку, так як він: низькотемпературний, неруйнівний для білків, дозволяє частково видалити хлорогенову кислоту з соняшникової макухи.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження: дослідити процес надкритичної екстракції CO_2 та отримати з соняшникової макухи білковий концентрат нейтрального смаку і кольору з низьким вмістом поліфенолів.

Завдання:

- визначити вплив режимних параметрів на кінетику процесу надкритичної екстракції соняшникової макухи чистим CO_2 та з використанням співрозчинника (етанолу);
- оцінити вміст хлорогенової кислоти в сухому залишку.

Матеріали та методи дослідження. Ядро насіння соняшника було віджато на пресі Dulong ZYJ05 400W (Китай). Застосовувалась технологія холодного віджиму (температура продукту не вище 45°C). Було протестовано біомасу у вигляді подрібненої макухи (розмір частинок різних фракцій $d_p = 1 \dots 5$ мм) та пелюсток соняшникової макухи (пелюстки до 10 см). Екстракцію проводили чистим CO_2 , та з етанолом (96 %) як співрозчинником. Вуглекислий газ (CO_2) чистоти 99,9% поставлено компанією GROHE (Німеччина). Експерименти виконано на лабораторній установці безперервної дії EXTRATEX (Франція) об'ємом екстрактора 25 літрів. Експерименти проводились на базі ТОВ «Потоки».

Принципова схема надкритичної екстракції CO_2 на рис. 1.

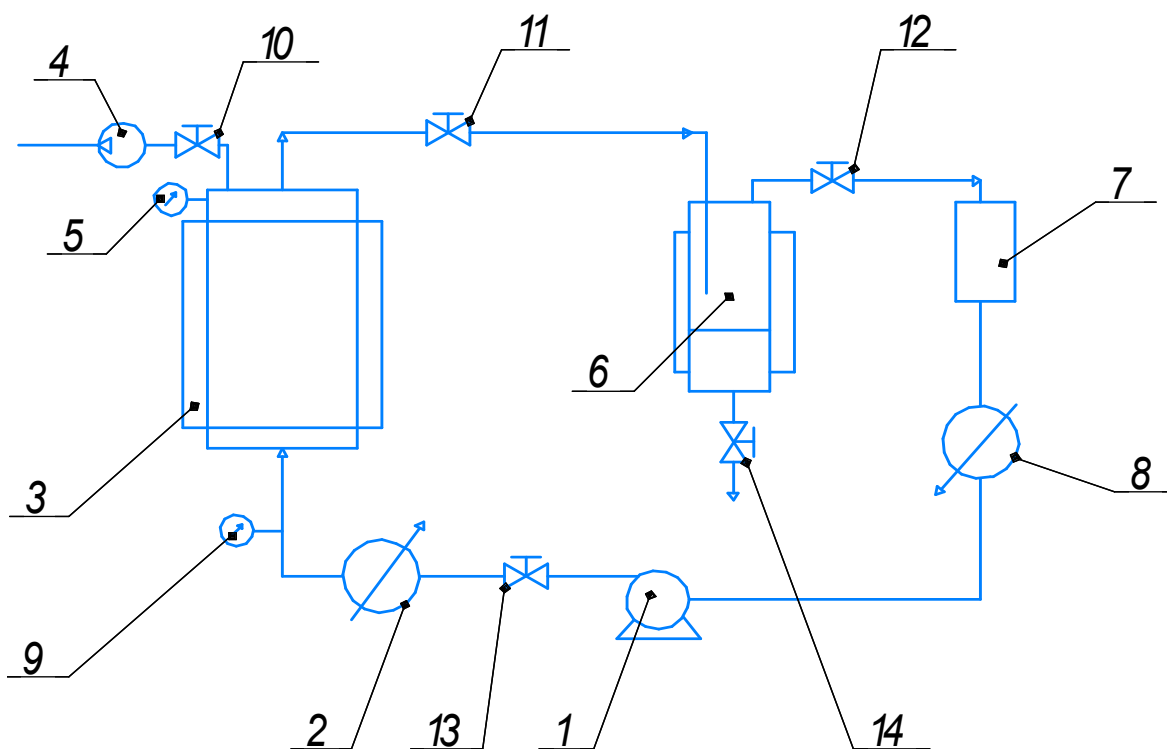


Рис. 1 – Принципова схема надкритичної екстракції CO_2

Установка складається з: компресору 1, теплообмінника 2, екстрактору 3, вакуум насоса 4, манометра 5, ресивера 6, фільтра 7, конденсатора 8, манометра 9.

До установки також входять запірна арматура (10, 11, 12, 13, 14) та трубопроводи.

Установка працювала наступним чином. Компресор 1 перекачував зріджений CO_2 у теплообмінник 2 для досягнення надкритичного стану. Екстрактор 3 заповнювався біомасою. Вакуумна система 4 застосовувалась на початку процесу екстрагування перед подачею екстрагента в екстрактор. До складу цієї системи входить вакуумний насос 4, датчик тиску 5, трубопровідна та запірна арматура.

В екстракторі надкритична фаза насичувалася розчинними сполуками з біомаси. Потім суміш екстракту і CO_2 прямувала до сепаратора 6, де суміш розділялась за рахунок підведення тепла. Газоподібний CO_2 подавався до конденсатора 8, де переходив у рідкий стан.

Циркуляція екстрагента проводилась багаторазово до виснаження сировини. У випарнику отримували концентрований розчин екстрактивних речовин. Витрати CO_2 контролювали через ротаметр (MFG Co. Ltd., Великобританія). Температуру контролювали на зовнішній поверхні екстрактору за допомогою вмонтованих мідь-константанових термопар. Експерименти без співрозчинника проводили в наступному діапазоні.

Таблиця 1

Умови експериментальних досліджень

N	Продукт	Олійність початкова, %	Олійність кінцева, %	Вміст протеїну початковий, %	Вміст протеїну кінцевий, %	Температура, °C	Тиск, МПа	Витрата CO ₂ , г/хв
1	Подрібнена макуха	7,5	1,6	53,2	56,7	50	30	50
2			2,4		56,2			200
3			1,5		57,2			500
1	Пелюстки	7,5	1,6	53,2	57	70	60	833
2			1,8		56,8	50		

Для роботи зі співрозчинником було використано установку, що включає два сепаратори (рис. 2).

Під час випробування зі співрозчинником два сепаратори працювали при однаковій температурі та тиску (6 МПа, 50 °C). Екстракт в основному збирався в першому, це була суміш олії та етанолу. Через дві години тиск у першому сепараторі підвищували до 12 МПа підтримували температуру 50°C. Мета полягла в тому, щоб залишати надкритичний стан у першому сепараторі, але при більш м'яких умовах, щоб осадити ліпіди та спробувати зберегти етанол дуже розчинний у надкритичній фазі. Другий сепаратор підтримувався в газоподібних умовах для остаточної рекуперації етанолу.

Відповідно до кольору сухого залишку екстракція здавалася закінченою після першої години. Використання співрозчинника ускладнює оцінку виходу екстракції шляхом зважування екстракту, тому кінетику процесу в цьому випадку не досліджували.



1 – екстрактор, 2 – сепаратор, 3 – сепаратор для співрозчинника, 4 – компресор, 5 – блок управління

Рис. 2 – Експериментальна установка

Кількість екстракту в відсотках розраховували як співвідношення маси сировини до маси отриманого екстракту помножено на 100 %. Проба зважувалася на лабораторних електронних вагах (ER-Plus-06, Техноваги, Україна).

Вміст сирого протеїну у сухому залишку після екстракції визначали за методом К'ельдаля, олійність за методом Сокслета. Вміст хлорогенової кислоти в сухому залишку визначали за допомогою вискоєфективної рідинної хроматографії.

Результати досліджень процесу надкритичної екстракції

Результати досліджень кінетики процесу. Залежність кількості екстракту від тривалості процесу для подрібненої макухи представлено на рис. 3.

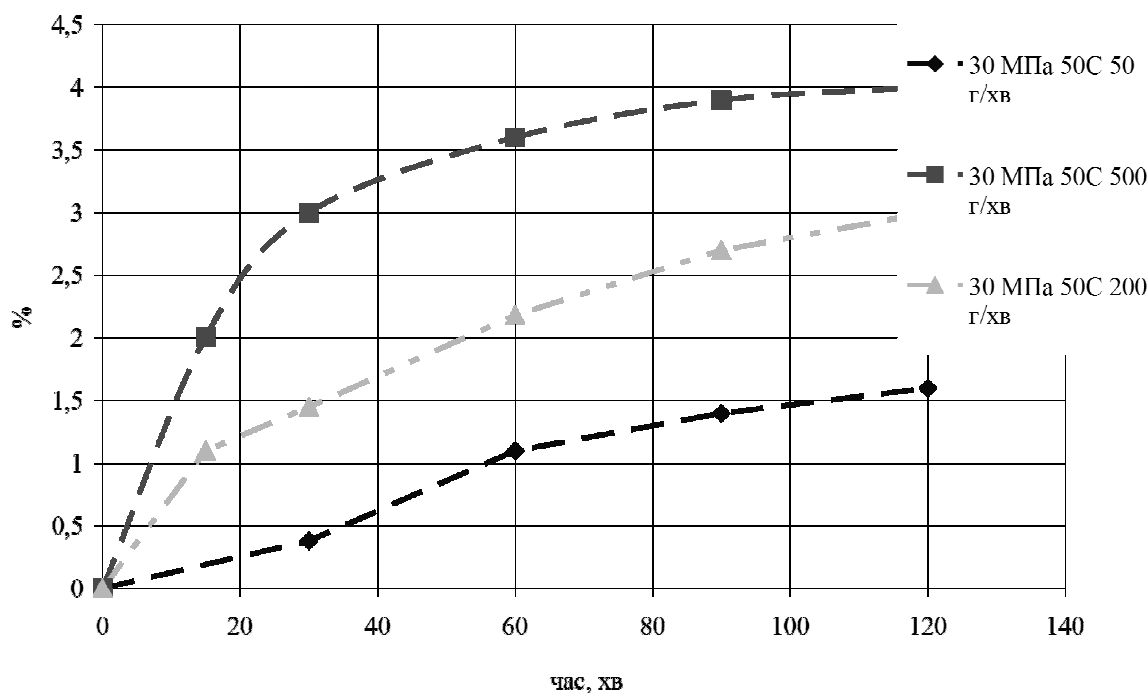


Рис. 3 – Кінетика надкритичної екстракції CO_2 подрібненої соняшникової макухи

Збільшення витрат екстрагенту призводить до суттєвого збільшення швидкості екстракції. Так збільшення витрат екстрагенту в 10 разів призводить до підвищення кількості кінцевого екстракту в 2,5 раз. Розчинність сполук соняшникової макухи у вибраних умовах демонструє ефективність процесу.

Залежність кількості екстракту від тривалості процесу для сировини у вигляді пелюсток представлено на рис. 4.

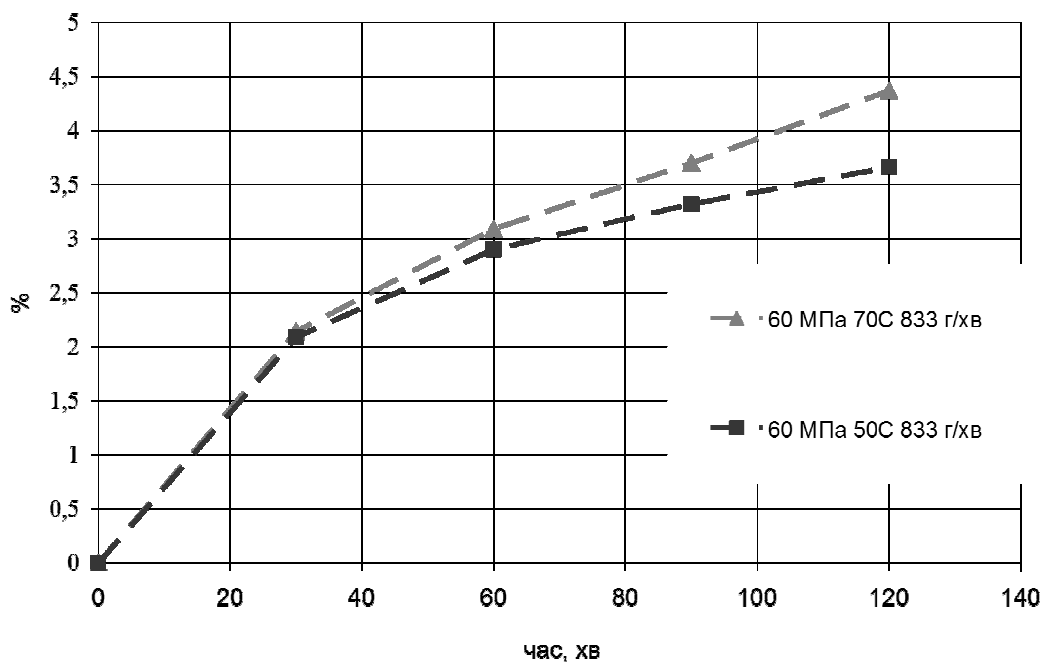


Рис. 4 – Кінетика надкритичної екстракції CO_2 макухи в пелюстках

Збільшення температури на 20°C практично не призводить до збільшення швидкості процесу. Швидкість екстракції при рівних умовах для пелюсток і подрібненої макухи практично не відрізняється (рис. 3,4).

Якісний аналіз отриманих зразків показує, що в екстракт перейшла більша частина поліфенолів (хлорогенова кислота). Екстракт являє собою рідину жовтого-зеленого відтінку рис. 5а, сухий залишок добре вибілений рис. 5б,в. Фактично сухий залишок являє собою соняшниковий білковий концентрат.



а) екстракт; б) сухий залишок з подрібненої сировини; в) сухий залишок (пелюстки)

Рис. 5 – Продукти, отримані при екстракції CO₂ соняшникової макухи

Щоб оцінити наявність хлорогенової кислоти (яка може забарвити білковий концентрат у зелений колір після окислення), зразки сухого залишку змішували з водою, до якої додавали розчин гідроксиду натрію та витримували на протязі години.



а) розчин концентрату з водою; б) розчин концентрату після витримки у лужному середовищі

Рис. 6 – Якісна оцінка вмісту хлорогенової кислоти у білковому концентраті

Суміш розчину концентрату та лугу не забарвлюється у зелений колір протягом години (РН 9), що говорить про низьку концентрацію хлорогенової кислоти.

Вміст хлорогенової кислоти в сухому залишку: при екстракції чистим CO₂ – 34 мг/100 г; при екстракції зі співрозчинником – 14 мг/100 г.

Обговорення результатів дослідження процесу екстракції. Експерименти показують високу розчинність поліфенолів з використанням CO₂ і співрозчинника при 60 МПа/50°C. Якісно це можна оцінити по забарвленню екстракту (рис. 5а). Результати можливо пояснити тим, що при надкритичній екстракції CO₂ веде себе як неполярний розчинник та добре вимиває масло, в свою чергу етанол поводить себе як полярний розчинник та ефективно видаляє поліфеноли.

Екстракт при 60 МПа/70°C являє собою жовту емульсію, а залишок добре вибілений. Більш висока температура не збільшує розчинність, але є небезпечним параметром, що може пошкодити кінцевий продукт.

Вміст білку в концентраті в порівнянні з вихідною сировиною збільшується на 3,5 – 4 % (табл. 1), що пов'язано з вимиванням екстрагентом масла і поліфенолів.

Висновки. Отримано білковий концентрат (вміст білку 56,2...57,2 %) високої якості з нейтральним запахом та кольором. Використання низькотемпературних режимів екстрагування дає можливість зберегти нативні властивості білку. На відміну від експериментів [13] проведено попереднє механічне знежирення сировини, що дозволяє отримати високоякісне масло холодного віджиму. Також більший розмір частинок дозволяє уникнути додаткових гідравлічних опорів в системі.

Досліджено кінетику при екстрагуванні соняшникової макухи в середовищі надкритичного CO₂. Визначено вплив режимних параметрів, тиск, температура, витрати екстрагенту на швидкість процесу. Так збільшення витрат екстрагенту (при тиску в 30 МПа) в 10 разів призводить до підвищення кількості кінцевого екстракту в 2,5 раз.

Якісні дослідження показують низьку концентрацію хлорогенової кислоти в отриманих зразках. Суміш розчину концентрату та лугу не забарвлюється у зелений колір протягом години (РН 9). Вміст хлорогенової

кислоти в сухому залишку: при екстракції чистим CO₂ – 34мг/100 г; при екстракції зі співрозчинником – 14 мг/100 г.

References

1. Sosulski, F. W., Mccleary, C. W., & Soliman, F. S. (1972). Diffusion extraction of chlorogenic acid from sunflower kernels. *Journal of Food Science*, 37(2), 253–256.
2. Burdo, O., Bandura, V., Kolianovska, L., & Dukulis, I. (2017). Experimental research of oil extraction from canola by using microwave technology. *Engineering for Rural Development*, 16, 296–302.
3. Bandura, V., Bulgakov, V., Adamchuk, V., & Ivanovs, S. (2018). Investigation of oil extraction from the canola and soybean seeds using a microwave intensifier. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 55(2), 45–52.
4. Bandura, V., Fialkovska, L., Osadchuk, P., Levtrynskaia, Y., & Palvashova, A. (2022). Investigation of properties of sunflower and rapeseed oils obtained by the Soxhlet and microwave extraction methods. *Agraarteadus*, 33(1), 48–58.
5. Osetskiy, O. I., Sevastianov, S. S., Yevlash, V. V., Potapov, V. O., Piliugina, I. S., & Bilyi, D. V. (2023). Low-temperature extraction of lipid fractions from vegetable raw materials using liquefied freons. *Problems of Cryobiology and Cryomedicine*.
6. Grabov, L. N., Mershchiiy, V. I., Posunko, D. V., & Malysheva, A. V. (2009). Termodiffuzionnaya tekhnologiya i ustanovka izvlecheniya biologicheskii aktivnykh veshchestv iz lekarstvennogo rastitelnogo syr'ya [Thermodiffusion technology and installation for the extraction of biologically active substances from medicinal plant materials]. *Industrial Heat Engineering*, 31(3).
7. Mendiola, J. A., & Rezaei, K. (2014). Pressurized limonene as an alternative bio-solvent for the extraction of lipids from marine microorganisms. *The Journal of Supercritical Fluids*, 92, 1–7.
8. Vági, E., Simándi, B., Suhajda, A., & Héthelyi, E. (2005). Essential oil composition and antimicrobial activity of *Origanum majorana* L. extracts obtained with ethyl alcohol and supercritical carbon dioxide. *Food Research International*, 38, 51–57.
9. Sodini, G., & Canella, M. (1977). Acidic butanol removal of color-forming phenols from sunflower meal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 25(4), 872–875.
10. Zanqui, A. B., de Moraes, D. R., da Silva, C. M., Santos, J. M., Chiavelli, L. U. R., Bittencourt, P. R. S., Eberlin, M. N., Visentainer, J. V., Cardozo-Filho, L., & Matsushita, M. (2015). Subcritical extraction of *Salvia hispanica* L. oil with N-propane: Composition, purity and oxidation stability as compared to the oils obtained by conventional solvent extraction methods. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 26, 282–289.
11. Bier, M. C. J., Medeiros, A. B., De Oliveira, J. S., Cocco, L. C., Da Luz Costa, J., De Carvalho, J. C., & Soccol, C. R. (2016). Liquefied gas extraction: A new method for the recovery of terpenoids from agro-industrial and forest wastes. *The Journal of Supercritical Fluids*, 110, 97–102.
12. Hoshino, R., Ogawa, M., Murakami, K., Wahyudiono, K. H., & Goto, M. (2017). Extraction of lipids from wet *Arthrospira platensis* by liquefied dimethyl ether. *Solvent Extraction Research and Development, Japan*, 24, 47–60.
13. Daraee, A., Ghoreishi, S. M., & Hedayati, A. (2019). Supercritical CO₂ extraction of chlorogenic acid from sunflower (*Helianthus annuus*) seed kernels: Modeling and optimization by response surface methodology. *The Journal of Supercritical Fluids*, 144, 19–27.

RESEARCH ON THE SUNFLOWER OIL CAKE EXTRACTION PROCESS IN A CO₂ ENVIRONMENT

¹Bezbakh I.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,

²Bandura V.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, ¹Bezbah S.V., postgraduate student,

¹Taranenko Ye. Yu., postgraduate student, ¹Kazani V.Z., postgraduate student

¹Odesa National University of Technology, Odesa

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. The global demand for plant-based proteins is on the rise due to population growth, dietary trends favoring non-meat options, and the increasing need for sustainable food sources. Sunflower oil cake, a byproduct of oil extraction, is a promising source of proteins superior in amino acid composition to many other plant proteins. However, its high content of polyphenols, particularly chlorogenic acid, complicates its use in food technology. This compound forms complexes with proteins and is challenging to fully separate. This study investigates the application of supercritical CO₂ extraction to produce a neutral-tasting and neutral-colored protein concentrate with reduced polyphenol content. Sunflower kernels were processed using cold pressing, and the resulting oil cake was tested in different forms, including fine particles and larger flakes. Supercritical CO₂ was employed both as a pure solvent and with ethanol as a co-solvent. Key findings include the effective removal of polyphenols, notably chlorogenic acid, and the preservation of protein properties through low-temperature processing. A high-quality

protein concentrate with a neutral smell and color was obtained. Protein content in the final concentrate reached 56.2–57.2%, with chlorogenic acid levels reduced to 14–34 mg/100 g depending on the extraction method. The study highlights the potential of supercritical CO₂ as a sustainable and efficient extraction method for upgrading sunflower oil cake into a high-value food ingredient.

Keywords: protein concentrate, supercritical extraction, sunflower cake

Список використаної літератури

1. F. W. Sosulski, C. W. McCleary, F. S. Soliman Diffusion extraction of chlorogenic acid from sunflower kernels // *Journal of Food Science*. – 1972. – Vol. 37, №2. – С. 253–256.
2. Burdo, O., Bandura, V., Kolianovska, L., Dukulis, I. Experimental research of oil extraction from canola by using microwave technology // *Engineering for Rural Development*. – 2017. – Vol. 16. – С. 296–302. 16: 296–302.
3. Bandura, V., Bulgakov, V., Adamchuk, V., Ivanovs, S. Investigation of oil extraction from the canola and soybean seeds, using a microwave intensifier // *INMATEH – Agricultural Engineering*. – 2018. – Vol. 55, №2. – С. 45–52.
4. Bandura, V., Fialkovska, L., Osadchuk, P., Levtrynskaia, Y., Palvashova, A. Investigation of properties of sunflower and rapeseed oils obtained by the Soxhlet and microwave extraction methods // *Agraarteaus*. – 2022. – Vol. 33, №1. – С. 48–58
5. Osetskiy O.I., Sevastianov S.S., Yevlash V.V., Potapov V.O., Piliugina I.S., Bilyi D.V. Low-Temperature extraction of lipid fractions from vegetable raw materials using liquefied freons // *Problems of Cryobiology and Cryomedicine*. – 2023
6. Грабов Л.Н., Мерший В.И., Посулько Д.В., Малышева А.В. Термо-диффузионная технология и установка извлечения биологически активных веществ из лекарственного растительного сырья // *Промышленная теплотехника*. – 2009. – Т. 31, №3.
7. Mendiola, J. A., & Rezaei, K. (2014). Pressurized limonene as an alternative bio-solvent for the extraction of lipids from marine microorganisms. *The Journal of Supercritical Fluids*, 92, 1–7.
8. Vági, E., Simándi, B., Suhajda, A., & Héthelyi, E. (2005). Essential oil composition and antimicrobial activity of *Origanum majorana* L. extracts obtained with ethyl alcohol and supercritical carbon dioxide. *Food Research International*, 38, 51–57.
9. Sodini, G., & Canella, M. (1977). Acidic butanol removal of color-forming phenols from sunflower meal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 25(4), 872–875.
10. Zanqui, A. B., de Moraes, D. R., da Silva, C. M., Santos, J. M., Chiavelli, L. U. R., Bittencourt, P. R. S., Eberlin, M. N., Visentainer, J. V., Cardozo-Filho, L., & Matsushita, M. (2015). Subcritical extraction of *Salvia hispanica* L. oil with N-propane: Composition, purity and oxidation stability as compared to the oils obtained by conventional solvent extraction methods. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 26, 282–289.
11. Bier, M. C. J., Medeiros, A. B., De Oliveira, J. S., Cocco, L. C., Da Luz Costa, J., De Carvalho, J. C., & Soccol, C. R. (2016). Liquefied gas extraction: A new method for the recovery of terpenoids from agro-industrial and forest wastes. *The Journal of Supercritical Fluids*, 110, 97–102.
12. Hoshino, R., Ogawa, M., Murakami, K., Wahyudiono, K. H., & Goto, M. (2017). Extraction of lipids from wet *Arthrospira platensis* by liquefied dimethyl ether. *Solvent Extraction Research and Development, Japan*, 24, 47–60.
13. Daraee, A., Ghoreishi, S. M., & Hedayati, A. (2019). Supercritical CO₂ extraction of chlorogenic acid from sunflower (*Helianthus annuus*) seed kernels: Modeling and optimization by response surface methodology. *The Journal of Supercritical Fluids*, 144, 19–27.

