

ISSN 2073 – 8730

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ODESSA NATIONAL ACADEMY OF FOOD TECHNOLOGIES

НАУКОВІ ПРАЦІ SCIENTIFIC WORKS

ТОМ 85
ВИПУСК 1

VOLUME 85
ISSUE 1



ОДЕСА

2021



НАУКОВІ ПРАЦІ

Том 85, Випуск 1

Засновник:
Одеська національна академія харчових технологій

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

Горгачова К. Г., д-р техн. наук, проф.
Безусов А.Т., д-р техн. наук, проф.
Віннікова Л.Г., д-р техн. наук, проф.
Жигунов Д.О., д-р техн. наук, доцент
Капрельянц Л.В., д-р техн. наук, проф.
Косой Б. В., д-р техн. наук, доцент
Коваленко О.О., д-р техн. наук, ст. наук. співр.
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.
Осіпова Л.А., 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 техн. наук, проф.
Шит М. Л., к.т.н., доцент
Шульга О. С., к.т.н., доцент

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

Технічний редактор

Ружицька Н.В., *Левтринська Ю.О.*,
Паламарчук Г.С., *Кушніренко Н.М.*

Реєстраційне свідоцтво
КВ №12577-1461 ПР
від 16.05.2007р. Видано Міністерством юстиції
України.

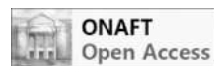
Усі права захищені.
Передрук і переклади дозволяються лише зі згоди
автора та редакції.

Рекомендовано до друку та розповсюдження в
мережі Internet Вченою радою Одеської національної академії харчових технологій,
протокол № 16 від 07.07.2021 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.

Одеська національна академія харчових технологій

Наукові праці – Одеса, Одеська національна академія харчових технологій: 2021. – Том 85, Вип. 1. – 134 с.

Адреса редакції:

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

np_onaft@ukr.net

terma_onaft@ukr.net

© Одеська національна академія харчових технологій, 2021 р.

Founder: Odessa National
Academy of Food
Technologies

SCIENTIFIC WORKS

Founded in Odessa, 1937

Volume 85, 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 of 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

Iorhacheva K.H., Dr. Sci. Tech, prof.

Bezusov A.T., Dr. Sci. Tech, prof.

Vinnikova L.H., Dr. Sci. Tech, prof.

Zhyhunov D.O., Dr. Sci. Tech, accos. prof.

Kaprelyants L.V., Dr. Sci. Tech, prof.

Kosoy B.V., Dr. Sci. Tech, accos. prof.

Kovalenko O.O., Dr. Sci. Tech, Senior Researcher

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

Osyova L.A., Dr. Sci. Tech, prof.

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., PhD., accos. prof.

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

It's recommended for printing and publishing online by
academic council of Odessa National Academy of Food
Technologies

07 July 2021., protocol № 16

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

Odessa National Academy of Food Technologies

Scientific Works – Odessa, Odessa National Academy of Food Technologies: 2021. – Volume 85, Issue 1. – 134 p.
ти

Address of the editorial office:

Ukraine, Odessa, Kanatnaya str, 112, 65039, e-mail:

terma_onaft@ukr.net

np_onaft@ukr.net

© Odessa National Academy of Food Technologies, 2021

ІННОВАТИКА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ ХАРЧОВОЇ ІНДУСТРІЇ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ ПРОБЛЕМ ЛЮДСТВА

Бурдо О.Г., д.т.н., професор

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Україна

Аналізуються результати моделі «Римського клубу». Підкреслено революційну новизну авторів у проблемах прогнозного, глобального моделювання, її значний соціальний внесок. Обговорюються причини низького практичного ефекту моделі, протиріччя між обговоренням ідей моделі та реальними діями на її впровадження. Пропонується положення, що подальші етапи роботи мають визначити, що конкретно треба робити в конкретних галузях економіки, в регіонах. Аналізуються етапи індустріального розвитку людства, показано перспективи інноваційних технологій, нанотехнологій. Представлено концепцію узгодження моделі «Римського клубу» із моделлю індустріального розвитку. Визначено, що пріоритетним напрямком практичної реалізації концепції є харчові технології, де сконцентровано глобальні проблеми людства, пов'язані із енергією, екологією та їжею. Наведені інноваційні принципи, які дозволяють здійснювати глибоку переробку харчової сировини. Показано, що сучасні принципи наноенерготехнологій, вакуумних, електродинамічних технологій спроможні на революцію у харчовій індустрії. Розглянуто обладнання, що використовує засоби направленої енергетичної дії в процесах вилучення цільових компонентів, дегідратації сировини. Запропоновано універсальну схему комплексної глибокої переробки сировини, де із відходів виробництва головного продукту отримують додатково вилучені функціональні компоненти, олію та паливні пелети. Така безвідходна переробка сировини в комплексі вирішує 3 проблеми: резервів їжі, витрат енергії (отримання додаткових джерел) та зменшення навантаження на довкілля. Показано, що використання сучасних інноваційних технологій спроможне вирішувати глобальні проблеми людства, управляти розвитком криз та пом'якшити гостроту їх впливу.

Ключові слова: прогнозні моделі, харчові технології, наноенерготехнології, технології направленої енергетичної дії, обладнання для екстрагування та дегідратації, електродинамічні апарати.

Вступ. На протязі всієї історії розвитку цивілізації людина прагнула підвищити рівень комфортності свого життя. Це логічна тенденція розвитку людства. Зрозуміло бажання слабких країн підвищити рівень комфорту до європейських стандартів, зрозуміло прагнення європейця поліпшувати свої життєві показники. Середня тривалість життя сучасної людини сягає 70 років, що в 3,5 разів вище, ніж у первісної. При цьому, споживання енергії зросло у 100 разів. Є чітка кореляція між тривалістю та комфортністю життя та рівнем споживання енергії [1, 2].

Але, добування енергоносіїв та їх переробка мають дуже негативний вплив на довкілля. Парадоксально, але прагнення комфорту веде до погіршення умов середі проживання (рис.1).

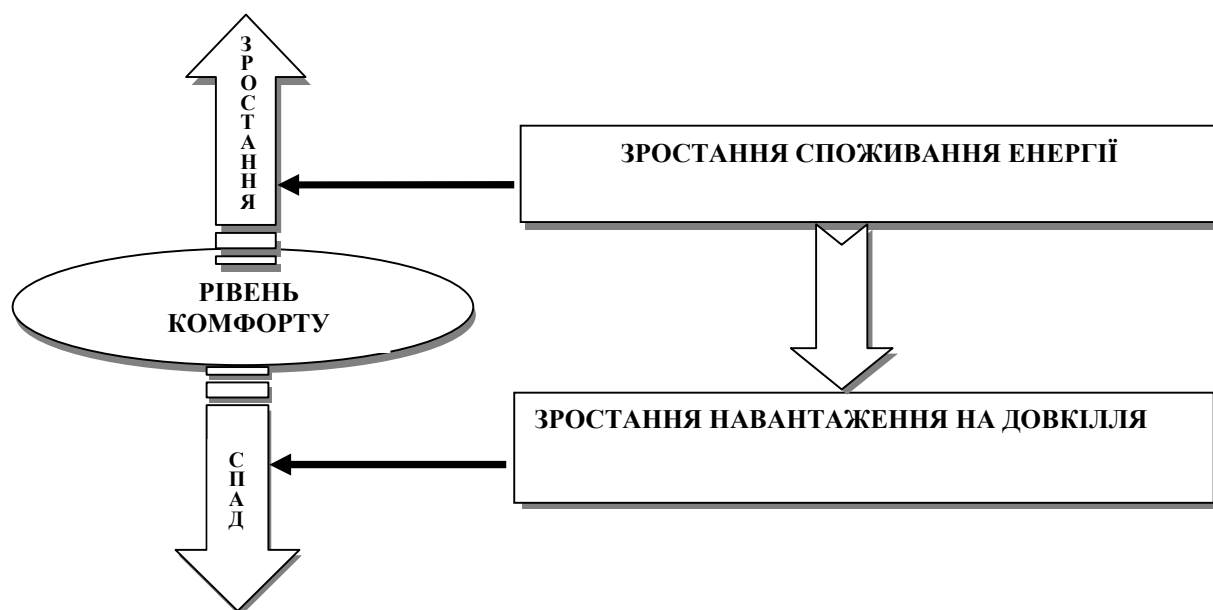


Рис. 1 – Протиріччя в системі «енергія – екологія - комфорт»

Для забезпечення зростаючих вимог комфортності в побуті, у сфері послуг й на виробництві (опалення, кондиціонери, автоматизація, використання інформаційних технологій та інш.), людство витрачає все більше та більше енергії, відповідно зростає навантаження на довкілля. Сучасна епоха характеризується стрімким зростанням рівня споживання енергії, особливо в індустріально розвинутих країнах. Кожні 12 років енергетичні витрати подвоюються. А зростання виробництва подвоюється тільки кожні 15 років [1]. Пояснюється ця невідповідальність зростаючим рівнем комфортності на виробництві, в побуті. Сучасне людство бездумно витрачає запаси самої цінної сировини, яка необхідна наступним поколінням для переробки у препарати, матеріали та різноманітні засоби. Наразі, визначилось нове протиріччя – сучасний рівень видобутку та переробки енергоносіїв загрожує безпеці довкілля. Забруднення середі проживання - протиріччя умовам комфорту (рис.1). Слід негайно шукати шляхи суттєвого зменшення витрат енергоносіїв, забруднення довкілля при підвищенні рівня комфорту людства. На часі актуальне питання – який він розумний баланс використання ресурсів, як витрачати тільки строго необхідну кількість енергії для збереження досягнутого рівня комфорту і, навіть, підвищувати його.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми. Важливою причиною стрімко зростаючого рівня споживання енергії при сталому зменшенні їх запасів у надрах Землі є індустріалізація [3]. Історія індустріального розвитку характеризується 4 яскравими епохами (табл.1). В кожній епосі визначено 3 етапи: формування, бурного росту та стабілізації. Тривалість кожної епохи піврічна. Епохи носять назви тих технологій, які були пріоритетними та стимулювали розвиток цілого ряду галузей техніки. Кожна епоха потребувала принципово нових, революційних наукових та технологічних рішень.

Таблиця 1

Епохи індустріального розвитку людства

№	Епохи	Періоди формування, роки		
		зародження	бурного росту	стабілізації
1	текстильна	1771 - 1800	1800 - 1853	1853
2	залізнична	1825 - 1853	1853 - 1913	1913
3	автомобільна	1886 - 1913	1913 - 1969	1969
4	комп'ютерна	1939 - 1969	1969 – 2025	2025
5	нанотехнологій	1997 - 2025	2025 - 2081	2081

У 1939 р. на зміну індустріальним революціям прийшла інформаційна, (табл.1), свідками бурного розвитку якої ми є. Однак, до 2025г. її революційний характер буде вичерпано, ці технології не будуть визначати завдання науки і техніці. Їй на зміну придуть нанотехнології. Вони започатковані були у 1997г. Ричардом Фейманом [2]. Вже зараз доказана висока практична ефективність нанотехнологій в різних складних задачах [2 - 3].

Високий рівень споживання енергії в країні із низьким рівнем комфорту свідчить про марнотратне використання енергоносіїв. В світі у виробництві використовується тільки 1/3 сировини. Тому, проблема глибокого використання сировинних ресурсів є глобальною. За останні десятиріччя промислове навантаження на довкілля зросло в 2,5...3 рази. Зростає дефіцит енергії в світі. Базельський маніфест, прийнятий в рамках Всесвітнього конгресу «Мир та справедливість» (1989г.), визначив обмеження всієї первинної енергії на одного мешканця 3 тонами кам'яного вугілля, тобто 88 ГДж [1].

Формується проблема «слідів людини в планетарній екосистемі». Визиває тривогу прагнення людини до нескінченного росту населення на реальних масштабах планети. Проблеми забезпечення людства ресурсами вимагали серйозних досліджень [3].

Першим аналізувати ці глобальні проблеми почав крупний бізнесмен, видатний громадський діяч Ауреліо Печчеї. Саме він, за особовою ініціативою в 1968г. організував, та став першим президентом незвичайної міжнародної, неурядової, громадянської організації «Римський клуб» (РК). Організація отримала свою назву за містом першої зустрічі її засновників. Основною ціллю РК стали дослідження глобальних екологічних, економічних, соціальних та політичних проблем й розробка практичних рекомендацій по їх вирішенню. Головними задачами РК стала широка просвітня діяльність серед населення, щоб справити відповідний вплив на осіб, що приймають рішення на міжнародному рівні. При цьому, Римський клуб ніяк не зв'язаний із будь-якою державою, організацією чи політичною партією. У нього відсутній постійний бюджет, що, на думку створювачів організації, не обмежувало свободу їх дій.

Широкий резонанс мала розроблена науковцями клубу глобальна прогнозна модель розвитку людства, яка отримала назву «модель Римського клубу». Модель відрізнялась суттєвою новизною, як в методологічному ключі, так й в формуванні нового наукового напрямку - теоретичні основи глобалістики.

При розробці моделі враховувались такі визначальні показники суспільства як запаси органічного палива, смертність, число народжених, населення планети, виробництво товарів, об'єм послуг, навантаження на довкілля. Визначались тенденції їх змін за 70 років розвитку людства. В подальшому будувались сценарні моделі по принципу «що чекати, якщо розвиток буде таким». Всього складено 12 сценаріїв. Перший (самий

песимістичний) сценарій, визначав, якщо всі тенденції збережуться й не будуть знайдені додаткові джерела енергії, то в 2030р. людство чекає гостра енергетична криза.

Наступні сценарії проводились із наростаючим оптимізмом. Автори припускали, що з часом будуть знайдені нові джерела енергії, знизиться навантаження на навколишнє середовище. Автори не вказували шляхи, як це зробити, просто розглядалися ситуації, якщо це станеться. У цих ситуаціях кризи зм'якшувалися і відсувалися в часі. Однак, завжди проблеми енергії, екології та їжі залишалися ключовими. Останній сценарій був стабілізаційним, були встановлені рівні аналізованих параметрів, які забезпечать стійке і стабільне існування суспільства.

Таким чином, глобальна прогнозна модель «Римського клубу» [2] визначила пріоритети розвитку людства в XXI столітті. В найближчому майбутньому до 2030 року прогнозується рішення задач забезпечення світової економіки енергією і загострення наступної проблеми - зростання навантаження на навколишнє середовище [2]. До кінця століття нас чекає масштабна продовольча криза [2]. Концептуальна ідея моделі «Римського клубу» може бути виражена схемою (табл.2).

Кожна криза формується з трьох етапів: розвиток, бурхливе зростання і стабілізація на досягнутому рівні (табл.2).

Таблиця 2

Періоди формування глобальних криз

	кризи	періоди, роки		
		розвиток	бурхливе зростання	стабілізації
1	енергії	1970 - 2000	2000 -2020	2020-2030
2	екології	2010-2030	2030-2050	2050 - 2070
3	їжі	2040-2060	2060-2080	2080- 3000

Наразі людство активно шукає рішення проблеми енергетичної ефективності. Найбільш гостро ці завдання характерні для країн, які із енергомарнотратних, але енергозабезпечених, стали енергодефіцитними країнами, але до сих пір залишилися енергомарнотратними. Високий рівень споживання енергії в таких країнах і низький рівень комфорту свідчать про марнотратство при використанні енергоносіїв. Тому, енергетична криза в таких країнах розвивається надзвичайно гостро. Особливо, якщо в країні відсутні науково обгрунтовані енергетичні програми, немає дієвої системи енергоменеджменту.

Розвиток положень Римського клубу. Піввіковий досвід роботи Римського клубу дозволяє зробити ряд прогнозованих і несподіваних висновків, встановити досягнення і питання, які не вдалося вирішити. Безумовними є теоретичні та методологічні досягнення Клубу. Саме в РК прийшло усвідомлення глобального характеру змін, що відбуваються в світі, і загострення проблем планетарного масштабу. Саме в РК пройшло становлення і розвиток глобалістики як міждисциплінарної галузі наукового знання, створені її теоретичні основи. Саме в РК вперше і досить ефективно використовувалося глобальне моделювання, яке набуло широкого розвитку в комп'ютерних моделях соціально-економічних завдань в математичному моделюванні системи «суспільство - природа».

В кожній країні, галузі, регіоні, місті, на підприємствах доцільно обгрунтувати прогнозу модель розвитку, яка обов'язково б враховувала проблеми забезпечення ресурсами, їх розвиток і специфіку. Тільки на основі серйозного прогнозування можна будувати поточну політику модернізації виробництва, зростання ефективності економіки і підвищення тривалості і якості життя населення. Формування таких прогнозних моделей вимагає коректного обліку всіх визначальних показників, оцінки тенденцій їх розвитку, ув'язки з геополітичними та економічними проблемами. Зрозуміло, це фундаментальна робота, але вона вкрай необхідна для забезпечення майбутнього галузі, підприємства. Причому, доцільно, з досвіду РК, розробляти моделі сценарного плану, що враховують всі шляхи розвитку від песимістичних до оптимістичних.

Методи побудови прогнозних моделей засновано на системному підході та структурному аналізі. Енергетична і екологічна складові таких моделей розробляються із залученням принципів енергетичного та екологічного менеджменту. Особливо важливо це враховувати на стадії проектування інноваційних технологій, особливо, для виробництва продуктів харчування.

Наразі, дослідження РК представлено у вигляді 44 доповідей, останні з яких [4 – 5]. Широкий суспільний резонанс мали доповіді [6 – 12]. Самі назви доповідей свідчать про всебічне вивчення глобальної проблематики. Але, за 50 років діяльності, РК так і не вдалося досягти не лише кардинальних змін, але і хоч якось поліпшити вкрай небезпечний стан світової арени. І це, незважаючи на активну діяльність по реалізації відповідних висновків і пропозицій, на безумовне визнання РК в якості провідного світового центру в області глобальних досліджень, його впливом на сферу міжнародних відносин, економіки і політики. Сам А. Печчеї констатував, що, при всілякому вітанні створенню Римського клубу, люди не вірили у перспективи проєктів, не висловлювали готовності приділити на благо майбутнього всього людства хоч якусь частку свого часу, грошей або громадського престижу і впливу. Таким чином, півстоліття діяв РК, який об'єднав однодумців вчених, які глибоко перейнялися глобальним протиріччям сучасності - продовження зростання

населення в неослабному темпі при скороченні ресурсів і серйозному підвищенню навантаження на навколишнє середовище, неминуче призведе до колапсу існуючого світового порядку. Можна навіть припустити, що ентузіазм вчених кілька посилив гостроту цих протиріч. Інструментом дії РК були заклики і звернення. Якщо врахувати сумний досвід Кіотського протоколу, який був підписаний всіма провідними державами планети, то практичні результати РК і не могли стати відчутними. І хто їх повинен був почути? Населення слаборозвинених країн, країн, які страждають від нескінченних воєн за ресурси планети? Мігранти з цих країн, які прагнуть до безпечного і більш комфортного життя, яких вже більше 60 млн.? Обивателі розвинених країн, для яких парадигми РК за хмарні? Політики, яким ця тема не підвищить рейтинги? Олігархи, для яких проблема глобалізації не принесе прибутку? Світова еліта, яка, на догоду меншості, для вирішення глобальних завдань перевіряє інструменти паніки, страху, пандемії?

В окремо взятій багатій і процвітаючій соціалістичній або монархічній країні з прогресивним правительством такі зміни можуть відбутися. Для розвинених капіталістичних країн потрібні покоління для виховання нової філософії природокористування. Ймовірно, доцільно шукати нову парадигму розвитку цивілізації, яка ґрунтувалася б на досягненнях науково-технічного потенціалу, на новій платформі, яка має прийти. Такою платформою може стати нанотехнологічна революція. При створенні РК про можливості нанотехнологій не говорили, в моделях РК інноваційний фактор взагалі не брався до уваги. Узгодження глобальних завдань планети при створенні наноіндустрії і екоіндустрії із сучасними усталеними поглядами і рушійною силою економіки капіталістичних країн здатне вирішити проблеми глобалізації. Концепція такої моделі повинна бути однозначною: глобальними завданнями повинно бути займатися вигідно. Конкретні специфічні питання концепції визначаються галуззю виробництва, сферою життя.

Надалі зосередимося на агропромисловому комплексі.

Нова парадигма узгодження моделей глобалізації з моделями індустріального розвитку суспільства. Концептуально розвиток глобальних криз, за прогнозами Римського клубу, з періодами зародження, бурхливого зростання і стабілізації пропонується визначити моделлю (рис.1).

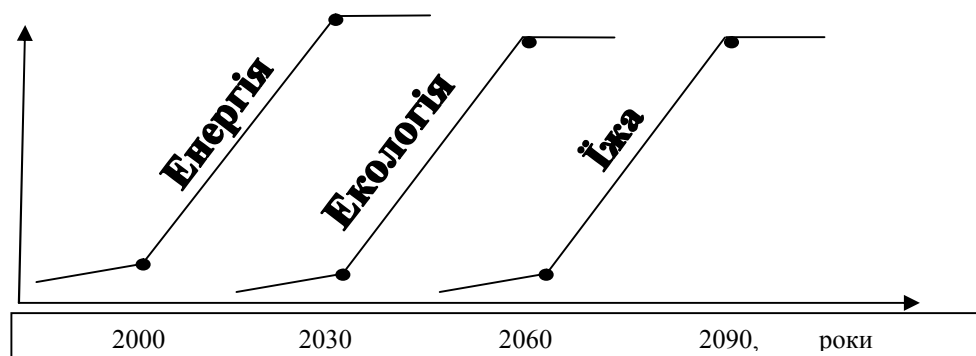


Рис. 2 – Формування глобальних криз в моделі Римського клубу

Цікаво, що закономірності формування криз і епох індустріалізації схожі (рис. 1 – 2). Епоха нанотехнологій може серйозно скорегувати розвиток глобальних криз.

Основні глобальні проблеми людства найбільш гостро стосуються технологій виробництва їжі: це і енергетика, і екологія, і безпосередньо продукти харчування [2 – 3]. Агропромисловий комплекс (АПК) розвинений абсолютно у всіх країнах, і займає лідируючі позиції, як за рівнем споживання енергетичних ресурсів, так і по навантаженню на навколишнє середовище. Для країн, що розвиваються, питомі витрати енергії в харчових технологіях в 2 – 4 рази вище, ніж в індустріально розвинених країнах [1].

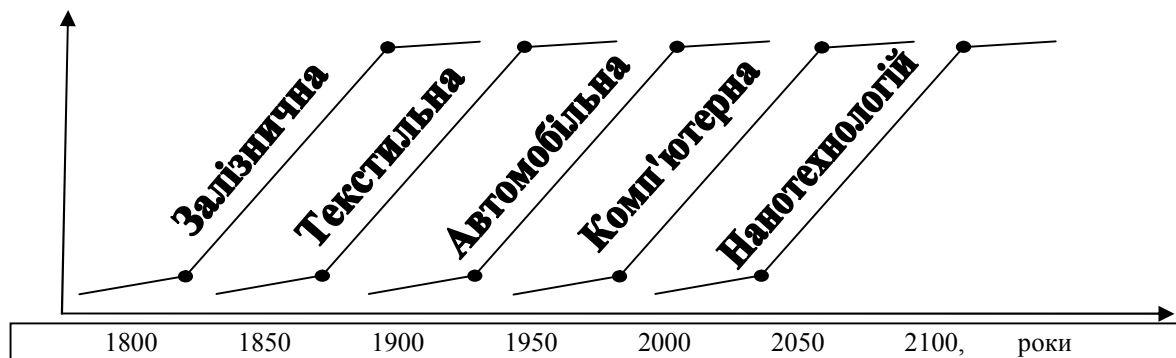


Рис. 3 – Формування епох індустріального розвитку

Поставимо задачу управління процесами розвитку криз із залученням інновацій наноіндустрії. Було висунуто ідею - проблеми енергетики, екології та їжі доцільно вирішувати в комплексі, паралельно, а не послідовно. Слід ініціювати вже сьогодні комплексне вирішення питань: «глибока переробка харчової сировини - отримання резервної їжі - зниження навантаження на середовище проживання - переробка залишків біомаси на паливні пелети». Тоді періоди зростання екологічного і, особливо, кризи їжі будуть не настільки стрімкі, кризи будуть протікати м'якше зі зміщенням в часі на 10 – 30 років (рис.3). А можуть, навіть, наблизитися до моделі стабілізації.

Ефективним інструментом управління розвитком криз може стати наноіндустрія.

Нова парадигма розвитку суспільства формулюється так: «концентрацію ресурсів суспільства і наукового потенціалу слід, по-перше, направити на створення харчової наноіндустрії, що зможе ефективно в комплексі вирішувати проблеми безвідходних харчових технологій, - забезпечити додаткові повноцінні резерви їжі при різкому зниженні навантаження на навколишнє середовище і отримання додаткових джерел енергії на основі паливних елементів з біомаси».

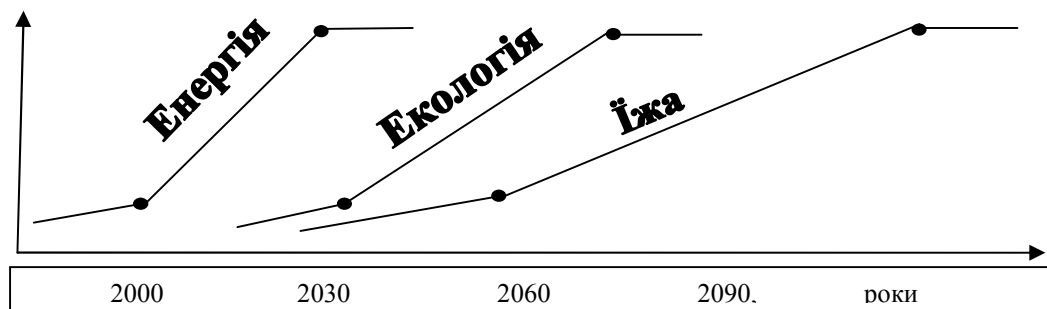


Рис. 4 – Управління розвитком глобальних криз

У країнах з соціалістичною економікою ці положення можуть посилитися ентузіазмом суспільства, стати частиною національної ідеї. В капіталістичних країнах парадигма розраховує на високу рентабельність проектів.

Роль харчових технологій у вирішенні проблем глобалізації. Таким чином, безвідходні харчові технології зможуть не тільки вирішувати проблеми екологічної безпеки виробництва, а й резервних джерел їжі. Однак рішення цих проблем вимагає революційних перетворень в харчовій і переробній галузях. Необхідний перехід до принципово нових технологічних прийомів. Виробництво неенергоємних харчових продуктів підвищеної харчової цінності, створення асортименту нових зразків, глибока переробка харчової сировини однозначно вимагають використання сучасних прийомів в технологіях. Їх основою стануть нанотехнології.

Проблемами харчових нанотехнологій в світі комплексно не займаються. Разом з тим, харчова сировина - це створені природою нанорозмірні структури, які при переробці необхідно зруйнувати з мінімальними витратами енергії і при максимальному збереженні харчової цінності. Використання нанотехнологій у харчовій промисловості дозволить створити принципово нові продукти, що не мають аналогів в сучасній кулінарії. Оскільки харчові системи це найскладніші біологічні системи, то нанотехнологічний підхід повинен ґрунтуватися на комплексному аналізі хімічних, фізичних і біотехнологічних явищ.

Розглянемо енергетичний та екологічний аспекти інноваційних харчових технологій.

Виробництво їжі є енергоємною галуззю в усіх індустріально розвинених країнах [1–2]. Харчові технології розвиваються по шляху стабільного зростання рівня споживання енергетичних ресурсів. Якщо ввести поняття енергетичний ККД продовольчого ланцюжка, то він не перевищить 10 % (рис.5).

Підприємства АПК лідирують за кількістю споживаних енергетичних ресурсів серед різних відомств. До 20% паливно-енергетичних ресурсів в країні витрачається підприємствами АПК. При цьому до 40% енергії в харчових технологіях може заощаджуватися за рахунок простих, безвитратних і малозатратних методів.

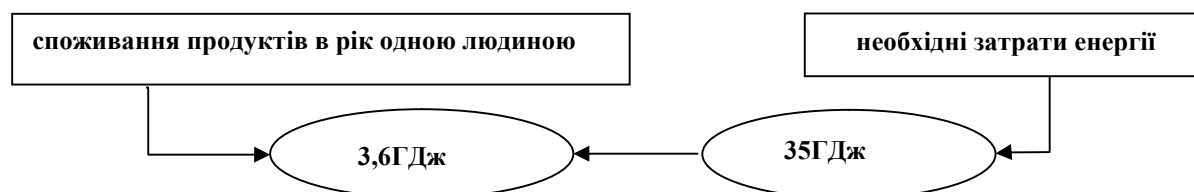


Рис. 5 – Енергія в продовольчому ланцюжку.

Перехід харчових технологій на прогресивні принципи, особливо на нанотехнології, відкриває нові можливості вигідно удосконалювати виробництво при істотному зниженні витрат ресурсів [1 – 2, 14 – 32]. Серйозні енергетичні проблеми характерні для галузей, продукція яких вимагає зневоднення сировини, а це завжди є енергоємною технологією [17, 20, 22, 28 – 32]. Одночасно посилюються вимоги по безпеці харчових продуктів [20, 26] і регламентуються екологічні умови роботи підприємства. Очевидно, що харчові технології, і, в першу чергу, виробництво харчових концентратів слід переводити на інноваційні принципи рішення енергоекологічних проблем. Запропонована оцінка енергетичного ККД (рис.5), який в харчовому ланцюжку не перевищує 10 %, дає підставу вважати, що резерви тут істотні, і, що в такому аспекті питання їжі не досліджувалися.

Поняття і принципи екоіндустрії завойовують популярність в розвинених країнах [1, 26]. Але щодо харчових технологій - це напрямок практично не розвивається. Разом з тим, саме екоіндустрія здатна в комплексі вирішувати суперечливі завдання, які стоять перед сучасними харчовими технологіями. Звісно ж, що визначення цього напрямку можна сформулювати наступним чином. Екоіндустрія АПК – це безперервна послідовність технологічних процесів, які забезпечують максимальну енергетичну ефективність, глибоку переробку сировини, мінімальні термічні впливи на харчову сировину, гранично низьке навантаження на атмосферу і літосферу, отримання безпечного продукту.

Синтез екоіндустріальної технології повинен ґрунтуватися на сучасних принципах організації процесів переносу. Напрямок і об'єктом досліджень можуть стати «безвідходні технології», наближенням до яких є технології «глибокої переробки сировини». Те, що зараз викидають на звалища, чим забруднюють атмосферу, гідросферу і літосферу може вирішувати проблемні питання планети. Так з відходів більшості харчових і переробних виробництв можна одержувати паливні пелети і вирішувати проблеми енергозабезпечення. Це не тільки дозволить використовувати регіональні джерела енергії, а й зберегти дерева, які зараз змушені використовувати як паливо.

Відходи харчових виробництв - це джерело великої кількості функціональних компонентів. Вилучення їх і реалізація мають безсумнівні бізнес-перспективи. Відходи більшості харчових і аграрних технологій - це повноцінні резерви їжі. Отже, переробка цих відходів в комплексі вирішує проблеми екології, енергозабезпечення та їжі. Це захищає актуальність напрямку і його стратегічну роль у вирішенні проблем глобалізації.

Досягнення в галузі харчових нанотехнологій. Сучасні проблеми енергоефективності, глибокої переробки харчової сировини з повним використанням його харчового потенціалу, екології виробництва і безпеки харчового продукту вирішуються в площині пошуку нових принципів організації процесів теплопереносу, використання унікальних можливостей комбінованих впливів на процеси перенесення, формування складних комбінацій рушійних сил спрямованих на ефективне витяг цільових компонентів із сировини. Особливу увагу приділяють до мікро- і нанорозмірних структур сировини, які в традиційних технологіях взагалі не розглядаються. В даний час сформульовані і доведені: парадигма наноенерготехнологій, наукові концепції термічного парадоксу, відкриті ефекти «механодифузії» і «бародифузії» [2]. Ці концепції стали основою системи технологій, які вирішують загальну проблему і використовують такі підходи:

- принципи адресної доставки енергії до елементів харчової сировини, в тому числі і нанорозмірних;
- наноенерготехнології, вакуумні, хвильові та електродинамічні технології;
- комбіновані і гібридні процеси для ініціювання ефектів «механодифузії» і «бародифузії».



Рис. 6 – Дія гібридного процесу

Прийняту класифікацію процесів на: механічні, гідродинамічні, теплові та масообмінні, їх спільний перебіг як зв'язані і комбіновані, пропонується доповнити гібридними процесами, результат яких визначається послідовною дією декількох рушійних сил. Гібридний процес організовується спеціально для того, щоб ініціювати самостійний потік J_b з потужною гідродинамічною рушійною силою (рис.6). Він турбулізує приграничний шар, і може бути на кілька порядків більше класичного дифузійного потоку J_d . Отже, безпосередньо гібридний процес не вирішує завдання масопереносу, але він ініціює зародження і розвиток потужного гідродинамічного (бародифузійного) потоку, можливості

якого за ступенем інтенсифікації масообміну істотні. Особливо це відноситься до умов природної конвекції і руху потоку в ламінарному режимі. Наведені в (табл. 3) дані відносяться до процесів теплопереносу. Але і для масообмінних процесів ефект інтенсифікації практично однаковий.

Ступінь інтенсифікації процесів переносу

№	Принцип інтенсифікації	Ефект інтенсифікації
1	Спеціальна обробка поверхні	до 2 разів
2	Використання ультразвуку	в 2...3 рази
3	Використання електричного поля	в 3...4 рази
4	Закрутка потоку	в 6...8 разів
5	Обертання реактора	в 25...30 разів
6	Вібрація	в 30...35 разів
7	Бародиффузія	на 2...3 порядки

Розроблено та апробовано конструкції унікального обладнання, яке реалізує ефект «механодифузії». При виробництві коньячних спиртів електромагнітний екстрактор проточного типу забезпечив інтенсифікацію процесу в 1000 разів. При екстрагуванні з зерен кави ступінь вилучення компонентів збільшена на 15%, а витрата енергії знижено на 50 %. Отримано екологічно безпечні зразки рідкого диму та амарантового масла з високим вмістом сквалену. Технології адресної доставки енергії дозволили отримати чисту воду з вмістом солей не вище 4 мг / кг.

Розроблено конструкції вакуумних електродинамічних апаратів: сушарки, випарювання, екстрактора. Це інноваційне обладнання, яке здатне перевести харчові технології на нові принципи, забезпечити високу якість продукту при значному зменшенні енергетичних витрат. Розроблений випарної апарат не має обмежень по кінцевій концентрації продукту, він функціонує і дає стабільні параметри по продуктивності випарювання до (90 – 95) °brix. Для нього відсутні типові проблеми теплопередачі. Апробований апарат для отримання безалкогольного вина, зневоднення морепродуктів. Створено стрічкова ІК-сушарка, деалкоголізатор, піролізна установка, тепломасоутилізатор, кріоконцентратор, та т.п.

Розглянемо типову схему екстракційного цеху і пропозиції по глибокій переробці відходів (рис.6). Рослинна сировина (витрата якого G_c , загальний вміст цільових компонентів C_c і вологовміст W_c) змішується з екстрагентом (витрата якого G_p , зміст сухих речовин X_p) і надходить в екстрактор $Е_k$. Тут із сировини в розчин переходить частина цільових компонентів і виходить екстракт G_e з концентрацією X_e . У випарній апараті $B1$ видаляється частина розчинника і виходить концентрат (G_k, X_k). З екстрактора вивантажуються відходи з параметрами G_o, C_o, W_o . Як правило, ці відходи являються агресивними забруднювачами навколишнього середовища, при цьому вони містять достатню для переробки кількість цільових компонентів. Однак традиційні технології екстрагування не в змозі їх витягати, оскільки зосереджені вони в мікрокапілярах. Пропонується залучити технології адресної доставки енергії [2] для організації інноваційних процесів масопереносу з відходів (рис.7).

Відходи традиційних технологій (G_o) містять комплекс термолабільних функціональних компонентів, і, наприклад, масла, які витягуються і іншим екстрагентів, і на іншому рівні температур. Тому, інноваційна схема передбачає два екстрактора - вакуумний (ВМЕФ) для вилучення функціональних компонентів, і мікрохвильовий екстрактор для масла (МЕМ). З вакуумного екстрактора виходять функціональний компонент (G_f, X_f) і шлам ($G_{ш}, W_{ш}$). У мікрохвильовій сушарці з шламу видаляється волога ($W_{ш}$) і зневоднений шлам надходить в мікрохвильовий екстрактор масла (МЕМ).

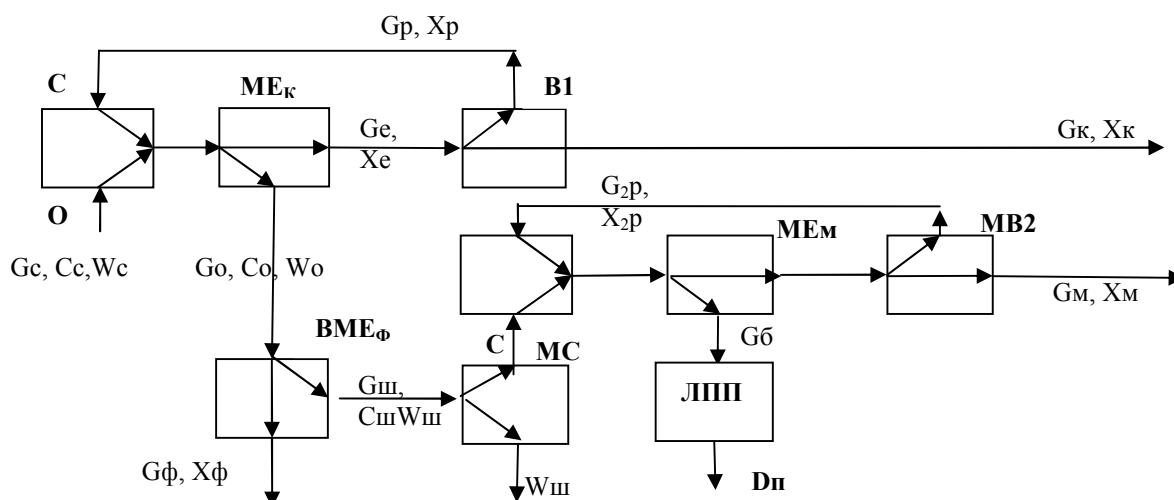


Рис. 7 – Схема матеріальних потоків при глибокій переробці рослинної сировини

З біосировини (Гб) на лінії виробництва пелет отримують паливні елементи (Дп), а в мікрохвильовому випарній апараті (МВ2) - концентрат олії (Гм, Хм). Таким чином, крім традиційного концентрату (Гк) йде глибока переробка сировини і ставиться завдання додатково отримати: рідкий концентрат функціональних компонентів (Гф), пелети (Дп) і масло (Гм). Причому комерційна вартість цих продуктів часто вище, ніж традиційного концентрату.

Висновки. Запропонована понад 50 років тому прогнозна модель «Римського клубу» була важливим кроком як в методології глобального сценарного прогнозування, так і в становленні наукових засад глобалістики. Ця модель має широкий резонанс в суспільстві, але залишається тільки моделлю, бо вона не дає конкретних програм «а що робити?». В роботі автора вперше пропонується така програма, захищається доцільність її реалізації саме в харчових технологіях. Сценарії моделі РК узгоджено із сучасним рівнем розвитку інноваційних технологій, нанотехнологій. А це дозволяє організувати безвідходні харчові технології, отримати резервні джерела їжі, переробити залишкову біомасу на паливні пелети. Розроблено інноваційне обладнання для впровадження безвідходних технологій. Дослідні зразки інноваційних продуктів, отриманих на цьому обладнанні, мають високі смакові характеристики. Отримано: сушені овочі, фрукти, чіпси, слайси, пасти, рідкий концентрат кави, кріоконцентрати соків, молока і екстрактів (50 °brix), порошок м'яса. З відходів харчоконцентратних консервних, виноробних виробництв отримано фруктове та безглютенове борошно, паливні пелети. Отримано порошки цибулі, часнику, екологічно безпечний концентрат рідкого диму, масла, водний 97% концентрат екстракту кофеїну, фруктові есенції, гідролати, бальзами та ін.

Харчові продукти, отримані за запропонованими принципами, практично повністю збережуть функціональні властивості сировини, їх виробництво вимагає менших витрат енергії, а глибока переробка і безвідходні технології зведуть до мінімуму навантаження на навколишнє середовище.

References

- Burdo, O.H., Trishyn, F.A., Yarovyy, I.I. (2020). *Enerhetychnyy monitorynh kharchovykh i pererobnykh vyrobnystv [Energy monitoring of food and processing industries]*. Odesa: Madzhenta [in Ukrainian].
- Burdo, O.G. (2013). *Pishchevyie nanoenergotekhnologii [Food nanotechnologies]*. Kherson [in Russian].
- Clapp J., Newell P., Brent Z. W. (2018). The global political economy of climate change, agriculture and food systems. *The Journal of Peasant Studies*, 45(1), 80-88.
- Weizsäcker, E., Wijkman, A. (2018). *Come On! Capitalism, Short-termism, Population and Destruction of the Planet: a report to the Club of Rome*. NY: Springer.
- Kuenkel P. (2019) *Stewarding Sustainability Transformation: a report to the Club of Rome*. Cham: Springer.
- Meadows et al. (1972). *The limits to growth: a report to the Club of Rome*. NY: Univerce Books.
- Mesarovic M., Pested E. (1975). *Mankind at the Turning Point: a report to the Club of Rome*. New York : New American Library.
- Tinbergen J. Rio (1976). *Reshaping the International Order: a report to the Club of Rome*. New York: Dutton.
- Gabor D., Colombo U., King A. S. (2016). *Beyond the age of waste: a report to the Club of Rome*. New York: Pergamon Press.
- Laszlo E. et al. (1977). *Goals for Mankind: a report to the Club of Rome*. New York: Dutton.
- Bofgese M. (1986). *The Future of the Oceans: a report to the Club of Rome*. New York: Columbia University Press.
- King A. (1991). *The First Global Revolution: a report to the Club of Rome*. New York: Pantheon Books.
- Goodman, Emily & Redmond, Jessica & Elia, Dana & Harris, Stephanie & Augustine, Mary Beth & Hand, Rosa. (2018). Practice Roles and Characteristics of Integrative and Functional Nutrition Registered Dietitian Nutritionists. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 118 (12), 2356-2369. doi: 10.1016/j.jand.2018.03.027.
- Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Yu.O. (2018). Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Material. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(2), 210-218. doi: 10.3103/S1068375518020047.
- Liu W., Zhang M., Bhandari B. (2019). Nanotechnology – A shelf life extension strategy for fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(10), 1706-1721. doi: 10.1080/10408398.2019.1589415.
- Burdo O.G., Trishyn F.A., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V. (2020). Elektrodinamicheskie tehnologii – effektivnoe reshenie problem pishchevoi industrii [Electrodynamic technologies – effective solution to the food industry problems]. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 56 (4), 74-88. (In Russian). doi: 10.5281/zenodo.3970438.
- Bozkir, H., Baysal, T. (2017). Concentration of apple juice using a vacuum microwave evaporator as a novel technique: Determination of quality characteristics. *J Food Process Eng*, 40, 1-9. doi: 10.1111/jfpe.12535.
- Qi C.Tianyang G., Jian Y., Renyi L., Peng W., Qiong W., Shaotong J., Yiyang D. (2020). Microwave-Assisted Extraction Combined with Ultra-High-Performance Liquid Chromatography and Quadrupole/Q-Exactive High-Resolution Mass Spectrometry for the Determination of Main Flavor Substances in Green Tea. *Journal of AOAC International*, 103(2), 428-432. doi:10.5740/jaoacint.19-0265.

19. Burdo, O.G., Syrotyuk, I.V., Alhury, U., Levtrinska, J.O. (2018). Microwave Energy, as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polydisperse Extract Formation. *Problemele energeticii regionale*, 36(1), 58-71. doi: 10.5281/zenodo.121725.
20. Milczarek, R.R., Vilches, A.M., Olsen, C. W., Breksa, A.P., Mackey, B.E., Brandl, M.T. (2020). Physical, microbial, and chemical quality of hot-air-dried persimmon (*Diospyros kaki*) chips during storage. *Journal of Food Quality*, 2020, 1-15. doi: 10.1155/2020/7413689.
21. Manzoor, M.F. et al. (2020). Novel processing techniques and spinach juice: Quality and safety improvements. *Journal of Food Science*, 85(4), 1018-1026. doi: 10.1111/1750-3841.15107.
22. Sabanci, S., Icier, F. (2019). Effects of Vacuum Ohmic Evaporation on Some Quality Properties of Sour Cherry Juice Concentrates. *International Journal of Food Engineering*, 15(9), 1-8. doi:10.1515/ijfe-2019-0055.
23. Pattnaik, M., Mishra, H.N. (2020). Effect of microwave treatment on preparation of stable PUFA enriched vegetable oil powder and its influence on quality parameters. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(4), 1-15. doi: 10.1111/jfpp.14374.
24. Almena, A., Goode, K.R., Bakalis, S., Fryer, P.J., Lopez-Quiroga, E. (2019). Optimising food dehydration processes: energy-efficient drum-dryer operation. *Energy Procedia*, 161, 174-181. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.078
25. Simić, S., Orašanin, G., Golubović, D., Milić, D., Batinić, K. (2019). Consideration of Opportunities for the Optimization of Heat Energy Consumption in Industry and Energetics. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 76, 494-503.
26. Weststrate, J.A., van Poppel, G., Verschuren, P.M. (2002). Functional foods, trend and future *British J. Nutrition*, 88, Suppl.2.1 - 233-235.
27. Trishin, F.A., Trach, A.R., Orlovskaya, Yu.V. (2018). Upravlenie potokami enerhii v nizkotemperaturnykh razdelitel'nykh ustanovkakh [Control of energy flows in low-temperature separation plants]. *Probleme energeticii regionale*, 1(36), 72-86 (in Russian).
28. Kumar, C., Karim, M. A. (2019). Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59(3), 379-394.
29. Monteiro, Ricardo L., et al. (2018). Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. *Journal of food engineering*, 232, 1-10.
30. Potapov, V.O., Efremov, Yu.Y., Mykhaylova, S.V. (2014). Potapov V.O., Efremov Yu.Y., Mykhaylova S.V. Doslidzhennya protsesiv vakuumnoho mikrokhvylovoho kontsentrivannya ta sushynnya pryanoi syrovyny [Investigation of the processes of vacuum microwave concentration and drying of spicy raw materials], *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, 10(1), 36.
31. Adarsh, M., Kalla Devaraju, R. (2017). Microwave energy and its application in food industry: A review, *Asian J. Dairy Food Res.*, 36(1), 37. doi: 10.18805/ajdfr.v0iOF.7303
32. Burdo, O.G., Terziyev, S.G., Gavrilov, A.V., Sirotyuk, I.V. (2020). Sistema innovatsionnykh energotekhnologiy obezvozhivaniya pishchevogo syr'ya [System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials], *Probleme energeticii regionale*, 46(1), 92. doi: 10.5281/zenodo.3898317

INNOVATION OF ENERGY TECHNOLOGIES OF FOOD INDUSTRY IN THE CONTEXT OF GLOBAL PROBLEMS OF HUMANITY

**Burdo O.G., Dr. Sci. Tech., professor
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine**

The results of "The Club of Rome" model are analyzed. The revolutionary novelty of the authors in the problems of forecasting global modeling, its significant social contribution is emphasized. The reasons for the low practical effect of the model, the contradictions between the discussion of the model ideas and the actual actions for its implementation are discussed. It is proposed that further stages of work should determine what specifically needs to be done in specific sectors of the economy and in the regions. Stages of industrial development of humanity are analyzed, prospects of innovative technologies and nanotechnologies are shown. The harmonization concept of "The Club of Rome" model with the industrial development model is presented. It is determined that the priority area of practical implementation of the concept is food technology, where the global problems of humanity related to energy, ecology and food are concentrated. Innovative principles implementing deep processing of food raw material are given. It is shown that modern principles of nanoenergy technologies, vacuum, electrodynamic technologies are capable of revolution in the food industry. The equipment using the means of directed energy action in the processes of extraction of target components and dehydration of raw materials is considered. A universal scheme of complex deep processing of raw materials is proposed, where additional extracted functional components, oil and fuel pellets are obtained from the wastes of the main product production. Such waste-free processing of raw material in the complex solves 3 problems: food reserves, energy consumption (obtaining additional sources) and reducing the burden on the

environment. It has been shown that the use of modern innovative technologies can solve the global problems of humanity, manage the development of crises and mitigate the severity of their impact.

Key words: forecasting models, food technologies, nanoenergy technologies, technologies of directed energy action, equipment for the extraction and dehydration, electrodynamic apparatuses.

Список використаної літератури

1. Бурдо О.Г., Трішин Ф.А., Яровий І.І. *Енергетичний моніторинг харчових і переробних виробництв*. Одеса: Маджента, 2020. 246 с.
2. Бурдо О.Г. *Пищевые нанотехнологии [Food nanotechnologies]*. Херсон, 2013. 294с.
3. Clapp J., Newell P., Brent Z. W. The global political economy of climate change, agriculture and food systems. *The Journal of Peasant Studies*. 2018. Vol.45. № 1. С. 80-88.
4. Weizsäcker E., Wijkman A. *Come On! Capitalism, Short-termism, Population and Destruction of the Planet: a report to the Club of Rome*. NY: Springer, 2018. 232p.
5. Kuenkel P. *Stewarding Sustainability Transformation: a report to the Club of Rome*. Cham: Springer, 2019. 317p.
6. Meadows et al. *The limits to growth: a report to the Club of Rome*. NY: Univerce Books, 1972. 211p.
7. Mesarovic M., Pested E. *Mankind at the Turning Point: a report to the Club of Rome*. New York : New American Library, 1975. 228 p.
8. Tinbergen J. Rio . *Reshaping the International Order: a report to the Club of Rome*. New York: Dutton, 1976. 342 p.
9. Gabor D., Colombo U., King A. S. *Beyond the age of waste: a report to the Club of Rome*. New York : Pergamon Press, 2016. 264 p.
10. Laszlo E. et al. *Goals for Mankind: a report to the Club of Rome*. New York: Dutton, 1977. 472 p.
11. Bofgesse M. *The Future of the Oceans: a report to the Club of Rome*. New York: Columbia University Press, 1986. 277 p.
12. King A. *The First Global Revolution: a report to the Club of Rome*. New York: Pantheon Books, 1991. 292 p.
13. Goodman E.M., Redmond J., Elia D., Harris S.R., Augustine M.B., Hand R.K. Practice Roles and Characteristics of Integrative and Functional Nutrition Registered Dietitian Nutritionists. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*. 2018. Vol. 118. No. 12, P. 2356-2369. doi: 10.1016/j.jand.2018.03.027.
14. Burdo O.G., Bandura V.N., Levtrinskaya Yu.O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Material. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 54. No. 2, P. 210-218. doi: 10.3103/S1068375518020047.
15. Liu W., Zhang M., Bhandari B. Nanotechnology – A shelf life extension strategy for fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 60. No. 10, P. 1706-1721. doi: 10.1080/10408398.2019.1589415.
16. Burdo O.G., Trishyn F.A., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V. Elektrodinamicheskie tehnologii – effektivnoe reshenie problem pishchevoi industrii [Electrodynamic technologies – effective solution to the food industry problems]. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2020. Vol. 56. No. 4. P. 74-88. (In Russian). doi: 10.5281/zenodo.3970438.
17. Bozkir H., Baysal T. Concentration of apple juice using a vacuum microwave evaporator as a novel technique: Determination of quality characteristics. *J Food Process Eng*. 2017. P. 1-9. doi: 10.1111/jfpe.12535.
18. Qi C.Tianyang G., Jian Y., Renyi L., Peng W., Qiong W., Shaotong J., Yiyang D. Microwave-Assisted Extraction Combined with Ultra-High-Performance Liquid Chromatography and Quadrupole/Q-Exactive High-Resolution Mass Spectrometry for the Determination of Main Flavor Substances in Green Tea. *Journal of AOAC International*. 2020. Vol. 103, No. 2, P. 428-432. doi:10.5740/jaoacint.19-0265.
19. Burdo O.G., Syrotyuk I.V., Alhury U., Levtrinska J.O. Microwave Energy, as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polydisperse Extract Formation. *Problemele energeticii regionale*, 2018, Vol. 36, No. 1, P. 58-71. doi: 10.5281/zenodo.121725.
20. Milczarek R.R., Vilches A.M., Olsen C. W., Breksa A.P., Mackey B.E., Brandl M.T. Physical, microbial, and chemical quality of hot-air-dried persimmon (*Diospyros kaki*) chips during storage. *Journal of Food Quality*, 2020, Vol. 2020, P. 1-15. doi: 10.1155/2020/7413689.
21. Manzoor M.F. et al. Novel processing techniques and spinach juice: Quality and safety improvements. *Journal of Food Science*. 2020, Vol. 85, No. 4, P. 1018-1026. doi: 10.1111/1750-3841.15107.
22. Sabanci S., Icier, F. Effects of Vacuum Ohmic Evaporation on Some Quality Properties of Sour Cherry Juice Concentrates. *International Journal of Food Engineering*. 2019. Vol.15. No.9. P. 1-8. doi:10.1515/ijfe-2019-0055.
23. Pattnaik M., Mishra H.N. Effect of microwave treatment on preparation of stable PUFA enriched vegetable oil powder and its influence on quality parameters. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. Vol. 44. No. 4. P. 1-15. doi: 10.1111/jfpp.14374.