Отримано в редакцію 09.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.08.2024
Approved 25.09.2024

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН

Кравченко О. Ю., аспірант

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Висвітлено актуальні проблеми процесу сушіння, особливу увагу приділено рослинній сировині реологічної структури. Розглянуто традиційні шляхи вирішення завдань зневоднення неньютонівських рідин, представлені у науковій літературі. Виділено перспективний напрямок щодо організації процесу дегідратації, який полягає у використанні іншого джерела енергії – інфрачервоного випромінювання. Проведено аналіз наукових публікацій, присвячених перевагам інфрачервоного поля у сфері масообмінних процесів. Підтверджено, що електромагнітне випромінювання інфрачервоного діапазону має великі перспективи при сушінні рослинної сировини. Однак в розглянутих роботах існує певний ряд недоліків, що не дозволяють максимально використати потенціал такого джерела енергії. Особливо це стосується конструкцій установок, на яких проводилися дослідження процесу сушіння. Найважливіший серед них – це періодичний режим роботи. Будь-які наукові дослідження повинні бути направлені на перспективу впровадження новітніх розробок у виробництво і безперервний режим роботи будь-якого обладнання є вагомою умовою і конкурентоспроможною рисою при впровадженні у промисловість. В зв'язку із цим було запропоновано електродинамічний апарат для зневоднення неньютонівських рідин, який дозволяє здійснювати цей процес в потоці. Стенд для проведення досліджень оснащений регуляторами потужності інфрачервоних модулів та швидкості руху стрічки. В результаті проведених експериментальних досліджень було отримано дані, які слугували для побудови важливих кінетичних залежностей. Найбільшу увагу привертають лінії швидкості сушіння. Вони показали, що значення швидкості сушіння чітко корелюють із рівнем підведеної потужності інфрачервоного поля. Швидкість руху стрічки привносила незначні зміни, тому швидкість сушіння змінювалась в невеликому діапазоні. Загалом, на основі отриманих результатів було підтверджено працездатність та перспективність розробленої конструкції стрічкового електродинамічного апарату.

Ключові слова: сушіння, зневоднення, дегідратація, харчові реологічні системи, неньютонівські рідини, інфрачервоне поле, експериментальне моделювання.

Вступ

Сушіння харчової сировини є одним із найбільш розповсюджених та енерговитратних процесів харчової промисловості. Однак не зважаючи на широке застосування цього методу обробки, на велику варіацію шляхів його організації, на багаторічну плідну працю світових науковців в сфері проблематики даного процесу, зневоднення й досі має певний ряд недоліків, пов'язаних із значними втратами теплової енергії, зниженням якості кінцевого продукту при довготривалому термічному навантаженні на термолабільні компоненти сировини, втратами ароматичних та смакових властивостей, а іноді і певної частки готового продукту із відпрацьованим теплоносієм при конвективному сушінні.

Самостійною проблемою є зневоднення рослинної сировини, що має реологічну структуру, а саме неньютонівські рідини. Високі значення динамічного коефіцієнту в'язкості чинять суттєвий негативний вплив на процес сушіння, створюючи високі значення внутрішніх дифузійних опорів. Таким чином, при постановці завдання щодо зневоднення сировини реологічної структури необхідно враховувати проблеми подібного характеру.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми

Наукові дослідження, спрямовані на поліпшення процесу сушіння харчової сировини, представлені у великому різноманітті отриманих експериментальних даних, що відображені в авторитетних наукових виданнях. Наукова спільнота активно займається проблемами зневоднення, однак повноцінно вони так і не вирішені. Наприклад, у 2022 році вченими Кашмірського Університету (Індія) на прикладі яблучної суспензії, що являла собою неньютонівську рідину, було запропоноване зневоднення у розпилювальній сушарці [1]. Безумовно, такий метод дозволяє повноцінно видалити необхідну кількість вологи і отримати абсолютно сухий продукт. Однак температура сушильного агента в даній роботі сягала 160°C, що характерно для розпилювальних сушарок. Цілком очікувано, що якість порошку, отриманого при такій температурі, вкрай низька. До того ж забезпечення даного процесу супроводжується значними енерговитратами з відпрацьованим сушильним агентом. Відповідно до цього традиційні методи не в змозі забезпечити якісну дегідратацію даної сировини в умовах жорсткого енергодефіциту.

У пошуках нових підходів щодо вологовидалення досить часто намагаються не покращити вже існуючі методи, а знайти інноваційні важелі, які б дозволили організувати процес інакше. До таких важелів можна

віднести нові джерела енергії. Одним із таких джерел виступає інфрачервоне (ІЧ) випромінювання. При залученні такого методу відсутня необхідність у використанні сушильного агенту, що в свою чергу обумовлює вагоме зниження енерговтрат. Однак ІЧ поле має низьку проникну здатність, тому товщина шару сировини, що висушується, не повинна перевищувати 3–4 мм.

Так, у 2023 році дослідниками Центрально-Південного університету лісового господарства і технологій (Китай) вивчався вплив ІЧ випромінювання на зневоднення слайсів імбиру у поєднанні з ультразвуком [2]. Висушування зразків товщиною 3 мм здійснювалось до 2% вологості. Потужність ІЧ поля становила 2000 Вт, ультразвукового поля – 500 Вт. Температура обробки становила 50–70°C. Відзначається, що отриманий продукт не зазнав суттєвих змін стосовно кольору.

Там же, у 2024 році було проведено дослідження процесу сушіння женьшеню в умовах ІЧ поля [3]. Сировина була нарізана скибками товщиною 2–4 мм та висушувалась за температури 40–60°C. При цьому тривалість процесу варіювалась в межах від 60 до 225 хвилин. Кінцевий вологовміст сушеного женьшеню становив близько 10%.

В цьому ж році в Університеті Бурси Улудаг (Туреччина) були організовані дослідження по зневодненню слайсів хурми під дією ІЧ випромінювання [4]. Температура процесу коливалась в діапазоні 22,65–106,33°C, час висушування до заданого значення вологовмісту становив 85–225 хвилин при різних режимах роботи ІЧ генераторів.

У 2023 році на базі Університету Хаккарі (Туреччина) вивчався вплив ІЧ випромінювання при зневодненні слайсів груші в умовах вакууму у порівнянні з традиційним конвективним методом сушіння [5]. Потужність ІЧ поля змінювалась в діапазоні 100–300 Вт, температура сушильного агенту при конвективному сушінні становила 40–70°C. Порівняльна характеристика отриманих зразків сушених фруктів при ІЧ та конвективному методах показала, що використання джерел енергії ІЧ діапазону набагато краще зберігає поживні, смакові та ароматичні компоненти сировини.

В тому ж році спільними зусиллями вченими Дослідницького інституту сільськогосподарського машинобудівництва (Єгипет) та Університетів Цзянсу (Китай) та Бенха (Єгипет) був досліджений інноваційний спосіб ІЧ сушіння слайсів яблук [6]. Товщина слайсів була в межах 2–6 мм, напруженість ІЧ поля становила 0,13, 0,225 та 0,341 Вт/см², кінцевий вологовміст слайсів сягав 11%. Результати експериментів показали, що колір готового продукту помітно погіршується при підвищенні потужності ІЧ випромінювання та збільшенні товщини шару сировини.

У 2022 році дослідником Технічного університету Їлдиз (Туреччина) було реалізовано процес сушіння слайсів апельсину товщиною 6 мм в ІЧ полі [7]. Кінцевий вологовміст апельсину становив 14,9%. Час зневоднення був в межах 210–315 хвилин при потужності ІЧ поля 62–88 Вт. Температури коливались від 30 до 90°C. Було відмічено, що колір зазнає суттєвих змін при підвищенні потужності ІЧ поля.

Також в цьому році науковці Дослідницького інституту сільськогосподарського машинобудівництва (Єгипет) та Університетів Цзянсу (Китай) та Бенха (Єгипет) було проведено експеримент щодо зневоднення 2 мм слайсів томатів шляхом взаємодії з ІЧ випромінюванням [8]. Напруженість ІЧ енергії змінювалась від 0,15 до 0,35 Вт/см². При збільшенні напруженості зростала швидкість сушіння, що позитивно відобразилось на питомих енерговитратах.

У 2021 році у Технічному університеті Їлдиз (Туреччина) дослідили процес сушіння слайсів картоплі в умовах дії ІЧ поля [9]. Діапазон потужностей ІЧ випромінювання був в межах 38–88 Вт. Аналіз результатів досліджень показав, що збільшення потужності ІЧ поля веде до зростання швидкості вологовидалення, однак знижує відновлювальну здатність.

У тому ж році працівниками Лундського університету (Швеція), Центрально-Південного університету лісового господарства і технологій (Китай) та Харбинського політехнічного університету (Китай) проведено порівняльний аналіз технологій сушіння в умовах ІЧ випромінювання на різних харчових продуктах [10]. В цілому відмічено, що залучення ІЧ поля для вирішення проблем зневоднення суттєво покращує процес як з точки зору енергоефективності, так і зі сторони якості сухого продукту.

Відповідно до проведеного аналізу наявних результатів досліджень щодо перспектив використання електромагнітної енергії ІЧ діапазону в завданнях сушіння харчової сировини можна стверджувати, що позитивні сторони такого підходу явно є. Однак повноцінно можливості таких джерел енергії досі не розкриті. Як мінімум періодичні режими роботи розглянутих конструкцій спонукають до пошуку можливостей переходу на безперервний режим [11].

Модель електродинамічного апарату

При розробці установки для зневоднення неньютонівських рідин головною умовою була реалізація безперервного режиму роботи. Таким чином, була запропонована конструкція стрічкового апарату (рис. 1), оснащеного модулями з ІЧ випромінювачами 1. Модулі встановлені на тунельну камеру 2, всередині якої проходить стрічка 3, що транспортує касети із сировиною в процесі зневоднення. Рух стрічки забезпечується за рахунок привідного барабану 4. Натяжний барабан 5 унеможливує провисання стрічки.

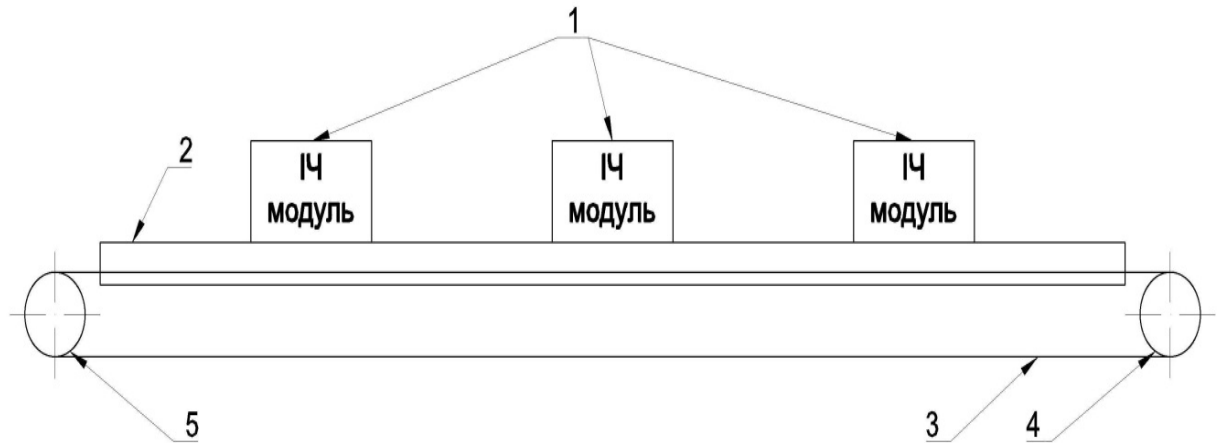


Рис. 1 – Електродинамічний стрічковий апарат для зневоднення неньютонівських рідин.

Довжина установки дає можливість досягти бажаного вологовмісту при одному проходженні касети. В залежності від заданого кінцевого значення вологовмісту передбачене регулювання швидкості стрічки за допомогою крокового двигуна. Вмикання ІЧ модулів та регулювання їх потужності здійснюється через блок керування, якими оснащені усі модулі. Додатково установка оснащена приладами для фіксації енергоспоживання, що дає змогу розрахувати питомі енерговитрати та визначити ефективність даної конструкції для кожного типу сировини.

Основні результати досліджень

Експериментальні дослідження проводились на основі реалізованого раніше аналітичного моделювання процесу зневоднення неньютонівських рідин в умовах дії ІЧ поля [12]. Завдяки цьому моделюванню було виділено основні параметри процесу сушіння реологічної сировини ІЧ випромінюванням, які чинять суттєвий вплив на кінетику та енергетику.

На першому етапі було проведено дослідження процесу зневоднення реологічної сировини при різних потужностях ІЧ поля та сталій швидкості руху стрічки 0,033 м/с (рис. 2).

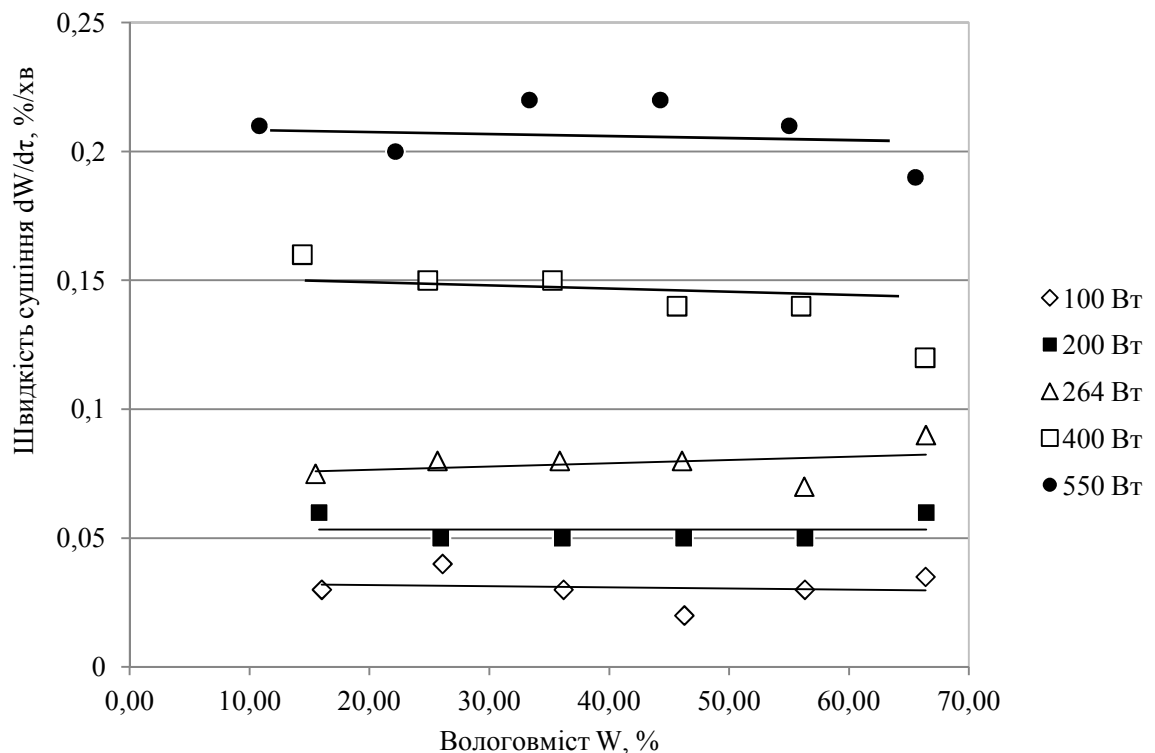


Рис. 2 – Графік залежності швидкості сушіння від потужності ІЧ поля

В якості об'єкту досліджень було обрано яблучні вичавки, що являють собою відходи сокового виробництва. За структурою їх можна віднести до реологічних систем. Сировина, масою 0,1 кг, розміщувалась на спеціальних касетах, що транспортувались стрічковим конвеєром. Після кожного проходження здійснювалось зважування касет на аналітичних вагах Radwag RC 750/C/1 з високою точністю з метою визначення швидкості вологовидалення. Температура експериментальних зразків вимірювалась за допомогою пірометра Benetech GM320. Потужність ІЧ випромінювання змінювалась в межах 100–550 Вт. Швидкість руху стрічки регулювалась за допомогою потенціометра та була в межах 0,011–0,033 м/с.

Виходячи з отриманої залежності можна стверджувати, що процес зневоднення неньютонівської структури супроводжується сталими значеннями швидкостей сушіння навіть при низьких значеннях вологовмісту на кожному рівні потужності ІЧ поля. Наступним кроком було визначення впливу швидкості стрічки на кінетику процесу сушіння при сталому значенні потужності ІЧ випромінювання у 264 Вт (рис. 3).

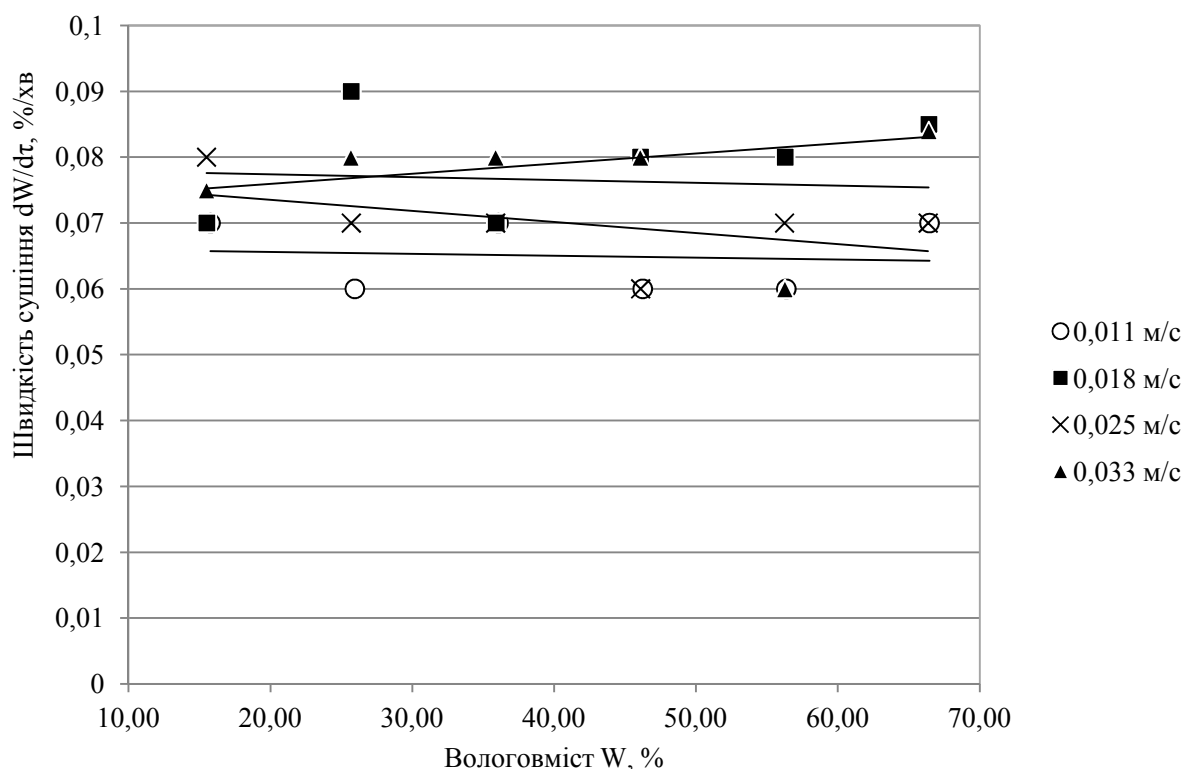


Рис. 3 – Графік залежності швидкості сушіння від швидкості руху стрічки

В результаті отриманих ліній швидкості сушіння для різних режимів руху стрічки видно, що швидкість стрічки не суттєво впливає на кінетику процесу зневоднення. Загалом значення варіюються в діапазоні 0,06–0,08 %/хв.

Висновки. Експериментальні дослідження, проведені на розробленому електродинамічному апараті цілком підтвердили його працездатність. ІЧ випромінювання добре підходить для вирішення завдань по зневодненню неньютонівських рідин. Окремою вимогою для забезпечення рівномірності висушування матеріалу є невеликі значення товщини шару продукту.

References

1. Qadri T., Naik H.R., Hussain S.Z., Naseer B., Bhat T., Vijaykumar, Wani F.J. Spray Dried Apple Powder: Qualitative, Rheological, Structural Characterization and Its Sorption Isotherm. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 165, 113694. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113694>
2. Zhang D., Huang D., Zhang Yi., Lu Yi., Huang Sh., Gong G., Li L. Ultrasonic Assisted Far Infrared Drying characteristics and Energy Consumption of Ginger Slices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 92, 106287. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106287>
3. Zhang Yi., Lu Yi., Huang D., Zhao H., Huang Sh., Zhang L., Gong G., Li L. Infrared Drying Characteristics and Optimization of Ginseng. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 57, 104334. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104334>
4. Ahmet Polat A., Taskin O., Izli N. Assessment of Freeze, Continuous, and Intermittent Infrared Drying methods for Sliced Persimmon. *Journal of Food Science*, 2024, 89, 2332–2346. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994>

5. Topuz F.C., Uğurlu S., Bakkalbaşı E. Comparison of a Novel Vacuum-Combined Infrared and Hot-Air Convection Methods for Drying of Deveci (*Pyrus communis* L.) Pear Slices. *Latin American Applied Research*, 2023, 53(4), 317–325. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2023.1200>
6. El-Mesery H.S., Ashiagbor K., Hu Z., Alshaer W.G. A Novel Infrared Drying Technique for Processing of Apple Slices: Drying Characteristics and Quality Attributes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 52, 103676. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676>
7. Doymaz I. Drying, Colour and Rehydration Characteristics of Orange Slices Under Infrared Radiation Heating. *Latin American Applied Research*, 2022, 52(1), 43–48. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2022.826>
8. El-Mesery H.S., Kamel R.M., Alshaer W.G. Thin-Layer Drying Characteristics, Modeling and Quality Attributes of Tomato Slices Dried with Infrared Radiation Heating. *Bioscience Journal*, 2022, 38, e38049. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-42303>
9. Doymaz I. Drying, Drying Behavior and Some Quality Parameters of Potato Finger Chips Using Infrared Radiation. *Latin American Applied Research*, 2021, 51(4), 261–267. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2021.779>
10. Huang D., Yang P., Tang X., Luo L., Sunden B. Application of Infrared Radiation in the Drying of Food Products. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110, 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039>
11. Burdo O.G. *Evolutsiya sushilnyih ustanovok*. – Odessa: Poligraf, 2010. – 368s.
12. Kravchenko O.Yu., Tersiiiev S.G. Doslidzhennia protsesiv znevodnennja reolohichnoi syrovyny v ICh poli. *Scientific Works*, 2023, 87(1), 123–129. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2702>

RESEARCH OF ELECTRODYNAMIC APPARATUS FOR NON-NEWTONIAN LIQUIDS DEHYDRATION

Kravchenko O.Yu., graduate student
Odesa national university of technology, Odesa, Ukraine

Abstract. The current problems of the drying process are highlighted, with special attention paid to plant raw materials of rheological structure. Traditional ways of solving the problems of non-Newtonian liquids dehydration, presented in the scientific literature, are considered. A promising direction for organizing the dehydration process is highlighted, which consists in using another energy source - infrared radiation. An analysis of scientific publications devoted to the advantages of the infrared field in the field of mass transfer processes is carried out. It is confirmed that electromagnetic radiation of the infrared range has great prospects for drying plant raw materials. However, in the considered works there are a number of shortcomings that do not allow to use the maximum potential of such an energy source. This especially applies to the designs of the installations on which the drying process was studied. The most important among them is the periodic mode of operation. Any scientific research should be aimed at the prospect of introducing the latest developments into production, and the continuous operation of any equipment is a significant condition and competitive feature when introduced into industry. In this regard, an electrodynamic apparatus for dewatering non-Newtonian liquids was proposed, which allows this process to be carried out in a continuous mode. The stand for conducting research is equipped with regulators of the infrared modules power and the belt speed. As a result of the experimental research, data were obtained that served to construct important kinetic dependencies. The drying speed lines attract the most attention. They showed that the values of the drying speed clearly correlate with the supplied power level of the infrared field. The belt movement speed introduced insignificant changes, so the drying speed varied in a small range. In general, based on the results obtained, the operability and prospects of the developed design of the belt electrodynamic apparatus were confirmed.

Key words: drying, dehydration, food rheological systems, infrared field, analytical and experimental modeling.

Список використаної літератури

1. Qadri T., Naik H.R., Hussain S.Z., Naseer B., Bhat T., Vijaykumar, Wani F.J. Spray Dried Apple Powder: Qualitative, Rheological, Structural Characterization and Its Sorption Isotherm. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 165, 113694. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113694>
2. Zhang D., Huang D., Zhang Yi., Lu Yi., Huang Sh., Gong G., Li L. Ultrasonic Assisted Far Infrared Drying characteristics and Energy Consumption of Ginger Slices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 92, 106287. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106287>
3. Zhang Yi., Lu Yi., Huang D., Zhao H., Huang Sh., Zhang L., Gong G., Li L. Infrared Drying Characteristics and Optimization of Ginseng. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 57, 104334. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104334>
4. Ahmet Polat A., Taskin O., Izli N. Assessment of Freeze, Continuous, and Intermittent Infrared Drying Methods for Sliced Persimmon. *Journal of Food Science*, 2024, 89, 2332–2346. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994>

5. Topuz F.C., Uğurlu S., Bakkalbaşı E. Comparison of a Novel Vacuum-Combined Infrared and Hot-Air Convection Methods for Drying of Deveci (*Pyrus communis* L.) Pear Slices. *Latin American Applied Research*, 2023, 53(4), 317–325. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2023.1200>
6. El-Mesery H.S., Ashiagbor K., Hu Z., Alshaer W.G. A Novel Infrared Drying Technique for Processing of Apple Slices: Drying Characteristics and Quality Attributes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 52, 103676. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676>
7. Doymaz I. Drying, Colour and Rehydration Characteristics of Orange Slices Under Infrared Radiation Heating. *Latin American Applied Research*, 2022, 52(1), 43–48. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2022.826>
8. El-Mesery H.S., Kamel R.M., Alshaer W.G. Thin-Layer Drying Characteristics, Modeling and Quality Attributes of Tomato Slices Dried with Infrared Radiation Heating. *Bioscience Journal*, 2022, 38, e38049. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-42303>
9. Doymaz I. Drying, Drying Behavior and Some Quality Parameters of Potato Finger Chips Using Infrared Radiation. *Latin American Applied Research*, 2021, 51(4), 261–267. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2021.779>
10. Huang D., Yang P., Tang X., Luo L., Sunden B. Application of Infrared Radiation in the Drying of Food Products. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110, 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039>
11. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. – Одесса: Полиграф, 2010. – 368с.
12. Кравченко О.Ю., Терзієв С.Г. Дослідження процесів зневоднення реологічної сировини в ІЧ полі. *Scientific Works*, 2023, 87(1), 123-129. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2702>

Отримано в редакцію 09.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.08.2024
Approved 25.09.2024

ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ВИРОБНИЦТВА ЕФІРНИХ ОЛІЙ

Коваленко О.А. ², д.сх.н, доцент, . Славинський Р.Л. ¹, аспірант, Федосов Я. С. ², аспірант, Славинська В.О. ¹ інженер

¹ Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

² Миколаївський національний аграрний університет, м.Миколаїв

Анотація. Проведено аналіз традиційних та інноваційних методів отримання ефірних олій. Виявлені суттєві недоліки традиційних (застарілих) методів та запропоновані інноваційні (високоєфективні) підходи, які є «зеленими» за своєю суттю. Розглянуто інноваційні методи отримання ефірних олій, також обґрунтовано ефективність їх використання у багатьох галузях народного господарства.