24. Almena A., Goode K.R., Bakalis S., Fryer P.J., Lopez-Quiroga E. Optimising food dehydration processes: energy-efficient drum-dryer operation. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 161. P. 174-181. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.078
25. Simić S., Orašanin G., Golubović D., Milić D., Batinić K. Consideration of Opportunities for the Optimization of Heat Energy Consumption in Industry and Energetics. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2019. Vol. 76. P. 494-503.
26. Weststrate J.A., G. van Poppel, P.M. Verschuren /Functional foods, trend and future *British J. Nutrition*. 2002.- V.88. Suppl.2.1 - 233-235.
27. Trishin F.A., Trach A.R., Orlovskaya Yu.V. Upravlenie potokami enerhii v nizkotemperaturnykh razdelitel'nykh ustanovkakh. *Probleme energeticii regionale*. 2018. 1(36). P. 72-86.
28. Kumar C., Karim M. A. Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2019. 59(3). P. 379-394.
29. Monteiro, Ricardo L., et al. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. *Journal of food engineering*. 2018. 232, P. 1-10.
30. Потапов В.О., Ефремов Ю.И., Михайлова С.В. Дослідження процесів вакуумного мікрохвильового концентрування та сушіння пряної сировини, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2014, Т. 10, № 1, С. 36.
31. Adarsh M., Kalla Devaraju R. Microwave energy and its application in food industry: A review, *Asian J. Dairy Food Res*. 2017. Vol. 36. No. 1. P. 37. doi: 10.18805/ajdfr.v0iOF.7303
32. Бурдо, О.Г., Терзиев, С.Г., Гаврилов, А.В., Сиротюк, И.В. Система инновационных энерготехнологий обезвоживания пищевого сырья. *Проблемы региональной энергетики*. 2020. N. 46. № 1. С. 92. doi: 10.5281/zenodo.3898317

Отримано в редакцію 17.03.2021

Прийнято до друку 26.06.2021

Received 17.03.2021

Approved 26.06.2021

THERMAL CONDITIONS OF ADSORPTIVE HEAT STORAGE DEVICE OPERATING IN OPEN-MODE FOR HEATING INFLOWING AIR

Belyanovskaya E.A., PhD, docent, Lytovchenko R.D., postgraduate student,
Sukhyi K.M., Dr. Sci. Tech., Prof., Serhiienko Ya.O., postgraduate student,
Sukhyi M.P., PhD, Prof., Sukha I.V., PhD, docent

State Higher Education Institution «Ukrainian State University of Chemical Engineering»,
Dnipro, Ukraine

Thermal conditions of adsorptive heat storage device operating in open-mode were considered when discharged. The main operating parameters affecting the final temperature of airflow which supplied to ventilated premises are determined on the example of heat storage device based on composite 'silica gel – sodium sulphate'. The main factors which determine a final airflow temperature are confirmed to be initial values of temperature, absolute humidity and speed of airflow which fanned to the adsorbent layer. Algorithm of calculating the operational parameters of adsorptive heat storage device has been further developed. Proposed algorithm involves calculation of diffusion coefficient, mass transfer coefficient, final absolute humidity of airflow, volume of air which passed through adsorbent layer, adsorption, specific adsorption heat and final airflow temperature, then useful heat, heat inputs for operating heat storage device and its efficiency factor are estimated. The adequacy of the proposed algorithm has been confirmed according with experimental data for operating of open mode adsorptive heat storage device. Curves final temperature of inflowing air vs. time of discharge of heat storage device are stated to depend on characteristics of airflow which fanned to the adsorbent layer such as temperature, speed and initial absolute humidity. When these parameters increased, time to achieve plateau, i.e. maximal values of final inflowing air temperature decrease. The dependence of initial values of temperature, absolute humidity, speed of humid airflow and final airflow temperature is shown. Maximal temperatures of at most 65 – 80 °C are stated at the initial temperatures and absolute humidity of initial airflow within the ranges of 20 – 30 °C and 0.03 – 0.04 kg/m³, respectively. The results of the present study can be used for the development of energy-efficient systems and devices for air-conditioning in habitual inner space and warehouses.

Key words: adsorptive storage of heat energy, open-type heat storage device, efficiency factor, composite 'silica gel – crystalline hydrate'.

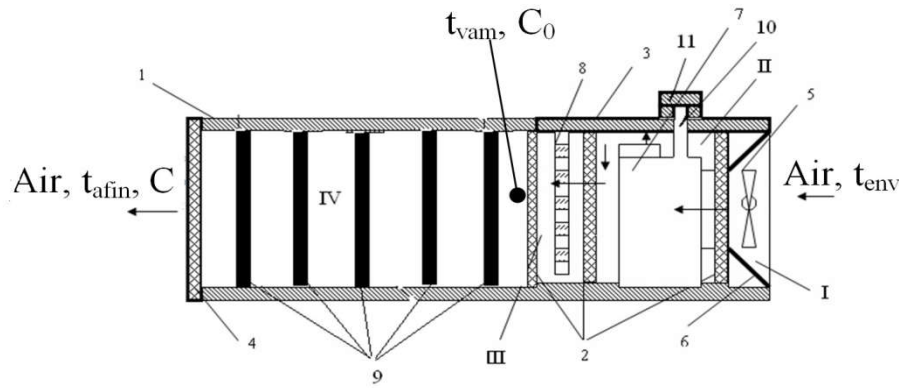
Introduction. The crucial expenditures in heat balance of building are thermal losses through enclosing parts of premises and infiltration for the inflow air. Convenient heat, ventilation and air conditioning systems are generally based on vapour compression machines which results in significant electric load. Heating and cooling processes usually perform in surface heat exchangers [1]. Sustaining the convenient level of humidity of the internal air occurs due to changing temperature of air. However absolute humidity of air, i.e. water concentration in the air, remains constant.

Adsorptive heat energy storage and conversion are shown to be promising technologies for heat supply and ventilation system [2 – 6]. Design and performance of such systems involving adsorptive units advance a strong demands on properties of adsorbents used, e.g. maximal adsorption have to surpass 0.5 kg/kg and regeneration temperature have to be less than 90 – 100 °C. Composites 'silica gel – crystalline hydrate' synthesized with sol – gel method are known to correspond with these requirements [2, 7]. Open-mode devices based on such materials exhibit a potential in heat supply and ventilation. However, introduction of such unit in domestic heat supply and ventilation system can be limited with Sanitary Regulations which resulted from temperature limitation. This fact impedes development of algorithm which allows to determine the air temperature during operating period.

The presented work is focused on determination of basic factors which affects air temperature during operating period of open-type adsorptive heat storage device. To achieve this purpose, the next tasks had been set:

- to determine crucial operating parameters which affect the inflow air temperature during operating period of heat storage device;
- to exhibit correlation between operating parameters and temperature of inflow air during discharge period of adsorptive heat storage unit;
- to estimate the basic requirements to thermal conditions and performance of open-type of adsorptive heat storage unit.

Experimental. The present work is devoted to correlation of performance and inflow air temperature during operating the open-type adsorptive heat storage device. Design of its laboratory prototype is presented in Fig. 1 [8], its length being 0.6 m.



1 – thermal insulated casing; 2 – mesh partitions; 3 – heat-insulated cover; 4 – mesh cover; 5 – fan; 6 – guide casing; 7 – humidifier; 8 – electric resistive heating element; 9 – cassettes with adsorbent; 10 – branch pipe; 11 – cover of a branch pipe [8].

Fig. 1 – Laboratory prototype of heat storage device

Composites ‘silica gel – sodium sulphate’ synthesized with sol – gel methods were used as heat storage media. The open-type heat storage device is operated according with two-phase mode. On the first phase external air is pumped by compressor 3 into humidifier 4, and its relative degree of humidity being increased up to 60 – 80 %. Then humid air is heated in resistance element 5 to 30 – 40 °C for speeding the adsorption rate. Then humid airflow is directed into the adsorbent layer. After short-term warm-up of heat storage material (15 min.) water adsorbed from airflow passed through adsorbent layer. It leads to increasing temperature of both adsorbent and air. Outlet airflow temperature is increased to at least 90 °C. The second step (regeneration) occurs due to pumping the hot air through adsorbent layer which results in warming warm up adsorbent upto temperatures above 90 °C and desorption of water.

According to these phases algorithm of calculation of operational characteristics has been further developed (Fig. 2).

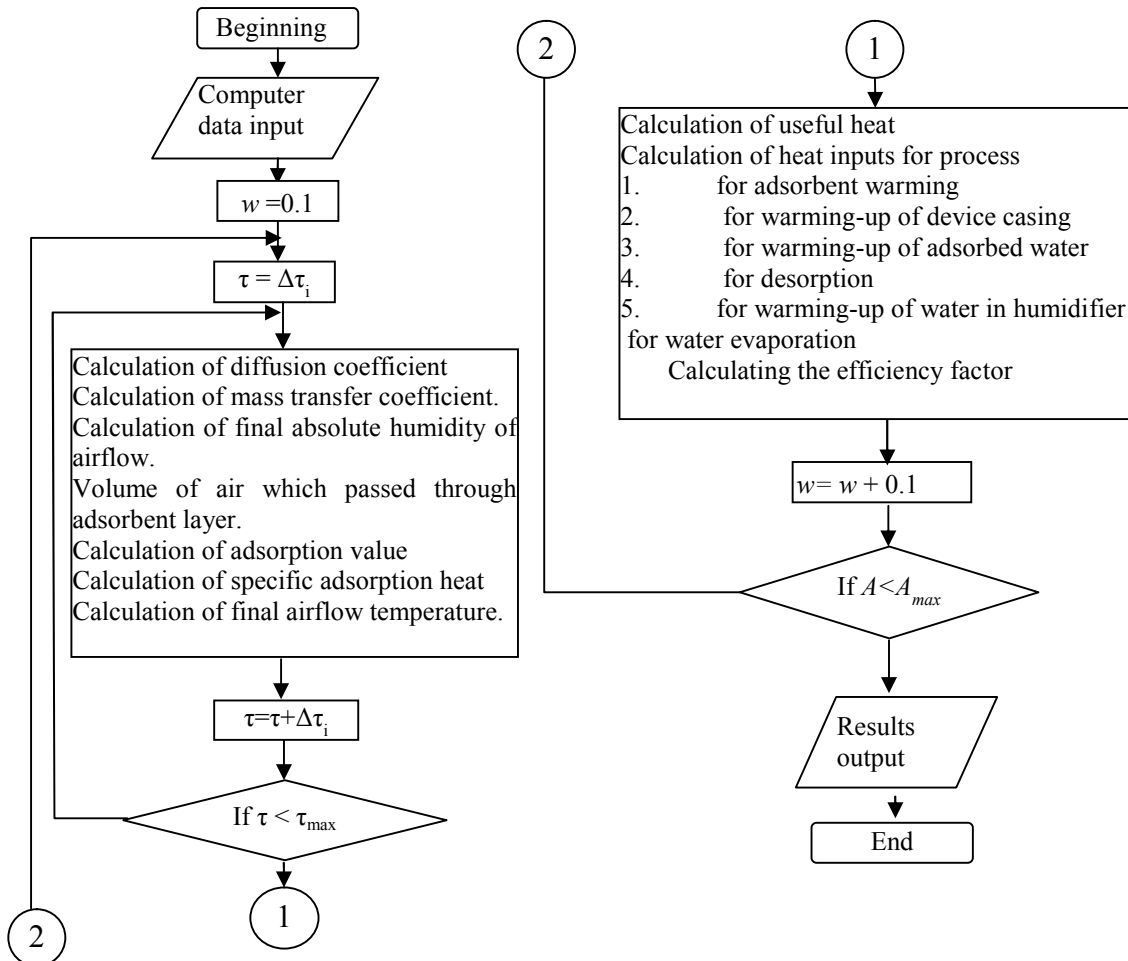


Fig. 2 – Control diagram to calculate temperature of inflowing air and efficiency factor of adsorption heat storage unit operating in open mode

As key operating parameters airflow temperature near the outlet heat storage device and efficiency factor are considered.

Airflow temperature near the outlet heat storage device is determined according to the equation of thermal balance:

$$t_{\text{afin}} = \frac{\Delta H_{\text{ads}} \cdot M_{\text{ads}} + V_{\text{air}} \cdot t_{\text{vam}} \cdot [4.19 \cdot C_0 + C'] + (M_{\text{cor}} \cdot c_{\text{cor}} + M_{\text{ads}} \cdot c_{\text{ads}} + 4.19 \cdot M_{\text{ads}} \cdot A) \cdot (t_{\text{vam}} - 10)}{V_{\text{air}} \cdot C' + V_{\text{air}} \cdot 4.19 \cdot C + (M_{\text{ads}} \cdot c_{\text{ads}} + 4.19 \cdot M_{\text{ads}} \cdot A + M_{\text{cor}} \cdot c_{\text{cor}})} \quad (1)$$

where t_{afin} is airflow temperature near the outlet of heat storage device, °C, V_{air} is air volume passes through the adsorbent layer, m^3 , M_{ads} is adsorbent mass, kg, M_{cor} refers to the mass of the device case, kg; ΔH_{ads} is adsorption heat, kJ/kg, t_{vam} is temperature of humid air, °C, C' is the volumetric heat capacity of inflowing air, $\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$, C_0 is initial absolute humidity of air, kg/m^3 , C is final absolute humidity of inflowing air, kg/m^3 , c_{ads} refers to special heat of adsorbent, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$.

Diffusion coefficient D was calculated by formula given in [2]:

$$\ln D = -2.95 - 6282.02 \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

where D is diffusion coefficient, T refers to an absolute temperature of adsorbent layer.

Mass transfer factor β , s^{-1} is calculated by [2]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_p} + \frac{1}{\beta_{c.s.}}, \quad (3)$$

where β_y , β_p and $\beta_{c.s.}$ are the factors mass transfer in gaseous phase, in pores and due to coplanar stirring, s^{-1} .

Values of adsorption, final absolute humidity of inflowing air and adsorption heat are calculated by procedure developed earlier [2]. For example, outlet absolute humidity of airflow is determined as [2]:

$$C = C_0 \cdot \left(1 + e^{\frac{[\beta \cdot \frac{(-\tau \cdot w \cdot C_0)}{A_{\text{max}}} + H]}{w}}\right)^{-1} \quad (4)$$

where H is the length of adsorbent layer, m, A_{max} is maximal water uptake, i.e. limit adsorption, kg/kg ;

Adsorption and air volume are determined by convenient formula

$$A = \frac{C_0 - C}{M_{\text{sor}}} \cdot V_{\text{air}} \quad (5)$$

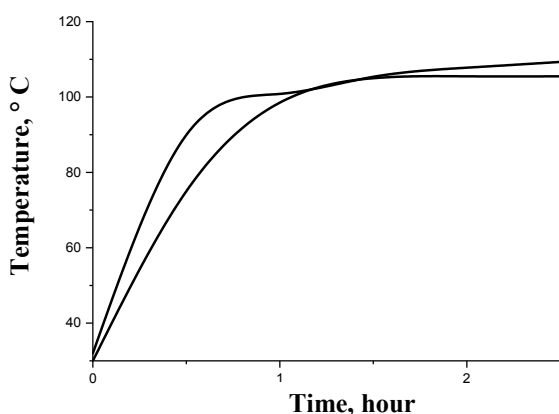
$$V_{\text{air}} = F_{\text{ts}} \cdot w \cdot \tau \quad (6)$$

where F_{ts} is transection area of heat storage device, m^2 , w is speed of humidified air, m/s , τ is time of discharge, i.e. adsorption, s.

Heat of adsorption is estimated as [2]

$$\Delta H_{\text{ads}} = \Delta h \cdot A \cdot \frac{1000}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (7)$$

where $\Delta h \cong 60$ is adsorption heat of water vapour, kJ/mole ; A is an adsorption or water uptake, kg/kg ; $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ is molar mass of water, g/mole .



1 – experimental data [7], 2 – results of mathematical modeling

Fig. 3 – Time-temperature curves for final airflow temperature near the outlet of open-type adsorptive heat storage device

Results and discussion. Suggested algorithm was confirmed by experimental data for open-type heat storage device based on composite ‘silica gel – sodium sulphate’ given in [7]. The difference between experimental data and the calculated temperatures does not surpass 5°C during 1,5 hours of discharge. So, this algorithm is appropriate for estimating the thermal conditions of open-mode heat storage device. Then performance of the adsorptive heat storage unit based on composites ‘silica gel sodium – sulphate’ was modeled for a convenient ventilation system of habitual inner space. Mass of adsorbent ‘silica gel – sodium sulphate’ was suggested to be 96 kg.

Plots of final airflow temperature near the outlet of heat storage device vs. time are given in Fig. 4. Obviously, curves flatten out at rather high times which corresponded with approaching the maximal adsorption values and efficiency factors. Time to achieve this plateau decreases when air-flow speed, absolute humidity and airflow temperature increase (Fig. 4a-c, Fig. 5). Temperature of air which sup-

flow speed, absolute humidity and airflow temperature increase (Fig. 4a-c, Fig. 5). Temperature of air which sup-

plied to the ventilated premise grows simultaneously due to increasing the adsorption or water uptake and adsorption heat.

However, airflow temperatures of 80 – 90 °C close to regeneration temperatures of adsorbent are achieved rather quickly. For example, at airflow temperature of 60 °C and absolute humidity final airflow temperature is risen to 80 °C within 1 – 2 hours from the beginning of discharge of the device. They are corresponded with values of adsorption no more than $0.2A_{\max}$. That results in rather low values of the efficiency factor.

Moreover, this time strongly depends on airflow speed. As airflow speed increased from 0.1 to 0.4 m/s, plateau of final airflow temperature decreased nearly by half (Fig. 4a-c).

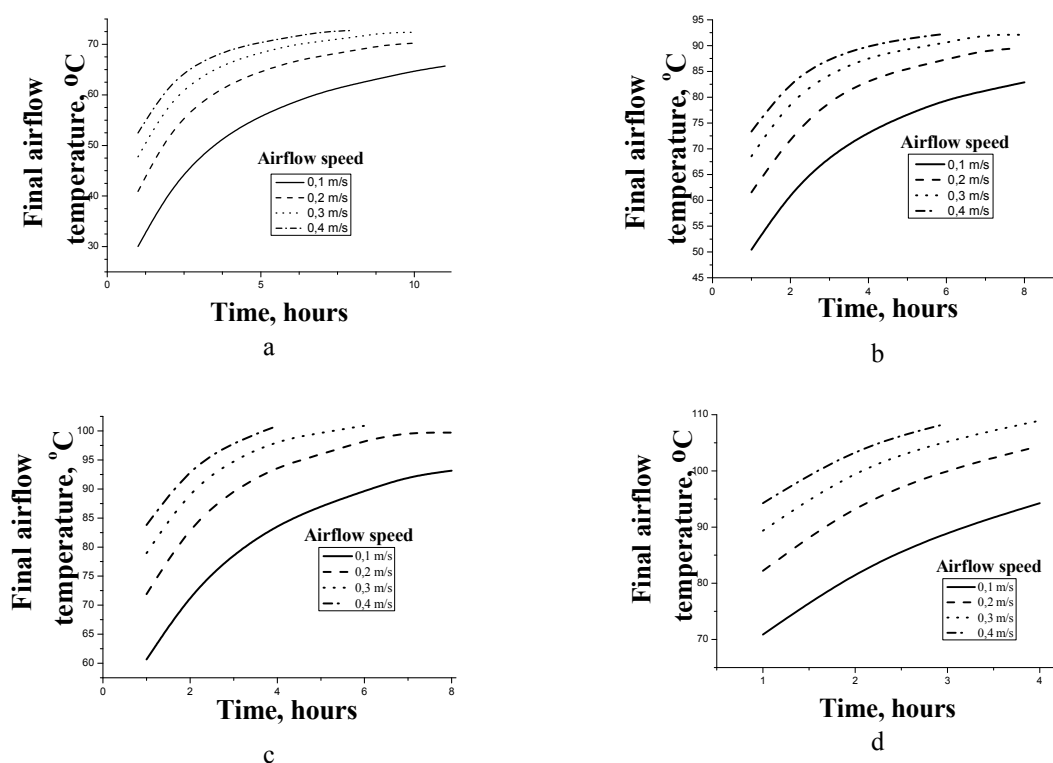


Fig. 4 – Temperature-time curves for heat storage device operating in open mode. Adsorbent ‘silica gel 20 % – sodium sulphate 80 %’. Airflow temperature 20 °C (a), 40 (b), 50 (c) and 60 °C (d). Absolute humidity 0.04 kg/m^3

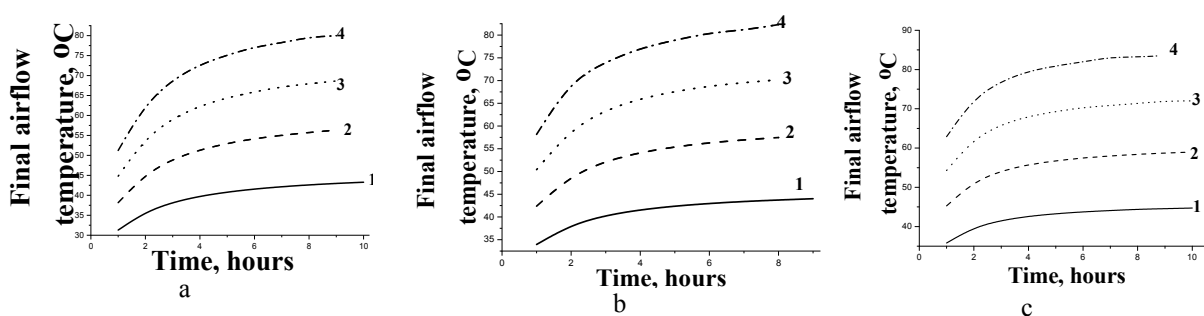


Fig. 5 – Temperature-time curves for open-mode heat storage unit. Adsorbent ‘silica gel 20 % – sodium sulphate 80 %’. Airflow temperature 30 °C. Airflow speed, m/s: 0.2 (a), 0.3 (b), 0.4 (c). Absolute humidity, kg/m^3 : 1 – 0.01; 2 – 0.02; 3 – 0.03; 4 – 0.04

When temperature of inflowing air increased to 50 – 60 °C, final temperatures of inflowed air of 80 °C can be achieved within 1 – 2 hours (Fig. 4c, d). Temperature of adsorbent layer reaches 90 °C, i.e. regeneration temperature.

Obviously, operating parameters of heat storage device should be analyzed. Plateau at temperatures which doesn't surpass 80 – 90 °C is observed at the temperatures of initial airflow which supplied to the heat storage device are sustained at 20 – 30 °C (Fig. 4a, Fig. 5).

More promising mode is absolute humidity of inflowed air $0.03 - 0.04 \text{ kg/m}^3$ which are corresponding to maximal values of efficiency factor [2]. Final temperatures of 65 – 80 °C are stated to be achieved at the airflow speed 0.4 m/s within 6 – 7 hours which corresponded with maximal values of efficiency factors 45 – 50 %. As another

simplest technical solution, falling five-fold of charge and discharge periods can be considered. Under these conditions warm airflow can be supplied to ventilated premises corresponded with Sanitary Regulation.

Conclusions. Thermal conditions of open-mode adsorptive heat storage device were studied. The method of determination of final airflow temperature which supplied into ventilated premises is developed for typical conditions of the ventilation systems for the residential premises. Curves final temperature of inflowing air vs. time when discharged is shown to depend on operational parameters of adsorptive open-mode heat storage device. It was shown that time to achieve plateau or maximal values of inflowing air decreases as temperature, speed and initial absolute humidity of air which supplied to adsorbent layer is increased. The correlation between initial temperature, absolute humidity, speed of humid airflow and final airflow temperature which passed through the adsorbent layer is shown. Maximal temperatures of at most 65 – 80 °C are corresponded with the initial temperatures and absolute humidity of initial airflow 20 – 30 °C and 0.03 – 0.04 kg/m³, respectively. Under these conditions maximal values of efficiency factor of open-mode adsorptive heat storage device is stated.

Acknowledgement

This work was performed within frames of taxpayer-funded research of Ministry of Education and Science of Ukraine (grant number 0119U002243).

References

1. Harmathy, N., Jakšić, Ž., Vatin, N. (2015). Heat Balance Method Application in Building Energy Performance Simulation. *Applied Mechanics and Materials.*, 725-726, 1572-1579. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.1572.
2. Sukhyi, K.M., Belyanovskaya, E.A., Sukhyi, M.P. (2020). *Technology Development for Adsorptive Heat Energy Converters: Emerging Research and Opportunities*. San Francisco: IGI-GLOBAL, USA. DOI: 10.4018/978-1-7998-4432-7.
3. Vasta, S., Brancato, V., La Rosa, D., Palomba, V., Restuccia, G., Sapienza, A., Frazzica, A. (2018). Adsorption Heat Storage: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Nanomaterials.*, 8, 522 – 535. DOI: 10.3390/nano8070522
4. Aristov, Yu.I. (2020). Review of adsorptive heat conversion/storage in cold climate countries. *Appl. Therm. Eng.*, 180. P. 115848. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115848
5. Hong, S.W., Ahn, S.H., Chung, J.D., Bae, K.J., Cha, D.A., Kwon, O.K. (2016). Characteristics of FAM-Z01 compared to silica gels in the performance of an adsorption bed. *Appl. Therm. Eng.*, 104, 24 – 33. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.058
6. Erdogan, M., Bau, U., Bardow, A. (2019). Benchmarking commercial adsorbents for drying air in a packed bed. *Appl. Therm. Eng.*, 160, 113942. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113942
7. Sukhyi, K.M., Belyanovskaya, E.A., Kozlov, Ya.N., Kolomiyets, E.V., Sukhyi, M.P. (2014). Structure and Adsorption Properties of the Composites ‘Silica Gel – Sodium Sulphate’, obtained by Sol – Gel Method. *Appl. Therm. Eng.*, 64, 408 – 412. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.013
8. Serhiienko, Ya.O., Belyanovskaya, E.A., Sukhyi, K.M., Kolomiyets, E.V., Sukha, I.V., Sukhyi, M.K. (2020). *UA Patent No. 141142*. Kyiv: State Enterprise "Ukrainian Intellectual Property Institute"(Ukrpatent).

ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ АДСОРБЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ ВІДКРИТОГО ТИПУ ДЛЯ ПІДГРІВУ ПРИПЛИВНОГО ПОВІТРЯ

Беляновська О.А., канд. техн. наук, доцент,

Литовченко Р.Д., аспірант,

Сухий К.М., д-р техн. наук, професор,

Сергієнко Я.О., аспірант

Сухий М.П., канд. техн. наук, професор

Суша І.В., канд. техн. наук, доцент

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»,
м. Дніпро

Розглянуто тепловий режим адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу при розряді. Основні робочі параметри, що впливають на кінцеву температуру повітряного потоку, що подається до вентильованих приміщень, визначено на прикладі теплового акумулятора на основі композиту «силіка-гелю – натрій сульфату». Основними факторами, що визначають кінцеву температуру повітряного потоку, є початкові значення температури, абсолютної вологості та швидкості повітряного потоку, що направляється до шару адсорбенту. Алгоритм розрахунку експлуатаційних параметрів адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою отримав подальший розвиток. Запропонований алгоритм передбачає розрахунок коефіцієнта дифузії, коефіцієнта масопередачі, кінцевої абсолютної вологості повітряного потоку, об'єму повітря, що пройшов через шар адсорбенту, адсорбції, питомої теплоти адсорбції та кінцевої температури-

ри повітряного потоку, далі проводиться розрахунок корисної теплоти та теплових витрат на експлуатація акумулятора теплової енергії та оцінюється коефіцієнт корисної дії. Адекватність запропонованого алгоритму підтверджена відповідно до експериментальних даних для роботи адсорбційного теплоакуючого пристрою відкритого типу. Зазначається, що криві кінцевої температури припливного повітря в залежності від часу розряду теплового акумулятора залежать від характеристик потоку повітря, що подається до шару адсорбенту, таких як температура, швидкість та початкова абсолютна вологість. Коли ці параметри збільшуються, час досягнення плато, тобто максимальних значень кінцевої температури припливного повітря зменшується. Показана залежність кінцевої температури припливного повітря від початкових значень температури, абсолютної вологості, швидкості потоку вологого повітря. Максимальні температури підігрітого повітря не більше $65 - 80^{\circ}\text{C}$ встановлені при початкових температурах та абсолютній вологості початкового потоку повітря в межах $20 - 30^{\circ}\text{C}$ та $0,03 - 0,04 \text{ кг/м}^3$ відповідно. Результати цього представленого дослідження можуть бути використані для розробки енергоефективних систем вентиляції житлових приміщень та складів.

Ключові слова: адсорбційне акумулювання теплової енергії, тепловий акумулятор відкритого типу, коефіцієнт корисної дії, композитний «силікагель – кристалогідрат».

Список використаної літератури

1. Harmathy, N., Jakšić, Ž., Vatin, N. Heat Balance Method Application in Building Energy Performance Simulation. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725-726. P. 1572-1579. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.1572.
2. Sukhyy, K.M., Belyanovskaya E.A., Sukhyy M.P. Technology Development for Adsorptive Heat Energy Converters: Emerging Research and Opportunities. – San Francisco: IGI-GLOBAL, USA, 2020. 328 p. DOI: 10.4018/978-1-7998-4432-7
3. Vasta, S. et al. Adsorption Heat Storage: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Nanomaterials*. 2018. Vol. 8. P. 522 – 535. DOI: 10.3390/nano8070522
4. Aristov, Yu.I. Review of adsorptive heat conversion/storage in cold climate countries. *Appl. Therm. Eng.* 2020. Vol. 180. P. 115848. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115848
5. Hong, S.W. et al. Characteristics of FAM-Z01 compared to silica gels in the performance of an adsorption bed. *Appl. Therm. Eng.* 2016. Vol. 104. P. 24 – 33. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.058
6. Erdogan, M., Bau, U., Bardow, A. Benchmarking commercial adsorbents for drying air in a packed bed. *Appl. Therm. Eng.* 2019. – Vol. 160. – P. 113942 DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113942
7. Sukhyy, K.M., Belyanovskaya, E.A., Kozlov, Ya.N., Kolomiyets, E.V., Sukhyy, M.P. Structure and Adsorption Properties of the Composites ‘Silica Gel – Sodium Sulphate’, obtained by Sol – Gel Method. *Appl. Therm. Eng.* 2014. Vol. 64. P. 408 – 412. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.013
8. Пат. 141142 UA. МПК F24H 7/04 (2006.01) Адсорбційний акумулятор теплової енергії / Сергієнко Я.О.; Беляновська О.А.; Сухий К.М.; Коломієць О.В.; Суха І.В.; Сухий М.К., ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», заявка № u201908840, заявл. 22.07.2019., опубл. 25.03.2020, бюл. № 6. 4 с

Отримано в редакцію 20.03.2021
Прийнято до друку 26.06.2021

Received 20.03.2021
Approved 26.06.2021

ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ГОЛОЗЕРНОГО ВІВСА В ДІЄТИЧНИХ ПРОДУКТАХ БЕЗ ГЛЮТЕНУ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ СТРУКТУРИ ЗЕРНА В ПРОЦЕСІ ЕКСТРУЗІЙНОЇ ОБРОБКИ

Іваницький Г.К. д-р. техн. наук, Целень Б.Я. канд. техн. наук, с.н.с.,
Ганзенко В.В. канд. техн. наук, с.н.с., Радченко Н.Л. канд. техн. наук, с.н.с.
Інститут технічної теплофізики НАНУ, м. Київ

Проведено аналіз світового і вітчизняного ринку виробництва безглютенових продуктів та встановлено перспективність цього напрямку через щорічне зростання кількості населення, яке нездатне засвоювати білок глютену. В Україні власне виробництво безглютенових продуктів ще досить обмежене і основний асортимент продукції представлений імпортними виробниками. В рамках цього було окреслено основні проблеми та сформульовано завдання, які полягають у необхідності нарощування обсягів власного виробництва за рахунок пошуку нових видів сировини, оновлення рецептур та розроблення новітніх технологій обробки. Для вирішення цих завдань було проаналізовано різні види сировини з яких запропоновано використовувати голозерний овес як основу складу сухих дієтичних безглютенових сумішей. Для його обробки було запропоновано використовувати екструдер, оскільки він дозволяє за рахунок регулювання початкової вологості в зерні змінювати тиск, температуру процесу та час обробки, забезпечуючи при цьому необхідну мікроструктуру екструдату і високі якісні показники. Крім цього, під час екструзії відбувається знешкодження шкідливої мікрофлори і видалення надлишкової вологості, що дозволить збільшити термін зберігання сухої суміші і покращити якість змішування компонентів. Експериментальна частина досліджень полягала у визначенні доцільності використання екструдера для обробки голозерного вівса при отриманні сухих сумішей. Для цього експериментальним шляхом було встановлено механізм впливу екструзії на мікроструктуру зерна при різних режимах обробки та проведено порівняння екструдату зі зразками не обробленого зерна, а також проаналізовано динаміку структурних перетворень, які відбуваються в каналі екструдера. Проведено оцінку кількості залишкової вологості в отриманому екструдаті для визначення терміну зберігання сухих сумішей та параметрів змішування з іншими компонентами. Доведено доцільність використання в подальшому екструдера для обробки голозерного вівса при отриманні сухих сумішей.

Ключові слова: голозерний овес, безглютенові продукти, екструзійні технології, екструдер.

Вступ Світовий ринок безглютенових продуктів за останні роки показав стрімке зростання та досяг в 2020 році 6,2 млрд. доларів, що на 65 % перевищує показники 2012 року. Надалі експерти прогнозують щорічне зростання цього показника на 7 %. Аналіз вітчизняного ринку дієтичного харчування показав також щорічне стійке зростання попиту на продукти безглютенової групи. При цьому спостерігається їх періодичний дефіцит через залежність від імпортерів та обмежений асортимент продукції вітчизняних виробників. Такий попит пов'язаний із загальною світовою тенденцією зростання на 1 % числа населення з генетичною схильністю до непереносимості глютену (целиакією), а також збільшенням до 7-15 % кількості людей, які не засвоюють білок глютену без целиакії або ж мають алергічну реакцію на пшеницю, жито, ячмінь, овес плівчастий (0,2 %) [1,2]. В Україні ця цифра офіційно становить 0,05 % населення [2, 3], однак в дійсності ці показники значно занижені. Споживачами безглютенових продуктів переважно є діти, молодь та люди середнього віку. Серед продуктів, які найбільше користуються попитом: безглютенові батончики, печиво, хлібобулочні вироби та різноманітні напої. Також розповсюджені різні види борошна та їх сумішей, зокрема, пшона, зеленої гречки, кукурудзи, коричневого рису, сорго, кунжуту тощо. Переважна більшість наведених продуктів імпортується з Німеччини ("Glutano"), Італії ("dr. Schar"), Іспанії ("Gullon"), Польщі ("Bezgluten") та мають доволі високу вартість. Обсяг вітчизняного виробництва досить обмежений і представлений наразі лише кількома компаніями, такими, наприклад, як "Каскад", що випускає сировину і готові продукти, "Healthy Tradition", яка реалізує лише готову продукцію та "Rich-Oil", що випускає тільки сировину [2]. У зв'язку з ситуацією, що склалася на сьогодні в Україні з цього питання, актуальним завданням стає нарощування обсягів власного виробництва безглютенових продуктів за рахунок пошуку нових видів сировини, оновлення рецептур та розроблення новітніх технологій обробки.

Аналіз останніх досліджень. Проаналізувавши ринок сировини за останні роки, варто окремо виділити голозерний овес [3-11]. Обсяги його вирощування в світі щорічно стабільно зростають. Серед десяти видів здорової їжі він, за даними журналу "Time", займає п'яте місце [10]. Для України це досить новий мало

досліджений вид сировини. Особливу цінність він представляє для виробництва безглютенових продуктів завдяки відсутності у своєму складі білку глютену. Окрім цього, він характеризується підвищеним вмістом білків (14,3-19,5 %), жирів (4,6-4,67 %), невеликою кількістю клітковини (4 %) та малою зольністю (2,5 %) у порівнянні з традиційним пльвчастим зерном вівса [5,8,11,12]. З точки зору переробки він також економічно вигідний, оскільки, в структурі зерна відсутні зовнішня оболонка та характерні волоски на поверхні зерна, наявність яких у пльвчастих сортах вівса знижує вихід готового продукту до 53 % [3-5, 8,9]. Голозерний овес може використовуватися для продовольчих цілей без попередньої доробки, що значно знижує час обробки, трудові витрати і вартість виробництва.

На сьогоднішній день вітчизняне виробництво переробляє голозерний овес переважно на крупу, муку, рідше на толокно [3,5,7,12,13]. Такі обсяги недостатні для внутрішнього ринку виробництва безглютенових продуктів. Їх потенційне збільшення дозволило би значно розширити спектр продукції, зокрема, виробляти вівсяне молоко, напої з різноманітними добавками, печиво, батончики, вершки, хлібобулочні вироби і т. п. Невеликі обсяги переробки голозерного вівса пояснюються необхідністю перебудови традиційних вітчизняних технологій переробки пльвчастого вівса та їх переорієнтації на обробку голозерного, зважаючи на суттєву відмінність анатомічної і морфологічної будови цих сортів. В Україні на сьогоднішній день відсутній регламент переробки голозерних сортів вівса, а його переробка проводиться по нормативній і технічній документації або за технічними умовами для пльвчастих сортів вівса [13]. Тому для вирішення цієї проблеми необхідна достатня експериментально-дослідна база та обґрунтовані рекомендації щодо особливостей ведення процесу, заходи по розробці нормативної документації і наступної модернізації обладнання та технологічних ліній в цілому.

В Одеській національній академії харчових технологій на протязі років послідовно проводяться дослідження, спрямовані на створення схем переробки голозерного вівса в крупи з використанням холодного і гарячого кондиціонування зерна [7-9,13]. Розроблена схема включає наступні етапи: очистку зерна від домішок, холодне кондиціонування, шліфування, сортування продуктів шліфування, гаряче кондиціонування з наступним контролем продукції. Пропоноване рішення дозволяє скоротити частку дробленого в результаті шліфування зерна в 1,5-2 рази.

В Білорусі проводяться роботи присвячені розробці нових енергозберігаючих технологій виробництва круп і пластівців з голозерного вівса. Авторами запропоновано дві схеми: 1 – розділення голозерного вівса на дві фракції з наступним луценням лише однієї; 2 – без розділення на фракції і виключення етапу луцення [11].

Застосування екструзійних технологій. На основі аналізу існуючих вітчизняних і зарубіжних технологій та літературних даних останніх років було встановлено, що для отримання безглютенових сухих сумішей на основі голозерного вівса найбільше підходить екструзійна обробка [1,6,11,14-21]. Застосування екструдера дозволяє за рахунок регулювання початкової вологи в зерні змінювати тиск, температуру процесу та час обробки, забезпечуючи необхідну мікроструктуру екструдату, властивості і фізико-хімічний склад. Крім цього, під час екструзії відбувається знешкодження шкідливої мікрофлори і видалення надлишкової вологи, що дає можливість подовжити термін зберігання сухої суміші.

В Росії активно проводяться наукові дослідження по розробці технологій переробки пльвчастих та голозерних сортів ячменю і вівса на муку [4,14-17]. Серед нових розробок варто відмітити технологію отримання муки з використанням екструзійного способу обробки [14]. В даній роботі дослідження проводилися з метою підвищення харчової цінності хлібобулочної продукції за рахунок введення в рецептуру муки із пльвчастих та голозерних сортів ячменю і вівса. Запропоновано екструзійну технологію та режими ведення процесу, а також рекомендовано рецептуру з додаванням до 10 % сумішей екструдованої муки до складу хлібобулочних виробів. В роботі [18] ведуться дослідження по розробці екструзійної технології виробництва сиропів з голозерного вівса, зокрема, в якості лікувального безглютенового продукту, рекомендованого для хворих целиацією, а також для застосування в кондитерській галузі.

В Японії впроваджується виробництво хліба на основі голозерного вівса [19]. Виробники невеликих пекарень запропонували адаптувати екструзійну технологію виробництва глазурованих кондитерських виробів для виробництва безглютенового хліба основним компонентом якого є голозерний овес. Технологія побудована на основі коекструдера серії KN компанії "Rheon" [1].

Застосування екструзійних технологій при виробництві харчових продуктів забезпечує глибокі біохімічні перетворення вуглеводів, клітковини та білків, що сприяє підвищенню їх засвоюваності і отримання екструдатів хорошої якості. Асортимент харчової продукції, що виробляється за допомогою екструзійної технології, включає більше 400 найменувань. Тільки в США виробляється продуктів типу готових сніданків на понад 2 млрд доларів, причому їх випуск зростає щорічно на 3 % [1]. В Німеччині обсяг споживання екструдованих зернових продуктів збільшився з 1991 по 2001 рік на 50 % [10].

Формулювання мети та постановка завдання. Дана робота проводилась з метою експериментального дослідження зміни мікроструктури голозерного вівса в процесі екструзійної обробки стосовно розробки на його основі сухих гомогенізованих безглютенових сумішей з наступним додаванням сухих молочних концентратів - для потреб харчової промисловості.

Для досягнення поставленої мети на першому етапі досліджень поставлено наступні завдання:

- Вивчити механізм впливу екструзії на мікроструктуру голозерного вівса при різних режимах обробки.
- Дослідити динаміку структурних перетворень зернової сировини в каналі екструдера.
- Порівняти структуру екструдату із структурою суцільного зерна в залежності від режимів обробки.
- Визначити залишкову вологу в отриманому екструдаті для подальшого визначення терміну зберігання сухих сумішей та параметрів змішування з іншими компонентами.

Проведення експериментальних досліджень. Дослідження по вивченню механізму впливу екструзії на мікроструктуру голозерного вівса проводились на лабораторному стенді, основою якого є екструдер ПЕК 40х5В з продуктивністю 30-40кг/год. Схема лабораторного стенду та фотографія стенду представлені, відповідно, на рисунках 1а та 1б. Для досліджень використовувався голозерний овес сорту "Самуель" з великим вмістом білку (15,72 %) та жиру (4,86 %) [12]. Експерименти проводились при різних режимах обробки, зокрема, при зміні початкового вологовмісту зерна, температури процесу та часу обробки. Режими екструзії обрано на основі рекомендацій, наведених в роботі [14], а саме: температура в каналі для першого експерименту – 150 °С, для другого – 160 °С, час обробки від 6 до 10 с в залежності від заданої температури. Початковий вміст води в зерні підібрано для першого експерименту – 10 % (при температурі екструзії 160 °С), для другого – 11,8 % (при 150 °С).

В ході першого експерименту попередньо зволожене до заданих значень (10 %) зерно подавалось в бункер, звідки дозатором рівномірно надходило в завантажувальну воронку екструдера для обробки (рис.1а). В каналі екструдера за рахунок обертання шнека зерно поступово подрібнювалось і переміщувалося вздовж каналу до виходу з фільтри. Максимальні значення тиску та температури в каналі екструдера досягаються перед фільтрою, а тому основні структурні перетворення відбуваються перед виходом з екструдера [22]. Після продавлювання через профілюючий інструмент (фільтр) з екструдера виходить спучений стренг, що має форму джгута.

Аналогічно проводився другий експеримент з початковим вологовмістом в сировині – 11,8 % та температурою екструзії – 150 °С.

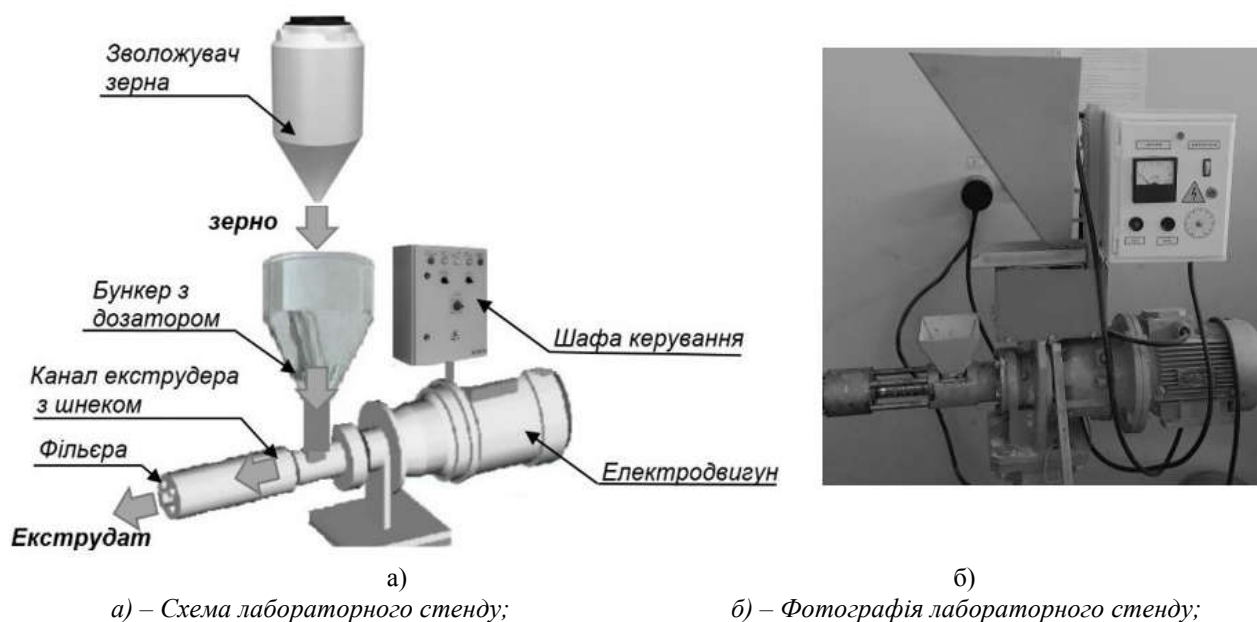
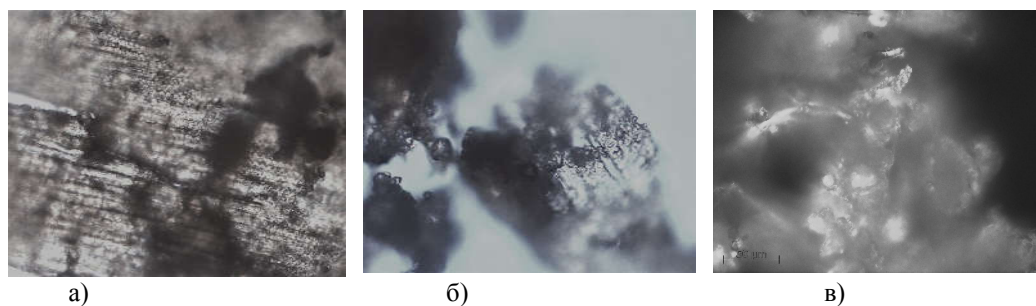


Рис. 1 – Лабораторний стенд для обробки голозерного вівса

В обох експериментах відбір проб зразків зерна проводився тричі: до обробки в екструдері, з каналу екструдера перед фільтрою та на виході з фільтри. Дослідження мікроструктури зразків проводились на мікроскопі Zeiss - Axio Imager за методом диференційно-інтерференційного контрасту (при х40).

Аналіз результатів. Для дослідження динаміки структурних перетворень в каналі екструдера необхідно спочатку проаналізувати структуру зерна до обробки. Тому було вивчено зразок поверхні ядра необробленого зерна голозерного вівса (рис.2а). Результати показали упорядкованість структури поздовжніх ліній розташованих на відстані одна від одної 20-25мкм.

Наступною відібрано пробу з каналу екструдера. Проаналізувавши зразок (рис.2б), можна побачити поступове механічне руйнування структури зерна до клітинного рівня, яке відбувається внаслідок обертання шнека та виникаючих сил тертя і зсувних напружень. Зростаюча температура і тиск в каналі викликають початок виділення жирів зі структури, про що свідчать характерні невеликі краплини, та желатинізацію крохмальних зерен [23].



а) – зразок не обробленого зерна; б) – зразок зерна відібраний з каналу шинка екструдера; в) – зразок відібраний на виході з фільтри.

Рис. 2 – Зміна мікроструктури голозерного вівса в процесі екструзійної обробки

Дослідження зразка, відібраного на виході з екструдера, також показало значну зміну у структурі (рис. 2в), у порівнянні, з необробленим зерном та зразком відібраним з каналу екструдера. Така трансформація структури пояснюється умовами, що створюються на виході з фільтри екструдера: зокрема, одночасним миттєвим перепадом тиску, температури та випаровуванням вологи. Внаслідок цього в екструдаті відбуваються значні структурні перетворення, які супроводжуються розривом стінок клітин та молекулярного ланцюга крохмалю з утворенням більш пористої структури, яка збільшується в об'ємі та, відповідно, отримує нові властивості. Окрім цього, в структурі відбувається розрив стінок жирових клітин на що вказує їх поява на зразках екструдату. При цьому завдяки короткій тривалості (6...10 с) дії високих температур, не спостерігається окислення жирів, що є безумовною перевагою даного методу [23].

Подібний характер динаміки структурних перетворень в екструдаті спостерігався і для другого режиму обробки.

Оскільки залишкова волога в екструдаті має впливати на параметри змішування компонентів сухої суміші та на термін зберігання кінцевого продукту, було проведено дослідження зміни кількості вологи в екструдаті. Результати показали, що в зразку, отриманому при початкових значеннях вологовмісту 10 % та температурі екструзії 160 °С, відбулось зменшення вологи до 5,8 %, а в другому експерименті при початковому вологовмісті 11,8 % та температурі екструзії 150 °С залишок вологи складає 9,4 %. З двох досліджених режимів кращим є перший, оскільки, при малій кількості залишкової вологи меншим буде ризик розвитку патогенної мікрофлори, а термін зберігання таких сумішей подовжується. В подальших дослідженнях планується визначити закономірність впливу кінцевої вологи на мікрофлору та якість змішування. Відповідно такі перетворення будуть впливати на властивості кінцевого продукту і параметри змішування при одержанні сухих сумішей, що стане наступним етапом досліджень.

Висновки. В ході виконання роботи було проаналізовано стан вітчизняного ринку виробництва дієтичних харчових продуктів та визначено найбільш ефективні технології виробництва безглютенових продуктів. В якості сировини обрано перспективний вид зерна – голозерний овес, а для його обробки серед відомих технологій було обрано екструзію. Саме цей метод дозволяє сумістити в одному апараті процеси подрібнення, транспортування та термічної обробки, що відкриває можливість за рахунок регулювання параметрів процесу отримувати продукти з наперед заданими властивостями.

Проведено перший етап досліджень, який полягав у визначенні динаміки структурних перетворень в каналі екструдера та порівнянні отриманої структури екструдату з необробленим зерном. За час перебування сировини в каналі екструдера найбільш інтенсивне руйнування структури, на клітинному рівні, відбувається перед виходом з фільтри та на виході з неї, де температура, тиск, сили тертя та зсувні напруження досягають максимальних значень. Встановлено, що при початковому вологовмісті зерна 10 %, температура процесу становить 160 °С, тривалість обробки - 10с, а також спостерігається інтенсивне руйнування клітин та виділення жиру на поверхні екструдату. Підвищення початкового вологовмісту на 1,8 % зменшує температуру процесу на 10 °С і скорочує час обробки з 10 с до 6 с. При цьому помітно зменшуються ступінь руйнування зерна та виділення жиру, але зростає кількість залишкової вологи в зразках екструдату. Визначено, що кількість вологи в зерні перед його обробкою визначає температуру процесу, тиск, час обробки та глибину структурних перетворень в зерні. Дослідження впливу механізму екструзії на мікроструктуру показали значні відмінності у структурі до та після обробки, зокрема, утворення більш пористої структури і зниження залишкової вологи в екструдаті, що забезпечує збільшення терміну зберігання сумішей та спрощує процес перемішування сухих компонентів.

Аналіз результатів підтвердив доцільність використання екструдера для обробки голозерного вівса при отриманні сухих сумішей. Однак отримані зразки екструдату у вигляді джгута свідчать, що екструдат необхідно буде додатково подрібнювати до консистенції борошна на млині. Наступним етапом стане вибір параметрів змішування з іншими компонентами сухої суміші та вибір обладнання для його реалізації, а також визначення терміну зберігання продукту.

References

1. Karpov, O. (2019). Proizvodstvo bezgliutenovoy produktsii [Production of gluten-free products.]. Foodbay Blog URL: <https://foodbay.com/wiki/novosti-industrii/2019/07/10/proizvodstvo-bezglyutenovoy-produkcii-problemy-ne-zakanchivayutsya-na-recepture/>
2. Naumova, O.A. (2020). Era bezgliutena: pochemu pshenichnaya muka stala vrednoy dlya bolee 10% zhytelej zemnogo shara? [The gluten-free era: why has wheat flour become harmful for more than 10% of the world's inhabitants?]. Khraneniye i pererabotka zerna. Nauchno-prakticheskiy portal. <https://hipzmag.com/tema/era-bezglyutena-pochemu-pshenichnaya-muka-stala-vrednoy-dlya-bolee-10-zhitelej-zemnogo-shara/>
3. Mukoid, R., Yemel'yanova, N., Ukrainets, A., Chumakova, O., Svydynyuk, I. (2010). Oves golozerny – syrovyna dlia likuval'no-dietychnykh produktiv [Naked oats – raw materials for therapeutic dietary products]. *Kharchova ta pererobna promyslovist*, 2, 24–25 (in Ukrainian).
4. Andrejev, N.R., Goldshtejn, V.G., Nosovskaya, L.P., Adikajeva, L.V., Golionko, Ye.O. (2019.) Golozerny oves – perspektivnoje syr'yo dlya glubokoy pererabotki [Naked oats are a promising raw material for deep processing]. *Agroculture Science Euro-North-East*, 20(5), 447–455 (in Russian).
5. Koshova, V.M., Mukoid, R., Gurina, J.J., Ushach, A.V. (2016). Kharakterystyka ryznykh sortiv vivsa [Characteristics of different varieties of oats]. *Naukovi Praci NUKhT*, Kyiv, 22(2), 213–219 (in Ukrainian).
6. Valentine, J., Clothier, R.B. (1992) The development of naked oats in the UK. The changing role of oats in human and animal nutrition. Proceed. of the IV Intern. oat conference. Adelaide, South Australia, 38–41.
7. Buranova, S.V. (2010). Tekhnologichni vlastyivosti golozernogo vivsa ta metody jogo zberigannya [Technological properties of Naked Oats and methods of its storage]. Avtoref. dis. kand. techn. nauk, 05.18.01, Odessa, ONAKhT, 22 (in Ukrainian).
8. Sots, S.M., Kustov, I.O. (2015). Osoblyvosti tekhnologichnykh vlastyivostej ta khimichnogo skladu golozernogo vivsa sortu «salomon» [Features of technological properties and chemical composition of Naked Oats of the Salomon variety]. *Kharchova nauka i tekhnologiya*, 2(31), 103–108 (in Ukrainian).
9. Sots, S., Chumachenko, Yu., Kustov, I. & Kuz'menko, Yu. (2020). Zerno golozernogo vivsa ta golozernogo yachmeniu. Osoblyvosti tekhnologichnykh vlastyivostej zerna [Grain of Naked Oats and naked barley. Features of technological properties of grain]. *Scientific Works*, 84(2), 5–9 (in Ukrainian).
10. Welch, R.W. (1995). The Oat Crop: Production and Utilization. ed. Chapman and Hall, UK. 584.
11. Kasjanova, L.A., Baitova, S.N. (2007). Otsenka kachestva zerna golozernogo i pljonchatogo ovsa kak syr'ya dlya proizvodstva pishchevykh produktov [Evaluation of the quality of grain of naked and filmy oats as raw materials for food production]. *Vestnik Mogilyovskogo gos. un-ta prodovol'stviya*, 1, 37–41 (in Russian).
12. Mazurkak, I.V., Likhochvor, V.V., Mazurkak, O.T. (2019). Vliyanie norm posieva na urozhajnost i kachestvo zerna ovsa v usloviyakh zapadnoj liesostiepi Ukrainy [The influence of sowing norms on the yield and quality of oat grain in the conditions of the western forest-steppe of Ukraine]. *Vestnik BGSKhA –nauchno-metodicheski zhurnal, Gorki, Bielorus'*, 2, 94–96 (in Russian).
13. Sots, S.M., Voloshenko, O.S., Kustov, I.O. (2013). Vplyv vodoteplovoj obrobky zerna na vykhid i yakist' tsiloi krupy z golozernogo vivsa [Influence of water heat treatment of grain on the yield and quality of whole grains from Naked Oats]. *Naukovi pratsi ONAKhT*, 44 (1), 7–10 (in Ukrainian).
14. Yanova, M.A., Ivanova, T.S. (2014). Ekstrusionnaya obrabotka zerna yachmenia i ovsa dlya polucheniya muki i muchnykh konditerskikh khlibobulochnykh izdeliy [Extrusion processing of barley and oat grains for the production of flour and flour confectionery, bakery products]. Krasnoyarsk, 115 (in Russian).
15. Yur'yev, V.P., Bogatyrev, A.N. (1991). Fiziko-khimicheskiye osnovy polucheniya ekstruzionnykh produktov na osnovie rastitel'nogo syr'ya [Physico-chemical bases of obtaining extrusion products based on vegetable raw materials]. *Vestnik sel'khoz. nauki*, 12, 43–51 (in Russian).
16. Shaburova, G.V. (2012). Ekstrudirovanny yachmien' kak component funktsional'nykh pishchevykh produktov [Extruded barley as a component of functional food products]. *Pishcheyaya promyshlennost*, 10, 44–45 (in Russian).
17. Magomedov, G.O., Karpenko, V.I., Zhuravliov, A.A. (2010). Reologicheskiye svoystva tiestsya s ekstrudatom ovsa [Rheological properties of the dough with oat extrudate]. *Khraneniye i pererabotka sel'khoz. syr'ya*, 11, 27–29 (in Russian).
18. Chekina, M.S. (2017). Pazrabotka tekhnologii zernovykh siropov iz golozernykh sortov ovsa [Development of technology of grain syrups from naked varieties of oats]. Dis. kand. techn. nauk, 05.18.07, SPb, SPb NIU ITMO, 165 (in Russian).
19. Bykovskaya, G. (1992). Ekstrusionnaya tekhnologiya v Yaponii [Extrusion technology in Japan]. *Khlieprodukty*, 7, 50–53 (in Russian).
20. *Extrusion cooking technology*/ Ed. R. Sowitt (1984). London; New York, 212 p
21. Bailey, L.N., Hauck, B. W., Sevatson, E.S., Singe, R.E. (1991). Systems for manufacture of ready to eat breakfast cereals using twin-screw extrusion. *Cereal Foods World*, 10, 863–869.
22. Ivanitsky, G.K., Shurchkova, Yu.A., Radchenko, N.L. (2011). Modelirovaniye protsessa ekstruzii v predmatrichnoy zonie i v matritse pri obrabotke rastitel'nogo syr'ya [Modeling of the extrusion process in the

pre-matrix zone and in the matrix during the processing of plant raw materials]. *Promyshlen. teplotekhnika*, 33 (6) 32–38 (in Russian).

23. Ostrikov, A.N., Abramov, O.V., Rudometkin, A.S. (2004). *Ekstruziya v pishchevykh tekhnologiyakh [Extrusion in food technologies]*. SPb, GIOR (in Russian).

PROSPECTS OF USING NAKED OATS IN GLUTEN-FREE DIETARY PRODUCTS. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE GRAIN STRUCTURE CHANGES DURING EXTRUSION PROCESSING

Ivanitsky G.K., Dr. Sci. Tech., Tselen B.Ya., Ph.D., Ganzenko V.V., Ph.D., Radchenko N.L., Ph.D.
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv

In the article the analysis of the world and domestic market of manufacture products gluten-free was carried. We have identified the need to develop this area in the context of the annual increase in the number of people who are unable to digest gluten protein. In Ukraine own manufacture of products without gluten is still limited, and the basic assortment of these products is delivered from other countries. The primary goals have been as a result formulated. They provide, first of all, the need to increase their own production volumes through the search for new types of raw materials, recipes and the development of new processing technologies. In solving these problems, we analyzed various types of raw materials, from which naked oats were selected as the main component of dry dietary gluten-free mixtures. For its processing, it was proposed to use a screw extruder, since it allows, by regulating the initial moisture in the grain, to change the pressure, process temperature and processing time, thus predicting the necessary microstructure of the extrudate and properties. In addition, during extrusion, harmful microflora is neutralized and excess moisture is removed, which will increase the shelf life of the dry mix and improve the quality of mixing the components. Experimental studies were carried out in order to confirm the feasibility of using an extruder for processing naked oats and obtaining dry powder mixtures. In the course of the study, the structure of the extrudate was compared with the internal structure of the whole grain, due to which the dynamics of the structural transformations of the product that occur in the extruder channel was analyzed, as well as the factors of the influence of extrusion on the microstructure of grain under various processing modes were established. The amount of residual moisture in the resulting extrudate was found to determine further shelf life of dry mixtures and mixing parameters with other components. As a result, the expediency of using an extruder for processing naked oats in the production of dry mixtures has been proven.

Key words: naked oats, gluten-free products, extrusion technology, extruder.

Список використаної літератури

1. Производство безглютеновой продукции. *Foodbay Blog*: веб-сайт. URL: <https://foodbay.com/wiki/novosti-industrii/2019/07/10/proizvodstvo-bezglyutenovoy-produkcii-problemy-ne-zakanchivayutsya-na-recepture/> (дата звернення 23.02.2021).
2. Эра безглютена: почему пшеничная мука стала вредной для более 10% жителей земного шара? *Хранение и переработка зерна. Научно-практический портал*: веб-сайт. URL: <https://hipzmag.com/tema/era-bezglyutena-pochemu-pshenichnaya-muka-stala-vrednoj-dlya-bolee-10-zhitelej-zemnogo-shara/> (дата звернення 23.02.2021).
3. Мукоїд Р., Ємельянова Н., Українець А., Чумакова О., Свидинюк І. Овес голозерний – сировина для лікувальнієтичних продуктів. *Харчова та переробна промисловість*. 2010. № 2. С. 24–25.
4. Андреев Н.Р., Гольдштейн В.Г., Носовская Л.П., Адикаева Л.В., Голионко Е.О. Голозерный овес - перспективное сырье для глубокой переработки. *Agroculture Science Euro-North-East*. 2019. № 20(5). С. 447–455.
5. Кошова В.М., Мукоїд Р.М., Гуріна О.О., Усач А.В. Характеристика різних сортів вівса *Наукові праці НУХТ*. 2016. № 22(2). С. 213–219.
6. Valentine J., Clothier R.B. The development of naked oats in the UK. The changing role of oats in human and animal nutrition. *Proceedings of the IV International oat conference. Adelaide, South Australia*. 1992. P. 38–41.
7. Буранова С.В. Технологічні властивості голозерного вівса та методи його зберігання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к. т. н. : 05.18.01. Одеса, 2010. 20 с.
8. Соц С.М., Кустов І.О. Особливості технологічних властивостей та хімічного складу голозерного вівса сорту «саломон». *Харчова наука і технологія*. 2015. №2(31). С. 103–108.
9. Соц С., Чумаченко Ю., Кустов І., Кузьменко Ю. Зерно голозерного вівса та голозерного ячменю. Особливості технологічних властивостей зерна. *Scientific Works*. №84(2). С. 5–9.
10. Welch R.W. The chemical composition of oats. *The Oat Crop: Production and Utilization*. ed. Chapman and Hall. 1995. P. 279–320.

11. Касьянова Л.А., Баитова С.Н. Оценка качества зерна голозерного и плёнчатого овса как сырья для производства пищевых продуктов. *Вестник Могилевского гос. университета продовольствия*. 2007. № 1. С. 37-41.
12. Мазурак И. В. Лихочвор В.В., Мазурак О.Т. Влияние норм посева на урожайность и качество зерна овса в условиях западной лесостепи Украины. *Вестник БГСХА: науч.-метод. журн.* 2019. № 2. С. 94–96.
13. Соц С.М., Волошенко О.С., Кустов І.О. Вплив воднотеплової обробки зерна на вихід і якість цілої крупи з голозерного вівса. *Наукові праці ОНАХТ*. 2013. № 44 (1). С. 7–10.
14. Янова М.А., Иванова Т.С. Экструзионная обработка зерна ячменя и овса для получения муки и мучных кондитерских, хлебобулочных изделий. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2014. 115 с. URL: http://www.kgau.ru/sveden/2017/ipp/metod_190402_ukr_17.pdf (дата звернення 15.03.2021).
15. Юрьев В.П., Богатырев А.Н. Физико-химические основы получения экструзионных продуктов на основе растительного сырья. *Вестник сельхоз науки*. 1991. № 12. С. 43–51.
16. Шабурова Г.В. Экструдированный ячмень как компонент функциональных пищевых продуктов. *Пищевая промышленность*. 2012. № 10. С. 44–45.
17. Магомедов Г.О., Карпенко В.И., Журавлев А.А. Реологические свойства теста с экструдатом овса. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2010. № 11. С. 27–29.
18. Чекина М.С. Разработка технологии зерновых сиропов из голозерных сортов овса: автореф. дис. на соиск. науч. степени к. т. н. : 05.18.07. Санкт-Петербург, 2017. 16 с.
19. Быковская Г. Экструзионная технология в Японии. *Хлебпродукты*. 1992. № 7. С. 50-53.
20. Sowitt R. Extrusion cooking technology. London. New York, 1984. 212 p.
21. Bailey L.N., Hauck B. W., Sevatson E.S., Singer R.E. Systems for manufacture of ready-to-eat breakfast cereals using twin-screw extrusion. *Cereal Foods World*. 1991. № 10. С. 863–869.
22. Иваницкий Г.К., Шурчкова Ю.А., Радченко Н.Л. Моделирование процесса экструзии в предматричной зоне и в матрице при обработке растительного сырья. *Промышленная теплотехника*. 2011. № 33 (6). С. 32–38.
23. Остриков А.Н., Абрамов О.В., Рудометкин А.С. Экструзия в пищевых технологиях. СПб.: ГИОРД, 2004. 288 с.

Отримано в редакцію 01.04.2021
Прийнято до друку 02.07.2021

Received 01.04.2021
Approved 02.07.2021

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ТЕМПЕРАТУРИ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ПІД ДІЄЮ ПІДВИЩЕНОГО ТИСКУ

Потапов В.О., професор, д.т.н., Якушенко Є.М., доцент, к.т.н.,
Гриценко О.Ю., інженер

Харківський Державний Університет Харчування та Торгівлі, м. Харків

Проведено експериментальні дослідження кінетики температури під час фільтраційного сушіння вологого матеріалу у випарно-конденсаційному модулі (ВКМ) під дією підвищеного тиску, що створюються зовнішнім компресором. При цьому компресор використовуються для одночасного нагрівання сушильного агенту та його фільтрації через шар матеріалу у ВКМ. Досліджено вплив тиску від 0,2 до 0,6 МПа на кінетику температури та тепловий к.к.д. процесу сушіння. Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що тепловий к.к.д. фільтраційного сушіння в сушарці з ВКМ на 12...15 % вище ніж в конвекційних фільтраційних сушарках в діапазоні температур 55...90 °С. Показано, що за умов надлишкового тиску існує постійний градієнт температур за шаром матеріалу та довжиною ВКМ на відміну від фільтраційного сушіння за атмосферного тиску.

Ключові слова: фільтраційне сушіння, підвищений тиск, кінетика температури, політропні процеси, енергоефективність.

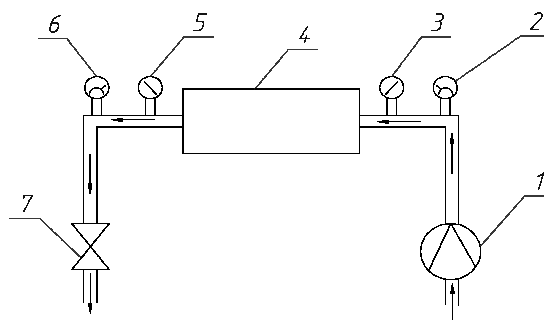
Вступ. В сучасних умовах при швидкому подорожчанні енергоносіїв, особливо актуальною стає проблема енергозбереження у виробничо-господарської діяльності підприємств. Одним з найбільш енергоємних процесів є теплове сушіння. Як відомо, корисна енергія, що витрачається на випаровування вологи в конвекційних сушарках, за різними розрахунками складає всього 40...50 % [1]. Питомі енерговитрати конвекційних сушарок, які використовуються на підприємствах досягають 8 МДж/кг видаленої вологи, що практично втричі більше фізично необхідного мінімуму [2]. Крім того, викиди відпрацьованого сушильного агента з високим тепловмістом збільшують теплове забруднення оточуючого середовища. Відзначені проблеми є найбільш актуальними для вирішення на сучасному етапі розвитку теорії та техніки сушіння. Тому створення нових технологій, контурентноспроможного промислового устаткування і технологічних ліній з урахуванням вимог до раціонального використання енергії та захисту довкілля є першочерговою задачею.

З практичного досвіду відомо, що більшу частину втрат енергії при тепловому сушінні припадає на викиди з відпрацьованим сушильним агентом, тому сучасні тенденції розвитку техніки сушіння спрямовані в першу чергу на скорочення саме цієї статті енерговитрат [3]. До таких перспективних способів сушіння слід віднести застосування теплових насосів, сушіння із радіаційним підведенням теплоти (НВЧ та ІЧ сушіння), комбіновані способи сушіння, які використовують адресну доставку енергії до об'єму матеріалу [4]. Саме до такого способу сушіння слід відносити фільтраційне сушіння, під час якого сушильний агент фільтрується через шар дисперсного вологого матеріалу, що дозволяє, по перше, видаляти частину вільної вологи без перетворення її в пару, а, по друге, суттєво збільшити коефіцієнти тепло-масообміну та скоротити тривалість сушіння, а відповідно і питомі енерговитрати [5].

Подальшим розвитком способу фільтраційного сушіння є спосіб сушіння під дією підвищеного тиску [6], який має наступні переваги: нагрівання та переміщення сушильного агента здійснюється одним пристроєм – компресором, в результаті досягається повне використання ентальпії сушильного агента, яка витрачається не тільки на нагрівання та випаровування, але й на здійснення роботи по подоланню гідродинамічного опору шару матеріалу. Як наслідок цього температура на виході із сушарки може бути нижче температури адиабатного насичення і теоретично навіть нижче температури оточуючого середовища, що призведе до повної відсутності теплових втрат з відпрацьованим сушильним агентом.

Раніше нами було досліджено особливості кінетики вологовмісту в процесі сушіння під дією надлишкового тиску [7], де було виявлено основні закономірності цього процесу [8]. У зв'язку з цим метою даної роботи є експериментальне дослідження кінетики температури фільтраційного сушіння під дією підвищеного тиску, оскільки саме температура відпрацьованого сушильного агента визначає енергоефективність сушарки, а температура матеріалу безпосередньо впливає на якісні показники матеріалу, що зневоднюється.

Матеріали та методи досліджень. Для дослідження кінетики процесу фільтраційного сушіння під дією підвищеного тиску використовувалась експериментальна установка, яка зображена на рис. 1.

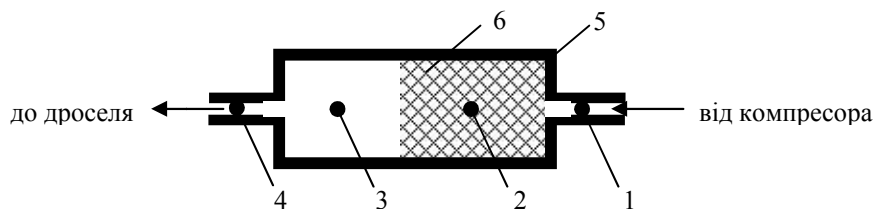


1 – компресор; 2, 6 – датчики температури; 3, 5 – датчики тиску; 4 – випарно-конденсаційний модуль; 7 – дросель

Рис. 1 – Схема експериментальної установки

Температури у випарно-конденсаційному модулі та у шарі матеріалу вимірювались термопарами. Схема розміщення термопар представлена на рис. 2.

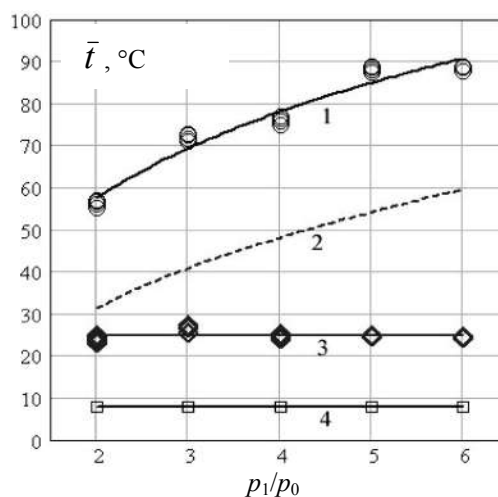
Експерименти проводились на моделі колоїдного капілярно пористого тіла у якості якого була обрана попередньо підготовлена дерев'яна тирса.



1, 2, 3, 4 – термопари; 5 – випарно-конденсаційний модуль; 6 – шар матеріалу, що висушується

Рис. 2 – Схема розміщення термопар у ВКМ

Результати досліджень. На рис. 3 наведено осереднені температури сушильного агента за весь період сушіння під тиском.



1 – температура сушильного агента на вході у ВКМ; 2 – розрахункова температура адіабатного насичення сушильного агента на виході із ВКМ; 3 – температура сушильного агента на виході із ВКМ; 4 – температура сушильного агента на вході в компресор

Рис. 3 – Середні температури сушильного агента за весь період сушіння

Температура на виході із сушарки виявляється меншою ніж температура адіабатного насичення сушильного агента при поточних значеннях температури та тиску на виході із сушарки. На рис. 3 температура адіабатного насичення сушильного агента (t_{ad}) розрахована за умов постійної ентальпії сушильного агента у процесі сушіння (втрати через теплоізоляцію ВКМ відсутні) для заданої температура на вході (t_1) та тисків на вході (p_1) та виході (p_2).

Ці експериментальні данні підтверджують принципову особливість процесу фільтраційного сушіння під тиском: сушильний агент повністю насичується вологою з матеріалу, а за рахунок виконання механічної

роботи по переміщенню паро-рідинної суміші крізь шар матеріалу зменшує свою температуру нижче температури адіабатного насичення.

Низька температура на виході із сушарки означає, що зменшуються втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом. Це призводить до підвищення енергоефективності процесу сушіння. Розрахуємо тепловий к.к.д. сушарки за відомою формулою

$$\text{к.к.д.} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0} \quad (1)$$

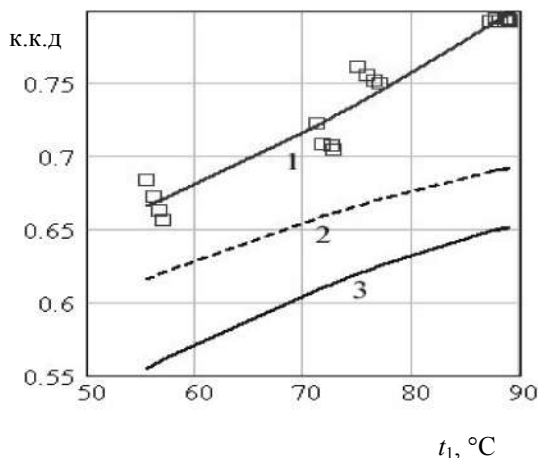
Для конвекційного сушіння температура на виході із сушарки $t_2 \geq t_{ad}$, а для фільтраційного сушіння під тиском $t_2 < t_{ad}$, тому тепловий к.к.д. сушарки в цьому випадку буде вищий.

На рис. 4 наведено порівняння експериментальних даних про к.к.д. процесу фільтраційного сушіння під тиском та конвекційного сушіння за нормального тиску.

Тепловий к.к.д. конвекційного сушіння розраховувався за умов ізоентальпійного процесу в сушарці ($t_2 \geq t_{ad}$) за тих же значень температур t_1, t_0 , що і для фільтраційної сушарки під тиском.

Лінія 2 на рисунку 4 відповідає теоретично максимальному к.к.д. конвекційної сушарки, коли вологість сушильного агента на виході $\varphi_2 = 100\%$. Реально на практиці $\varphi_2 = 60 \dots 80\%$, бо інакше буде спостерігатись конденсація вологи із повітря на матеріалі, що висушується. Для фільтраційного сушіння, як вже зазначалось, це не має значення, бо волога, що конденсується в шарі матеріалу, вилучається з нього під дією підвищеного тиску.