Запропоновано долучити електродинамічні технології до процесу отримання ефірних олій. Сформульовано гіпотезу обробки мікрохвилями рослинної сировини, що сприяє виникненню механодифузії.

Наведено переваги інноваційного метода отримання ефірних олій методом мікрохвильової екстракції без розчинників.

Проведено експерименти методом мікрохвильового екстрагування без розчинників на об'ємному вакуумному мікрохвильовому екстракторі із різними сортами гісопу та побудовані графіки залежностей відносно. Наведено результати експериментальних досліджень кінетики екстрагування рослинної сировини.

Виконано порівняльну характеристику виходу ефірної олії залежно від морфологічно-анатомічних властивостей сировини, часу проведення експерименту та витрат енергії, наведено графіки відповідних залежностей.

У результаті експерименту визначено параметри за яких відбувається екстрагування ефірної олії з гісопу. Також визначено сорт гісопу, який забезпечує за інших рівних умов більший вихід продукту.

Визначено завдання вчених-дослідників у двадцять першому столітті, які зможуть сприяти розвитку інноваційних методів отримання ефірних олій.

Ключові слова: ефірні олії, мікрохвильові електродинамічні екстрактори, суха дистиляція, енергетична ефективність, квітки гісопу.

Вступ. Ефірні олії - це пахучі та леткі рідини, одержувані з рослин, багаті біологічно активними речовинами. Біоактивність становить величезний інтерес для науки та призводить до використання у багатьох галузях промисловості. Ефірні олії, часто називають "рідким золотом", які являють собою групу хімічних сполук, та є джерелом специфічних ароматів. Ці речовини використовуються у виробництві різних видів продукції.

Ефірні олії утворюються у вигляді висококонцентрованих екстрактів, отриманих із різних частин рослин. У результаті їхньої переробки утворюються інтенсивно леткі ароматичні речовини. Ароматичні молекули рослин, крім їхніх ароматичних якостей, беруть участь у багатьох біохімічних процесах навколишнього середовища. Зростає попит на ефірні олії, оскільки ці олії, як стверджується, покращують здоров'я та імунітет. Глобальний ринок здебільшого рухомий стійкою тенденцією зеленого споживання серед зростаючою популярністю натуральних ресурсів важливих для життєдіяльності людини та збереження продуктів харчування.

Природа, склад та кількість ефірних олій залежать від [1]:

- навколишнього середовища;
- чинників, пов'язаних зі збором урожаю;
- зберігання після збору врожаю;
- морфологічно-анатомічних властивостей сировини;
- методів отримання.

Обсяг світового ринку ефірних олій оцінювався в 11,41 млрд доларів США у 2023 році та, за прогнозами, зросте з 12,47 млрд доларів США у 2024 році до 27,82 млрд доларів США до 2032 року, демонструючи середньорічний темп зростання в 10,55% протягом прогнозованого періоду. Європа домінувала на ринку ефірних олій із часткою ринку 43,65% у 2023 році, за нею йде Північна Америка та Азія, тоді як основними виробниками є Китай та Індія, за якими йдуть Індонезія, Шрі-Ланка та В'єтнам [2].

Основоположні драйвери та тренди ринку ефірних олій:

1) Зростання попиту на натуральні інгредієнти та збільшення сфери застосування у вигляді консервантів та антимікробних засобів.

2) Зростаючий інтерес до ароматерапії та застосування ефірних олій у різних галузях промисловості.

Різноманітні методи отримання ефірних олій використовувалися на протязі багатьох років. Так дистиляція використовувалась ще у Стародавньому Єгипті, Персії та Індії. Екстракти отримували традиційними

широковідомими способами з рослинної матриці. Поступово методи еволюціонували, що призвело до підвищення ефективності процесу, виходу продукту та його якості.

В роботі поставлено завдання організувати процес екстрагування без розчинників за принципами сухої дистиляції [3, 4]. Вперше пропонується залучити до процесу електромагнітні джерела енергії, які ефективно впроваджуються в сучасне тепломасообмінне обладнання [5 - 8] і мають значні перспективи у широкому використанні.

Аналіз проблематики та останніх досліджень. Аналіз свідчить, що традиційні методи застаріли та мають багато недоліків [3]:

- низькі якість, ефективність та енергоефективність;
- значні експлуатаційні витрати;
- вони неекологічні.

В традиційних методах [9, 10] передача теплової енергії здійснюється за допомогою механізмів теплопровідності та конвекції, що спричиняє коливання температурного градієнта всередині продукту, що може призвести до зменшення виходу та якості продукту.

В роботі [11] розглянуто вилучення біоактивних сполук із природних джерел їжі за допомогою нетрадиційних нових методів, яке набирає популярності через їхні численні переваги порівняно з традиційними методами. Біоактивні сполуки, отримані такими новими методами, мають великий потенціал на ринку функціональних харчових продуктів, оскільки вони вважаються більш безпечними.

Концепція екологічних методів видобутку дає поштовх для створення стійких методів видобутку та має намір слідувати стратегії Організації Об'єднаних Націй до 2030 року. Ця концепція називається принципом e^3 та включає шість принципів, розглянутих у роботі [11]:

- а) чітко визначене джерело;
- б) обмеження використання органічного розчинника;
- в) мінімізація споживання енергії;
- г) створення побічної продукції з високим потенціалом доданої вартості;
- д) зменшення тривалості вилучення;
- е) відновлення природних інгредієнтів.

Постійно розробляються сучасні технології, які дозволяють вдосконалити традиційні методи, та підвищити їх енергоефективність. В традиційних технологіях потрібні зміни, які б призвели до зростання кількісного та якісного виходу ефірних олій із лікарських рослин. Таким чином їм на зміну прийшли інноваційні (високоєфективні) методи, які є "зеленими" відповідно до своєю суті, конкурентоспроможні та економічно вигідніші [3].

Переваги та недоліки інноваційних методів отримання ефірних олій було розглянуто у роботі [3] та проілюстровано в таблиці 1.

Таблиця 1

Інноваційні та традиційні методи екстракції ефірних олій

Традиційні методи	Інноваційні методи
Гідродистиляція	Дистиляція з використанням «Виробництва 4.0» [4]
Дистиляція паром	Докритична рідинна екстракція
Екстракція	Мікрохвильова дистиляція парою
Прессування	Мікрохвильове екстрагування без розчинника
Анфлераж	Мікрохвильова гідродифузія та гравітація
Мацерація	Ультразвукова гідродистиляція
	Дистиляція з використанням сонячної енергії
	Надкритична екстракція рідини

Промисловий сегмент отримання ефірних олій завдяки впровадженню основ «Виробництва 4.0» надає нові можливості для технологічного оновлення галузі [4].

Процес виробництва ефірних олій удосконалений за рахунок використання інноваційних технологій забезпечує значні переваги починаючи з виходу продукту та енергії, і закінчуючи позитивним впливом на екологічні та фінансові результати.

Ефективність залучення електродинамічних технологій до процесу отримання ефірних олій обґрунтована в роботі [5]. Технічні характеристики електродинамічних апаратів приведено на сайті [8]. Інноваційним

підходом до проведення процесу екстрагування є ініціювання гібридного процесу для організації ефекту механодифузії [6]. Виконано аналіз кінетики взаємодії рослинного матеріалу із мікрохвильовим полем [3].

Формулюється гіпотеза: «обробка мікрохвилями сировини спроможне ініціювати та створити передачу маси та теплоти в середині рослинних матриць назовні, за допомогою впливу механодифузії, що призведе до значного скорочення часу екстрагування».

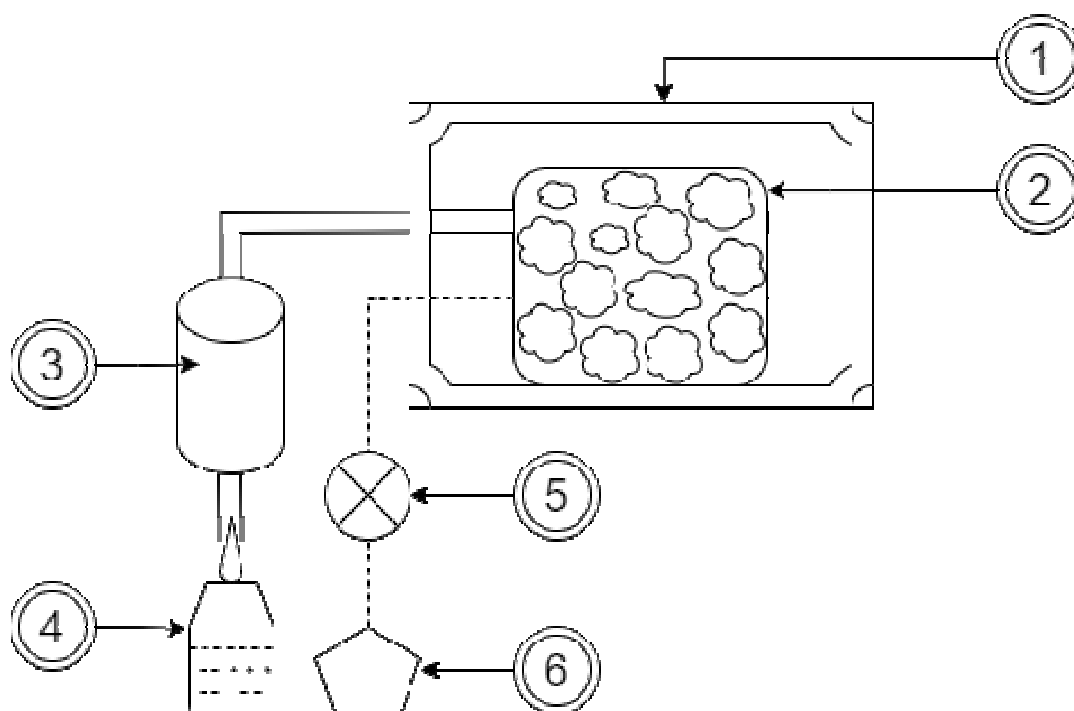
Таким чином, мікрохвильове екстрагування - це комбінація мікрохвильового нагрівання та сухої дистиляції, що виконується без додавання розчинника чи води. При цьому виділення і концентрування летких сполук здійснюються в одну стадію.

Мікрохвильова екстракція без розчинників — це адресна доставка енергії до нанорозмірних структур, що виконується при нормальних умовах без додавання розчинника чи води. Цей метод є екологічно чистою технологією і виглядає як альтернатива для вилучення ефірних олій з ароматичних рослин завдяки дії електромагнітного поля на рідину у капілярі рослинної сировини. Основна перевага — це виділення і концентрування летких сполук в одну стадію, який містить ефективність, селективність та більш короткий час [1]. Новизна цього дослідження полягає в можливості поліпшення якості на прикладі ефірних олій розмарину шляхом регулювання кількості цільових сполук, що характеризуються сильним антиоксидантним ефектом [9].

Цей метод використовує приблизно 70% води, що міститься в найсвіжішій рослинній тканині, для отримання ефірних олій, і метод поєднує в собі переваги гідродистиляції, спричиненої мікрохвильовим випромінюванням це - швидкість, високий вихід і низьке споживання енергії, при цьому практично не виробляючи стічних вод [10].

Процес мікрохвильового екстрагування без розчинників досліджено на стенді (рис.1). Експерименти проводились з синім, рожевим та білим гісопом.

Обговорення результатів експериментальних досліджень. Основними елементами стенду є: резонаторна камера з магнетроном, холодильник-дистилятор, вакуумна система (рис.1).



1 - резонаторна камера; 2 - радіо прозора ємність з сировиною; 3 - холодильник - дистилятор;
4 - ємність для збору рідини; 5 - вакууметр; 6 - вакуум-насос.

Рис. 1 – Схема експериментального стенду

У резонаторній камері 1 розташована радіопрзора ємність з сировиною 2, яка приєднана до холодильника-дистилятора 3, де парова фаза конденсується та рідина потрапляє у ємність для її збору. Вакуум у системі забезпечується вакуум-насосом 6 та контролюється манометром 5.

Проведено серію експериментальних досліджень кінетики екстрагування квітів гісопу на об'ємному вакуумному мікрохвильовому екстракторі (рис.1) та побудовані графіки залежностей тиску в системі від часу проведення експерименту відповідно для трьох сортів гісопу (таблиця 2).

Таблиця 2

Кінетики екстрагування квітів гісопу

Рослинна сировина	Маса квітів, Мс, г	Тиск Р, МПа	Час, т, хв
Сорт Водограй (білий гісоп)	37,27	0,039...0,107	42
Сорт Маркіз (синій гісоп)	37	0,039...0,101	42
Сорт Національний (рожевий гісоп)	26,9	0,039...0,104	42

Результати дослідів наведено на рис. 2.

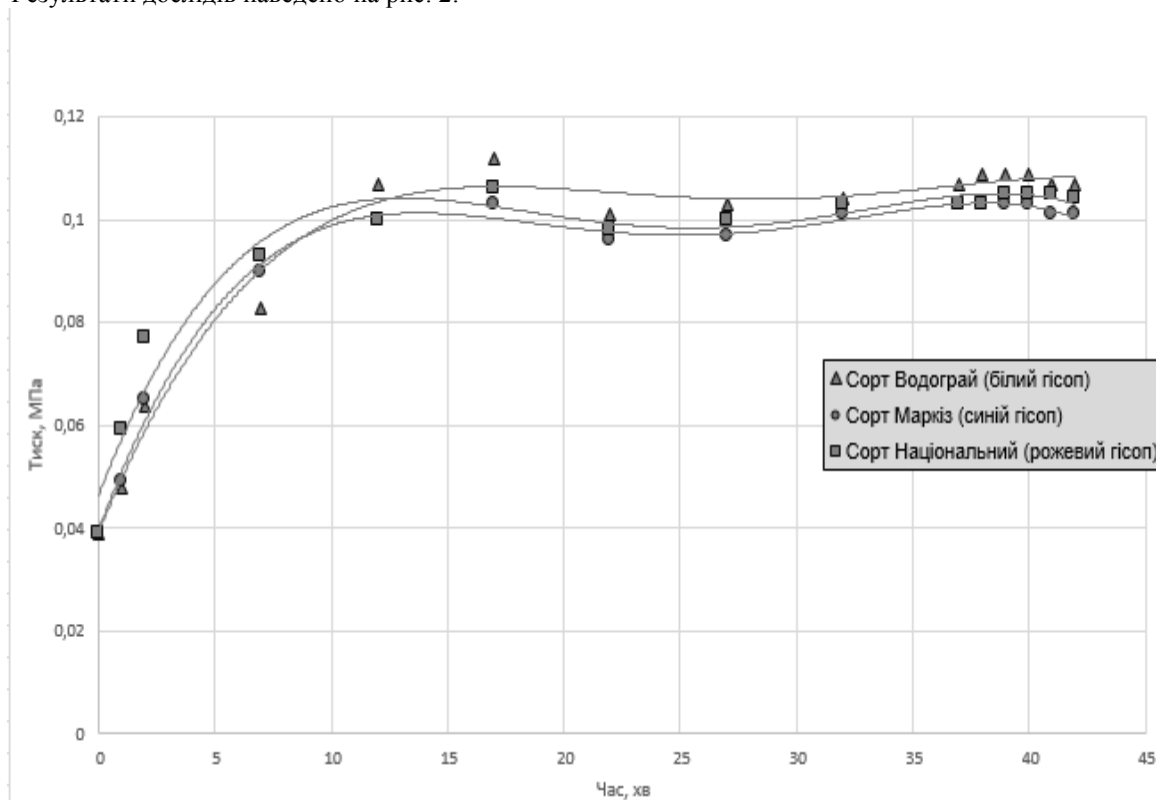


Рис. 2 – Кінетика екстрагування квітів гісопу

Після близько 12 хвилин проведення експерименту тиск у резонаторній камері досягає 0,1 МПа і далі практично не змінюється, що свідчить про стабілізацію процесу масоперенесення. Це характерно для різних сортів гісопу. Виконано розрахунки та досліджено вплив витрат енергії, часу та морфологічно-анатомічні властивостей сировини на вихід ефірної олії (табл.3).

Таблиця 3

Параметри екстрагування квітів гісопу

Рослинна сировина	Час, т, с	Вихід ефірної олії, %
Сорт Маркіз (синій гісоп)	1620	0,08
	1920	0,08
	2520	0,12
Сорт Водограй (білий гісоп)	2280	0,24
	2520	0,2
	3180	0,16
Сорт Національний (рожевий гісоп)	1380	0,12
	1920	0,16
	2520	0,2

Результати дослідів представлено на рис. 3.

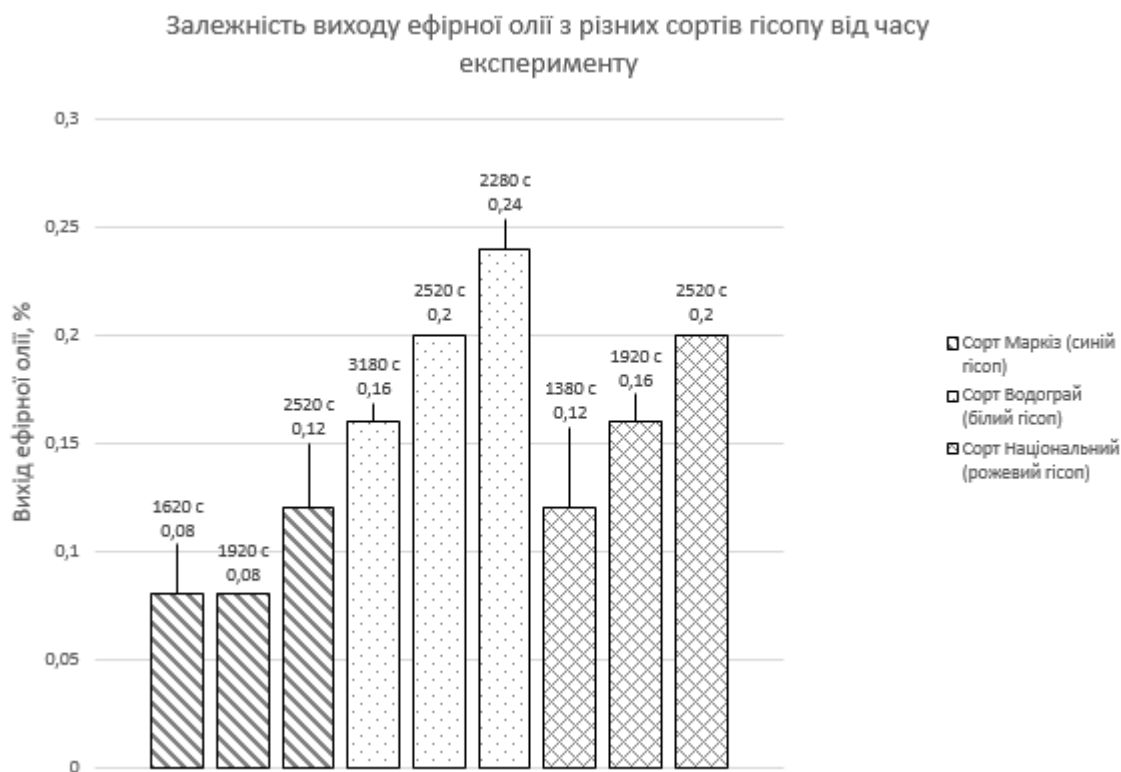


Рис. 3 – Залежність виходу ефірної олії від часу екстрагування та сорту гісопу

У сорту Водограй (білий) та Національний (рожевого) гісопу у порівнянні з сортом Маркіз (синій) міститься більше ефірної олії та вихід продукту збільшується прямопропорційно до часу проведення експерименту.

Висновки

1) Мета науковців-дослідників у двадцять першому столітті - стимулювати розвиток інноваційних процесів отримання ефірних олій, які підвищують вихід і якість летких олій та застосування їх у різноманітних галузях промисловості. Це дасть змогу невпинно прагнути до нових технічних та операційних горизонтів досконалості.

Мікрохвильове екстрагування без розчинника — це перспективний інноваційний екологічно чистий метод отримання ефірних олій завдяки дії електромагнітного поля на рідину у капілярі рослинної сировини, що викликає вихід компонентів з рослин у вигляді потужного гідродинамічного потоку. Він є доцільною альтернативою існуючих традиційних методів.

2) Визначено що при досягненні тиску в системі 0,1 МПа та часу проведення дослідження 12...15 хвилин починається масоперенесення, яке триває приблизно 30 хвилин не залежно від сорту гісопу (рис.2). Про це свідчить постійний тиск при збільшенні часу експерименту, що є фактором рушійної сили процесу.

3) Визначено експериментальним шляхом, що сорт гісопу, енергоспоживання та час процесу впливає на вихід ефірної олії. Так приблизно на однакових режимах та часу проведення експериментів вихід ефірної олії у гісопу сорту Водограй (білий) та сорту Національний (рожевий) вищий за сорт Маркіз (синій).

4) Отримані результати досліджень (рис.2, 3) є основою для організації екологічно безпечних та енергоефективних методів екстрагування із квітів гісопу. Для отримання доцільних режимів екстрагування потрібні комплексні та більш цілеспрямовані дослідження по виходу із екстрактів безпосередньо ефірних олій.

References

- Valeria Cavallaro, Ana Paula Murray, María Luján Ferreira (2023). Chapter 12 - Innovative and Eco-friendly methods and pretreatments for essential oil extraction: an update, Editor(s): Atta-ur Rahman, Studies in Natural Products Chemistry, Elsevier, Volume 78,. DOI:10.1016/B978-0-323-91253-2.00002-9.
- «TFood Additives & Ingredients/Essential Oils Market». <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/essential-oils-market-101063>
- Kovalenko O.A., Slavinskiy R.L., Fedosov Ya. S., Slavinska V.O., Al-Khamad I.M. (2023) Yeksperimentalne modelyuvannya protsesiv yekstraguvannya yefirnikh olii u mikrokhvilovomu poli. *Scientific Works* 87(1):109-116 87(1):109-116. DOI:10.15673/swonaft.v87i1.2700.

4. Machado, C. A. T., de Andrade, M. A. N., & Lepikson, H. A. (2019). Manufacturing 4.0: Discussion on Application in the extractive industry of essential oils. *Journal of Bioengineering and Technology applied to Health*, 2(3), 86-91.
5. OG Burdo, FA Trishyn, SG Terziev, AV Gavrilov, IV Sirotyuk (2021). Yelektrodynamicni protsesi yak yefektivne virishennya problem kharchovoї promislivosti, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 57(3), 330-344 <https://doi.org/10.3103/s1068375521030030>.
6. Burdo O.G., Levitskii A.P., Trishin F.A., Terziev S.G., Sirotyuk I.V., Burdo A.K., Lapinska A.P., Molchanov M.Yu. (2023). Yelektrodynamicni tekhnologii v yeko-industrii kharchovoї ta farmatsevtichnoї promislivosti *Problemele Energeticii Regionale*, 2 (58). DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-11>.
7. Burdo, O. G., Bandura, V. N., & Levtrinskaya, Y. O. (2018). Yelektrotekhnologii tsilespryamovanoї dostavki yenerгии pri pererobtsi kharchovoї sirovini. *Inzheneriya poverkhni ta prikladna yelektrokimiya*, 54(2), 210-218.
8. Tekhnologii adresnoї dostavki yenerгии i nanoenergotekhnologii. <http://nanofood.com.ua>
9. Asma Oubeka, Karim Assami, Dalila Meziane Assami & Rachid Tir. (2023) Enhancing Yields and Antioxidant Activities of Caraway Seeds Essential Oil by Ultrasonic Treatment Combined with Hydro-distillation, and Microwave-assisted Hydro-distillation. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 26(1), 10-20.
10. Shuang Li, Lifei Chen, Yunwei Zhou. (2023) Essential oil obtained from *Chrysanthemum indicum* var. *aromaticum* leaf using solvent-less microwave irradiation-induced hydrodistillation and extraction *in situ*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101259>
11. Ishrat Majid, Shafat Khan, Alanoud Aladel, Aamir Hussain Dar, Mohd Adnan (2022) Recent insights into green extraction techniques as efficient methods for the extraction of bioactive components and essential oils from foods. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2022.2157492>.