Як свідчать наведені данні, тепловий к.к.д. фільтраційного сушіння в експериментальній сушарці на

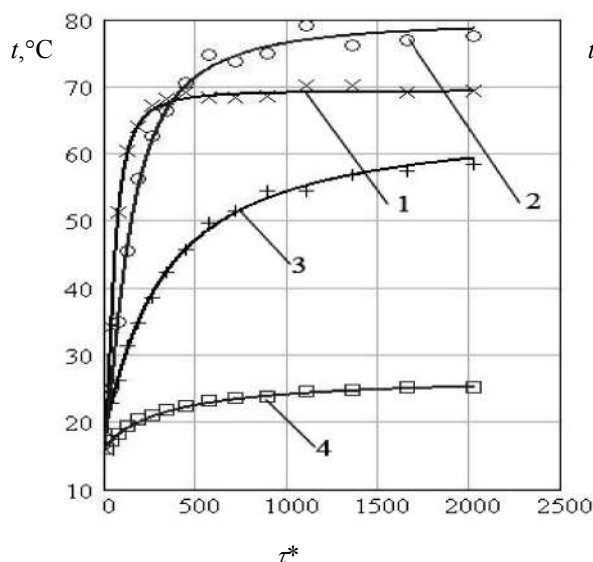


1 – фільтраційне сушіння під тиском; 2 – розрахунковий к.к.д. конвекційного сушіння за нормального тиску $\varphi_2 = 100\%$; 3 – розрахунковий к.к.д. конвекційного сушіння за нормального тиску $\varphi_2 = 60\%$

Рис. 4 – Тепловий к.к.д. процесу фільтраційного сушіння під тиском та конвекційного сушіння

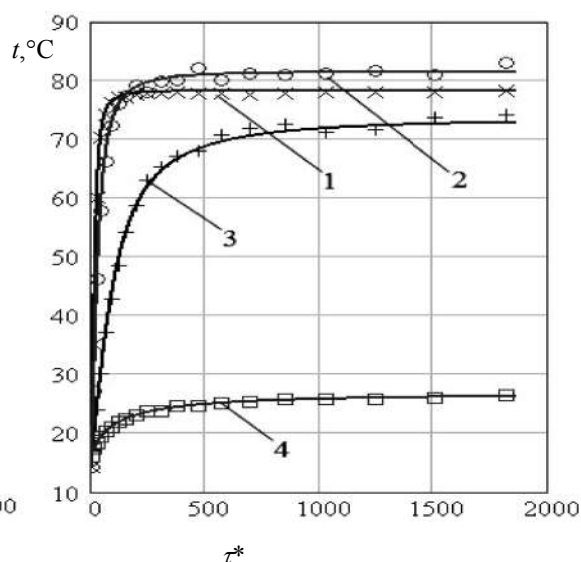
12...15 % вище ніж в конвекційних сушарках.

На рисунках 5, 6 наведено результати з кінетики температур під час фільтраційного сушіння під тиском для різної товщини шару (l_M) та тисків.



1 – на вході в ВКМ; 2 – середня температура в шарі; 3 – на виході з шару; 4 – на виході з ВКМ

Рис. 5 – Кінетика температури сушіння під тиском $p_1 = 0,2$ МПа, $l_M = 0,06$ м



1 – на вході в ВКМ; 2 – середня температура в шарі; 3 – на виході з шару; 4 – на виході з ВКМ

Рис. 6 – Кінетика температури сушіння під тиском $p_1 = 0,6$ МПа, $l_M = 0,15$ м

На цих рисунках температурні криві з позначкою 1 та 4 вимірювались на вході та виході випарно-конденсаційного модуля відповідно (розташування термопар наведено на рис. 2). Температурні криві з позначкою 3 вимірювались у ВКМ на виході з шару матеріалу (товщина шару була змінною, тому ВКМ був

частково заповнений). Температурні криві з позначкою 2 вимірювались в шарі матеріалу. Залежно від товщини шару всередині нього розміщувалось від 1 до 3 термопар і показання з них осереднювались за об'ємом шару.

Особливістю кінетики температури фільтраційного сушіння під тиском є те, що від початку до кінця процесу сушіння існує градієнт температур за шаром матеріалу та довжиною ВКМ на відміну від конвекційного сушіння, де висушений матеріал наприкінці процесу має температуру сушильного агента. Цей факт пояснюється особливістю гідродинаміки газового потоку під тиском. При відсутності теплообміну з оточуючим середовищем, та без здійснення роботи газом температура сушильного агента буде зменшуватись за напрямком руху, якщо швидкість потоку збільшується і навпаки. Так у пустому ВКМ при вході стиснутого після компресора газу відбувається його миттєве розширення (діаметр ВКМ 160 мм, а діаметр трубопроводу 10 мм), тому швидкість потоку зменшується, а його температура зростає. Навпаки при виході з ВКМ у трубопровід газ пришвидшується а температура його зменшується.

Зазначимо, що цей перепад температур між входом та виходом сушарки не є наслідком втрат теплоти, а є результатом перетворення кінетичної енергії потоку газу. Саме тому, як зазначалось вище, забезпечується низька температура на дроселі після ВКМ, що призводить до підвищення к.к.д. сушарки..

Наведені особливості пояснюються теорією газодинаміки. Згідно рівняння тепловмісту газового потоку у відсутності впливу сили тяжіння

$$Q - A = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} + c_p(t_2 - t_1), \quad (2)$$

де Q – питома теплова енергія, що підводиться до газового потоку на ділянці 1-2, Дж/кг; A – питома технічна робота потоку, Дж/кг; ω_1, ω_2 – швидкість потоку на вході та виході з ділянки 1-2, м/с; питома теплосмість газу, Дж/(кг·К); t_1, t_2 – температура газового потоку вході та виході з ділянки 1-2/.

Звідки отримуємо, що різниця температур сушильного агента під тиском залежить від співвідношення швидкостей потоку на конкретній ділянці ВКМ та термодинамічного процесу, який відбувається на цій ділянці

$$t_1 - t_2 = \frac{1}{c_p} \left(\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} - Q + A \right). \quad (3)$$

З іншого боку з узагальненого рівняння Бернуллі у відсутності впливу сили тяжіння питома технічна робота потоку дорівнює

$$-A = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} + \int_1^2 \frac{1}{\rho_z} dp + A_{mp}, \quad (4)$$

де A_{mp} – питома робота сил тертя в потоці, Дж/кг; ρ_z – густина газу.

З урахуванням (3) та (4) у випадку політропного процесу отримуємо наступну формулу, яка визначає зміну температури сушильного агента в процесі фільтраційного сушіння під тиском

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{c_p} \left\{ \frac{n}{n-1} \frac{p_1}{\rho_{a1}} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + Q + A_{mp} \right\}, \quad (5)$$

де ρ_{a1} – густина сушильного агента, яка відповідає тиску p_1 , кг/м³.

Згідно цієї формулі, за умови відсутності втрат теплоти (Q) та втрат на тертя (A_{mp}), зменшення тиску ($p_2 < p_1$) від входу в шар матеріалу до виходу із ВКМ повинно зменшувати температуру сушильного агента у напрямку його руху ($t_2 < t_1$). Тому для тонкого шару матеріалу, коли його гідродинамічний опір майже відсутній, середня температура шару матеріалу буде меншою за температури на вході в шар. Оскільки з підвищенням тиску зростає робота сил тертя, яку здійснює сушильний агент по переміщенню паро-рідинної суміші через ВКМ, то при більшому тиску (0,6 МПа) температура матеріалу менша ніж при тиску 0,3 МПа.

Інша закономірність спостерігається при збільшенні товщини шару. Як свідчать данні на рис. 5 та 6 середня температура шару матеріалу стає більшою за температури на вході у ВКМ. Це пояснюється рівнянням (5), згідно якого при збільшенні роботи сил тертя різниця температур на вході в шар та в самому шарі буде позитивною, якщо величина A_{mp} буде більшою, ніж перші два члени правої частини рівняння.

Це пояснюється наступним рівнянням для питомої сили тертя газового потоку в каналі

$$A_{mp} = \int_{x_1}^{x_2} \zeta \frac{\omega^2}{2} \frac{dx}{D}, \quad (6)$$

де ζ – коефіцієнт тертя; D – еквівалентний діаметр каналу, м.

Оскільки швидкість потоку залежить від тиску на ділянці 1-2 (рис.2), як і коефіцієнт тертя, то питома робота сил тертя буде збільшуватися зі збільшенням тиску та відношенням товщини шару до діаметру фільтраційних каналів у матеріалі. Саме тому зі збільшенням товщини шару та тиску спостерігається збільшення температури матеріалу під час фільтраційного сушіння під тиском.

Таким чином встановлені особливості кінетики температури в процесі фільтраційного сушіння під тиском цілком пояснюються теорією газодинаміки. Ці особливості слід враховувати при проектуванні фільтраційних сушарок під тиском, оскільки значення температур за шаром матеріалу безпосередньо пов'язані як з тиском на виході компресора, так і з гідравлічним опором шару. Зважаючи на це слід визначати раціональну товщину шару матеріалу, оскільки існує обмеження за максимальним гідродинамічним опором шару, яке пов'язано з тим, що регулювання температури сушильного агента здійснюється регулюванням тиску зовнішнього компресора.

Висновки. Досліджено кінетику температури під час фільтраційного сушіння під дією підвищеного тиску та отримано експериментальні данні про температуру в шарі матеріалу та у випарно-конденсаційному модулі на ділянці від компресора до виходу із сушарки.

Виявлено особливості впливу тиску від 0,2 до 0,6 МПа на кінетику температури та тепловий к.к.д. процесу сушіння. Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що тепловий к.к.д. фільтраційного сушіння в сушарці з випарно-конденсаційним модулем на 12...15 % вище ніж в конвекційних сушарках в діапазоні температур 55...90 °C.

Виявлено, що за умов надлишкового тиску існує постійний градієнт температур за шаром матеріалу та довжиною модуля на відміну від фільтраційного сушіння за атмосферного тиску. Цей градієнт виникає внаслідок політропного процесу у ВКМ з матеріалом за наявності теплообміну з оточуючим середовищем та сил тертя. При цьому цей градієнт температур не є наслідком втрат теплоти, а є результатом перетворення кінетичної енергії потоку газу, що призводить до зниження втрат теплоти з відпрацьованим сушильним агентом.

Отримані особливості кінетики температури слід враховувати при проектуванні фільтраційних сушарок під тиском.

References

1. Denisyuk, S.P. (2013). Formuvannya polityky pidvyshchennya enerhetychnoyi efektyvnosti – suchasni vyklyky ta yevropeys'ki oryentyury [Formation of energy efficiency policy – modern challenges and European guidelines]. *Energy: economics, technologies, ecology*, 2, 7–22 [in Ukrainian].
2. Bevz, S.M., Bondarenko, B.I., Denisyuk, S.P. (2007). Enerhoefektyvnist' ta vidnovlyuvani dzhherela enerhiyi [Energy efficiency and renewable energy sources]. In A.K. Shidlovsky (Ed.), Kyiv: Ukrainian encyclopedic knowledge [in Ukrainian].
3. Snezhkin, Y.F. (2009). Puty yntensyfykatsyy protsessov sushky [Ways to intensify drying processes]. *Industrial heat engineering*, 31(7), 89-90 [in Ukrainian].
4. Burdo, O.G. (2010). *Evolutsiya sushil'nykh ustanovok [Evolution of dryers]*. Odessa: POLYGRAPH, 368 [in Ukrainian].
5. Atamanyuk, V.M., Khanyk, Y.M. (2007). Klasyfikatsiya dyspersnykh materialiv, yak ob'yektiv sushynnya fil'tratsiynym metodom [Classification of dispersed materials as objects of drying by the filtration method]. *Chemical industry of Ukraine*. 3, 37-45 [in Ukrainian].
6. Potapov, V.O., Petrenko, O.V., Gritsenko, O.Y. (2016). Ukr. Patent No 108135 Method of drying food products in the heat and mass exchange module under the action of high pressure [in Ukrainian].
7. Potapov, V., Hrytsenko, O. (2019). Theoretical analysis of the energy efficiency of the filtration drying at high pressure. *Chemical Technology and Engineering: 2 International Scientific Conference* (pp. 83-86). Lviv: LPAU [in Ukrainian].
8. Potapov, V.O., Gritsenko, O.Y. (2019). Eksperymental'ni doslidzhennya kinytyky fil'tratsiynoho sushynnya pid diyeyu pidvyshchenoho tysku na modeli koloyidnoho kapylarno porystoho tila [Experimental studies of filtration drying kinetics under the action of high pressure on a model of a colloidal capillary porous body]. *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference "Innovative Energy Technologies"* (pp. 185-188). Odessa, ONAHT [in Ukrainian].

EXPERIMENTAL STUDIES OF TEMPERATURE KINETICS DURING FILTRATION DRYING UNDER THE ACTION OF HIGH PRESSURE

Potapov V.O., professor, Dr. Sci. Tech., Yakushenko E.M., Associated professor, PhD,
Hrytsenko O.Y., engineer
Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkiv, Ukraine

One of the most energy-intensive processes is thermal drying. It is known that the useful energy expended on the

evaporation of moisture in convection dryers, according to various calculations, is only 40... 50 %. The specific energy consumption of convection dryers used in enterprises reaches 8 MJ / kg of removed moisture, which is almost three times more than the physically required minimum. In addition, emissions of spent drying agent with a high heat content increase the thermal pollution of the environment.

One way to solve this problem is filtration drying under high pressure. This method of drying has the following advantages: heating and moving the drying agent is carried out by one device - a compressor, resulting in full use of the enthalpy of the drying agent, which is spent not only on heating and evaporation, but also on overcoming hydrodynamic resistance. As a consequence, the temperature at the outlet of the dryer can be lower than the adiabatic saturation temperature and theoretically even lower than the ambient temperature, which leads to the complete absence of heat loss with the spent drying agent.

Experimental studies of temperature kinetics during filtration drying under high pressure of wet material in the evaporation-condensation module (VCM) under the action of excess pressure generated by an external compressor have been carried out. The influence of pressure from 0.1 to 0.6 MPa on temperature kinetics and thermal efficiency of drying process was investigated. It is theoretically proved and experimentally confirmed that the thermal efficiency filtration drying in a dryer with VCM 12... 15 % higher than in convection filtration dryers in the temperature range 55... 90 °C. It is shown that under conditions of excess pressure there is a constant temperature gradient over the material layer and the length of the VCM in contrast to filtration drying at atmospheric pressure. This gradient occurs due to the polytropic process in VCM with the material in the presence of heat exchange with the environment and friction forces. In this case, this temperature gradient is not a consequence of heat loss, but is the result of the conversion of the kinetic energy of the gas flow, which leads to a decrease in heat loss with the spent drying agent.

Keywords: filtration drying, overpressure, temperature kinetics, polytropic processes, energy efficiency.

Список використаної літератури

1. Денисюк С.П. Формування політики підвищення енергетичної ефективності – сучасні виклики та європейські орієнтири. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2013. № 2. С. 7–22.
2. Энергоефективність та відновлювані джерела енергії / Під заг. ред. А.К. Шидловського; Авт.: Бевз С.М., Бондаренко Б.І., Денисюк С.П. та інші. К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. 500 с.
3. Снежкин Ю.Ф. Пути интенсификации процессов сушки. *Промышленная теплотехника*, 2009. Т. 31, № 7. С.89-90.
4. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Одесса: Полиграф, 2010. 368 с.
5. Атаманюк В. М., Ханик Я. М. Класифікація дисперсних матеріалів, як об'єктів сушіння фільтраційним методом. *Хімічна промисловість України*, 2007. № 3. С. 37-45.
6. Патент на корисну модель № 108135 «Спосіб сушіння харчових продуктів в тепломасообмінному модулі під дією підвищеного тиску» (автори: Потапов В.О., Петренко О.В., Гриценко О.Ю.); Опубліковано 11.07.2016, бюл. № 13/2016, 4.с
7. Potapov V., Hrytsenko O. Theoretical analysis of the energy efficiency of the filtration drying at the high pressure. *Chemical Technology and Engineering: 2 International Scientific Conference (24-28.06. 2019)*. Львів. ЛПАУ.2019. С.83-86.
8. Потапов В.О., Гриценко О.Ю. Експериментальні дослідження кінетики фільтраційного сушіння під дією підвищеного тиску на моделі колоїдного капілярно пористого тіла. Збірник наукових праць VII міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології», 9-13 вересня 2019. Одеса, ОНАХТ, 2019, С.185-188.

Отримано в редакцію 22.03.2021
Прийнято до друку 23.06.2021

Received 22.03.2021
Approved 23.06.2021

КОМПЛЕКСНА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЯ ОДЕРЖАННЯ АНТИОКСИДАНТНОГО БУРЯКОВО-ТОМАТНОГО БАРВНИКУ ТА НАСІННЯ ТОМАТІВ

Петрова Ж.О., д.т.н., ст.н.с., Пазюк В.М., д.т.н., доцент,
Самойленко К.М., к.т.н.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Сучасні технології, особливо процеси сушіння, є енергозатратними. То ж, основними завданнями при розробці теплотехнологій в харчовій промисловості є зменшення витрат енергоносіїв на процес зневоднення. Такі наукові розробки – це шлях до конкурентоздатної економіки та енергонезалежності України.

В зв'язку із поширенням таких хвороб як серцево-судинні захворювання, рак, зміна серцевого м'язу, неправильне перетравлення їжі, послаблення репродуктивної функції основним завданням працівників харчової промисловості є максимально замінити в готових продуктах харчування синтетичні ароматизатори, барвники на натуральні.

В Україні виробництво овочів переважає над їх вживанням. Переробка за допомогою сушіння та отримання порошкоподібного продукту практично відсутня. Сучасні способи отримання порошку зі столового буряка дають можливість зберегти бетанін на рівні 50-70 % у кінцевому продукті.

Тому розробка нових методів та удосконалення існуючих технологій сушіння столового буряка з метою отримання натурального барвника є важливою та значущою.

Червоний столовий буряк має високий вміст бетаніну з антиоксидантними властивостями і є традиційним в харчуванні населення України. Оскільки сушіння є енерговитратним процесом, зменшення енергозатрат на процес зневоднення та максимальне збереження біологічно активних речовин та зниження собівартості кінцевого продукту є актуальним.

Користь природних антиоксидантів полягає в тому, що вони здатні вступати в реакції з вільними радикалами, нейтралізуючи їх згубну дію на організм людини. Бетанін – це червоний харчовий барвник, який отриманий зі столового буряка та може використовуватись при виробництві морозива, кондитерських виробів, порошкоподібних безалкогольних напоїв.

В даній статті висвітлено безвідходну енергоефективну теплотехнологію отримання антиоксидантного буряково-томатного барвнику та насіння томатів. Завдяки використанню м'якоті та шкірки томатів, які містять органічні кислоти та відіграють роль стабілізатора барвника під час сушіння із заданими режимами. Одержано якісний насіннєвий матеріал та порошкоподібний натуральний продукт, який завдяки високому вмісту каротиноїдів, пектинів, клітковини, бетаніну, мікро- та мікроелементів може використовуватись в лікувально-профілактичному збалансованому харчуванні.

Ключові слова: теплотехнологія, енергоефективність, сушіння, столовий буряк, насіння томатів.

Поставка проблеми у загальному вигляді

Одним із основних аспектів при сушінні антиоксидантної рослинної сировини (столовий буряк) є зменшення енерговитрат, оскільки нестача енергетичних ресурсів є актуальною проблемою України. Тому раціональне їх використання одна із основних вимог сьогодення. При зневодненні столового буряку важливими напрямками є не лише зниження енерговитрат, але й запобігання втрати важливих біологічно активних речовин в процесі обробки.

Аналіз останніх досліджень

На основі аналізу літературного огляду виявлено, що існуючі способи переробки столового буряку характеризуються низькою продуктивністю та великою кількістю відходів з високими енерговитратами. Його переробка на харчовий барвник різними способами сушіння досліджується в Україні, Угорщині, Франції, Німеччині, Польщі, Бразилії, Малайзії, Індії та ін. В Угорщині вчені дослідили вплив вакуумного сушіння буряку та збереження біологічно активних речовин [1]. В університеті Маринга (Бразилія) було досліджено вплив рН на стабільність мікрокапсул екстракту червоного буряку та застосовано розпилювальне та сублімаційне сушіння [2]. В Інституті технологій та хімічної інженерії (Польща) досліджено вплив осмотичної дегідратації на стадії підготовки до зневоднення та конвективне сушіння столового буряку [3]. В Інституті досліджень якості харчових продуктів (Малайзія) застосовують метод сушіння з піноутворенням [4]. У більшості цих досліджень за основу покладено отримання бетаніну саме із соку столового буряку. Застосову-

ються енерговитратні методи сушіння (вакуумний, сублімаційний, розпилювальний), а також допоміжні матеріали, такі як ксантанова камедь, мальтодекстрин.

Формулювання цілі статті

Основною метою є – розробка універсальної безвідходної технології отримання антиоксидантного барвника на основі столового буряку з високим вмістом бетаніну та отримання насіннєвого матеріалу томату.

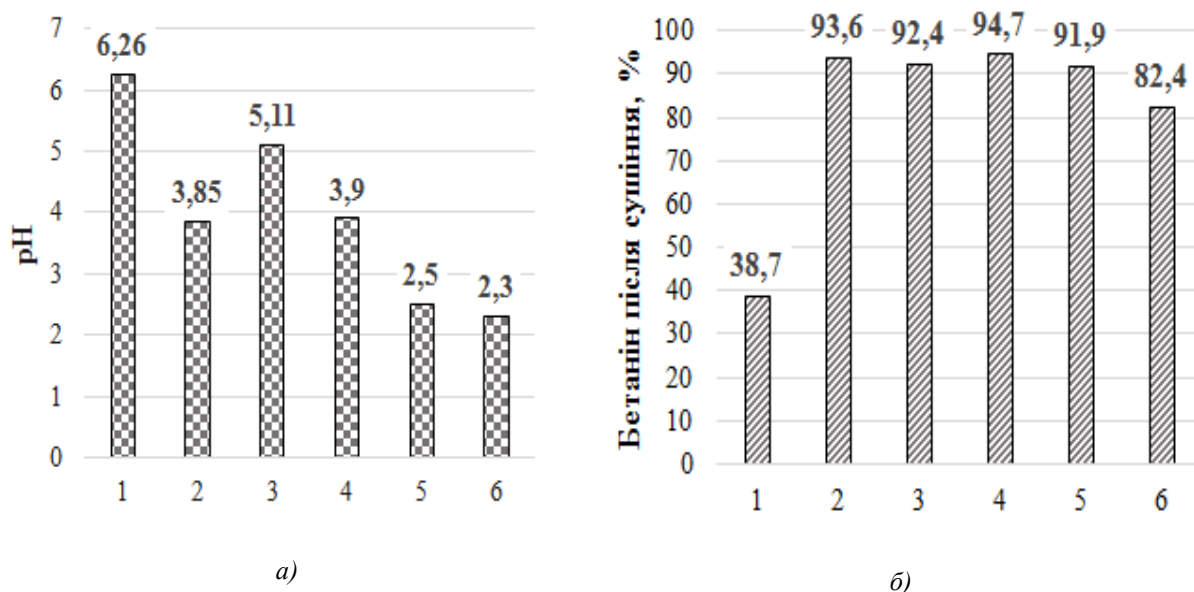
Результати досліджень та обговорення

Актуальним завданням є дослідження стабілізації барвника столового буряку після термічної обробки. Це обумовлено тим, що пігменти столового буряку вкрай чутливі сполуки до рН середовища та температури. При сушінні з високою температурою теплоносія та при контакті з повітрям бетанін столового буряку окислюється та змінює колір від бордового до жовто-коричневого. Якщо додати кислоти, то реакція відбувається у зворотній бік [5]. На стадії підготовки матеріалу до сушіння, додавали до столового буряку рослинну сировину, яка має органічні кислоти (томат). Використовували різні співвідношення досліджуваних матеріалів. Було визначено, що оптимальному значенню рН, відповідає співвідношення складових композиції 3 частини буряку та 1 частина томату [6].

При отриманні насіння з томатів м'якоть потрапляє у відходи та забруднює навколишнє середовище. При використанні відходів томатів для стабілізації бетаніну суттєво зменшується собівартість антиоксидантного барвника та вирішується екологічна проблема утилізації відходів (шкірки та м'якоті томатів), яка становить до 80 %.

При розробці теплотехнології отримання антиоксидантного буряково-томатного барвника важливе значення має попередня підготовка сировини до сушіння та фізико-хімічний контроль якісних характеристик. Були проведені експериментальні дослідження попередньої обробки рослинної сировини до сушіння: вплив рН середовища на збереження бетаніну; стан клітинної оболонки столового буряку під впливом органічних кислот. Досліджено зміну вологовмісту під час сушіння та збереження бетаніну в залежності від режимів зневоднення.

Оскільки рН столового буряку становить 6,26 (рис. 1.а), застосовували метод його купажування з томами для підбору оптимального рН, при якому максимально зберігається бетанін.



1 – столовий буряк; 2 – столовий буряк гідротермічно оброблений; 3 – буряково-томатна композиція (4:1); 4 – буряково-томатна композиція (3:1);

5 – буряково-томатна композиція (2:1); 6 – буряково-томатна композиція (1:1)

Рис. 1 – Збереження бетаніну столового буряку під час переробки в залежності від рН середовища

При дослідженнях був застосований метод купажування, що являє собою змішування столового буряку і томату в різних співвідношеннях [7]. Було визначено рН столового буряку, гідротермічно обробленого та купажуваного (буряково-томатного) у різних співвідношеннях (рис. 1 а,б). Найбільш оптимальним для буряково-томатної композиції є співвідношення 3:1, при якому рН становить 3,9 (рис. 1.а), а бетанін зберігається на 94,7 % (рис. 1.б).