INNOVATIVE METHODS OF PRODUCTION OF ESSENTIAL OILS

Kovalenko O.A. ², doctor of science, associate professor, Slavynskiy R.L. ¹,

graduate student of the department, Fedosov Y. S. ²,

graduate student, Slavynska V.O. ¹ an engineer

¹ Odessa National Technological University, Odessa, Ukraine

² Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The article analyses traditional and innovative methods of obtaining essential oils. Significant disadvantages of traditional (outdated) methods have been identified and innovative (highly efficient) approaches, which are 'green' in nature, have been proposed. Innovative methods of obtaining essential oils are considered, and the effectiveness of their use in many sectors of the national economy is substantiated.

It is proposed to involve electrodynamic technologies in the process of obtaining essential oils. The hypothesis of microwaves treatment of plant raw materials, which contributes to the emergence of mechanodiffusion, is formulated.

The advantages of an innovative method of obtaining essential oils by microwave extraction without solvents are presented.

The experiments by the method of microwave extraction without solvents in a volumetric vacuum microwave extractor with different varieties of hyssop were carried out and the dependence graphs were constructed accordingly. The results of experimental studies of the kinetics of extraction of plant material are presented.

A comparative characteristic of the essential oil yield depending on the morphological and anatomical properties of the raw material, the time of the experiment and energy consumption is performed, and graphs of the corresponding dependencies are presented.

As a result of the experiment, the parameters under which the extraction of essential oil from hyssop is carried out were determined. Also, the variety of hyssop, which provides, *ceteris paribus*, a higher product yield, has been determined.

The tasks of research scientists in the twenty-first century, which can contribute to the development of innovative methods of obtaining essential oils, have been determined.

Keywords: essential oils, microwave electrodynamic extractors, dry distillation, energy efficiency, hyssop flowers.

Список використаної літератури

1. Valeria Cavallaro, Ana Paula Murray, Maria Luján Ferreira, Chapter 12 - Innovative and Eco-friendly methods and pretreatments for essential oil extraction: an update, Editor(s): Atta-ur Rahman, *Studies in Natural Products Chemistry*, Elsevier, Volume 78, 2023. DOI:10.1016/B978-0-323-91253-2.00002-9.
2. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/essential-oils-market-101063> - сайт «TFood Additives & Ingredients/Essential Oils Market».

3. Коваленко О.А., Славинський Р.Л., Федосов Я.С., Славинська В.О., Аль-Хамад І.М. (2023) Експериментальне моделювання процесів екстрагування ефірних олій у мікрохвильовому полі. // Scientific Works 87(1):109-116 87(1):109-116. DOI:10.15673/swonaft.v87i1.2700.
4. Machado, C. A. T., de Andrade, M. A. N., & Lepikson, H. A. (2019). Manufacturing 4.0: Discussion on Application in the extractive industry of essential oils. JOURNAL OF BIOENGINEERING OF AND TECHNOLOGY applied to Health, 2(3), 86-91.
5. OG Burdo, FA Trishyn, SG Terziev, AV Gavrilov, IV Sirotyuk (2021). Yelektrodinamichni protsesi yak yefektivne virishennya problem kharchovoi promislovosti // Surface Engineering and Applied Electrochemistry 57 (3), 330-344 <https://doi.org/10.3103/s1068375521030030>.
6. 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 промисловостей //PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 2 (58) DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-11>.
7. Бурдо О. Г., Бандура В.Н., Левтринська Ю. О. (2018). Електротехнології цілеспрямованої доставки енергії при переробці харчової сировини. Інженерія поверхні та прикладна електрохімія, 54(2), 210-218.
8. <http://nanofood.com.ua> – сайт Технології адресної доставки енергії і наноенерготехнологій.
9. Asma Oubeka, Karim Assami, Dalila Meziane Assami & Rachid Tir. (2023) Enhancing Yields and Antioxidant Activities of Caraway Seeds Essential Oil by Ultrasonic Treatment Combined with Hydro-distillation, and Microwave-assisted Hydro-distillation. Journal of Essential Oil Bearing Plants 26:1, P. 10-20.
10. Shuang Li, Lifei Chen, Yunwei Zhou. (2023) Essential oil obtained from *Chrysanthemum indicum* var. *aromaticum* leaf using solvent-less microwave irradiation-induced hydrodistillation and extraction *in situ*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101259>
11. Ishrat Majid, Shafat Khan, Alanoud Aladel, Aamir Hussain Dar, Mohd Adnan (2022) Recent insights into green extraction techniques as efficient methods for the extraction of bioactive components and essential oils from foods. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2022.2157492>.

Отримано в редакцію 09.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.08.2024
Approved 25.09.2024

КІНЕТИКА ВИЛУЧЕННЯ ОЛІЇ З МАКУХИ СОНЯШНИКУ В УМОВАХ АДРЕСНОЇ ДОСТАВКИ ЕНЕРГІЇ

Запорожець Д.О., аспірант, Ружицька Н.В., к.т.н., асистент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. У даній статті розглядаються результати досліджень кінетики вилучення олії з макухи соняшнику. Відомо, що після пресування в капілярних структурах макухи залишається олія. З метою більш ефективною переробки сировини, залишки олії екстрагують органічними розчинниками.

З метою підвищення якості та екологічної безпеки, неполярні екстрагенти, такі як гексан або екстракційні бензини, які є продуктами переробки нафти, поступово замінюють відновлюваним і менш токсичним етанолом.

Проте існує проблема невисокої розчинності тригліцеридів жирних кислот в етанолі. Ефективність етанолу в якості екстрагента пов'язується з емульгуванням олій, а не тільки розчиненням.

У статті пропонується інтенсифікувати як масообмінну складову процесу вилучення олії (екстрагування), так і гідромеханічну (емульгування) за допомогою технологій адресної доставки енергії.

Робиться припущення, що механізм механодифузії в умовах дії мікрохвильового поля не тільки руйнує капіляри сировини та інтенсифікує дифузійні процеси, а й збільшує вихід дрібнодисперсних крапель олії в екстрагент.

Проведено експериментальні дослідження залежності кінетики екстрагування олії від температури, гідралічного режиму, розміру частинок, питомого підведення енергії. Здійснено спроби гідромеханічного відокремлення олії від емульгованого екстракту.

Встановлено, що адресна доставка енергії та подрібнення макухи збільшують вихід олії. Збільшення питомих енерговитрат у досліджуваному діапазоні не впливає на вихід олії, що відкриває можливості до зменшення цього показника та подальшого підвищення енергетичної ефективності процесу.

Ключові слова: соняшникова макуха, мікрохвильове екстрагування, етанол, соняшникова олія.

Вступ. Україна є одним з провідних виробників та експортерів соняшникової олії у світовому масштабі [1]. У 2023 – 2024 році обсяг виробництва соняшникової олії склав 6,6 млн тонн [2]. Після одержання соняшникової олії пресуванням, вміст олії в макусі складає 15...26 % [3]. Після повторного пресування вміст жирів у макусі повинен становити не більше 6 %. А після екстрагування органічними розчинниками, вміст олії в соняшковому шроті не перевищує 1% [4].

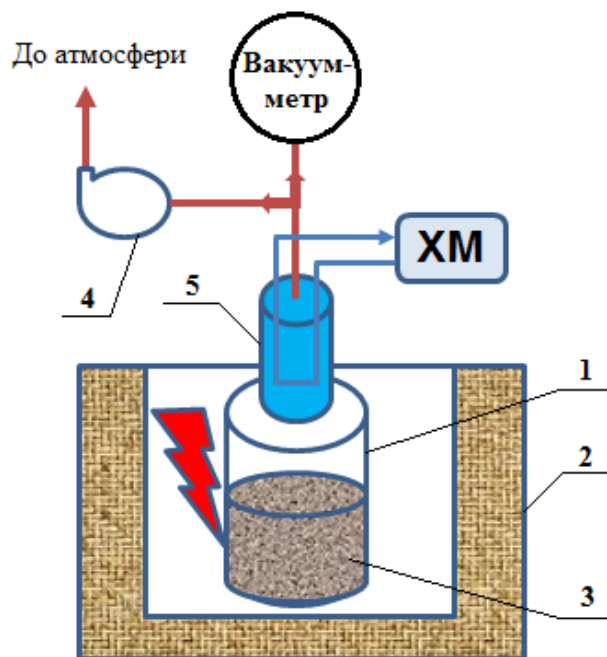
В пошуку більш екологічно безпечних технологій переробки харчової сировини, все більшу увагу в якості екстрагента привертає етанол, який, на відміну від гексану та екстракційних бензинів, одержують бродинням відновлюваної сировини [3]. Високу ефективність в якості екстрагента етанол показав при екстрагуванні ріпакової, соєвої, амарантової олій, олії кави [5].

Розчинність олії в етанолі обмежена, але при використанні етанолу концентрацією близько 95 % олія утворює емульсії [6]. Таким чином емульгуванням олії можна пояснити високий вихід олій при екстрагуванні етанолом.

Одним із способів інтенсифікації процесу екстрагування олій з рослинної сировини є адресна доставка енергії до мікро- та наноструктур за допомогою мікрохвильових технологій [7]. Встановлено, що дія мікрохвиль викликає швидке утворення парової фази та різке збільшення тиску в капілярах сировини – явище бародифузії. Бародифузійний потік механічно ініціює викид екстрактивних речовин, таке явище отримало назву механодифузії [7]. Саме утворення та викид в екстрагент дрібних крапель екстрактивної речовини імовірно інтенсифікує утворення емульсії олії, тобто олія в екстракті знаходиться як у вигляді розчину (дифузійна складова), так і у вигляді дисперсної системи (гідромеханічна складова). З точки зору енергетичної ефективності виробництва, вилучення олії з емульсії механічними способами є менш витратними.

Об'єкти досліджень та обладнання. Об'єктом досліджень було обрано макуху соняшника з олійністю 6%. В якості екстрагенту використано етанол, концентрацією 91 %.

Дослідження проводились на експериментальному мікрохвильовому вакуум-екстракторі (рис. 1). У реакційну ємність 1 з радіопрозорого термостійкого матеріалу, розміщену в мікрохвильовій камері 2, завантажується суміш екстрагента з сировиною 3. Режим кипіння екстрагенту за низьких температур досягається за допомогою вакуум-насосу 4. Екстрагент, що випаровується при високих температурах, або в режимі кипіння, конденсується у холодильнику 5 і повертається до суміші. Мікрохвильовий вакуум-екстрактор дозволяє проводити процес екстрагування в режимі кипіння в діапазоні температур від 36 °С до температури кипіння відповідного екстрагенту.



1 – реакційна ємкість з радіопрозорого матеріалу; 2 – мікрохвильова камера; 3 – продукт; 4 – вакуум-насос; 5 – конденсатор; ХМ – холодильна машина

Рис. 1 – Схема МХ екстрактора періодичної дії

Досліди в умовах традиційного енергопідведення проводились на лабораторній водяній бані ВБ-2.

Для обробки експериментальних зразків використовувались сушильна шафа 2В-151, ваги аналітичні Radwag - 220, центрифуга.

Визначення впливу способу енергопідведення на інтенсивність екстрагування. Досліди проводились на водяній бані та у мікрохвильовому екстракторі в режимі кипіння з фракцією макухи 2...3 мм. Гідромодуль складав 1:3, питоме енергопідведення – 720 кДж/кг суміші. Кінетичні криві процесу наведено на рис. 2.

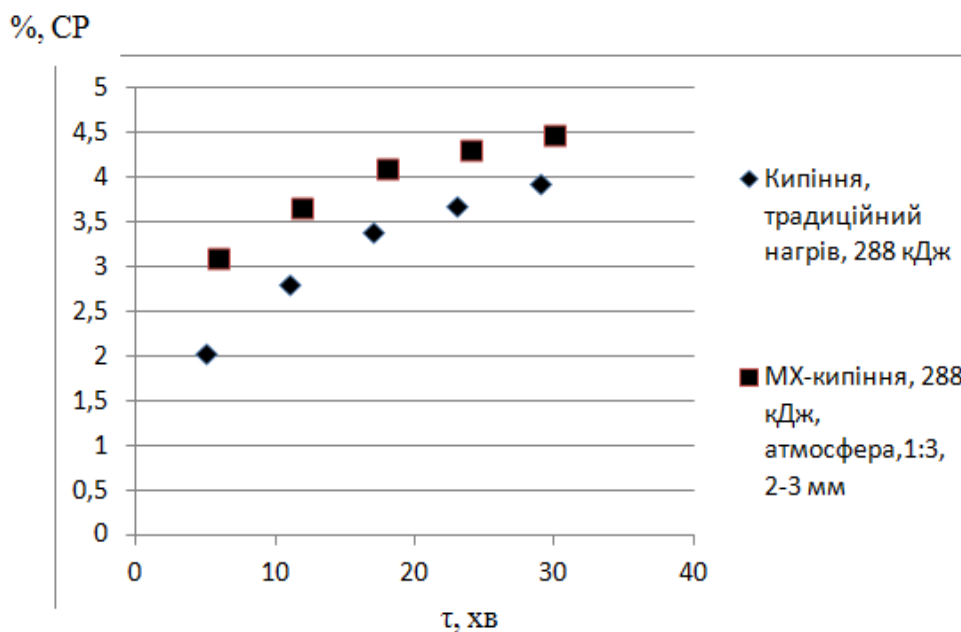
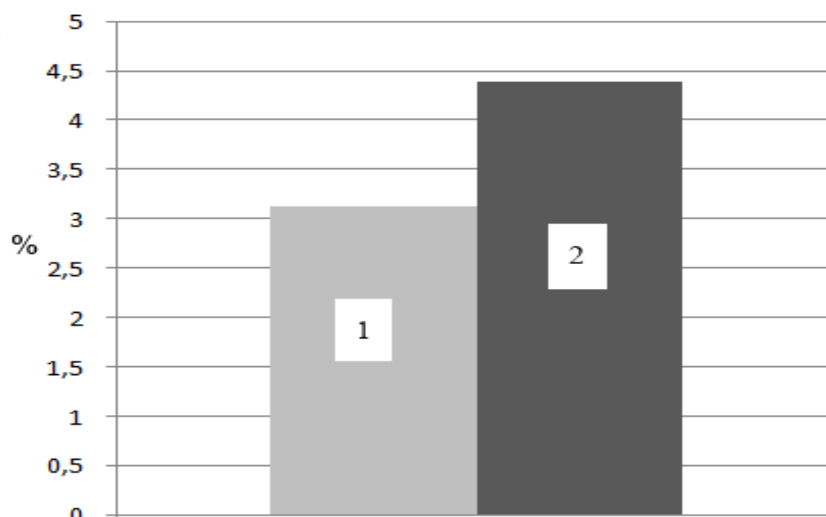


Рис. 2 – Кінетика екстрагування олії з макухи соняшника в залежності від способу енергопідведення

Оскільки в спиртових екстрактах може міститись до 75% спирторозчинних речовин, які не є тригліцеридами жирних кислот [7], проводилось розділення емульсії «спирт-олія» випарюванням та центрифугуванням. Вихід олії визначали у % від вихідної сировини. Результати наведено на рис. 3.

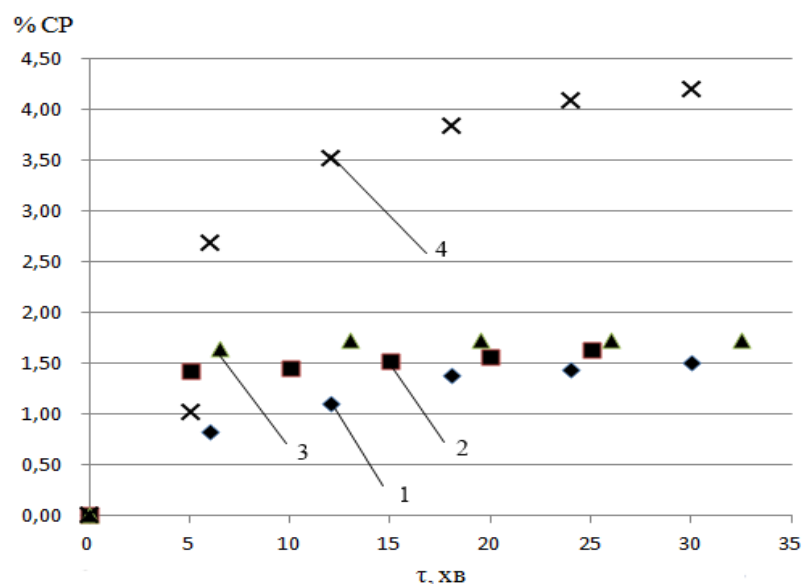


1 – традиційний нагрів; 2 – адресна доставка енергії

Рис. 3 – Вихід олії (у % від вихідної сировини) з макухи соняшника в залежності від способу енергопідведення

Як видно з графіків, застосування адресної доставки збільшує як перехід сухих речовин у екстракт, так і вихід безпосередньо олії.

Вплив температури та гідромеханічного режиму. Збільшення температури інтенсифікує процеси масопереносу, але в режимі кипіння виникає інтенсивна вимушена конвекція, що може суттєво збільшити вихід сухих речовин в екстрагент. Досліди проводились в мікрохвильовому екстракторі в режимі кипіння з фракцією макухи 2...3 мм. Гідромодуль складав 1:3. Кінетичні криві процесу наведено на рис. 4.



1 – 40 °C; 2 – 50 °C; 3 – 70 °C; 4 – кипіння

Рис. 4 – Кінетика екстрагування олії з макухи соняшника в залежності від температури та гідромеханічного режиму

В режимі кипіння інтенсивність масоперенесення та вихід сухих речовин збільшується майже вдвічі. Таким чином, більш доцільним можна вважати екстрагування саме в режимі кипіння.

Вплив кількості підведеної енергії. З одного боку, збільшення питомого підведення енергії збільшує кількість механодифузійних осередків у сировині, але надлишок теплоти, що виділяється, викликає локальні перегріви та термічне пошкодження сировини. В той же час, організація будь-якого технологічного процесу має мету зниження питомих витрат енергії та підвищення енергетичної та економічної ефективності. Дослі-

ди проводились в мікрохвильовому екстракторі в режимі кипіння з фракцією макухи 2...3 мм. Гідромодуль складав 1:3. Вибір енергетичних режимів зумовлено технічними можливостями установки. Кінетичні криві процесу наведено на рис. 5.

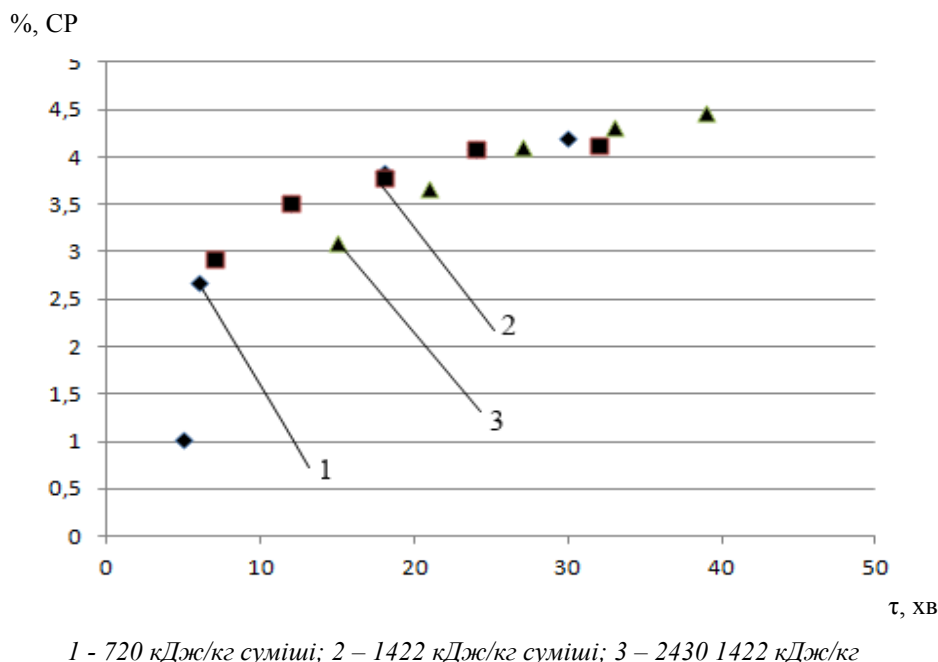


Рис. 5 – Кінетика екстрагування олії з макухи соняшника в залежності від питомих енерговитрат

З кривих видно, що після 20 хвилин обробки суттєвого впливу на кінетику процесу зміна питомого підведення енергії в дослідженому діапазоні не чинить. Також вивчався вихід олії (рис. 6)

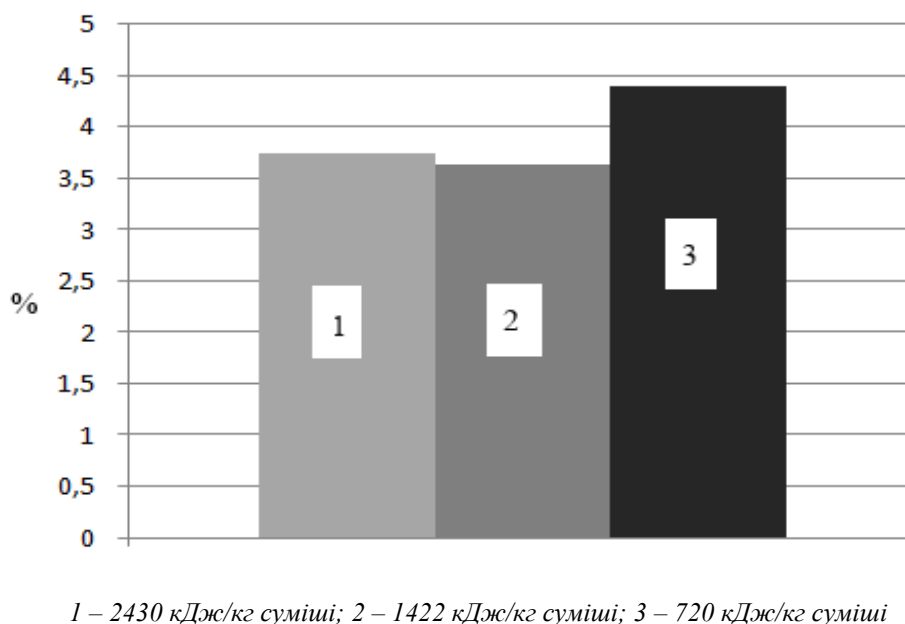


Рис. 6 – Вихід олії (у % від вихідної сировини) з макухи соняшника в залежності від способу енергопідведення

Як видно з діаграми, найбільший вихід олії спостерігався за найменших питомих енерговитрат. В якості пояснення можна зробити припущення, що за меншого енергопідведення сировина зазнавала меншого термічного пошкодження.

Дослідження впливу розміру частинок. Відомо, що чим менший розмір частинок, тим більша поверхня контакту фаз, проте надмірне подрібнення може спричинити закриття частинками мікрокапілярів сировини. Також, занадто дрібні частинки ускладнюють розділення екстракту та твердої фази. Кінетичні криві процесу наведено на рис. 7.

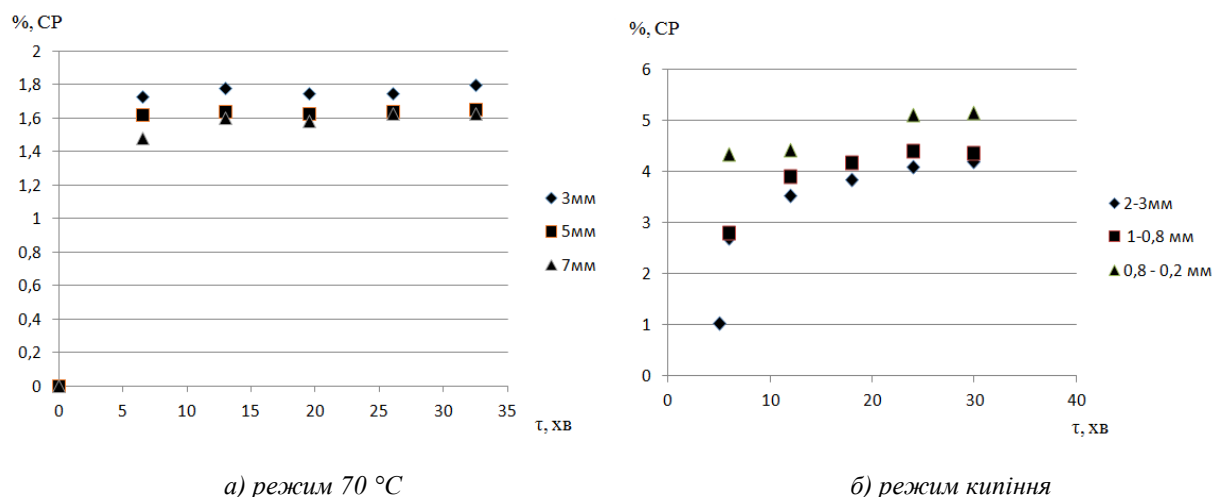


Рис. 7 – Кінетика екстрагування олії з макухи соняшника в залежності від питомих енерговитрат

В дослідженому діапазоні розмірів частинок найбільша інтенсивність масоперенесення спостерігалась при розмірі частинок 0,8...0,2 мм. У фракціях, дрібніших за 2 мм спостерігалась зміна співвідношення подрібнених ядер та лушпиння. У фракції, дрібнішій за 0,2 мм фрагменти лушпиння не спостерігались, відповідно, слід очікувати різницю в хімічному складі фракцій, дрібніших за 2...3 мм.

Фізичні властивості одержаних екстрактів. Всі одержані екстракти були непрозорими, по мірі зниження температури до 20...25 °C, мутність збільшувалась, що вказує на перехід частини розчиненої олії в емульсований стан внаслідок зменшення розчинності за даних температур. Густина складала 827...834 кг/м³. Після концентрування екстракту випаровуванням, встановлено, що при видаленні 80...90% екстрагенту та густині екстракту близько 970 кг/м³ спостерігається його розділення на шари. Верхнім є шар олії. Наступні шари потребують подальшого хімічного аналізу.

Висновки. В результаті проведення серії досліджень кінетики екстрагування олії з макухи соняшника етанолом встановлено залежності виходу екстрактивних речовин та олії від температури, типу конвекції екстрагенту, способу доставки енергії, розміру частинок, питомого енергопідводу. Встановлено, що адресна доставка енергії дозволяє суттєво збільшити вихід олії, при цьому питомі енерговитрати, більші за 720 кДж/кг суміші є недоцільними. Враховуючи наявність олії в екстракті у вигляді емульсії, відкриваються перспективи до відокремлення частини олії від екстрагента гідромеханічними методами та кріоконцентруванням, що дозволяє зменшити витрати енергії на випаровування.

References

1. Shevchenko A., Petrenko O., Helas V. (2024). Stratehichnyi rozvytok vyroshchuvannya soniashnyku v Ukraini [Strategic development of sunflower cultivation in Ukraine] *Economic Bulletin of the Black Sea Littoral*, 5, 133 – 145. <https://doi.org/10.37000/ebbsl.2024.05.11>
2. The production and export of sunflower oil in Ukraine set the second result during the years of Independence. Available at: <https://biz.censor.net/n3510984>
3. Petik, P. F., Hirman, V. V., Mazur, O. V. (2014). Doslidzhennia kinetyky ekstrakuvannya soniashnykovoi makukhy etylovym spyrtom [Study of the kinetics of extraction of sunflower cake with ethyl alcohol], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/6 (72), 13–18.
4. Yegorov, B., Turpurova T., Sharabaeva, E., & Bondar, Y. (2019). Prospects of using by-products of sunflower oil production in the food industry. *Food Science and Technology*, 13(1). <https://doi.org/10.15673/fst.v13i1.1337>
5. Terziiev, S., Ruzhytska, N., Shcherbych, M., & Alkhuri, Yu. (2021). Intensification of the extraction process in food and oilseed productions waste utilization technologies. *Scientific Works*, 85(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2079>
6. Xu, Qingyi & Nakajima, Mitsutoshi & Nabetani, Hiroshi & Iwamoto, Satoshi & Liu, Xinqi. (2001). The effect of ethanol content and emulsifying agent concentration on the stability of vegetable oil–ethanol emulsions. *Journal of Oil & Fat Industries*. 78. 1185-1190. 10.1007/s11745-001-0411-z.
7. Burdo, O., Terziiev, S., Syrotiuk, I., Molchanov, M., & Burdo, A. (2023). The system of technologies of addressed energy delivery to food elements. *Scientific Works*, 87(1), 4-12. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2683>
8. Бурдо, О., Ружицька, Н., Левицький, А., Лапінська, А., Запорожець, Д., & Гуліваті, В. (2023). ОДЕРЖАННЯ РОСЛИННИХ ОЛІЙ МОДИФІКОВАНОГО СКЛАДУ. *Scientific Works*, 87(1), 117-122. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2701>

KINETICS OF OIL EXTRACTION FROM SUNFLOWER OIL CAKE UNDER THE CONDITIONS OF ADDRESSED ENERGY DELIVERY

Zaporozhets D.O., graduate student, Ruzhytska N.V., PhD
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. In current paper the results of studies on the kinetics of oil extraction from sunflower cake are considered. It is known that after pressing, oil remains in the capillary structures of the cake. In order to process raw materials more efficiently, oil residues are extracted with organic solvents. In order to improve quality and environmental safety, non-polar extractants such as hexane or extraction gasolines, which are products of petroleum refining, are gradually being replaced by renewable and less toxic ethanol.

However, there is a problem of low solubility of fatty acids triglycerides in ethanol. Ethanol's effectiveness as an extractant is due to emulsification of oils, not just dissolution. The article proposes to intensify both the mass exchange component of the oil extraction process (extraction) and the hydromechanical component (emulsification) using targeted energy delivery technologies. It is assumed that the mechano-diffusion mechanism under the conditions of the microwave field not only destroys the capillaries of the raw material and intensifies the diffusion processes, but also increases the output of finely dispersed oil droplets into the extractant. Experimental studies of the dependence of oil extraction kinetics on temperature, hydraulic regime, particle size, and specific energy input have been conducted. Attempts were made to hydromechanically separate the oil from the emulsified extract. Targeted energy delivery and cake grinding have been found to increase oil yield. An increase in specific energy consumption in the studied range does not affect the yield of oil, which opens up opportunities to reduce this indicator and further increase the energy efficiency of the process.

Keywords: sunflower cake, microwave extraction, ethanol, sunflower oil.

Список використаної літератури

1. Шевченко А., Петренко О., Гелас В. Стратегічний розвиток вирощування соняшнику в Україні // Економічний вісник Причорномор'я – 2024. - № 5, С. 133 – 145.
2. Виробництво та експорт соняшникової олії в Україні встановили другий результат за роки Незалежності Джерело: <https://biz.censor.net/n3510984>
3. Петік П. Ф. Дослідження кінетики екстрагування соняшникової макухи етиловим спиртом / П. Ф. Петік, В. В. Гірман, О. В. Мазур // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – 6/6(72) – С. 13–18.
4. Yegorov, V., Turpurova T., Sharabaeva, E., & Bondar, Y. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ВИРОБНИЦТВА СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ В КОМБІКОРМОВІЙ ГАЛУЗІ. // *Food Science and Technology*. – 2019. – 13(1). <https://doi.org/10.15673/fst.v13i1.1337>
5. Терзієв, С., Ружицька, Н., Щербич, М., & Альхурі, Ю. Інтенсифікація процесу екстрагування в технологіях утилізації відходів харчових та олійних виробництв. // *Scientific Works*, - 2021. – 85(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2079>
6. Xu, Qingyi & Nakajima, Mitsutoshi & Nabetani, Hiroshi & Iwamoto, Satoshi & Liu, Xinqi. The effect of ethanol content and emulsifying agent concentration on the stability of vegetable oil-ethanol emulsions. // *Journal of Oil & Fat Industries*. - 2001. – 78. 1185-1190. 10.1007/s11745-001-0411-z.
7. Бурдо, О., Терзієв, С., Сиротюк, І., Молчанов, М., & Бурдо, А.. СИСТЕМА ТЕХНОЛОГІЙ АДРЕСНОЇ ДОСТАВКИ ЕНЕРГІЇ ДО ЕЛЕМЕНТІВ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ. // *Scientific Works*, - 2023. – 87(1), С.4 – 12. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2683>
8. Бурдо, О., Ружицька, Н., Левицький, А., Лапінська, А., Запорожець, Д., & Гуліваті, В.. ОДЕРЖАННЯ РОСЛИННИХ ОЛІЙ МОДИФІКОВАНОГО СКЛАДУ // *Scientific Works*, - 2023. – 87(1), С. 117-122. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2701>

Отримано в редакцію 09.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.08.2024
Approved 25.09.2024

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ХЛІБОБУЛОЧНИХ, КОНДИТЕРСЬКИХ, МАКАРОННИХ ВИРОБІВ І ХАРЧОКОНЦЕНТРАТІВ

Солоницька І.В., к. т. н., доцент, Макарова О.В. к. т. н., доцент,
Ганчев С.С. здобувач PhD
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. У статті розглядаються інноваційні підходи до управління якістю хлібобулочних, кондитерських, макаронних виробів і харчоконцентратів. Особлива увага приділяється сучасним технологіям, а саме технологіям «відкладеного випікання», методам контролю якості, що включають аналіз сировини, моніторинг фізико-хімічних показників та оцінку кінцевого продукту. Висвітлено роль автоматизації виробничих процесів та використання штучного інтелекту для оптимізації виробництва. Також розглянуто новітні технології, такі як біотехнології, нанотехнології та цифрові методи контролю, що сприяють покращенню безпеки та якості продукції та виробництва хлібобулочних заморожених напівфабрикатів за технологіями «відкладеного випікання».

Стаття аналізує вплив різних факторів на якість продукції, включаючи технологічні параметри виробництва, контроль процесів бродіння, випікання та зберігання виробів. Розглянуто впровадження автоматизованих систем, які дозволяють здійснювати контроль у режимі реального часу, прогнозувати можливі відхилення та запобігати дефектам.

Окремо акцентовано увагу на використанні алгоритмів машинного навчання та комп'ютерного зору у виявленні дефектів, а також можливості їх інтеграції у сучасні системи управління якістю. Автоматизація виробництва та цифрові технології дозволяють значно підвищити ефективність підприємств, зменшити вплив людського фактора та покращити конкурентоспроможність продукції.

Запропоновані в статті підходи можуть бути застосовані для вдосконалення систем контролю якості на харчових підприємствах, що забезпечить стабільну якість продукції та відповідність сучасним стандартам безпеки.

Ключові слова: Управління якістю хлібобулочних, кондитерських, макаронних виробів, інноваційні технології виробництва хліба, кондитерських виробів, харчові технології, технології «відкладеного випікання».

Вступ

У сучасних умовах забезпечення високої якості харчових продуктів є ключовим завданням харчової промисловості. Споживачі очікують відповідності продукції високим стандартам безпеки та якості, що змушує виробників впроваджувати інноваційні технології у виробничий процес. Дана стаття аналізує сучасні методи управління якістю хлібобулочних, кондитерських та макаронних виробів, зокрема автоматизацію процесів, застосування штучного інтелекту та використання біотехнологій. В Україні технологія виробництва хлібобулочних напівфабрикатів, вироблених за технологіями «відкладеного випікання» щодня набуває поширення та розвитку і являється економічно вигідною та перспективною. Тому саме проблеми забезпечення якості вимагають інноваційних рішень.

Важливість цієї проблеми обумовлена необхідністю дотримання міжнародних стандартів, забезпечення продовольчої безпеки та підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції. Водночас, сучасна харчова промисловість стикається з низкою викликів, таких як нестабільність якості сировини, вплив кліматичних змін, необхідність автоматизації та зменшення впливу людського фактора. Саме тому дослідження, спрямовані на вдосконалення контролю якості харчових продуктів, мають важливе значення як у науковій, так і в практичній площині. [1, 2]

Сучасні методи контролю якості. Традиційні методи контролю якості включають аналіз сировини, моніторинг фізико-хімічних показників та органолептичну оцінку готової продукції. Зокрема, використання сенсорів та автоматизованих систем моніторингу дозволяє здійснювати безперервний контроль параметрів виробництва в реальному часі, що сприяє своєчасному виявленню та усуненню відхилень [3, 4]. Стандарти, такі як HACCP, ISO 22000, BRC та IFS, забезпечують системний підхід до управління якістю [5].

Інноваційні технології контролю якості. Автоматизація виробничих процесів є ключовим фактором підвищення ефективності та якості продукції. Використання сучасного обладнання, оснащеного системами управління на основі штучного інтелекту, дозволяє оптимізувати процеси замішування тіста, випікання та пакування виробів. Зокрема, застосування алгоритмів машинного навчання та комп'ютерного зору сприяє

виявленню дефектів на ранніх стадіях виробництва, що забезпечує високу якість кінцевого продукту. Автоматизація виробничих процесів – застосування сенсорних систем для моніторингу параметрів виробництва в режимі реального часу [6, 7].

Сучасні дослідження спрямовані на розробку нових технологій, які покращують стабільність та якість хлібобулочних виробів. Наприклад, італійські дослідники запропонували інноваційну стратегію, яка полягає у впровадженні нової процедури замішування тіста. Ця процедура передбачає відстрочене додавання висівок та середніх фракцій під час замішування, що покращує якість кінцевого продукту. Використання штучного інтелекту – алгоритми машинного навчання дозволяють прогнозувати відхилення у якості та оптимізувати виробничий процес [8].

Дослідження показують, що використання фітодобавок у виробництві хлібобулочних виробів оздоровчого призначення сприяє підвищенню їхньої харчової цінності та покращенню органолептичних властивостей. Це дозволяє створювати продукти, які не тільки задовольняють смакові потреби споживачів, але й сприяють покращенню їхнього здоров'я. Біотехнології та нанотехнології – використання ферментних препаратів та наночастинок для покращення текстури, терміну придатності та безпеки харчових продуктів [9].

Впровадження інноваційних підходів до управління якістю хлібобулочних, кондитерських та макаронних виробів є необхідною умовою для забезпечення конкурентоспроможності підприємств на сучасному ринку. Сучасні методи контролю якості, автоматизація виробничих процесів, використання інноваційних технологій та фітодобавок дозволяють підвищити ефективність виробництва та забезпечити високу якість продукції, що відповідає зростаючим вимогам споживачів.

Аналіз впливу технологічних параметрів на якість. Важливими факторами є температура, вологість, контроль процесів бродіння та випікання. Недотримання технологічних умов може призвести до дефектів продукції [10].

Впровадження автоматизованих систем контролю. Застосування сучасних систем дозволяє здійснювати моніторинг виробництва в реальному часі, виявляти дефекти на ранніх стадіях та запобігати браку.

Перспективи розвитку інноваційних підходів. Подальше впровадження цифрових технологій, штучного інтелекту та біотехнологій дозволить підвищити ефективність виробництва та конкурентоспроможність харчової продукції [11, 12].

Інноваційні підходи до управління якістю хлібобулочних, кондитерських та макаронних виробів сприяють підвищенню безпеки, покращенню характеристик продукції та оптимізації виробничих процесів. Запропоновані методи можуть бути використані для вдосконалення контролю якості на харчових підприємствах.

Останні дослідження у сфері управління якістю харчових продуктів підтверджують важливість застосування інноваційних підходів. Зокрема, розглядається впровадження автоматизованих систем контролю на основі сенсорних технологій, що дозволяють зменшити вплив людського фактора. У дослідженнях детально проаналізовано застосування штучного інтелекту для оптимізації технологічних процесів та раннього виявлення дефектів продукції. Крім того, вивчено перспективи використання нанотехнологій та ферментних препаратів для підвищення стабільності та безпечності хлібобулочних виробів [13].

Останні дослідження у сфері управління якістю харчових продуктів підтверджують важливість застосування інноваційних підходів.

Зокрема, в дисертації Мартинюка О.А. "Інноваційні технології в управлінській діяльності підприємств в умовах динамічного бізнес-середовища" розглядаються сучасні концепти формування управлінської діяльності та обґрунтовується необхідність впровадження інноваційних технологій управління на підприємствах харчової промисловості.

Крім того, дослідники з Університету Аліканте розробили інноваційний біосенсор, здатний визначати свіжість упакованих харчових продуктів. Цей колориметричний сенсор змінює свій колір залежно від наявності летких азотистих сполук, що виділяються під час розкладання білків. Виготовлений з відходів червоного апельсина та буряка, сенсор переходить від червоного (свіжий продукт) до жовто-зеленого (зіпсований продукт), надаючи візуальну індикацію свіжості. Цей біорозкладний матеріал може зменшити харчові відходи, доповнюючи інформацію про термін придатності продуктів.

Такі дослідження підкреслюють важливість впровадження інноваційних підходів у сфері управління якістю харчових продуктів для забезпечення безпеки та задоволення зростаючих вимог споживачів.

Також, у роботах Коркач Г.В. та Солоницької І.В. розглядається впровадження автоматизованих систем контролю на основі сенсорних технологій, що дозволяють зменшити вплив людського фактора. Дослідження показали, що сенсорні системи можуть забезпечувати безперервний моніторинг фізико-хімічних параметрів продукції в режимі реального часу, що значно підвищує ефективність контролю якості [15].

У дослідженнях, проведених Солоницькою І.В., детально проаналізовано застосування штучного інтелекту для оптимізації технологічних процесів та раннього виявлення дефектів продукції. Використання нейронних мереж дозволяє прогнозувати можливі відхилення у виробничих параметрах, що сприяє своєчасному коригуванню процесів та зменшенню рівня браку. Додатково розглянуто застосування комп'ютерного зору для автоматизованого виявлення дефектів на виробничій лінії.

Крім того, у роботах Новікової О.В. вивчено перспективи використання нанотехнологій та ферментних препаратів для підвищення стабільності та безпечності хлібобулочних виробів. Дослідження довели, що

застосування наночастинок антимікробних агентів у харчових продуктах сприяє збільшенню терміну їх зберігання без втрати якісних показників. Використання ферментів дозволяє покращити текстуру та смакові властивості виробів, а також оптимізувати процес бродіння тіста [16].

Попри значний прогрес у дослідженнях, залишається низка нерозв'язаних питань, зокрема: інтеграція різних технологій у єдину систему управління якістю, розробка методів зниження впливу змін клімату на виробничі процеси, а також впровадження ефективних способів контролю у режимі реального часу. Саме цим аспектам присвячена дана стаття, яка має на меті узагальнити сучасні досягнення та запропонувати нові підходи до вдосконалення управління якістю хлібобулочних, кондитерських та макаронних виробів.

Метою даної статті є аналіз сучасних інноваційних підходів до управління якістю хлібобулочних, кондитерських та макаронних виробів, виявлення основних викликів у цій сфері та запропонування шляхів їх подолання.

Основними завданнями є:

- аналіз традиційних та сучасних методів контролю якості;
- оцінка впровадження автоматизованих систем контролю;
- дослідження можливостей застосування штучного інтелекту та біотехнологій;
- формулювання рекомендацій щодо удосконалення процесів управління якістю.

1. Основи управління якістю в хлібопекарському та кондитерському виробництві

Якість харчових продуктів визначається комплексом фізико-хімічних, органолептичних і мікробіологічних показників. Особливо важливі інноваційні підходи визначення та управління якістю при виробництві заморожених хлібобулочних напівфабрикатів, вироблених за технологіями «відкладеного випікання». Для забезпечення стабільної якості виробів використовуються різні методи контролю, серед яких:

- Аналіз сировини (борошна, дріжджів, цукру, масла тощо);
- Оцінка фізико-хімічних параметрів тіста і готових виробів;
- Контроль вологості, кислотності та підйімальної сили напівфабрикатів.

На рівень якості впливають такі чинники, як технологія замішування тіста, режими бродіння, температурні умови випікання та використання інноваційних харчових добавок. Важливу роль відіграє правильний підбір рецептури, що сприяє отриманню продукції з високими споживчими характеристиками. Якість та розробка системи забезпечення якості на підприємстві, визначається для напівфабрикатів після доведення до готовності, а саме після допікання.

2. Інноваційні технології виробництва хліба та кондитерських виробів

Розвиток харчових технологій спрямований на підвищення якості продукції шляхом застосування сучасного обладнання та вдосконалених виробничих процесів. Серед інноваційних рішень у хлібопекарській і кондитерській галузях можна виділити:

- Використання заквасок нового покоління, що покращують текстуру і смакові якості хліба;
- Автоматизовані системи контролю якості, що дозволяють аналізувати характеристики тіста та випечених виробів у режимі реального часу;
- Нанотехнології та біотехнологічні методи для збереження свіжості продукції.

3. Методи оцінки якості хлібобулочних та кондитерських виробів

Оцінка якості продукції здійснюється за допомогою фізико-хімічних, сенсорних та мікробіологічних методів аналізу. Основними показниками контролю є:

- **Вологість** – визначається висушуванням зразків та аналізом змін маси;
- **Кислотність** – оцінюється шляхом титрування;
- **Органолептичні характеристики** – включають оцінку смаку, кольору, текстури та запаху виробів.

У лабораторних умовах використовують спеціалізоване обладнання, таке як рефрактометри, спектрофотометри та газові хроматографи, що дозволяють детально вивчати якість продукції та прогнозувати її збереження у процесі зберігання.

4. Використання штучного інтелекту та автоматизації в контролі якості

Однією з ключових тенденцій сучасної харчової промисловості є інтеграція цифрових технологій у виробничі процеси. Використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє:

- Аналізувати великі масиви даних щодо параметрів виробництва та якості продукції;
- Виявляти дефекти у виробах за допомогою комп'ютерного зору;
- Прогнозувати можливі відхилення від стандартів якості та запобігати їх появі.

Автоматизація процесів контролю дозволяє зменшити вплив людського фактору, підвищити продуктивність виробництва та покращити конкурентоспроможність підприємств харчової промисловості.

Висновки

Забезпечення високої якості хлібобулочних, кондитерських і макаронних виробів є пріоритетним завданням сучасної харчової промисловості. Інноваційні технології, автоматизація та впровадження цифрових методів контролю сприяють вдосконаленню виробничих процесів та підвищенню безпеки продукції. Використання новітніх методів управління якістю дозволяє задовольняти зростаючі вимоги споживачів та забезпечувати стійкий розвиток підприємств харчової галузі.

Управління якістю у харчовій промисловості є комплексним процесом, що охоплює контроль сировини, оптимізацію виробничих параметрів та впровадження сучасних методів моніторингу. Інноваційні технології, такі як біотехнології, нанотехнології та алгоритми штучного інтелекту, значно покращують якість кінцевого продукту, підвищують ефективність виробництва та забезпечують відповідність продукції сучасним стандартам безпеки [17].

References

1. Iorgachova, K., & Lebedenko, T. (2015). *Bakery Products for Health Purposes with the Use of Phytosupplements*. K-Press.
2. Ovsyannikova, T. (2019). *Development of Technology for Pressed Baker's Yeast Enriched with Iodine and Selenium* [Dissertation Candidate of Technical Sciences].
3. Kroshko O.S. (2010) *Development of Technology for the Production of Flour Mixtures with Increased Nutritional Value* [Dissertation ... Candidate of Technical Sciences]
4. Collection of Scientific Papers of ONTU (2021). Issue 47, Odesa: ONTU,
5. Shved, S., & Elperin, I. (2018). Approaches to Automated Quality Management of Bakery Products. *Bulletin of VNTU*, 1.
6. Innovative Development of the Bakery Industry of Ukraine: Main Directions. (2013). *Economic Innovations*, 20(3 (68)).
7. Economic Innovations. Vol. 20, Issue 3 (68). JEL O32, P42.
8. Informatics, Computing Technology, and Automation. (2018). Part 2. Automation of Food Industry. In Agro.
9. Automation of Food Industry. // In Agro.
10. HACCP System: What You Need to Know? // SkyService POS.
11. Quality Control System for Manufacturing Companies. // SB1.
12. Automation of Quality Control and Visual Inspection. // Machine Vision Ukraine.
13. Martyniuk, O. Innovatsiini tekhnologii v upravlinshii diialnosti pidpriemstv v umovakh dynamichnoho biznes-seredovyshcha. https://card-file.ontu.edu.ua/bitstream/123456789/7458/1/Disser_Martyniuk.pdf.
14. Quality and safety management at bakeries. Available at: https://www.researchgate.net/publication/357947470_Quality_and_safety_management_at_bakeries.
15. *New strategies to improve the stability and quality of bakery products*. Italian Food Tech. Available at: <https://www.italianfoodtech.com/new-strategies-to-improve-the-stability-and-quality-of-bakery-products/>
16. *La Universidad de Alicante desarrolla un biosensor capaz de indicar si un alimento fresco está en buen estado para su consumo*. Cadena SER. Available at: <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2024/09/30/la-universidad-de-alicante-desarrolla-un-biosensor-capaz-de-indicar-si-un-alimento-fresco-esta-en-buen-estado-para-su-consumo-radio-alicante/>
17. *Fitodobavky u vyrobnytstvi khlibobulochnykh vyrobiv ozdorovchoho pryznachennia* Repozytarii Odeskoho natsionalnoho tekhnolohichnoho universytetu. Available at <https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/d04448ac-fe4b-4340-9016-a5f1a73acc35/download>.

INNOVATIVE APPROACHES TO QUALITY MANAGEMENT OF BAKERY, CONFECTIONERY, PASTA PRODUCTS AND FOOD CONCENTRATES

Solonytska I. V., Makarova O.V., Ganchev S.S.
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. The article examines innovative approaches to quality management of bakery, confectionery, and pasta products. Special attention is given to modern quality control methods, including raw material analysis, monitoring of physicochemical parameters, and final product evaluation. The role of automation in production processes and the use of artificial intelligence for production optimization are highlighted. The paper also explores cutting-edge technologies such as biotechnology, nanotechnology, and digital control methods that contribute to improving product safety and quality.

The study analyzes the impact of various factors on product quality, including technological parameters of production, control of fermentation, baking, and storage processes. The implementation of automated systems that enable real-time monitoring, prediction of possible deviations, and defect prevention is discussed.

Particular emphasis is placed on the use of machine learning algorithms and computer vision for defect detection, as well as their integration into modern quality management systems. Automation and digital

technologies significantly enhance enterprise efficiency, reduce human factor influence, and improve product competitiveness.

The approaches proposed in the article can be applied to improve quality control systems in food enterprises, ensuring stable product quality and compliance with modern safety standards.

Keywords: quality management of bakery, confectionery, pasta products, innovative technologies for the production of bread, confectionery products, food technologies, technology of "the postponed baking".