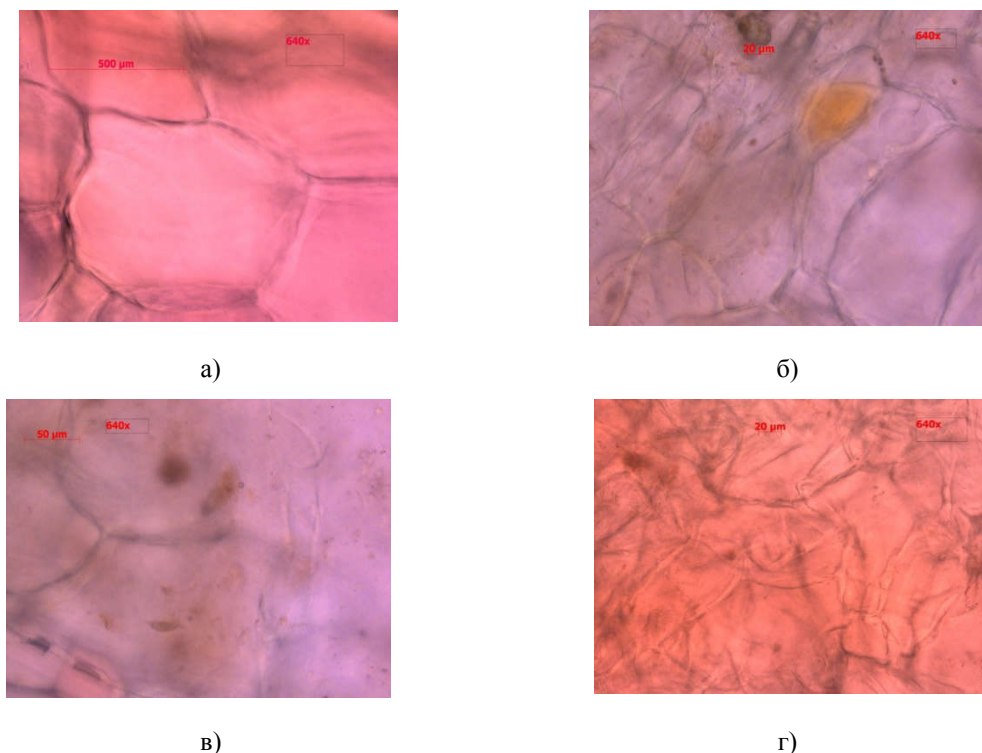
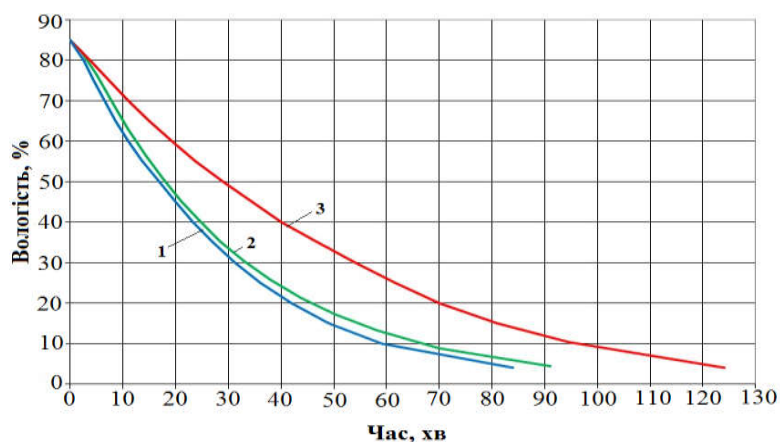


Рис. 2 – Зображення клітини столового буряку а) та буряково-томатної композиції у співвідношенні б) (3:1), в) (2:1), г) (1:1)

При підготовці сировини світловий (оптичний) мікроскоп марки Axio Imager Z1 був використаний для дослідження впливу органічних кислот томату на клітини столового буряку з метою збереження бетаніну. На рисунку 2 представлені мікроструктурні дослідження зрізів паренхімної тканини столового буряку та буряково-томатної композиції.

На рисунку 2.а. показано фотографії клітини чистого столового буряку. При співвідношенні складових композиції 3 частини столового буряку та 1 частина томату (рис. 2.б.) оболонки клітини майже неушкоджені, проте спостерігається очевидний вплив органічних кислот томату клітинну оболонку червоного буряку. При цьому збільшується гранична проникність клітин, що дає можливість речовинам ззовні дифундувати в середину клітин і тим самим змінювати рН середовища. При поєднанні компонентів 2 частини столового буряку та 1 частина томатів відбувається часткове руйнування клітинних оболонок. При співвідношенні компонентів 1:1 (2.г.) спостерігається руйнування майже всіх клітинних мембран. В подальшому, під час сушіння, це призводить до витікання соку та втрати бетаніну [7].

Отже, пошкодити частково клітину, тобто надати їй властивості напівпроникності можна за допомогою створення композиції буряк-томат у співвідношенні 3:1 (рис. 2.б.).

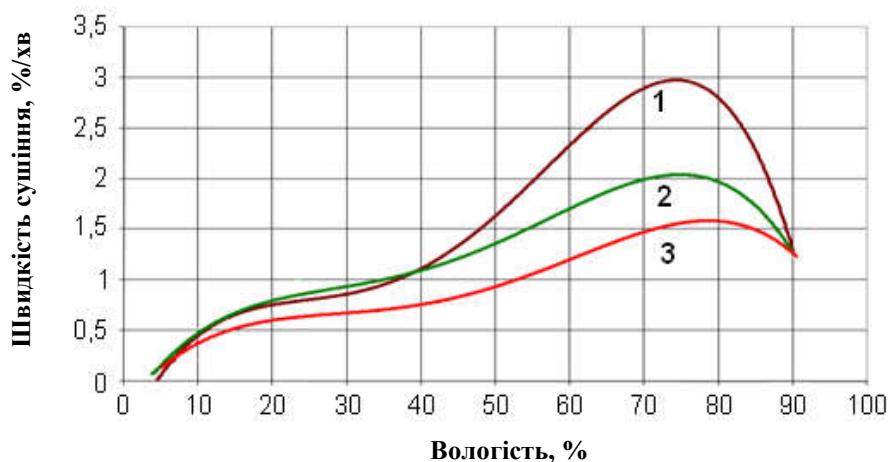


$$t = 60^\circ, V = 3,5 \text{ м/с}, \delta = 10 \text{ мм}, d = 10 \text{ г/кг с. п.}:$$

1 – буряково-томатна композиція (3:1), 2 – томат; 3 – столовий буряк

Рис. 3 – Вплив складових компонентів на процес сушіння антиоксидантної сировини

Експериментальні дослідження зміни вологовмісту композиції столового буряка і томату були проведені на конвективному стенді, а саме – досліджено вплив температури теплового агента на процес зневоднення буряково-томатної композиції [8].

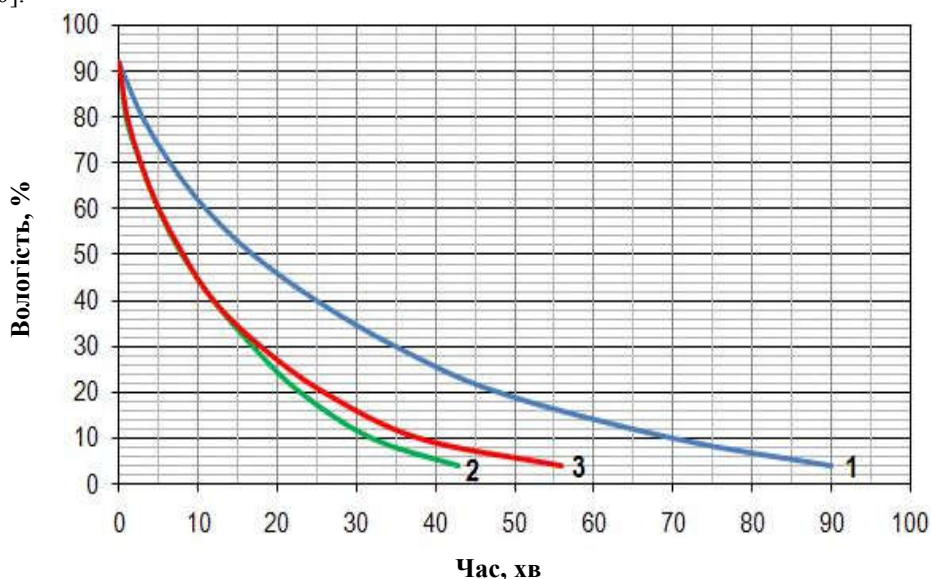


$t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 3,5\text{ м/с}$, $\delta = 10\text{ мм}$, $d = 10\text{ г/кг с. п.}$:

1 – буряково-томатна композиція (3:1), 2 – томат; 3 – столовий буряк

Рис. 4 – Залежність швидкості сушіння антиоксидантної сировини від складових композиції

Як видно з рисунку 3, буряково-томатна композиція (поз.1) у порівнянні із столовим буряком (поз. 3), у 1,5 рази швидше досягає кінцевої вологості. На рисунку 4 показано криві швидкості сушіння буряково-томатної композиції, томату та столового буряку. Найбільша швидкість сушіння у буряково-томатної композиції 3,0 %/хв, для столового буряку - 2,1 %/хв, а для томату – 1,6 %/хв. Можемо припустити, що у буряково-томатній композиції під дією органічних кислот томату клітинна оболонка столового буряку стає напівпроникною, змінюється співвідношення зв'язаної та вільної води, змінюється рН середовища, стабілізується бетанін [9, 10].

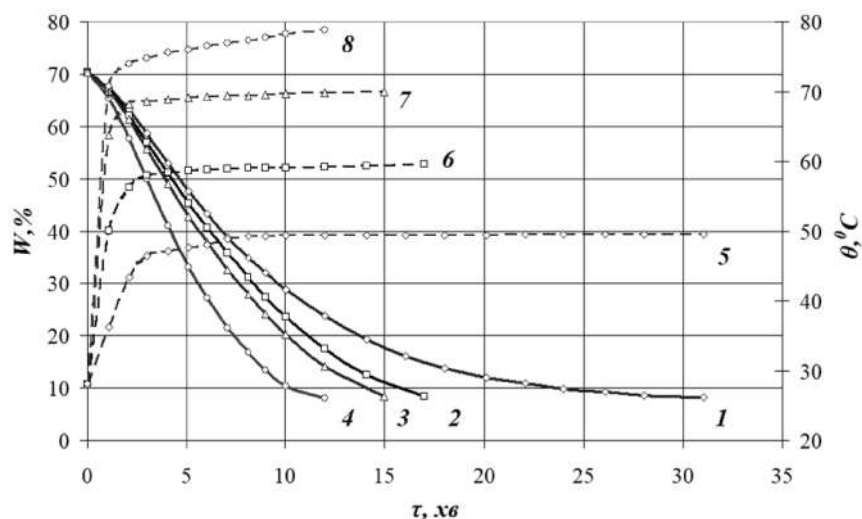


$V = 3,5\text{ м/с}$, $\delta = 10\text{ мм}$, $d = 10\text{ г/кг с. п.}$:

1 – 60 °C; 2 – 100 °C; 3 – 100/60 °C

Рис. 5 – Вплив двостадійного режиму на кінетику процесу сушіння буряково-томатної композиції (3:1)

Був розроблений двостадійний режим сушіння (рис. 5), під час якого відбувається інтенсифікація процесу в 2 р. При сушінні 60 °C час сушіння становить 90 хв, а при 100/60 °C - 43 хв. При сушінні рослинної сировини важливо зберегти якісні характеристики матеріалу. Розроблена підготовка сировини до сушіння та оптимальний режим 100/60 °C дозволяють зберегти бетанін на 96,5 % [8].



$W_n = 70 \%, V = 1,5 \text{ м/с}, d = 10 \text{ г/кг с. п.}, \delta = 2 \text{ мм}: 1,5 - 50^\circ\text{C}, 2,6 - 60^\circ\text{C}, 3,7 - 70^\circ\text{C}, 4,8 - 80^\circ\text{C}$

Рис. 6 – Вплив температури теплоносія та температури нагрівання матеріалу на тривалість сушіння насіння томату сорту «Сливки»

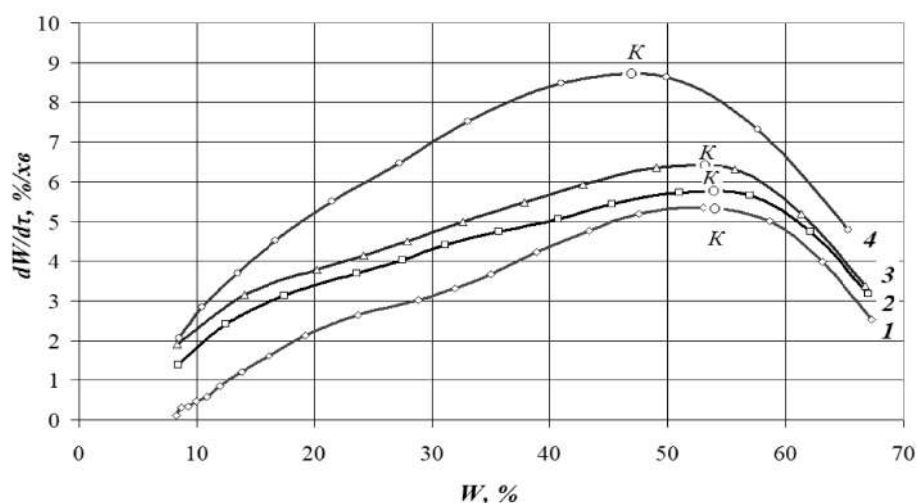
На основі проведених досліджень був розроблений спосіб одержання антиоксидантного буряково-томатного барвнику та насіннєвого матеріалу томатів, який завдяки використанню м'якоті та шкірки томатів, в якості стабілізатора бетаніну та оптимальним режимам сушіння дозволяє одержати якісний насіннєвий матеріал та порошкоподібний натуральний продукт.

Насіння томатів не потребує стратифікації і може проростати в плодах дозрілих томатів, тому його потрібно швидко сушити [9].

Сушіння насіннєвого матеріалу томату в елементарному шарі відбувалось від початкової вологості 70 % до кінцевої 8 % тривалістю 31 хв [10]. Збільшення температури від 50 до 80 °C зменшує тривалість в 2,58 рази (рис. 6).

На термограмах нагрівання насіння томату відбувається від 8 до 12 хв. В режимі сушіння при температурі теплоносія 80 °C відбувається видалення вологи та нагрівання на протязі всього процесу сушіння, в інших режимах після прогрівання температура нагрівання майже не змінюється.

Підвищення температури підвищує значення швидкості сушіння, так при температурі теплоносія 80 °C швидкість сушіння складає 8,8 %/хв. (рис. 7) [11].



$W_n = 70 \%, V = 1,5 \text{ м/с}, d = 10 \text{ г/кг с. п.}, \delta = 2 \text{ мм}: 1 - 50^\circ\text{C}, 2 - 60^\circ\text{C}, 3 - 70^\circ\text{C}, 4 - 80^\circ\text{C}$

Рис. 7 – Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння насіння томату

Насіння томату для кращої схожості доцільно сушити при температурі теплоносія 50 °C схожість на 7 день пророщування становить 98 % (рис. 8). Експериментальні дослідження схожості насіннєвого матеріалу проводили згідно ДСТУ 2240-93 [11].

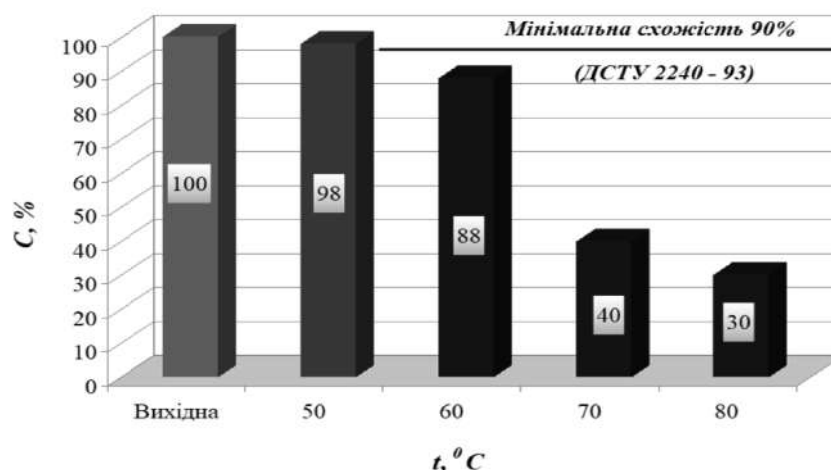


Рис. 8 – Схожість насіння томату сорту «Сливки» на 7 день пророщування від впливу режимів сушіння

Підвищення температури негативно впливає на якісні показники. Так при температурі теплоносія 60°C схожість знижується до 88 %, при 70°C – 40 %, 80°C – 30 % [11].

Запропонована теплотехнологія одержання антиоксидантного буряково-томатного барвнику та насіннєвого матеріалу дозволяє раціонально консервувати рослинну сировину у вигляді порошку при зниженій собівартості за рахунок використання відходів насіннєвого виробництва (рис. 9) [11].

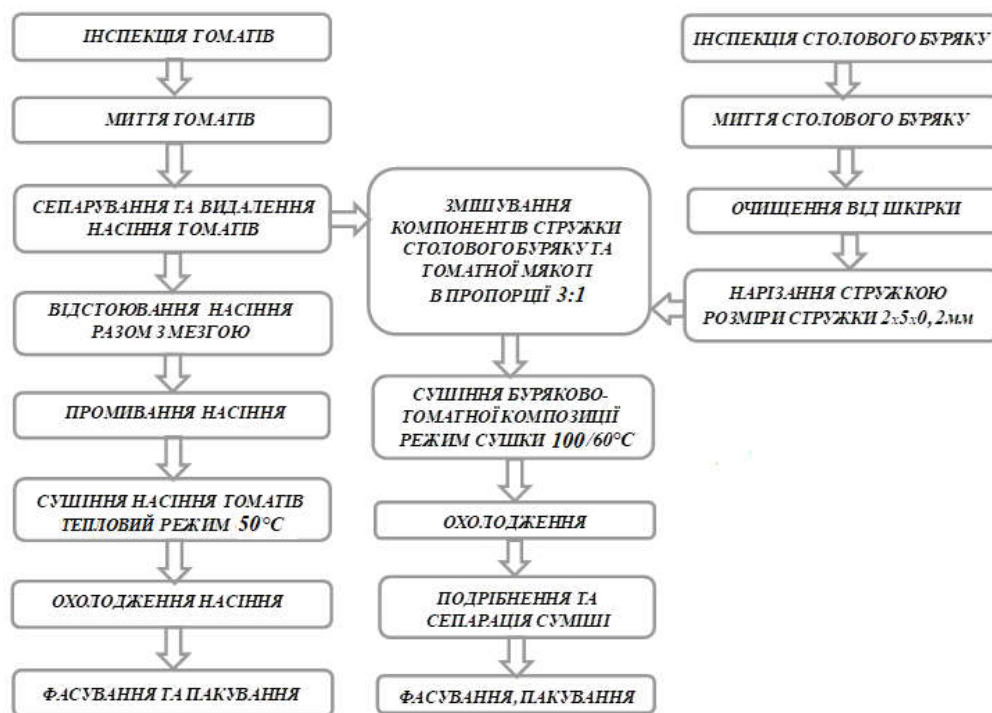


Рис. 9 – Теплотехнологія одержання антиоксидантного буряково-томатного барвнику та насіннєвого матеріалу

Одержаний у такий спосіб продукт, завдяки високому вмісту органічних кислот, не потребує гідротермічної обробки перед сушінням, має підвищені антиоксидантні властивості, високий вміст цинку, який збільшує дію інсуліну в організмі.

Сировину буряк і томати інспектують, миють, видаляють насіння з томатів, очищують від шкірки буряк, після чого стружкою столовий буряк і відходи томатів змішують в пропорціях 3:1. Відбувається стабілізація бетаніну органічними кислотами томату.

Видалене насіння томату направляється на ферментацію у власному соку при температурі навколишнього повітря $23 - 25^\circ\text{C}$ протягом доби, після цього рідину зливали, а насіння яке залишилось у ємності промивали декілька разів водою [11].

Сушіння буряково-томатної суміші відбувається при температурі теплоносія 100°C на початковій стадії, потім температуру теплоносія знижували до 60°C , висушений матеріал надходив в зону охолодження, для

сушіння насіннєвого матеріалу томатів в сушильній камері встановлюють інший режим зневоднення з температурою теплоносія 45 °С до кінцевої вологості 10 – 12 % з наступним охолодженням.

Температура буряково-томатної суміші при сушінні не перевищує 60 °С, що дозволяє отримати продукт високої харчової якості з антиоксидантними властивостями, завдяки бетаніну та лікопіну. Під час сушіння насіннєвого матеріалу температура нагрівання насіння не перевищує 50 °С, що дозволяє отримати якісний посівний матеріал вітчизняного виробництва [11].

Висновки

Отриманий новий комбінований універсальний продукт, збалансований за вмістом вітамінів, мінеральних речовин, клітковини, органічних кислот. Характерною ознакою якого є підвищена кількість бетаніну, що перевищує встановлений рівень для лікувальних препаратів, завдяки клітковині та пектину, які відповідно підвищують термостійкість продукту, збільшуючи при цьому термін зберігання.

Буряково-томатний антиоксидантний барвник покращує структуру та консистенцію виробів, додає забарвлення продуктам, збільшує їх біологічну та харчову цінність і може знайти широке застосування у виробництві лікувально-профілактичного призначення.

References

1. Székely, D., Ill'és, B., Steger-Mate, M., Monspart-S'enyi, J. (2016). Effect of drying methods for inner parameters of red beetroot (*Beta vulgaris* L.). *Acta Univ. Sapientiae, Alimentaria*, 9, 60–68.
2. Duenha, J.L., Cassia, R. (2018). Grasiere Scaramal Effect of pH on the stability of red beet extract (*Beta vulgaris* L.) microcapsules produced by spray drying or freeze drying. *Food Sci. Technol, Campinas*, 38(1), 72–77.
3. Kowalski, S.J., Lechtanska, J.M. (2015). Drying of red beetroot after osmotic pretreatment: Kinetics and quality considerations. *Chemical and Process Engineering*, 36 (3), 345–354.
4. Mei Ling Ng, Sulaiman, R. (2018). Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. *Food Science and Technology*, 88, 80–86.
5. Petrova, Zh.O., Sniezhkin, Yu.F. (2018) *Enerhoefektyvni teplotekhnolohiyi pererobky funktsional'noyi syrovyny [Energy efficient heat technologies for processing functional raw materials]*. Monograph. Kyiv, Naukova dumka (in Ukrainian).
6. Samoilenko, K.M. (2019). *Intensyfikatsiya teplomasoobminu pry kupazhuvanni ta sushinni antyoksydantnoyi syrovyny [Intensification of heat and mass transfer during blending and drying of antioxidant raw materials]*. Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. Kyiv (in Ukrainian).
7. Petrova, Zh., Sniezhkin, Yu., Samoilenko, K. (2021) *Blending and drying of antioxidant raw materials*. Monograph. LLC “Tvory”, Vinnitsa.
8. Petrova, Zh.O., Paziuk, V.M., Samoilenko, K.M., Chepeliyk, O.P. (2018). *Effect of treatment modes on quality and antioxidant properties of tomato and beet processing products*. Ukrainian food journal, 7 (2). 291–302.
9. Sniezhkin, Yu.F., Petrova, Zh.O., Paziuk, V.M. (2016). *Enerhoefektyvni teplotekhnolohiyi vyrobnytstva funktsional'nykh kharchovykh poroshkiv [Energy efficient heat technologies for the production of functional food powders]*. NASU, Institute of Technical Thermophysics. Vinnytsia: VNAU (in Ukrainian).
10. Sniezhkin, Yu.F., Paziuk, V.M., Petrova, Zh.O., Samoilenko, K.M. (2019). *Efektyvni tekhnolohiyi sushinnya nasinnya ovochiv [Effective technologies for drying vegetable seeds]*. Monograph. Published in the editorial and publishing department of Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia (in Ukrainian).
11. Sniezhkin, Yu.F., Petrova, Zh.O., Paziuk, V.M. (2020) *Teplomasoobminni tekhnolohiyi ta obladnannya otrymannya nasinnnyevykh materialiv [Heat and mass transfer technologies and equipment for obtaining seed materials]*. Monograph. LLC “Tvory”, Vinnitsa (in Ukrainian).

COMPLEX ENERGY EFFICIENT HEAT TECHNOLOGY OBTAINING OF ANTIOXIDANT RED BEETROOT-TOMATO DYE AND TOMATO SEEDS

Petrova Zh., Doctor of Engineering, Senior researcher, Paziuk V., Doctor of Engineering, docent, Samoilenko K., Ph.D.

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv

Modern technologies, especially drying processes, are energy consuming. Also, the main tasks in the development of heat technology in the food industry is to reduce energy costs for the dehydration process. Such scientific developments are a way to a competitive economy and energy independence of Ukraine.

Due to the spread of diseases such as cardiovascular disease, cancer, changes in heart muscle, poor digestion, impaired reproductive function, the main task of food industry workers is to replace as much as possible in the finished food synthetic flavors, dyes for natural.

In Ukraine, vegetable production prevails over its consumption. Processing by drying and obtaining a powdered product is almost absent. Modern methods of obtaining beetroot powder make it possible to keep betanin at the level of 50-70 % in the final product.

Therefore, the development of new methods and improvement of existing technologies for drying red beetroot in order to obtain a natural dye is important and significant.

Red beetroot have a high content of betanine with antioxidant properties and are traditional in the diet of the population of Ukraine. Since drying is an energy-intensive process, reducing energy costs for the dehydration process and maximum preservation of biologically active substances and reducing the cost of the final product is relevant.

The benefit of natural antioxidants is their ability to react with free radicals, neutralizing their detrimental effects on the human body. Betanine is a red food coloring, derived from red beetroot, and can be used in the production of ice cream, confectionery, and powdered soft drinks.

This article highlights the waste-free energy-efficient heat technology for the production of antioxidant red beetroot-tomato dye and tomato seeds. Due to the use of tomato pulp and peel, which contain organic acids and act as a dye stabilizer during drying with the specified modes. We get high-quality seed material and powdered natural product, which due to the high content of carotenoids, pectins, fiber, betanine, micro- and microelements can be used in therapeutic and prophylactic balanced nutrition.

Key words: heat technology, energy efficiency, drying, red beetroot, tomato seeds.

Список використаної літератури

1. Székely D., Ill'és B., Steger-Mate M., Monspart-S'enyi J. Effect of drying methods for inner parameters of red beetroot (*Beta vulgaris* L.). *Acta Univ. Sapientiae, Alimentaria*. 2016. № 9. С. 60–68.
2. Duenha, J. L., Cassia, R. Grasielle Scaramal Effect of pH on the stability of red beet extract (*Beta vulgaris* L.) microcapsules produced by spray drying or freeze drying. *Food Sci. Technol, Campina*. 2018. Vol. 38. No.1. P. 72-77.
3. Kowalski, S. J., Lechtanska, J. M. Drying of red beetroot after osmotic pretreatment: Kinetics and quality considerations. *Chemical and Process Engineering*. 2015. 36 (3). P. 345-354.
4. Mei Ling Ng, Sulaiman R. () Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. *Food Science and Technology*. 2018. No. 88. P. 80-86.
5. Петрова Ж.О., Снежкін Ю.Ф. *Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини*: монографія. Київ: Наукова думка, 2018, 187 с.
6. Самойленко К. М. Інтенсифікація тепломасообміну при купажуванні та сушінні антиоксидантної сировини: дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / НАН України, Ін-т техн. теплофізики. Київ, 2019. 172 с.
7. Zh. Petrova, Yu. Sniezhkin, K. Samoilenko *Blending and drying of antioxidant raw materials*: Monograph. LLC "Tvory", Vinnitsa, 2021. 107 с.
8. Petrova, Zh.O., Paziuk, V.M., Samoilenko, K.M., Chepeliyk, O.P. Effect of treatment modes on quality and antioxidant properties of tomato and beet processing products. *Ukrainian food journal*. 2018. Volume 7, Issue 2. P. 291-302.
9. Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О., Пазюк В.М. *Енергоефективні теплотехнології виробництва функціональних харчових порошків*: Монографія. Вінниця (ВНАУ), 2016. 456 с.
10. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Самойленко К.М. *Ефективні технології сушіння насіння овочів*: Монографія. Віддруковано у редакційно-видавничому відділі Вінницького національного аграрного університету, м. Вінниця, 2019. 129 с.
11. Petrova, Zh.O. et al. Intensifying Drying Process with Creation of Functional Plant Compositions. *Ukrainian Food Journal*, 2014. 3 (2), P. 167-174.