Список використаної літератури

1. Iorgachova K.G., Lebedenko T.Ye. Bakery Products for Health Purposes with the Use of Phytosupplements: Monograph. – Kyiv: K-Press, 2015. – 464 p.
2. Ovsyannikova T.O. Development of Technology for Pressed Baker's Yeast Enriched with Iodine and Selenium: Dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 03.00.20. – Kharkiv, 2019. – 150 p.
3. Kroshko O.S. Development of Technology for the Production of Flour Mixtures with Increased Nutritional Value: Dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.18.01. – Kyiv, 2010. – 200 p.
4. Collection of Scientific Papers of ONTU. Issue 47. – Odesa: ONTU, 2021. – 300 p.
5. Shved S.M., Elperin I.V. Approaches to Automated Quality Management of Bakery Products. // Bulletin of VNTU. – 2018. – No. 1.
6. Economic Innovations. Vol. 20, Issue 3 (68). JEL O32, P42.
7. Innovative Development of the Bakery Industry of Ukraine: Main Directions. // Economic Innovations. – 2013. – Vol. 20, Issue 3 (68).
8. Informatics, Computing Technology, and Automation. – 2018. – Part 2. Automation of Food Industry. // InAgro.
9. Automation of Food Industry. // InAgro.
10. HACCP System: What You Need to Know? // SkyService POS.
11. Quality Control System for Manufacturing Companies. // SB1.
12. Automation of Quality Control and Visual Inspection. // Machine Vision Ukraine.
13. Мартинюк О.А. Інноваційні технології в управлінській діяльності підприємств в умовах динамічного бізнес-середовища. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://card-file.ontu.edu.ua/bitstream/123456789/7458/1/Disser_Martyniuk.pdf.
14. Quality and safety management at bakeries // ResearchGate. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/357947470_Quality_and_safety_management_at_bakeries.
15. New strategies to improve the stability and quality of bakery products // Italian Food Tech. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.italianfoodtech.com/new-strategies-to-improve-the-stability-and-quality-of-bakery-products/>.
16. La Universidad de Alicante desarrolla un biosensor capaz de indicar si un alimento fresco está en buen estado para su consumo // Cadena SER. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2024/09/30/la-universidad-de-alicante-desarrolla-un-biosensor-capaz-de-indicar-si-un-alimento-fresco-esta-en-buen-estado-para-su-consumo-radio-alicante/>.
17. Фітодобавки у виробництві хлібобулочних виробів оздоровчого призначення // Репозитарій Одеського національного технологічного університету. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/d04448ac-fe4b-4340-9016-a5f1a73acc35/download>.

Отримано в редакцію 11.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 11.08.2024
Approved 25.09.2024

ТЕРМОСТАБІЛЬНИЙ ЗАВАРНИЙ КРЕМ НА ОСНОВІ РЕЗИСТЕНТНОГО КРОХМАЛЮ З ПОДОВЖЕНИМ ТЕРМІНОМ ЗБЕРІГАННЯ

Капустян А.І. д.т.н., професор, Доценко С.С., магістр, Доценко Н.В., к.т.н., доцент, Науменко К.І., к.т.н., доцент, Гураль Л.С., к.т.н., доцент, Лисюк В.М., к.т.н., доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Обґрунтовано використання резистентних крохмалів(РК) та комбінації консервантів для виробництва термостабільних заварних кремів подовженого терміну зберігання. Надано характеристику нутрієнтного складу досліджуваних зразків РК. Встановлено, що вміст легкогідролізованих полісахаридів (ЛГП) у складі Зразків 1 та 2 складає близько 38–49%, Зразків 3 та 4 – 82–88%. Наявність достатньо великої кількості важкогідролізованих полісахаридів (ВГП) у складі РК Зразків 1 та 2 можна пояснити типом крохмалю (РК2, РК3), в яких ланки амілози достатньо жорстко упаковані (кристалічна структура) через генетичні особливості субстратів для отримання крохмалів, чи внаслідок ретроградних змін внаслідок модифікації. Найбільш схильними до перетравлюваності є вуглеводи Зразків 1 та 2, оскільки вони містять достатньо велику кількість ЛГП, представлених крохмалем. Перетравлюваність Зразків 3 та 4 є достатньо низькою, не дивлячись на те що вуглеводна складова представлена переважно ЛГП, що, ймовірно, можна пояснити достатньо глибокою хімічною модифікацією даних об'єктів. Для використання у рецептурі термостабільних заварних кремів рекомендовано РК «PURITY™ 87», оскільки зразки з даним видом РК характеризуються найліпшою консистенцією (при дозуванні 80 г на 500 г крему). Порівняльне оцінювання заварних кремів дозволило констатувати, що найліпшими органолептичними характеристиками володіють натуральний (класичний) заварний крем та крем на основі РК «PURITY™ 87». Зварний крем на основі РК «PURITY™ 87» характеризується гарною консистенцією як до, так і після випікання у складі тістових виробів, на відміну від інших дослідних зразків, отже, пропонується рецептура дозволяє отримати термостабільний заварний крем. Результати вивчення динаміки рН, титрованої кислотності та мікробіологічних критеріїв при зберіганні заварних кремів з консервантами показали, що найбільш вираженою консервувальною дією володіє суміш консервантів калію сорбату та натрію бензоату у дозуванні по 500 мг на 1 кг продукту. Згідно результатів досліджень заварний крем може зберігатися до 5 днів при температурі 12–15°C без ризику мікробіологічного псування. Саме такі температурні режими відповідають умовам зберігання випечених тістових виробів у ритейлах, кав'ярнях та інших закладах громадського харчування. Проведені дослідження дозволили обґрунтувати блок-схему технологічного процесу виробництва заварного термостабільного крему подовженого терміну зберігання на основі резистентного крохмалю, обґрунтувати критичні точки контролю та операційні програми передумови.

Ключові слова: заварний крем, термостабільність, резистентний крохмаль, консерванти, термін зберігання, технологія, критичні контрольні точки.

Вступ. Зварний крем – класична складова деяких кондитерських виробів, володіє відмінними смаковими та поживними характеристиками. Проблемаю використання заварного крему у якості начинки тістових напівпродуктів є втрата його функціонально-технологічних властивостей, а саме пластичності та консистенції, при термічному обробленні виробів. Для стабілізації характерної текстури заварних кремів доцільним є використання у їхній рецептурі термостабільних гідрокоолідів, в тому числі модифікованих крохмалів, камеді та ін.. Представляє інтерес вивчення можливості використання резистентних крохмалів у якості структуроутворювальних агентів при виготовленні заварних кремів та дослідження їхньої поведінки при додатковому термообробленні. При розробленні удосконаленої рецептури заварного крему доцільним є пошук шляхів подовження терміну його зберігання, оскільки у контексті забезпечення продовольчої безпеки, мінімізації втрат харчових ресурсів та зниження негативного впливу довкілля дана проблема є глобальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Креми є невід'ємною частиною багатьох кондитерських виробів. Зварні креми характеризуються підвищеним вмістом вологи в порівнянні з іншими типами кремів. У заварному кремі борошно перебуває в оклеїстеризованому стані, що в поєднанні з яйцями та молоком створює сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів. Такі креми швидко втрачають якість через активність молочнокислих бактерій, кишкової палички та інших мікробів. Внаслідок цього термін зберігання виробів, що містять заварний крем, не перевищує 6 годин [1]. Зварний крем є неньютонівською рідиною, в'язкість і густина якої можуть бути збільшені шляхом подовження часу нагрівання та підвищення кінцевої температури приготування. Основними компонентами заварного крему виступають пшеничне борошно, яйця та молоко [1]. Для виготовлення заварних кремів у промислових масштабах використовують суміші гідрокоолідів, найчастіше модифікованих крохмалів, з метою стабілізації їхньої текстури.

Сьогодні значного поширення набуває використання резистентних крохмалів у якості рецептурних інгредієнтів харчових систем, оскільки вони характеризуються високими функціонально-технологічними та фізіологічними властивостями.

Раніше вважалося, що всі крохмалі піддаються ферментативному перетравленню в травній системі, перш ніж остаточно всмоктуються в кровообіг. Однак, було виявлено унікальний тип крохмалю, який не перетравлюється і не всмоктується в тонкому кишківнику [3-8].

У 1982 році Englyst та ін. [3] вперше назвали цей крохмаль «резистентним крохмалем» (РК). У 1991 році Європейська програма узгоджених дій підтвердила, що РК не перетравлюється і не всмоктується в тонкому кишечнику. Натомість він потрапляє до товстої кишки, де в різній мірі ферментується кишковими мікробами [4].

У 1992 році ФАО Організації Об'єднаних Націй визнала РК загальним терміном для позначення крохмалів та продуктів розщеплення крохмалю, які не можуть перетравлюватися в тонкому кишечнику у здорових людей [3].

На додаток до природних РК, які були спочатку відкритого Енглістом, різні типи РК були синтезовані шляхом штучної модифікації крохмалю [3-4].

Отже, зазвичай крохмаль розщеплюється до глюкози за допомогою травних ферментів у шлунково-кишковому тракті і всмоктується у тонкому кишківнику, тоді як РК має властивості, подібні до харчових волокон. Резистентний крохмаль (РК) можна визначити як тип крохмалю, який ферментується мікрофлорою товстого кишківника, внаслідок чого синтезуються коротколанцюгові жирні кислоти, такі як ацетат, бутират і пропіонат. Стійкість до травлення може бути пов'язана зі структурою крохмалю, яка ускладнює його доступ до дії травних ферментів. Прикладами стійких продуктів, багатих на крохмаль, є незрілі банани, бобові, цільні зерна, горіхи, а також готові та охолоджені крохмалисті страви, такі як рис і картопля.

РК поділяють на п'ять класів залежно від джерела, структури та схильності до перетравлення [5-6].

РК 1 – це фізично інкапсульований крохмаль, в якому крохмальні гранули обгорнуті стінками рослинних клітин або білками, утворюючи фізичний бар'єр, що перешкоджає його контакту з травними ферментами, тому він не може перетравлюватися і всмоктуватися в тонкому кишківнику. Цей тип крохмалю міститься в основному в таких продуктах, як зернові та бобові з недостатнім подрібненням і грубими частинками. Коли крохмаль готують у вигляді цільного зерна, клітинні стінки насіння бобових і білки зерна перешкоджають проникненню води в крохмаль, і крохмаль не може отримати достатню кількість води для набухання і желатинізації, що ускладнює його з'єднання з амілазою для гідролізу. Зміни в методі обробки можуть вплинути на його стійкість і полегшити засвоєння.

РК 2 – це гранула РК, яка має компакту молекулярну структуру з кристалічними вкрапленнями типу В або С, що робить її недоступною для амілази. Цей тип РК в основному міститься в бананах, сирому рисі, сирому борошні та картоплі, а також у кукурудзяному крохмалі з високим вмістом амілози. Такі методи оброблення, як варіння та подрібнення, можуть посилити дію травних ферментів і зменшити вміст РК. Більшість крохмалю втрачає кристалічну структуру типу В або С внаслідок желатинізації після варіння і перетворюється на крохмаль, що швидко перетравлюється.

РК 3 – це зістарений крохмаль, також відомий як ретроградований крохмаль, який є найпоширенішим типом РК. Він утворюється внаслідок старіння та регенерації амілози під час переробки харчових продуктів. В умовах заморожування крохмаль зазнає ретроградації, і довгі ланцюги молекул амілози та амілопектину рекомбінують, утворюючи подвійні спіральні полімери, з'єднані водневими зв'язками, утворюючи короткі лінійні кристали з міцною молекулярною структурою, які ускладнюють розщеплення амілазою в шлунково-кишковому тракті. Витриманий крохмаль має хорошу термостабільність, низьку водоутримувальну здатність і кращі смакові якості, ніж традиційні харчові волокна. Як допоміжна сировина, він мало впливає на колір і смак їжі, а також на вихідні поживні елементи під час процесів приготування та нагрівання, що робить його новим типом харчового інгредієнта з широкими перспективами застосування.

РК 4 – це хімічно модифікований крохмаль, який утворюється шляхом введення нових хімічних груп до природного крохмалю. Серед таких модифікацій – етерифікація, фосфорилування, етилована естерифікація або γ -опромінення, які приводять до зміни молекулярної структури та фізико-хімічних властивостей крохмалю, запобігаючи адсорбції амілази або утворенню поперечних зв'язків. Найпоширенішими модифікованими крохмалю є термоденатурований крохмаль, зшитий крохмаль, ацетилкрохмаль та фосфорильований крохмаль. Модифіковані крохмалі мають текстурні властивості, придатні для різноманітної харчової переробки; наприклад, ацетильований крохмаль за низьких температур стає желатиновим, що робить його ідеальним для додавання в підливи, начинки для пирогів і заправки для салатів; фосфорильований крохмаль має хорошу стійкість до заморожування-розморожування і часто використовується в заморожених продуктах; а зшитий крохмаль часто використовується як згущувач у консервованих продуктах.

РК5 – це амілозо-ліпідний комплекс, утворений шляхом поєднання амілози з жирними кислотами або жирними спиртами. РК5 зазвичай має V-подібну кристалічну структуру, і його унікальна кристалічна структура зменшує площу контакту між гранулами крохмалю та травними ферментами, що робить його неперетравлюваним. Такі комплекси часто зустрічаються в нативних крохмалю, таких як зернові, соя та кукурудза, і їх вміст може бути збільшений за допомогою високої температури, їх можна приготувати шляхом додаван-

ня ліпідів в лабораторних умовах. РК5 має високу температуру желатинізації та сильну термостабільність і схильний до ретроградації.

Як натуральний інгредієнт, РК може мати широке застосування в харчовій та медичній промисловості. РК можна використовувати як харчові добавки, враховуючи їхні функціонально-технологічні властивості, а саме вплив на органолептику продукту, високу водозв'язувальну та водоутримувальну здатність. Деякі РК також здатні підвищувати хрусткість і збільшення об'єму, покращуючи текстуру кінцевого продукту. Приклади застосування РК у різних видах харчових продуктів та їхні очікувані фізіологічні ефекти наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Застосування резистентних крохмалів у різних харчових продуктах та їх переваги

Застосування	Харчові продукти	Тип РК	Переваги	Джерело
Хлібо-булочні вироби	Хліб, здоба, печиво, тістечка, торти	РК2, РК3, РК4	Покращена текстура, підвищений вміст харчових волокон, збільшений термін зберігання, знижений глікемічний індекс продуктів.	[6-7]
Макарони та локшина	Спагеті, рис локшина	РК3, РК4	Зниження глікемічного індексу, покращення здоров'я кишечника, збільшення нерозчинних харчових волокон, посилення насичення.	[3-13]
Снеки	Чіпси, сухарики	РК2, РК3	Знижена калорійність, багато клітковини, поживні речовини, низький вміст солі та цукру, запобігає неінфекційним захворюванням, підходяща альтернатива для людей з непереносимістю глютену, покращена засвоюваність.	[13]
Молочні продукти	Йогурт, сир, морозиво	РК2, РК4	Пребіотичні ефекти, підвищена вершковість, підвищений рівень заліза та клітковини, підвищена в'язкість та сенсорні властивості.	[6,8]
М'ясні продукти	Ковбаси, фрикадельки	РК4, РК5	Покращена текстура, заміна жиру та підвищений вміст клітковини, діє як пребіотик.	[14,15]
Сніданки	Крупи, кукурудзяні пластівці, гранола	РК3, РК4	Вищий вміст клітковини, нижча глікемічна відповідь, знижений ризик раку товстої кишки, ішемічної хвороби серця	[16]
Напої	Смузі, заміники їжі	РК2, РК3	Покращене насичення, пребіотична дія, нижчий глікемічний індекс, корисний для здоров'я кишечника, регулює гомеостаз глюкози.	[17]
Безглютенові продукти	Безглютеновий хліб, корж для піци, локшина	РК2, РК3	Покращена текстура, підвищений вміст харчових волокон, кращий поживний профіль, нижчий ризик хронічних дегенеративних захворювань, низький глікемічний індекс та покращення здоров'я кишечника.	[18-20]
Кондитерські вироби	Шоколад, цукерки	РК2, РК4	Зменшений вміст цукру, нижчий глікемічний індекс, багатий на клітковину, з високим вмістом антиоксидантів	[19-21]

Таким чином, РК має ряд фізіологічних ефектів, оскільки він не перетравлюється в тонкому кишківнику. РК може проявляти властивості пребіотиків, сприяючи зростанню пробіотиків у кишківнику. У результаті вживання РК покращується травлення, імунна система і, зрештою, здоров'я кишківника. Це корисно для полегшення симптомів запорів та синдрому подразненого кишківника.

Як дієтична добавка, або функціональний харчовий інгредієнт РК може сприяти контролю ваги тіла і зтримувати стрибки цукру в крові, забезпечуючи при цьому інші фізіологічні переваги [3,4]. Відповідно, його можна використовувати для розробки продуктів харчування для спеціальних медичних цілей. РК може надати певні переваги для профілактики та лікування хронічних захворювань, таких як діабет, ожиріння та гіперліпідемія. Вплив РК на здоров'я досліджується як на тваринах, так і на людях, а його фізіологічні механізми вивчаються на молекулярному рівні в клітинних моделях [6]. Крім того, виробництво коротколанцюгових жирних кислот як продукту ферментації стійкого крохмалю в товстому кишківнику може знизити ризик розвитку хронічних захворювань, таких як рак товстої кишки, завдяки своїй протизапальній дії. Резистентний крохмаль сприяє засвоєнню мінералів, в основному кальцію і магнію, які корисні для здоров'я кісток. РК може покращити здоров'я серцево-судинної системи завдяки своїй здатності знижувати рівень холестерину. Люди, які додають РК до свого раціону, можуть скористатися широким спектром переваг для загального благополуччя [7].

У літературі відсутні свідчення використання резистентних крохмалів у виробництві термостабільних заварних кремів, тому метою роботи було обґрунтування рецептури, послідовності технологічних операцій виробництва термостабільного заварного крему подовженого терміну зберігання на основі резистентного крохмалю.

Завдання роботи:

надати характеристику нутрієнтного складу РК, їхньої водоутримувальної здатності та перетравлювано-

сті;

обґрунтувати тип та кількість резистентного крохмалю як ефективного структуроутворювача у складі заварного крему, дослідити поведінку крему при додатковому термообробленні;

обґрунтувати дозування консерванту у складі заварного крему шляхом мікробіологічних досліджень;

обґрунтувати блок-схему технологічного процесу виробництва заварного крему та критичні контрольні точки.

Матеріали та методи досліджень. Для досліджень використовували наступні зразки РК: Зразок 1 – резистентний крохмаль типу РК 2 «HI-MAIZE® 260», виробник Ingredion EMEA Company. Натуральний високоамілозний кукурудзяний крохмаль з високим вмістом харчових волокон; Зразок 2 резистентний крохмаль типу РК 3 «NOVELOSE® 330», виробник Ingredion EMEA Company; Зразок 3 – резистентний крохмаль типу РК 4 «VERSAFIBER™ 285», виробник Ingredion EMEA Company, розчинна у холодній воді кукурудзяна клітковина; Зразок 4 – резистентний крохмаль типу РК 4 «PURITY™ 87», виробник Ingredion EMEA Company, хімічно модифікований харчовий крохмаль з тапіоки, харчова добавка Е 1442, відповідає вимогам Регламенту (ЄС) 1333/2008 та Регламенту (ЄС) 231/2012.

Для приготування дослідних зразків заварних кремів використовували наступну сировину: молоко коров'яче пастеризоване ТМ «Селянське», меланж яєчний, цукор білий кристалічний ТМ «Diamant», борошно пшеничне вищого сорту ТМ «Богумила», масло солодковершкове 82,5% ТМ «Молокія», ванілін ТМ «Мрія», суха суміш для заварного крему Cremuso ТМ «Puratos» (склад: пудра цукрова, крохмаль модифікований картопляний Е1414, суха молочна сироватка, молочний білок, жир рослинний рафінований (кокосовий), крохмаль кукурудзяний модифікований; стабілізатор пірофосфат тетранатрію Е450, трифосфат натрію Е451, фосфат натрію Е 339, сульфат кальцію Е516, агент проти грудкування; діоксид кремнію Е551, загущувач: альгінат натрію Е401, ароматизатори: ванілін, вершковий, барвник: бета-каротин Е160а), сорбат калію Е202 ТМ «Клебріг», бензоат натрію Е211 ТМ «MyChem».

Характеристика резистентних крохмалів. Вміст жиру визначали методом Сокслета згідно ДСТУ ISO 7302:2003 «Зерно і зернові продукти. Визначення загального вмісту жиру (ISO 7302:1982, IDT)», вміст білка – методом К'ельдаля згідно ДСТУ 8076:2015 «Продукти білкові рослинного походження. Макухи та шроті. Визначення вмісту розчинного протеїну титриметричним методом К'ельдаля».

Визначення легкогідролізованих полісахаридів. Наважку досліджуваного зразка поміщали у колбу і додавали розчин HCl з масовою часткою 2%, гідромодуль 10. Колбу з підключеним зворотним холодильником ставили на киплячу водяну баню на чотири години, охолоджували. Надосадову рідину відділяли від осаду центрифугуванням, визначали в ній вміст редукувальних речовин методом Хагедорна-Йенсена.

Визначення вмісту редукувальних речовин за методом Хагедорна-Йенсена. В кожну з чотирьох пробірок вносили по 2 см³ розчину K₃Fe(CN)₆, в три з них вносили по 0,5 см³ отриманого гідролізату, четверта пробірка – контроль. Пробірки поміщали на киплячу водяну баню на 15 хвилин. Після охолодження в кожну пробірку вносили по 3 см³ розчину KI·ZnSO₄, 2 см³ оцтової кислоти з масовою часткою 3% і 2–3 краплі розчину крохмалю з масовою часткою 1%, в якості індикатора і титрували 0,005 н розчином натрій гіпосульфідом до зникнення забарвлення.

Вміст цукрів розраховували за формулою 1:

$$X = \frac{a \times V \times 100}{1000 \times b \times g}, \% \quad (1)$$

де а – маса глюкози знайдена за таблицею (додаток 2), мг

V – загальний об'єм досліджуваного гідролізату, см³

b – об'єм гідролізату, взятого на досвід, см³

g – маса наважки, взятої на гідроліз, мг

Визначення важкогідролізованих полісахаридів (ВГП). Твердий залишок після гідролізу легкогідролізованих полісахаридів висушували при температурі не вище 50оС і зважували, переносили в колбу і заливали 10 кратним об'ємом розчином H₂SO₄. Отриману суміш ретельно перемішували протягом двох з половиною годин, так щоб наважка практично повністю розчинилась у кислоті.

Після розчинення в колбу додавали певний об'єм дистильованої води і ставили на киплячу водяну баню з підключеним зворотним холодильником на п'ять годин. Потім розчин охолоджували і далі дослідження проводять за методом Хагедорна-Йенсена.

Твердий залишок фільтрували через попередньо висушений до постійної маси фільтр Шотта (скляний пористий фільтр №1). Промивали залишок гарячою водою до нейтральної реакції. Сушили залишок до постійної маси при t=105°С.

Маса залишку після гідролізу важкогідролізованих полісахаридів розраховують за формулою 2 (в перерахунку на суху речовину):

$$X = \frac{a \times 100 \times 100}{g \times (100 - w)}, \% \quad (2)$$

де а – маса отриманого залишку в г.

g – наважка сировини в г;

w – вологість сировини в %

Визначення перетравлюваності вуглеводів РК. 20%-вий розчин РК у хлороводневій кислоті (рН=1,2–1,5), інкубують при 37°C протягом 60 хв, після чого суміш нейтралізують, доводять значення рН до 7,5 одиниць, вносять ферментний препарат «Панкреатин», після чого продовжують інкубацію суміші при 37°C протягом 180 хв, періодично її перемішуючи. Відбір проб для визначення вмісту редукувальних цукрів проводили через кожні 30 хв. Визначення вмісту редукувальних речовин у реакційній суміші проводили за допомогою методу Хагедорна-Йенсена.

Перетравлюваність харчових волокон рахували за формулою 3:

$$П = 100 - \frac{(C_{ЛГП} + C_{ВГП}) - C_{ЦФ}}{C_{ЛГП} + C_{ВГП}} \times 100, \% \quad (3)$$

де СЛГП – вміст легкогідролізованих полісахаридів, %;

СВГП – вміст важкогідролізованих полісахаридів, %;

СЦФ – вміст редукуючих цукрів після ферментації, %.

Визначення водоутримувальної здатності (ВУЗ) РК. У центрифужні пробірки зважували 2 г харчових волокон з точністю до 0,01г, додавали дистильовану воду у співвідношенні 1:5(50). Пробірки поміщали у термостат і витримували при 37°C 2 години. Потім центрифугували при 1500 хв-1 протягом 15 хвилин. Надосадову рідину обережно видаляли, витримають центрифужні пробірки під кутом 45° 2–3 хвилини. Зважували вміст пробірки і розраховували водоутримувальну здатність (у грамах води на 1грам харчових волокон) за формулою 4:

$$ВУЗ = (M - M_1) / M_1, \quad (4)$$

де М – маса гідратованих харчових волокон, г;

М1 – маса сухих харчових волокон, г.

Процедура приготування контрольних та дослідних зразків кремів. У роботі у якості контрольного зразка використовували заварний крем, який готували за класичною рецептурою (табл. 2), у якості дослідних зразків готували крем заварний на основі суміші ТМ «Puratos» (табл. 3) та крем, в якому борошно із класичної рецептури замінювали на резистентний крохмаль (табл. 4). Для оцінювання органолептичних, в тому числі текстурних характеристик дослідних зразків заварних кремів розроблено критерії оцінювання за бальною шкалою (табл. 5).

Таблиця 2

Рецептура заварного крему з натуральних інгредієнтів

Інгредієнти	Вміст інгредієнтів, г
Молоко коров'яче	500
Яєчний меланж	80
Цукор	200
Борошно пшеничне	50
Масло вершкове	140
Ванілін	0,6
Вихід продукту	1000

Таблиця 3

Рецептура заварного крему з суміші ТМ «Puratos»

Інгредієнти	Вміст інгредієнтів, г
Вода питна	380
Молоко коров'яче	380
Суміш	240
Ванілін	1,2
Вихід продукту	1000

Таблиця 4

Рецептура дослідних зразків заварного крему з резистентними крохмалю

№ зразка	Вміст інгредієнтів, г								
	Крохмаль «PURITY™ 87»	Крохмаль «VERSAFIBER™ 285»	Крохмаль «NOVELOSE® 330»	Крохмаль «HIMAIZE® 260»	Молоко	Меланж	Цукор	Масло	Ванілін
1	50				530	50	200	140	0,6
2	80				500	50	200	140	0,6
3	100				480	50	200	140	0,6
4		50			530	50	200	140	0,6
5		80			500	50	200	140	0,6
6		100			480	50	200	140	0,6
7			50		530	50	200	140	0,6
8			80		500	50	200	140	0,6
9			100		480	50	200	140	0,6
10				50	530	50	200	140	0,6
11				80	500	50	200	140	0,6
12				100	480	50	200	140	0,6

Таблиця 5

Критерії оцінювання органолептичних характеристик заварних кремів за бальною шкалою

Показник	Балова шкала				
	5	4	3	2	1
Консистенція	Однорідна, гладка, без грудочок, гарно тримає форму	Однорідна, гладка, поодинокі грудочки можливі маленькі тріщини	Однорідна, багато грудочок, наявне невелике розтікання крему	Не однорідна, крем не тримає форму	Не однорідна, розшарований крем, не придатний до використання
Смак	Виражений, вершково-молочний, притаманний даному виду виробів, без сторонніх присмаків	Притаманний даному виробу, слабо виражений вершково-молочний смак	Ледве відчутний вершково-молочний смак	Сторонній крохмальний присмак	Сторонній крохмальний присмак з відчутною гіркотою
Колір	Кремово-жовтий	Жовтий	Блідий	З сірим підтоном	Сірий
Аромат	Яскраво виражений молочний та ванільний аромат, без сторонніх ароматів	Молочний та ванільний аромат, без сторонніх ароматів,	Ледве відчутний молочний та ванільний аромат,	Присутній кислуватий аромат, неприємний	Яскравий кислий та гіркий аромат

Дозування консервантів здійснювали згідно даних, наведених в табл. 6.

Мікробіологічні критерії контрольних і дослідних зразків заварних кремів визначали за допомогою стандартних методик: ДСТУ IDF 122C:2003 Молоко і молочні продукти. Підготовка проб і розведень для мікробіологічного дослідження; ДСТУ 8446:2015 Продукти харчові. Методи визначення кількості мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів; ГОСТ 30518-97 Продукти харчові. Методи виявлення та визначення кількості бактерій групи кишкових паличок (коліформних бактерій); ДСТУ EN 12824:2004 Мікробіологія харчових продуктів та кормів для тварин. Горизонтальний метод виявлення *Salmonella*; ДСТУ EN ISO 6888-1:2022 Мікробіологія харчового ланцюга. Горизонтальний метод підрахунку коагулазопозитивних стафілококів (*Staphylococcus aureus* та інших видів). Частина 1. Метод із використанням агаризованого середовища Берда - Паркера (EN ISO 6888-1:2021, IDT; ISO 6888-1:2021).

Усі досліді проводили у трикратній повторюваності. Для всіх тестів за рівень статистичної значущості прийнято значення $p \leq 0,05$. Отримані результати дослідження опрацьовані з використанням пакета програми Microsoft Excel.

Таблиця 6

Дозування консервантів у дослідних зразках кремів

№ зразка	Крем із су-міші, г	Крем натуральний, г	Крем з модифікованим крохмалем, г	Калію сорбат, г	Натрію бензоат, г
1	500	-		-	-
2	500	-		0,5	-
3	500	-		1	-
4	500	-		0,25	0,25
5	500	-		0,5	0,5
6	-	500		-	-
7	-	500		0,5	-
8	-	500		1	-
9	-	500		0,25	0,25
10	-	500		0,5	0,5
11	-	-	500	-	-
12	-	-	500	0,5	-
13	-	-	500	1	-
14	-	-	500	0,25	0,25
15	-	-	500	0,5	0,5

Результати досліджень. На першому етапі досліджень вивчали фізико-хімічні характеристики дослідних зразків стійких крохмалів. У табл. 7 наведено їхній нутрієнтний склад.

Таблиця 7

Характеристика нутрієнтного складу крохмалів, $n=3$, $p \leq 0,05$

Показник	HI-MAIZE® 260 Зразок 1	NOVELOSE® 330 Зразок 2	VERSAFIBE™ 285 Зразок 3	PURITY™ 87 Зразок 4
ЛГП, г/100 г	40,6	49,8	82,0	87,9
ВГП, г/100 г	48,0	38,0	11,3	0,0
Білок, г/100 г	0,6	0,5	0,1	0,1
Жири, г/100 г	0,8	1,0	0,1	0,0

Як видно з даних таблиці, нутрієнтний склад крохмалів дещо відрізняється. Вміст ЛГП у складі Зразків 1 та 2 $\approx 38\text{--}49\%$. У складі резистентних крохмалів ЛГП, ймовірно, представлено крохмалем, що піддається гідролізу 2%-ю сульфатною кислотою, а отже його хімічна структура не є достатньо жорсткою, аби протистояти дії травних ферментів. Наявність достатньо великої кількості ВГП у складі резистентних крохмалів (Зразок 1, 2) можна пояснити типом крохмалю (РК2, РК3), в яких ланки амілози достатньо жорстко упаковані (кристалічна структура) через генетичні особливості субстратів для отримання крохмалів, чи внаслідок ретроградних змін внаслідок модифікації. Щодо вмісту білка, то в крохмалях він майже відсутній, оскільки технологія їхнього отримання передбачає видалення супутніх компонентів. Така ж тенденція спостерігається і щодо вмісту жирів.

На наступному етапі досліджень вивчали ступінь перетравлюваності вуглеводів досліджуваних РК в умовах імітації середовищ шлунково-кишкового тракту (ШКТ) (in vitro). Під впливом агресивних середовищ шлунку та ферментів ШКТ із складних вуглеводів розщепленню можуть піддаватись лише крохмальні полісахариди. Під час розщеплення крохмалю утворюються декстрини, мальтоза, глюкоза. На рис. 1 наведено результати досліджень.

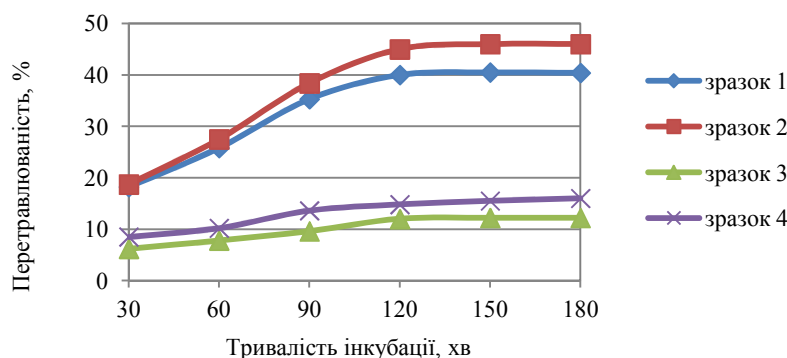


Рис. 1 – Перетравлюваність вуглеводів резистентних крохмалів

Найбільш схильними до перетравлюваності є вуглеводи Зразків 1 та 2, що корелює з даними таблиці 7, оскільки вони містять достатньо велику кількість ЛГП, представлених крохмалем, структура якого скоріш за все подібна до нативного «звичайного». Нативний крохмаль є доступним до дії амілолітичних ферментів травного тракту і в результаті гідролізу розщеплюється до низькомолекулярних цукрів. Не дивлячись на те, що вуглеводи Зразків 3 та 4 представлені переважно ЛГП, перетравлюваність їх достатньо низька, що, ймовірно, можна пояснити достатньо глибокою хімічною модифікацією даних об'єктів.

Оскільки усі досліджувані зразки РК містять достатньо високу кількість вуглеводів, які не перетравлюються середовищами ШКТ, можна припустити, що вони можуть проявляти ентеросорбційні властивості. Опосередкованим показником ентеросорбційної здатності РК є їхня водоутримувальна здатність (ВУЗ). ВУЗ відповідає за зростання маси вмісту ШКТ, знижує термін транзиту харчової грудки і, відповідно, термін контакту слизової з токсичними речовинами. Завдяки поглинанню значної кількості води, РК вірогідно можуть утримувати ксенобіотики, ендотоксини та сприяти їхньому виведенню з організму. Характеристику ВУЗ досліджуваних зразків наведено на рис. 2 та 3.

Показники ВУЗ у досліджуваних зразках крохмалю відрізняються не значно. Найвищий рівень гідратації спостерігається при температурі 70°C , що відповідає температурі клейстеризації більшості крохмалів та супроводжується гелеутворенням.

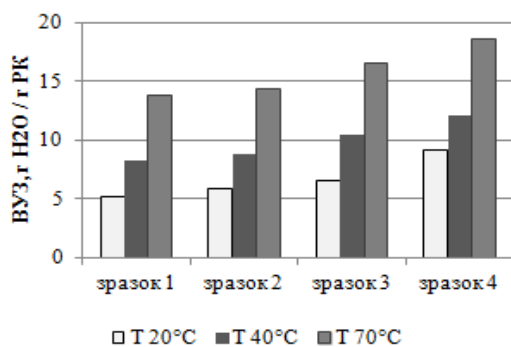


Рис. 2 – Характеристика ВУЗ досліджуваних зразків ХВ залежно від температури інкубації (тривалість інкубації 120 хв, рН суміші – властива рН суміші розчинів РК – 5,8 – 6,4 од.)

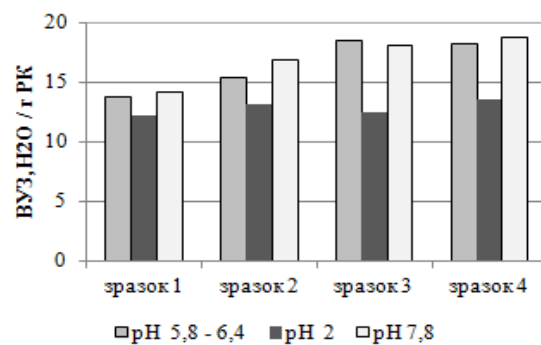


Рис. 3 – Характеристика ВУЗ досліджуваних зразків ХВ залежно від рН (тривалість інкубації 120 хв, $T 70^{\circ}\text{C}$)

При збільшенні рН в лужну сторону спостерігається не значне збільшення показника ВУЗ, при зниженні рН в кислу сторону ВУЗ має нижчі показники для всіх зразків РК.

На наступних етапах досліджень вивчали можливість використання РК у складі заварних кремів, рецептури дослідних та контрольних зразків заварних кремів наведено вище. Готували 12 дослідних зразків, в яких борошно заміняли на РК (табл. 4). Результати оцінювання консистенції дослідних зразків заварних кремів за бальною шкалою представлено на рис. 4. Найліпшою консистенцією характеризується Зразок 2, для виготовлення якого використовували РК «PURITY™ 87» у дозуванні 80 г на 500 г крему. Здійснено порівняльну оцінку органолептичних характеристик заварних кремів (рис.5), а саме, натурального крему, виготовленого за класичною рецептурою без додавання додаткових структуроутворювачів (табл. 2), заварного крему на основі РК «PURITY™ 87» та крему на основі суміші ТМ «Puratos» (табл. 3). Виходячи з даних рис. 5, найліпшими органолептичними характеристиками володіють натуральний (класичний) заварний крем та крем на основі РК «PURITY™ 87».



Зразок 1-3 Крохмаль «PURITY™ 87»
 Зразок 4-6 Крохмаль «VERSAFIBE™ 285»
 Зразок 7-9 Крохмаль «NOVELOSE® 330»
 Зразок 10-12 Крохмаль «HI-MAIZE® 260»

Рис. 4 – Результати оцінювання консистенції заварних кремів з РК

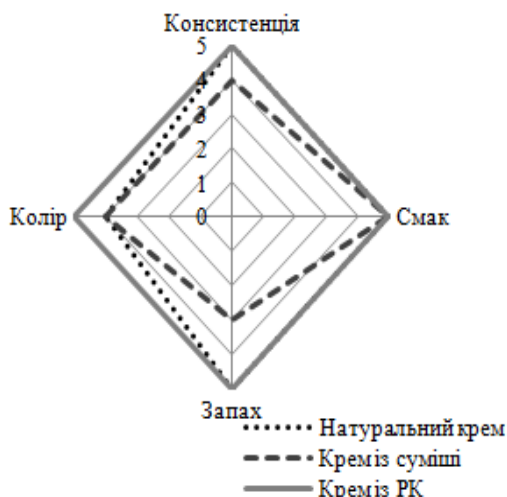


Рис. 5 – Результати оцінювання органолептичних показників отриманих заварних кремів

На наступному етапі досліджували поведінку заварних кремів при додатковому термообробленні. Для цього готували напівфабрикати із листового дріжджового тіста, в яких у якості начинки використовували готові заварні креми: класичний (із натуральних інгредієнтів); на основі РК «PURITY™87»; на основі суміші ТМ «Puratos». Напівфабрикати піддавали випіканню при температурі 180°C протягом 20 хвилин. Результати оцінювання консистенції заварних кремів після випікання за бальною шкалою та візуально представлені на рис. 6 та 7.

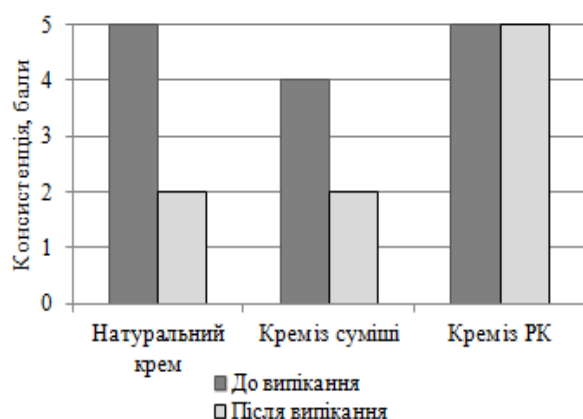


Рис. 6. Результати оцінювання консистенції заварних кремів до та після випікання

Рис. 6 – Результати оцінювання консистенції заварних кремів до та після випікання

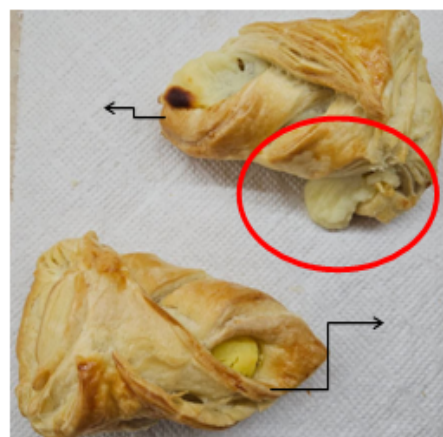


Рис. 7. Готові тістові вироби із начинкою із заварних кремів: 1 – на основі РК «PURITY™87»; 2 – класичний (натуральний)

Рис. 7 – Готові тістові вироби із начинкою із заварних кремів: 1 – на основі РК «PURITY™87»; 2 – класичний (натуральний)

Як свідчать дані рис. 6 та 7 заварний крем на основі РК «PURITY™87» характеризується гарною консистенцією як до, так і після випікання, на відміну від інших дослідних зразків, отже, запропонована рецептура дозволяє отримати термостабільний заварний крем.

З метою подовження терміну зберігання заварних кремів, до їхньої рецептури додавали консерванти калію сорбат та натрію бензоат окремо, або у комбінації. Дозування консервантів наведено у табл. 6. Максимальну дозу консерванту вводили згідно Регламенту ЄС 1333/2008 про харчові добавки [22]. Для дослідних зразків кремів було визначено динаміку показників рН та титрованої кислотності протягом п'яти діб зберігання (табл. 8). Згідно отриманих даних у всіх зразках відзначено зниження рН та підвищення титрованої кислотності протягом зберігання. Більш значне зниження рівня рН відмічено у зразках з меншою кількістю або з повною відсутністю консерванту, що може бути пов'язано з розвитком мікрофлори. Збільшення титрованої кислотності також може бути спровокованим в тому числі гідролітичним та окислювальним псуванням жирів.

Також проведено мікробіологічні дослідження заварних кремів на 1-й, 3-й та 5-й день зберігання у герметичних стерильних контейнерах при температурі 12–15°C, результати наведені у табл. 9.

Таблиця 8

Динаміка показників рН та титрованої кислотності протягом при зберіганні заварних кремів

№ зразка				Титрована кислотність, град		
	1 доба	3 доба	5 доба	1 доба	3 доба	5 доба
1	7,26	7,02	6,75	1,4	1,8	2,6
2	7,25	7,03	6,89	1,44	1,6	1,7
3	7,22	7,05	6,93	0,8	0,84	0,9
4	7,21	7,06	6,90	0,8	0,92	0,98
5	7,20	7,09	7,00	0,82	0,84	0,9
6	6,77	6,55	6,41	0,72	0,96	1,1
7	6,81	6,74	6,69	0,6	0,68	0,72
8	6,71	6,69	6,68	0,6	0,62	0,62
9	6,67	6,60	6,57	0,58	0,64	0,68
10	7,06	7,04	7,04	0,64	0,64	0,64
11	6,82	6,69	6,51	0,58	0,76	0,98
12	6,74	6,68	6,59	0,6	0,7	0,76
13	6,75	6,71	6,68	0,62	0,68	0,72
14	6,77	6,70	6,67	0,6	0,72	0,78
15	6,77	6,75	6,74	0,6	0,64	0,66

Таблиця 9

Кількість МАФАМ у заварному кремі при зберіганні

№ зразка	Наявність МАФАМ, КУО/г		
	1 доба	3 доба	5 доба
1			
2	130	110	400
3	60	200	250
4	120	150	300
5	210	250	70
6	220	20	250
7	150	400	1000
8	400	100	500
9	120	0	400
10	10	10	10
11	300	600	800
12	160	100	200
13	150	20	350
14	100	50	100
15	30	10	50

На початку досліджень було здійснено мікробіологічний аналіз кремів на наявність *Salmonella*, БГКП та *S. Aureus*, у результаті жодних колоній не було виявлено, що свідчить про використання доброякісних інгредієнтів та належні санітарно-гігієнічні умови виготовлення кремів. Протягом зберігання контролювали вміст МАФАМ у дослідних зразках. Згідно нормативних вимог вміст МАФАМ не має перевищувати 1·10⁴ КУО/г. У дослідних зразках не відмічено перевищення допустимого рівня КУО протягом 5 днів зберігання. У контрольному зразку натурального крему без консервантів на 5 день зберігання кількість МАФАМ виросла у 8 разів. У контрольному зразку заварного крему із суміші ТМ «Puratos» (без консервантів) на 5 день зберігання кількість МАФАМ виросла у 4 рази. У зразку заварного крему з РК «PURITY™87» без консервантів на 5 день зберігання кількість МАФАМ виросла у 2,5 рази. Виходячи із отриманих даних, найбільш

вираженою консервуючою дією володіє суміш консервантів калію сорбату та натрію бензоату у дозуванні по 500 мг на 1 кг продукту. Отже, за результатами досліджень заварний крем може зберігатися до 5 діб при температурі 12–15°C без ризику мікробіологічного псування. Такі температурні умови відповідають умовам зберігання випечених тістових виробів у ритейлах, кав'ярнях та інших закладах громадського харчування.

Проведені дослідження дозволяють обґрунтувати блок-схему технологічного процесу виробництва заварного термостабільного крему подовженого терміну зберігання на основі резистентного крохмалю (рис. 8).

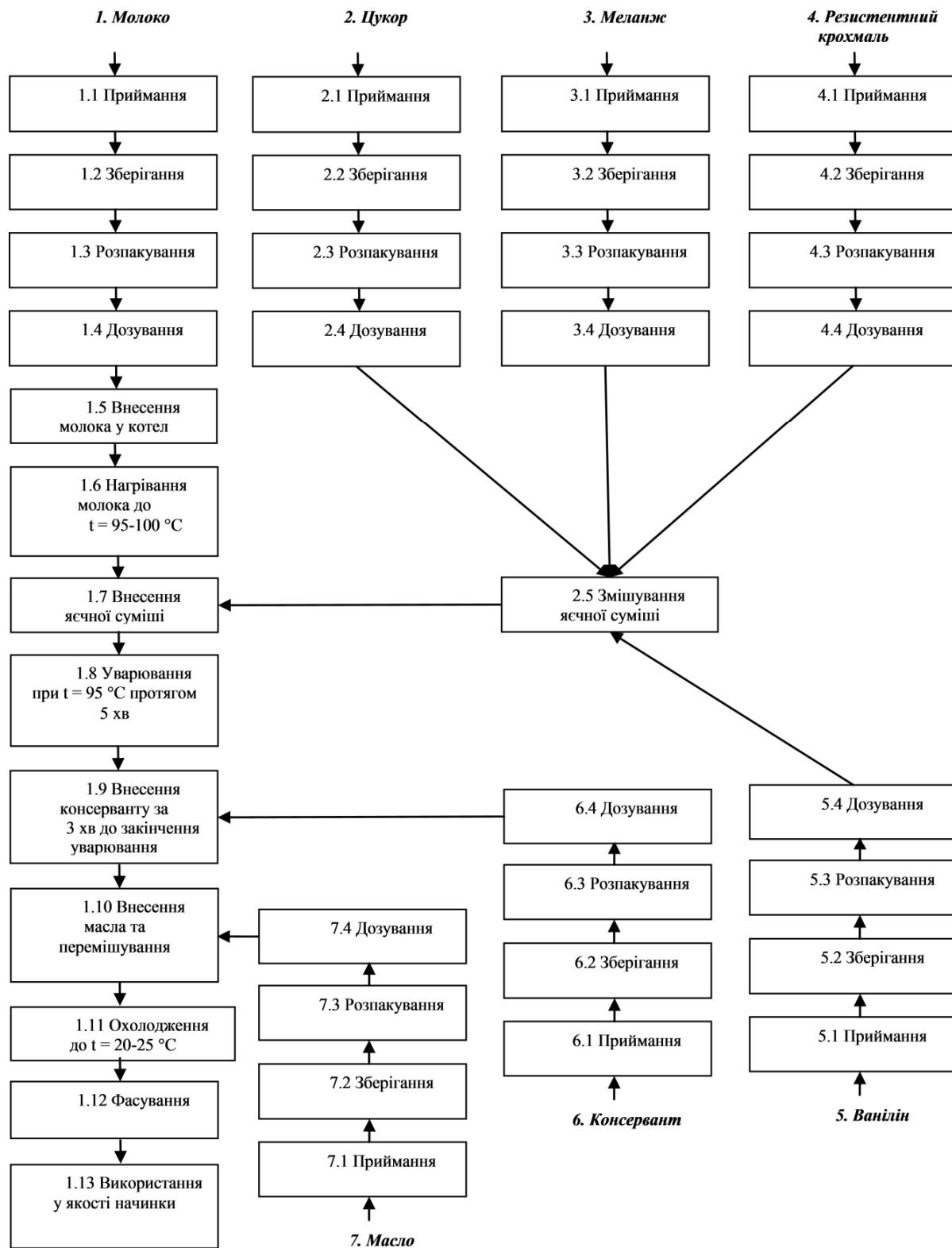


Рис. 8 – Блок-схема технологічного процесу виробництва заварного термостабільного крему подовженого терміну зберігання на основі резистентного крохмалю

Обов'язковою вимогою сучасного харчового законодавства [23-25] є розроблення процедур управління безпечністю (принципів НАССР) для виробництва продукції, особливо тієї, яка розробляється та вводиться на потужності вперше. Впровадження вдосконаленої рецептури крему заварного також передбачає розроблення форм та процедур управління безпечністю. Кожен етап технологічного процесу виробництва заварного крему аналізували на ймовірність появи небезпечних чинників (НЧ), а саме, біологічних, хімічних, фізичних та алергенів. Аналізували НЧ, що можуть потрапляти через харчовий ланцюг з сировиною, предметів і матеріалів, що контактують з сировиною та готовим продуктів, із виробничого середовища та від персоналу. До біологічних НЧ, що ймовірно можуть виникнути при виробництві крему заварного належать *Salmonella*, БГКП, *Staphylococcus aureus*, *L. Monocytogenes*; до хімічних НЧ – токсичні елементи, речовини, що застосовують у тваринництві, пестициди, радіонукліди, миючі та дезінфікуючі засоби, засоби з Pest контролю; до фізичних НЧ належать уламки скла, металу, пластику, елементи санітарного одягу, ювелірні вироби персоналу та ін. Щодо алергенів – у заварному кремі присутній молочний цукор лактоза та деякі види білків, управління даними видами небезпек регулюються коректним маркуванням готової продукції згідно закону України 2639 «Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів». У результаті аналізу НЧ на кожному етапі технологічного процесу згідно рис. 8, було визначено, що суттєвими НЧ є біологічні на етапах 1.6 та 1.8. У результаті розподілу заходів керування НЧ за категоріями (за принципом «дерева рішень»), було визначено, що етап 1.6 нагрівання молока до температури 95–100°C відноситься до операційної програми передумови (ОПП), а етап 1.8 – уварювання до критичної точки контролю (КТК). Для ОПП та КТК розроблено заходи керування, процедури моніторингу, коригування та коригувальні дії, для КТК зазначено критичні межі заходів керування.

Висновки. Надано характеристику нутрієнтного складу та ВУЗ досліджуваних зразків РК. Встановлено, що вміст ЛГП у складі Зразків 1 та 2 складає близько 38–49%, 3 та 4 – 82–88%. Наявність достатньо великої кількості ВГП у складі РК Зразок 1 та 2 можна пояснити типом крохмалю (РК2, РК3), в яких ланки амілози достатньо жорстко упаковані (кристалічна структура) через генетичні особливості субстратів для отримання крохмалів, чи внаслідок ретроградних змін внаслідок модифікації. Щодо вмісту білка, то в крохмалях він майже відсутній, така ж тенденція спостерігається і щодо вмісту жирів. Показники ВУЗ у досліджуваних зразках крохмалю відрізняються не значно. Найвищий рівень гідратації спостерігається при температурі 70°C, що відповідає температурі клейстеризації більшості крохмалів та супроводжується гелеутворенням.

Найбільш схильними до перетравлюваності є вуглеводи Зразків 1 та 2, оскільки вони містять достатньо велику кількість ЛГП, представлених крохмалем. Перетравлюваність Зразків 3 та 4 є достатньо низькою, не дивлячись на те що вуглеводна складова представлена переважно ЛГП, що, ймовірно, можна пояснити достатньо глибокою хімічною модифікацією даних об'єктів.

Для використання у рецептурі термостабільних заварних кремів рекомендовано РК «PURITY™ 87», оскільки зразки з даним видом РК характеризуються найліпшою консистенцією (при дозуванні 80 г на 500 г крему). Порівняльне оцінювання органолептичних характеристик натурального крему виготовленого за класичною рецептурою, заварного крему на основі РК «PURITY™ 87» та крему на основі суміші ТМ «Puratos», дозволило констатувати, що найліпшими органолептичними характеристиками володіють натуральний (класичний) заварний крем та крем на основі РК «PURITY™ 87». Заварний крем на основі РК «PURITY™ 87» характеризується гарною консистенцією як до, так і після випікання у складі тістових виробів, на відміну від інших дослідних зразків, отже, пропонується рецептура дозволяє отримати термостабільний заварний крем.

Результати вивчення динаміки рН, титрованої кислотності та мікробіологічних критеріїв при зберіганні заварних кремів з консервантами показали, що найбільш вираженою консервуючою дією володіє суміш консервантів калію сорбату та натрію бензоату у дозуванні по 500 мг на 1 кг продукту. Згідно результатів досліджень заварний крем може зберігатися до 5 днів при температурі 12–15°C без ризику мікробіологічного псування. Саме такі температурні режими відповідають умовам зберігання випечених тістових виробів у ритейлах, кав'ярнях та інших закладах громадського харчування.

Проведені дослідження дозволили обґрунтувати блок-схему технологічного процесу виробництва заварного термостабільного крему подовженого терміну зберігання на основі резистентного крохмалю, обґрунтувати КТК та ОПП.

References

1. Haiduk, O.V., Herliand, T.M., Drozhich, I.A., Kulalaieva N.V., Romanova, H.M. (2020). Suchasni tekhnolohii kondyterskoho vyrobnytstva: pidruchnyk. K.: IPTO NAPN Ukrainy.
2. Samokhvalova, O.V., Kucheruk, Z.I., Oliinyk, S.H. et al. (2017). Tekhnolohiia boroshnianskykh kondyterskykh vyrobiv: navch. posib. za red. O.V. Samokhvalovoi, Kharkiv. derzh. un-t kharchuvannia ta torhivli. Kyiv: Brovin O.V..
3. Englyst, H.N., Kingman, S., Cummings, J. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46, S33-S50.
4. Englyst, H.N., Cummings, J.H. (1987). Resistant starch, a new food component: classification of starch for nutritional purposes. In: Morton ID, editor. *Cereals in a European Context. First European Conference on Food*

- Science and Technology. Chichester: EllisHorwood, 221-233
5. Han et al. (2023). Physiological effects of resistant starch and its applications in food: a review. *Food Production, Processing and Nutrition*, 5, 48. <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00156-x>
 6. Han, J., Wu, J., Liu, X., Shi, J., Xu, J. (2023). Physiological effects of resistant starch and its applications in food: A review. *Food Prod. Process. Nutr.*, 5, 48. <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00156-x>
 7. Karunaratna, S., Wickramasinghe, I., Truong, T., Brennan, C., Navaratne, S., Chandrapala, J. (2024). Development of Low-Calorie Food Products with Resistant Starch-Rich Sources – A Review. *Food Rev. Int.*, 40, 814–831. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2204137>
 8. Walsh, S.K., Lucey, A., Walter, J., Zannini, E., Arendt, E.K. (2022). Resistant starch – An accessible fiber ingredient acceptable to the Western palate. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 21, 2930–2955. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12955>
 9. Tian, S., Sun, Y. (2020). Influencing factor of resistant starch formation and application in cereal products: A review. *Int. J. Biol. Macromol.*, 149, 424–431. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.264>
 10. Iuga, M., Mironeasa, S. (2021). Application of heat moisture treatment in wheat pasta production. *Food Control*, 128, 108176. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108176>
 11. Arp, C.G., Correa, M.J., Ferrero, C. (2021). Improving quality: Modified celluloses applied to bread dough with high level of resistant starch. *Food Hydrocoll.*, 112, 106302. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106302>
 12. Gutiérrez-Luna, K., Ansorena, D., Astiasaran, I. (2024). Effect of baking conditions on resistant starch: Model systems and cake formulations. *Food Chem.*, 449, 139174. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139174>
 13. Liu, Z., Liu, L., Han, P., Liang, X. (2023). Pea resistant starch preparation with cold-active type I pullulanase from *Bacillus megaterium* and its potential application in rice noodles. *LWT*, 182, 114799. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114799>
 14. Gong, X., Li, J., Liu, Z., Xu, X., Wang, A., Nie, M., Lin, R., Tian, Y., Zhang, X., Wang, L. (2024). Developing high resistant starch content rice noodles with superior quality: A method using modified rice flour and psyllium fiber. *Int. J. Biol. Macromol.*, 272, 132779. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132779>
 15. Tas, A., Shah, A. (2021). The replacement of cereals by legumes in extruded snack foods: Science, technology and challenges. *Trends Food Sci. Technol.*, 116, 701–711. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.016>
 16. Dos Santos, J.M., Ignácio, E.O., Bis-Souza, C.V., da Silva-Barretto, A.C. (2021). Performance of reduced fat-reduced salt fermented sausage with added microcrystalline cellulose, resistant starch and oat fiber using the simplex design. *Meat Sci.*, 175, 108433. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108433>
 17. Munir, H., Alam, H., Nadeem, M.T., Almalki, R.S., Arshad, M.S., Suleria, H.A.R. (2024). Green banana resistant starch: A promising potential as functional ingredient against certain maladies. *Food Sci. Nutr.*, 12, 3787–3805. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4063>
 18. Raungrusmee, S., Shrestha, S., Sadiq, M.B., Anal, A.K. (2020). Influence of resistant starch, xanthan gum, inulin and defatted rice bran on the physicochemical, functional and sensory properties of low glycemic gluten-free noodles. *LWT*, 126, 109279. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109279>
 19. Cervini, M., Frustace, A., Garrido, G.D., Rocchetti, G., Giuberti, G. (2021). Nutritional, physical and sensory characteristics of gluten-free biscuits incorporated with a novel resistant starch ingredient. *Heliyon*, 7, e06562. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06562>
 20. Žuljević, S.O., Akagić, A. (2021). Flour-based confectionery as functional food. In *Functional Foods: Phytochemicals and Health Promoting Potential*; IntechOpen: London, UK,; 351.
 21. Lončarević, I., Pajin, B., Petrović, J., Nikolić, I., Maravić, N., Aćkar, D., Šubarić, D., Zarić, D., Milićević, B. (2021). White chocolate with resistant starch: Impact on physical properties, dietary fiber content and sensory characteristics. *Molecules*, 26, 5908. <https://doi.org/10.3390/molecules26195908>
 22. Rehlament yevropeiskoho parlamentu i rady (IeS) № 1333/2008 vid 16 hrudnia 2008 rokupro kharchovi dobavky. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_028-08#Text
 23. Zakon Ukrainy 771 «Pro osnovni pryntsyipy ta vymohy do bezpechnosti ta yakosti kharchovykh produktiv». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-vr>.
 24. Recommended International Code of Practice. General principles of food hygiene. Codex Alimentarius Commission CAC/RCP 1-1969, Rev. 4-2003. Annex: Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) system and guidelines for its application. FAO/WHO. 1969. URL: http://www.codexalimentarius.net/web/standard_list.do?lang=en.
 25. Stybel, V.V., Simonov, M.R. *Upravlinnia bezpechnistiu produktiv kharchuvannia: praktychnyi posibnyk*. Lviv, TzOV Halytska vydavnycha spilka, 2018. 230 s.

THERMOSTABLE CUSTARD BASED ON RESISTANT STARCH WITH AN EXTENDED SHELF LIFE

Kapustian A.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Dotsenko S.E., Master, Dotsenko N.V., PhD, Associate Professor, Naumenko K.I., PhD, Associate Professor, Gural L.S., PhD, Associate Professor, Lysiuk V.M., PhD, Associate Professor
Odesa National University of Technology

Abstract. The use of resistant starches (RS) and a combination of preservatives for the production of thermostable custards with extended shelf life is substantiated. The nutritional composition of the studied RC samples has been characterized. It was found that the content of easily-hydrolyzed polysaccharides (EHP) in the composition of Samples 1 and 2 is about 38–49%, and in Samples 3 and 4 – 82–88%. The presence of a sufficiently large amount of hard-hydrolyzed polysaccharides (HHP) in the composition of RS of Samples 1 and 2 can be explained by the type of starch (RS2, RS3), in which the amylose links are rather tightly packed (crystal structure) due to the genetic characteristics of the substrates for obtaining starches, or due to retrograde changes due to modification. The most digestible carbohydrates are those of Samples 1 and 2, as they contain a fairly large amount of EHP represented by starch. The digestibility of Samples 3 and 4 is rather low, despite the fact that the carbohydrate component is represented mainly by EHP, which can probably be explained by a rather deep chemical modification of these objects. For use in the recipe of thermostable custards, it is recommended to use RS “PURITY™ 87”, since this type of RS is characterized by the best consistency (at a dosage of 80 g per 500 g of cream). A comparative evaluation of the organoleptic characteristics of custard made it possible to state that natural (classic) custard and custard based on RS “PURITY™ 87” have the best organoleptic characteristics. The custard based on RS “PURITY™ 87” is characterized by good consistency both before and after baking in the composition of doughy products, unlike other experimental samples, therefore, the proposed recipe allows to obtain a thermostable custard. The results of studying the dynamics of pH, titrated acidity and microbiological criteria during storage of custards with preservatives showed that the most pronounced preservative effect is provided by a mixture of preservatives potassium sorbate and sodium benzoate at a dosage of 500 mg per 1 kg of product. According to the research results, the custard can be stored for up to 5 days at a temperature of 12–15°C without the risk of microbiological spoilage. Such temperature conditions correspond to the storage conditions for baked dough products in retail, coffee shops and other catering establishments. The conducted research allowed us to substantiate the flow chart of the technological process of production of extended shelf life custard based on resistant starch, to substantiate the critical control points and operational programs of the prerequisites.

Keywords: custard, thermal stability, resistant starch, preservatives, shelf life, technology, critical control points.

Список використаної літератури

1. Сучасні технології кондитерського виробництва: підручник. / [Гайдук О. В., Герлянд Т. М., Дрозіч І. А., Кулалаєва Н. В., Романова Г. М.]. – К.: ПІТО НАПН України, 2020. – 440 с.
2. Технологія борошняних кондитерських виробів [Текст] : навч. посіб. / О. В. Самохвалова, З. І. Кучерук, С. Г. Олійник та ін. ; за ред. О. В. Самохвалової ; Харків. держ. ун-т харчування та торгівлі. — Київ : Бровін О. В., 2017. – 572 с.
3. Englyst H.N., Kingman S., Cummings J. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions // European Journal of Clinical Nutrition. 1992. Issue 46. S33-S50
4. Englyst H.N., Cummings J.H. Resistant starch, a new food component: classification of starch for nutritional purposes. In: Morton ID, editor. Cereals in a European Context // First European Conference on Food Science and Technology. Chichester: EllisHorwood. 1987. P. 221-233
5. Han et al. Physiological effects of resistant starch and its applications in food: a review. Food Production // Processing and Nutrition. 2023. Issue 5. P. 48. <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00156-x>
6. Han J., Wu J., Liu X., Shi J., Xu J. Physiological effects of resistant starch and its applications in food: A review // Food Prod. Process. Nutr. Issue 5. P. 48. <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00156-x>
7. Karunarathna S., Wickramasinghe I., Truong T., Brennan C., Navaratne S., Chandrapala J. Development of Low-Calorie Food Products with Resistant Starch-Rich Sources – A Review // Food Rev. Int. 2024. Issue 40. P. 814–831. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2204137>
8. Walsh S.K., Lucey A., Walter J., Zannini E., Arendt E.K. Resistant starch – An accessible fiber ingredient acceptable to the Western palate // Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 2022 Issue 21. P. 2930–2955. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12955>
9. Tian S., Sun Y. Influencing factor of resistant starch formation and application in cereal products: A review // Int. J. Biol. Macromol. 2020. Issue 149. P. 424–431. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.264>
10. Iuga M., Mironeasa S. Application of heat moisture treatment in wheat pasta production // Food Control. 2021. Issue 128. P. 108176. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108176>

11. Arp C.G., Correa M.J., Ferrero C. Improving quality: Modified celluloses applied to bread dough with high level of resistant starch // *Food Hydrocoll.* 2021. Issue 112. P. 106302. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106302>
12. Gutiérrez-Luna K., Ansorena D., Astiasaran I. Effect of baking conditions on resistant starch: Model systems and cake formulations // *Food Chem.* 2024. Issue 449. P. 139174. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139174>
13. Liu Z., Liu L., Han P., Liang X. Pea resistant starch preparation with cold-active type I pullulanase from *Bacillus megaterium* and its potential application in rice noodles // *LWT.* 2023. Issue 182. P. 114799. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114799>
14. Gong X., Li J., Liu Z., Xu X., Wang A., Nie M., Li, R., Tian Y., Zhang X., Wang L. Developing high resistant starch content rice noodles with superior quality: A method using modified rice flour and psyllium fiber // *Int. J. Biol. Macromol.* 2024. Issue 272. P. 132779. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132779>
15. Tas A., Shah A. The replacement of cereals by legumes in extruded snack foods: Science, technology and challenges // *Trends Food Sci. Technol.* 2021. Issue 116. P. 701–711. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.016>
16. Dos Santos J.M., Ignácio E.O., Bis-Souza C.V., da Silva-Barretto A.C. Performance of reduced fat-reduced salt fermented sausage with added microcrystalline cellulose, resistant starch and oat fiber using the simplex design // *Meat Sci.* 2021. Issue 175. P. 108433. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108433>
17. Munir H., Alam H., Nadeem M.T., Almalki R.S., Arshad M.S., Suleria H.A.R. Green banana resistant starch: A promising potential as functional ingredient against certain maladies // *Food Sci. Nutr.* 2024. Issue 12. 3787–3805. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4063>
18. Raungrum S., Shrestha S., Sadiq M.B., Anal A.K. Influence of resistant starch, xanthan gum, inulin and defatted rice bran on the physicochemical, functional and sensory properties of low glycemic gluten-free noodles // *LWT.* 2020. Issue 126. P. 109279. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109279>
19. Cervini M., Frustace A., Garrido G.D., Rocchetti G., Giuberti G. Nutritional, physical and sensory characteristics of gluten-free biscuits incorporated with a novel resistant starch ingredient // *Heliyon.* 2021. Issue 7. e06562. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06562>
20. Žuljević S.O., Akagić A. Flour-based confectionery as functional food. In *Functional Foods: Phytochemicals and Health Promoting Potential*; IntechOpen: London, UK, 2021. Volume 351.
21. Lončarević I., Pajin B., Petrović J., Nikolić I., Maravić N., Aćkar D., Šubarić D., Zarić D., Milićević B. White chocolate with resistant starch: Impact on physical properties, dietary fiber content and sensory characteristics // *Molecules.* 2021. Issue 26. P. 5908. <https://doi.org/10.3390/molecules26195908>
22. Регламент європейського парламенту і ради (ЄС) № 1333/2008 від 16 грудня 2008 року про харчові добавки. [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_028-08#Text
23. Закон України 771 «Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів». [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-вр>.
24. Recommended International Code of Practice. General principles of food hygiene. Codex Alimentarius Commission CAC/RCP 1-1969, Rev. 4-2003. Annex: Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) system and guidelines for its application. FAO/WHO. 1969. [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: http://www.codexalimentarius.net/web/standard_list.do?lang=en.
25. Управління безпечністю продуктів харчування: практичний посібник / В.В. Стибель, М.Р. Сімонов. Львів, ТЗОВ Галицька видавнича спілка, 2018. 230 с.

Отримано в редакцію 11.06.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 11.06.2024
Approved 25.09.2024

ЗМІСТ

ДЕСТРУКЦІЯ ТКАНИН ДЕЯКИХ ЯГІД ТА ФРУКТІВ ПРИ НАГРІВАННІ	
Корінчевська Т.В., Михайлик В.А.	4
ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАСІННЯ ДИНИ ТА ТЕПЛОМАСООБМІН В ПРОЦЕСІ ЙОГО СУШІННЯ	
Дмитренко Н.В., к.т.н., Іванов С.О., к.т.н., Дабіжа Н.О.	11
ПЕРЕРОБКА ХУРМИ (DIOSPYROS KAKI L.) СУШІННЯМ	
Петрова Ж.О., Новікова Ю.П., Слободянюк К.С., Граков О.П., Коваль І.О.	19
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ РЕЖИМИ НАСИЧЕННЯ ЦУКРОЗОЮ ЧАСТИНОК ПЛОДУ ЛИМОНУ	
Гузьова І.О., Атаманюк В.М.	30
КОМБІНОВАНА СИСТЕМА МІКРОХВИЛЬОВОГО ДЕГІДРАТОРА ІЗ ТЕПЛОНАСОСНИМИ ВИПАРНИМИ АПАРАТАМИ	
Бурдо О. Г., д.т.н., професор, Славинська В.О.	37
ОСОБЛИВОСТІ СКЛАДУ ГЕЙНЕРІВ ЯК АКТУАЛЬНОГО ВИДУ СПОРТИВНОГО ХАРЧУВАННЯ	
Авдєєва Л.Ю., Декуша Г.В., Турчина Т.Я., Макаренко А.А.	43
ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЮРЕ ІЗ ГАРБУЗА	
Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Турчина Т.Я., Декуша Г.В.	50
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОАКУМУЛЯЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ	
Коник А.В., Декуша Г.В.	57
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОД РОЗРАХУНКУ ДИНАМІКИ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В ЗОНІ КОНДЕНСАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ	
Сорокова Н.М., Половинкін К.О.	63
ДОСЛІДЖЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА З БУРЯКОВОГО ЖОМУ	
Іващук О.С., Атаманюк В.М., Чижович Р.А., Манастирська В.А., Собечко І.Б.	70
ВИВЧЕННЯ БІОЕЛЕКТРИЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ ВОДНИХ ЕКСТРАКТІВ РОСЛИН	
Дячок В.В.	76
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ КУКУРУДЗИ В УМОВАХ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ВІДЦЕНТРОВИХ ПОЛІВ	
Коцур І.О.	84
ГІДРОМЕХАНІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ СИРОВИНИ З ЯЛОВИЧИНИ ШЛЯХОМ МАСУВАННЯ: ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА ПРАКТИЧНІ ПІДХОДИ	
Вербицький С.Б.	90
ОСНОВНІ ПІДХОДИ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ТЕПЛОТИ І МАСИ ПРИ СУШІННІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ	
Ощипок І. М.	99
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ОБЛАДНАННЯ ШНЕКОВИХ ПРЕСІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ОЛІЇ	
Хоменко А. Д., Осадчук П.І.	107
ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ	
Яровий І.І., Маренченко О.І., Алі В.П.	113
ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОЦЕСІВ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ	
Мординський В.П., Бурдо А.К., Фатєєва Я. О., Грещук В.П.	122
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ШНЕКОВОГО ЕКСТРАКТОРУ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ	
Всеволодов О.М., Аль-Хамад І. М., Терзієв С.Г.	128
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАКЦІЇ СОНЯШНИКОВОЇ МАКУХИ В СЕРЕДОВИЩІ CO ₂	
Безбах І. В., Бандура В. М., Безбах С. В., Тараненко Є. Ю., Казани В. З.	135
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН	
Кравченко О. Ю.	143
ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ВИРОБНИЦТВА ЕФІРНИХ ОЛІЙ	
Коваленко О.А., Славинський Р.Л., Федосов Я. С., Славинська В.О.	149
КІНЕТИКА ВИЛУЧЕННЯ ОЛІЇ З МАКУХИ СОНЯШНИКУ В УМОВАХ АДРЕСНОЇ ДОСТАВКИ ЕНЕРГІЇ	
Запорожець Д.О., Ружицька Н.В.	156
ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ХЛІБОБУЛОЧНИХ, КОНДИТЕРСЬКИХ, МАКАРОНИХ ВИРОБІВ І ХАРЧОКОНЦЕНТРАТІВ	
Солоницька І.В., Макарова О.В., Ганчев С.С.	162
ТЕРМОСТАБІЛЬНИЙ ЗАВАРНИЙ КРЕМ НА ОСНОВІ РЕЗИСТЕНТНОГО КРОХМАЛЮ З ПОДОВЖЕНИМ ТЕРМІНОМ ЗБЕРІГАННЯ	
Капустян А.І., Доценко С.Є., Доценко Н.В., Науменко К.І., Гураль Л.С., Лисюк В.М.	167

CONTENTS

DESTRUCTION OF TISSUES OF SOME BERRIES AND FRUITS DURING HEATING Korinchevska T., Mykhailyk V.	4
THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MELON SEEDS AND HEAT AND MASS TRANSFER IN ITS DRYING PROCESS Dmytrenko N.V., Ivanov S.O., Dabizha N.O.	11
PERSIMMON (DIOSPYROS KAKI L.) PROCESSING BY DRYING Petrova Zh.O., Novikova Y.P., Slobodianiuk K.S., Grakov O.P., Koval I.O.	19
ENERGY-SAVING REGIMES FOR SATURATING LEMON FRUIT PARTICLES WITH SUCROSE Huzova I., Atamanyuk V.	30
COMBINED SYSTEM OF MICROWAVE DEHYDRATOR WITH HEAT PUMP EVAPORATORS Burdo O. G., Slavinska V. O.	37
FEATURES OF COMPOSITION OF GAINERS AS TOPICAL PRODUCTS IN SPORT NUTRITION Avdieieva L.Y., Dekusha H.V., Turchyna T.Y., Makarenko A.A.	43
THE INFLUENCE OF THE HOMOGENIZATION PROCESS ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF PUMPKIN PUREE Avdieieva L.Yu., Makarenko A.A., Turchyna T.Ya., Dekusha H.V.	50
RESEARCH OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THERMAL STORAGE MATERIAL Konyk A.V., Dekusha H.V.	57
MATHEMATICAL MODEL AND CALCULATING METHOD OF DYNAMICS HEAT AND MASS EXCHANGE IN THE CONDENSATION ZONE OF A HEAT PIPE Sorokova N.M., Polovynkin K.O.	63
THE STUDY OF BIOELECTRIC POTENTIALS OF AQUEOUS EXTRACTS FROM PLANTS Dyachok V.	70
RESEARCH ON THE ALTERNATIVE SOLID FUEL PRODUCTION FROM BEET PULP Ivashchuk O.S., Atamanyuk V.M., Chyzhovych R.A., Manastyrskaya V.A., Sobechko I.B.	76
RESEARCH OF THE DEHYDRATION PROCESSES OF CORN UNDER THE CONDITIONS OF THE COMBINED EFFECT OF ELECTROMAGNETIC AND CENTRIFUGAL FIELDS Kotsur I.O.	84
HYDRO-MECHANICAL PROCESSING OF RAW BEEF BY MASSAGING: THEORETICAL BASICS AND PRACTICAL APPROACHES Verbytskyi S.	90
BASIC APPROACHES IN RESEARCH OF THERMOMECHANIC PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER POTENTIAL DURING FOOD DRYING Oshchypok I.M.	99
ENERGY-EFFICIENT USE OF SCREW PRESS EQUIPMENT FOR OIL PRODUCTION Khomenko A., Osadchuk P.I.	107
TECHNICAL IMPLEMENTATION OF THE PROCESS OF VEGETABLE RAW MATERIALS COMBINED DRYING Yarovyi I.I., Marenchenko O.I.	113
RESEARCH OF LOW TEMPERATURE PROCESSES OF WATER DESALINATION Mordynskyi V.P., Burdo A.K., Fateeva Ya. O., Greschuk V.P.	122
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MICROWAVE SCREW CONTINUOUS ACTION EXTRACTOR Vsevolodov O.M., Al-Hamad I.M., Terziev S.G.	128
RESEARCH ON THE SUNFLOWER OIL CAKE EXTRACTION PROCESS IN A CO ₂ ENVIRONMENT Bezbakh I.V., Bandura V.M., Bezbah S.V., Taranenko Ye. Yu., Kazani V.Z.	135
RESEARCH OF ELECTRODYNAMIC APPARATUS FOR NON-NEWTONIAN LIQUIDS DEHYDRATION Kravchenko O.Yu.	143
INNOVATIVE METHODS OF PRODUCTION OF ESSENTIAL OILS Kovalenko O.A., Slavynskyi R.L., Fedosov Y. S., Slavynska V.O.	149
KINETICS OF OIL EXTRACTION FROM SUNFLOWER OIL CAKE UNDER THE CONDITIONS OF ADDRESSED ENERGY DELIVERY Zaporozhets D.O., Ruzhytska N.V.	156
INNOVATIVE APPROACHES TO QUALITY MANAGEMENT OF BAKERY, CONFECTIONERY AND PASTA PRODUCTS Solonytska I. V., Makarova O.V., Ganchev S.S.	162
THERMOSTABLE CUSTARD BASED ON RESISTANT STARCH WITH AN EXTENDED SHELF LIFE Kapustian A.I., Dotsenko S.E., Dotsenko N.V., Naumenko K.I., Gural L.S., Lysiuk V.M.	167