Отримано в редакцію 03.04.2021

Прийнято до друку 06.07.2021

Received 03.04.2021

Approved 06.07.2021

ОБҐРУНТУВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НАДВИСОКОЇ ЧАСТОТИ З НАСІННЯМ РІПАКУ В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ

Бандура В.М., д-р. техн. наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

В харчовій промисловості, в основному, використовуються технології конвективного сушіння зернових і олійних культур, що реалізовані в різноманітних за конструкціями сушарках: шахтних, стрічкових, барабанних, в яких передача теплоти до сировини реалізується за допомогою сушильного агента, нагрітого повітря. Перспективним способом при організації процесу сушіння є технологія мікрохвильової обробки насіння, що має цілий ряд відмінностей від традиційних методів зневоднення. Нагрів за рахунок мікрохвильового опромінення забезпечує підведення енергії до об'єму матеріалу, а температурою нагрівання легко керувати.

У статті представлені теоретичні та експериментальні дослідження діелектричного нагріву насіння ріпаку в процесі сушіння в мікрохвильовому полі. Проаналізовано математичні моделі тепломасообміну, розроблені для моделювання процесів мікрохвильового сушіння, і обговорені діелектричні властивості олійних культур в залежності від вологості та температури. Принцип перетворення НВЧ - енергії в теплоту заснований на ефективному поглинанні вологою продукту, що нагрівається, підведеної до нього НВЧ - енергії. При цьому теплота, що генерується в усьому об'ємі оброблюваного продукту, і що підводиться в робочу камеру НВЧ - енергія практично повністю поглинається насінням. Інтенсивність нагрівання насіння ріпаку залежить від його діелектричних властивостей і напруженості мікрохвильового поля, що створює випромінювач.

Коефіцієнт діелектричних втрат насіння ріпаку в значній мірі залежить від вологовмісту, тобто вода відіграє основну роль в процесі поглинання енергії при діелектричному нагріві. Нелінійна залежність коефіцієнта діелектричних втрат від вологості обумовлена різноманітністю форм зв'язку води в насінні ріпаку. Зменшення значення коефіцієнта діелектричних втрат, з підвищенням температури ріпаку можна пояснити активними втратами води при нагріванні насіння.

Ключові слова: насіння ріпаку, НВЧ-енергія, моделювання, сушіння, коефіцієнта діелектричних втрат.

Формулювання проблеми. Останніми роками в Україні на фоні прогресу в агротехніці і селекції спостерігається зростання посівних площ під ріпак. Якщо порівнювати ріпак, наприклад, з соняшником, то в цієї рослини дешевша собівартість і ширший спектр вживання. Ріпак зростає при відносно низькій температурі. Коротша сівозміна. Це коштвна кормова культура, як у вигляді зелених кормів, так і у вигляді шроту, який як компонент додається в комбікорми. Чудовий попередник для інших сільськогосподарських культур, який покращує агрофізичний і фіто санітарний склад ґрунту. Ріпакову соломку використовують як паливо і для господарських потреб або здають підприємствам целюлозно-паперової промисловості. Олія ріпаку поставляється для харчової промисловості, лакофарбового виробництва або для продажу населенню. Але найперспективніше використання ріпакової олії – для виробництва біопалива. Збільшення привабливості використання біодизельного палива обумовлене надмірно високими цінами на нафту і нафтопродукти, загрозою зниження запасів нафти і екологічними аспектами. Останніми роками виробництво біодизельного палива значно розвивається в Європі, у зв'язку з чим частина сировини йде на експорт. Саме тому виробництво біодизелю є рентабельним, а значить і післязбиральна обробка та сушіння насіння ріпаку є актуальним. До процесу сушіння і зерносушарок висуваються вимоги підвищення якості насіння, що висушується, енергоефективності та екологічності проведення процесу сушіння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сушіння зерна – одна з найважливіших і одночасно найбільш енерговитратних технологічних операцій післязбиральної обробки і зберігання зерна [1]. Розвиток подальшого удосконалення сушильних установок можна досягти використанням принципів адресного підведення енергії безпосередньо до матеріалу без проміжних теплоносіїв або ж у комбінації з ними. Проте недостатньо відомостей про математичний опис тепло - і масообмінних процесів, що відбуваються під час сушіння. Недостатньо вивчені властивості насіння ріпаку, що значно впливають на процес сушіння.

Метод нагріву матеріалів в мікрохвильовому електромагнітному полі зарекомендував себе як високоефективний щодо швидкості, енерговитрат і якості кінцевої продукції в процесах нагрівання і сушіння, про що свідчать результати аналізу експериментальних даних. Подальше вивчення процесу мікрохвильового нагріву потребує і аналітичних досліджень. Одним з яких є температура продукту, яка є базовою для оцінки

ефективності дії мікрохвильового поля і впливу вхідних параметрів на технологічний процес. Складання математичних моделей, які адекватно відображають фізичну сутність протікають явищ під дією мікрохвильового поля, пов'язане з певними труднощами, пов'язаними з багатьма факторами взаємодії електромагнітного поля з полярними діелектриками. Аналіз моделей про взаємодію мікрохвильового опромінення з продуктом засвідчив, що найбільш прийнятними математичними моделями теплопровідності для даної галузі досліджень, можна отримати, ґрунтуючись на моделях А.В. Ликова, наведених в [2]. Об'ємна природа нагріву матеріалу в мікрохвильовому полі припускає досліджувати продукт як середовище, в якому діють внутрішні позитивні джерела теплоти [3].

В статті авторів [4] наведено моделювання тепломасопереносу сушіння сільськогосподарських матеріалів в мікрохвильовій установці. Реакція харчового продукту з втратами на діелектричний нагрів призводить до швидкого переходу енергії у вологу, і до швидкого нагрівання та сушіння. Значне скорочення часу сушіння при мікрохвильовому підведенні енергії часто супроводжується поліпшенням якості продукту. Процес сушіння у мікрохвильовому полі є перспективною технологією зневоднення харчових продуктів. Потреба в поліпшенні інженерного проектування та оптимізації процесу мікрохвильового сушіння стимулювала розвиток методів комп'ютерного моделювання для прогнозування температури і вологості, а також розподілу температури в продукті, що підлягає сушінню. Крім того, проаналізовано нерівномірний нагрів, викликаний геометрією і складом продукту, а також неоднорідним розподілом електромагнітного поля в мікрохвильовому резонаторі. Запропоновано як поліпшити однорідність мікрохвильового нагріву. Математичне моделювання основане на моделях тепломасообміну, розроблених протягом багатьох років для моделювання мікрохвильового сушіння. Математичне моделювання включає і спрощені моделі, засновані на теорії дифузії, а також на спільному аналізі тепломасообміну з теорією Філіпа і де Фріза, теорією Ликова, методом Уітакера, і двухрегіональною моделлю.

У технічній літературі [5 – 7] і наукових статтях [8, 9] приведено достатньо даних щодо особливостей теплових і масообмінних процесів у електромагнітному полі НВЧ, математичного описання процесів нагрівання і сушіння [10] харчових продуктів і зернових культур. Деякі особливості математичного моделювання процесів сушіння і визначені моделі наведено в статтях [10, 11]. Практичну реалізацію сушіння в електромагнітному полі НВЧ захищено в роботах [12, 13] де вказано, що інтенсивність нагрівання не залежить від агрегатного стану матеріалу – тільки від його діелектричних властивостей і напруженості мікрохвильового поля створюваного випромінювачем.

Авторами [14] вивчено тепломасообмін, що відбувається при сушінні суміші 1:1 двох сортів насіння ріпаку з використанням комбінованого мікрохвильового і конвективного сушіння. Математична модель була адаптована для моделювання сумісного фізичного процесу. Використання мікрохвильової енергії під час сушіння насіння ріпаку призвело до більш швидкого сушіння в поєднанні з конвективним сушінням при низькій відносній вологості. Показано, що діелектричне нагрівання від мікрохвильового поля може мати певні переваги в операціях сушіння, що містять високу енергетичну ефективність та однорідніший розподіл вологовмісту.

Також вченими [15] було проведено дослідження щодо моделювання тепло- та масообміну між зерном та навколишнім повітрям під час сушіння за допомогою мікрохвильової сушарки з гарячим повітрям при низькій щільності НВЧ 0,2 Вт/г. Була адаптована математична модель для імітації висушування однієї насінини ріпаку, сої та кукурудзи. Процес переносу води моделювали на основі впливу тиску пари на молекули води всередині насінини. Було помічено, що коли різниця між тиском пари всередині зерна та навколишнім повітрям була вищою, ніж швидкість сушіння, то це призводило до утворення тріщин зерна. Моделювання мікрохвильового сушіння в гарячому повітрі показали, що швидкість сушіння зменшувалася за рахунок збільшення температури повітря всередині порожнини мікрохвильової установки для всіх досліджених олійних культур, через знижений перепад тиску пари між зерном і навколишнім повітрям. З іншого боку, швидкість сушіння збільшувалась, якщо температура вхідного повітря була знижена через різницю між двома тисками. Контролюючи атмосферне повітря, в насінні не будуть утворюватись тріщини.

Незважаючи на наявні успіхи в математичному моделюванні процесів сушіння в мікрохвильовому полі, все ж таки залишаються відсутні відповіді щодо діелектричних характеристик сільськогосподарської продукції, які можна вирішити проводячи експериментальні дослідження з різними сортами матеріалів.

Метою статті є теоретичне та експериментальне обґрунтування взаємодії електромагнітного поля надвисокої частоти з насінням ріпаку в процесі сушіння.

Виклад основного матеріалу дослідження. Процес трансформації енергії електромагнітного поля (НВЧ) в теплоту прийнято називати діелектричним нагріванням.

При дії змінного електромагнітного поля харчові продукти, що є діелектричними матеріалами, унаслідок діелектричних втрат нагріваються, тобто енергія поля перетворюється в теплоту.

Ефективність перетворення енергії змінного електромагнітного поля в теплову пропорційна значенню коефіцієнта діелектричних втрат (коефіцієнта поглинання енергії), частоті коливань електромагнітних хвиль і квадрату напруженості електричного поля в продукті [15].

Оскільки напруженість поля обмежена електричною міцністю діелектрика, то для збільшення швидкості нагрівання підвищують частоту коливань. Для теплової обробки харчових продуктів використовують елект-

ромагнітні поля дециметрового діапазону. Це дозволяє отримувати високу швидкість нагріву оброблюваних виробів.

Важливою перевагою НВЧ-нагріву є можливість здійснення і практичного використання нового виду нагрівання, наприклад виборчого, рівномірного, надчистого, саморегульованого.

Виборче нагрівання засноване на залежності втрат в діелектриці від довжини хвилі, тобто залежності тангенса кута діелектричних втрат δ як функції довжини хвилі λ . При цьому в багатокомпонентній суміші діелектриків будуть нагріватись лише ті частини, де високий $\operatorname{tg} \delta$.

Рівномірне нагрівання. Зазвичай передача тепла здійснюється за рахунок конвекції, теплопровідності і випромінювання. Звідси неминучий температурний градієнт від оболонки до центру насінини, причому тим більший, чим менша теплопровідність матеріалу. Сповільнити великий градієнт температур можливо за рахунок збільшення тривалості обробки. У багатьох випадках лише за рахунок повільного нагрівання вдається уникнути перегрівання поверхневих шарів оброблюваного матеріалу. Прикладами таких процесів є випалення кераміки, отримання полімерних з'єднань і тому подібне. З допомогою НВЧ-енергії можна не лише рівномірно нагрівати діелектрик за його об'ємом, але і одержувати визначений розподіл температур. Тому при НВЧ-нагріві відкриваються можливості багатократного прискорення ряду технологічних процесів.

При конвективному сушінні зернових та олійних культур, де проходить процес нагрівання повітря газовим полум'ям, а також за допомогою дугових пальників, проходить забруднення самого насіння продуктами горіння. А при застосуванні НВЧ-поля продукт нагрівається із середини матеріалу через захисні оболонки їх твердих діелектриків з малими втратами, тому таке нагрівання є надчисте. В результаті забруднення практично повністю усуваються. Крім того, поміщаючи матеріал, що нагрівається, в інертний газ, можна усунути окислення його поверхні. Забруднення від діелектрика, через який підводиться НВЧ – енергія, вельми малі, оскільки в разі малих втрат навіть при пропусканні великої НВЧ – потужності цей діелектрик залишається практично холодним.

Саморегулююче нагрівання. При нагріванні для цілей сушіння, якість отриманого матеріалу істотно покращується так як висушений матеріал не нагрівається і його сушіння автоматично призупиняється. Пояснюється це тим, що тангенс кута діелектричних втрат такого продукту співвідносний вологовмісту. Тому зі зниженням вологості в процесі сушіння насіння витрати НВЧ-енергії зменшуються, а нагрівання продовжується лише в тих ділянках насінини, де ще залишилася підвищена волога.

Діелектричне нагрівання засноване на зсуві зарядів і пов'язаних з ними молекул при дії на речовину (продукт) змінного електромагнітного поля. На переміщення заряджених часток витрачається робота, яка із-за наявності внутрішнього міжмолекулярного тертя перетворюється на теплоту.

Існує декілька видів зсувів зарядів (диполів) в змінному електричному полі [16].

Діелектричні втрати при частотах, використовуваних для теплової обробки харчових продуктів, обумовлені в основному полярними молекулами води. Оскільки харчові продукти містять в значній кількості воду, то їх певною мірою можна вважати полярними діелектриками.

Якщо для провідників характерна наявність вільних електронів, то в діелектриках вільних електронів теоретично немає. Всі вони пов'язані з ядрами і входять в атоми і молекули речовини. Залежно від розподілу зарядів усередині молекули діелектрики підрозділяють на неполярні і полярні.

У неполярних молекулах розміщення зарядів симетрично. У відсутності зовнішнього електричного поля їх електричний дипольний момент дорівнює нулю. А полярні молекули володіють деяким електричним дипольним моментом і у відсутності зовнішнього поля.

Полярність зв'язку характеризується дипольним моментом μ , який дорівнює твору заряду електрона (елементарного заряду) e на відстань між центрами тяжіння всіх негативних і позитивних зарядів.

Розрізняють електронну, іонну, дипольну і структурну поляризації діелектрика. У НВЧ - діапазоні найбільшу питому вагу мають дипольна і структурна поляризація діелектрика.

Дипольна поляризація має місце в речовинах, що складаються з полярних, або дипольних молекул. Центри тяжіння позитивних і негативних зарядів в таких молекул не збігаються і утворюють диполь. Дипольною є молекула води, що грає основну роль в процесі поглинання енергії при діелектричному нагріві харчових продуктів [16].

У молекулі води атом кисню з шістьма зовнішніми електронами має дві наполовину заповнені p -орбіти і може утворювати два p - зв'язки з двома атомами водню, створюючи ковалентну молекулу H_2O . Оскільки p зв'язки перпендикулярні, то валентний кут між атомами водню має бути рівний 90° . В результаті вимірів кут зв'язку рівний не 90° , а 104° . Це пояснюється тим, що атоми водню, заряджені частково позитивно, взаємно відштовхуються, утворюючи електричний момент.

Таким чином, дипольна молекула під дією зовнішнього електричного поля набуває обертового моменту (момент обертання), утвореного парою зарядів $+q$ і $-q$. Момент обертання пропорційний μE . Під дією моменту обертання диполь орієнтується у напрямі поля [16].

З макроскопічної точки зору виділення тепла за рахунок струмів провідності і поляризації невід'ємне один від одного. Математично цей факт можна виразити, записавши відносну діелектричну проникність ε у вигляді [11]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - j\tan\delta), \quad (1)$$

$$\text{де } \varepsilon' = \frac{\varepsilon_a'}{\varepsilon_0}, \varepsilon'' = \frac{\varepsilon_a''}{\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$$

$\varepsilon_a', \varepsilon_a''$ – дійсна і уявна частки абсолютної діелектричної проникності середовища;

σ – питома провідність середовища;

ω – кутова частота;

$$\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$$

$$\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_1 + \text{tg}\delta_2 = \frac{\varepsilon_a''}{\varepsilon_a'} + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a'}$$

$$t\delta_1 = \frac{\varepsilon_a''}{\varepsilon_a'}, \quad t\delta_2 = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a'} = \frac{\varepsilon_b''}{\varepsilon_a'}, \quad \varepsilon_b'' = \frac{\sigma}{\omega}.$$

Так при граничних коливаннях звичайно оперують з середніми за період значеннями потужності, тоді потужність теплових втрат рівна:

$$P_{\text{п}} = \frac{1}{2} \int_V \sigma \vec{E} \vec{E}^* dV + \frac{1}{2} \int_V \omega \varepsilon_a'' \vec{E} \vec{E}^* dV + \frac{1}{2} \int_V \omega \mu_a'' \vec{H} \vec{H}^* dV, \quad (2)$$

де зірочкою відмічені комплексно спряжені значення комплексних амплітуд векторів напружень електричного $\vec{E}$ та магнітного $\vec{H}$ полів.

Питому потужність теплових втрат з (2) можна представити у вигляді:

$$P_{\text{пит}} = \frac{\omega \varepsilon_b''}{2} |E|^2 + \frac{\omega \varepsilon_a''}{2} |E|^2 + \frac{\omega \mu_a''}{2} |H|^2. \quad (3)$$

Відповідно до закону Джоуля – Ленца величина $\frac{\omega \varepsilon_b''}{2} |E|^2$ виражає об'ємну щільність потужності, яка виділяється в середовищі при проходженні в ньому струмопровідності з щільністю $j = \sigma E$.

В ідеальному діелектрику $\sigma = 0$, і перший член в (3) рівний нулю. Другу та третю складові в (3) визначають за рахунок зміщення фази векторів електричної $\vec{D}$, магнітної $\vec{B}$ індукції і векторів $\vec{E}$ та $\vec{H}$. Відомо [11], що під дією зовнішнього магнітного поля електронна оболонка атома починає рухатись навколо напрямлення поля з певною кутовою швидкістю. В змінних магнітних полях до того ж відбувається переорієнтація магнітної осі атома. Ці явища в чомусь аналогічні «внутрішньому тертю», і приводять до виділення тепла в середовищі, яке описується третьою складовою в (3). Якщо $\mu_a' = 1$, $\mu_a'' = 0$, то третя складова рівна нулю. Але тоді при $\mu_a'' = 0$ співвідношення (3) матиме вигляд:

$$P_{\text{пит}} = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon''}{2} |E|^2 = 0,556 \cdot 10^{-10} \varepsilon'' |E|^2, \quad (4)$$

або

$$P_{\text{пит}} = 0,556 \cdot 10^{-10} \varepsilon'' |E|^2, \quad (5)$$

де $P_{\text{пит}}$ – питома потужність, Вт/м³;

f – частота, Гц;

E – напруженість електричного поля, В/м;

δ – кут діелектричних втрат.

За залежністю (4) і (5) чим вище $\vec{E}$, тим більша потужність втрат і, відповідно інтенсивніше нагрівання.

При виборі частоти f генератора варто мати на увазі, що зі збільшенням частоти зменшується глибина проникання електромагнітної хвилі в продукт.

Якщо визначити глибину проникання електромагнітної хвилі в продукт δ_E як відстань, на якій напруженість зменшується в еразів, отримаємо:

$$\delta_E = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{2\varepsilon'(\sqrt{1+\text{tg}^2\delta}-1)}}. \quad (6)$$

Якщо $\text{tg}\delta \ll 1$, то

$$\delta_E = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\varepsilon' \text{tg}\delta}}. \quad (7)$$

Однак величина δ_E характеризує глибину термообробки лише в першому приближенні, так як електромагнітне поле існує і на великій відстані від поверхні об'єкта, а енергія цього поля може бути достатньою для здійснення необхідної теплової дії.

Насіння ріпаку є твердим діелектриком, діелектричні властивості якого визначаються наявністю радикалів жирних кислот, що входять до складу олії, що міститься в насінні: олеїновою, лінолевою, α - ліноленою. Радикали є найбільш полярними групами, тому їх орієнтація в електромагнітному полі обумовлює значно вищу поляризацію, ніж це має місце в неполярних діелектриках.

Існує безліч методів виміру діелектричних характеристик продуктів в діапазоні НВЧ. Загальноприйнятими методами є: резонансні, метод вільних хвиль і методи, засновані на використанні повільних хвиль [16]. Нами був використаний метод порівняння, що дозволяє визначити діелектричні характеристики, зокрема коефіцієнт діелектричних втрат ε'' , харчових продуктів з достатньою для практичного використання точністю. Всі виміри зводяться до порівняння швидкості нагріву досліджуваного зразка і еталону (води) за однаковий період часу з врахуванням ваги і теплоємності зразка, а також потужності, що вводиться в робочу камеру.

Виміри проводилися в мікрохвильовій печі з частотою 2450 МГц і потужністю 700 Вт. Як еталон використовувалася дистильована вода. Було проведено декілька серій дослідів по НВЧ - нагріву води і насіння ріпаку, узятого в рівному об'ємі, за фіксований проміжок часу. Температура нагріву еталону і зразка контролювалася за допомогою мультиметра М – 838. Датчиками виміру температури служили хромель – копелєві термопари з діаметром термоелектродів 0,2 мм.

Середня за деякий проміжок часу питома активна потужність, розсіяна в одиниці об'єму даного матеріалу у вигляді теплоти визначається згідно із законом Джоуля – Ленца (5) [11].

Теплову енергію, що генерується в матеріалі можна також визначити за формулою:

$$Q = cm\Delta T, \quad (8)$$

де Q – кількість теплоти в матеріалі, Дж;

c – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

m – маса матеріалу;

ΔT – різниця температур між кінцевою T_k та початковою T_n .

Порівняння швидкості нагріву dT/dt еталону і зразка, а також спільне вирішення рівнянь (5) і (8) дозволяє визначити залежність значень коефіцієнта діелектричних втрат насіння ріпаку від різних чинників.

Залежність зміни коефіцієнта діелектричних втрат ε'' ріпаку при частоті електромагнітного поля $f=2450$ МГц від вологовмісту W при різних температурах представлена в таблиці 1.

Визначення коефіцієнта діелектричних втрат ріпаку проведене в інтервалі вологовмістів 0,06...0,30 кг/кг. До певної вологості ріпак підсушували на лабораторній сушарці. З метою зняття температурних залежностей ε'' досліді проводилися при різних температурах в інтервалі 298...348°К. Для цього продукт заздалегідь термостатувався в шафі з автоматичним регулюванням температури.

Таблиця 1

Зміна коефіцієнта діелектричних втрат ε'' ріпаку від вологовмісту при різних температурах і частоті електромагнітного поля $f=2450$ МГц

Коефіцієнт діелектричних втрат ε'' насіння ріпаку при різних температурах	Вологовміст насіння ріпаку								
	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,3
$T=298$ °К	1,1	1,3	2,3	4,0	6,2	7,0	7,3	7,7	7,8
$T=323$ °К	0,9	1,2	1,8	2,9	5,8	6,6	7,0	7,4	7,5
$T=348$ °К	0,8	0,9	1,5	2,1	4,5	6,0	6,8	7,2	7,3

Як видно з табл.1 значення ε'' в значній мірі залежить від вологості матеріалу.

При вологовмісті 0,06...0,12 кг_{вол}/кг_{с.реч.} коефіцієнт діелектричних втрат ε'' збільшується майже в два рази, оскільки волога в досліджуваному об'єкті має досить сильний адсорбційний зв'язок на молекулярному рівні, і загальна частка вологи в продукті невелика. В інтервалі вологовмісту від 0,12 до 0,21 кг_{вол}/кг_{с.реч.} спостерігається різке збільшення коефіцієнта діелектричних втрат ε'' від 2,3 до 7,0. Це пояснюється збільшенням кількості осмотично зв'язаної вологи.

При підвищенні вологовмісту від 0,21 до 0,30 кг_{вол}/кг_{с.реч.} коефіцієнт діелектричних втрат ε'' зростає незначно з 7,0 до 7,8, що обумовлене підвищенням вологовмісту ріпаку за рахунок механічно зв'язаної вологи, а також вологи, що міститься в капілярах поверхневого шару і має невисоку енергію зв'язку з продуктом. При цьому відносна доля міцно зв'язаної вологи в досліджуваному об'ємі матеріалу, зменшується.

Висновки з даного дослідження і перспективи. Коефіцієнт діелектричних втрат насіння ріпаку в значній мірі залежить від вологовмісту, тобто вода відіграє основну роль в процесі поглинання енергії при діелектричному нагріві. Нелінійна залежність коефіцієнта діелектричних втрат від вологості обумовлена різноманітністю форм зв'язку вологи в насінні ріпаку. Зменшення значення ε'' з підвищенням температури ріпаку можна пояснити активними втратами води при нагріванні насіння.

References

1. Stankevych, H.M., Strakhova, T.V., Atanazevich, K.K. (1997). *Sushinnya zerna [Grain drying]*. Kyiv: Lybid' [in Ukrainian].
2. Lykov, A.V. (1967). *Teoriya teploprovidnosti [Theory of thermal conductivity]*. Moscow (in Russian).

3. Boshkova, I.L., Volhusheva, N.V. (2015). Matematicheskoye modelirovaniye temperaturnogo polya v dielektricheskom materiale pri deystvii mikrovolnovogo polya [Mathematical modeling of the temperature field in a dielectric material under the action of a microwave field]. *Proceedings from Pervyye mezhdunarodnyye Lykovskiye nauchnyye chteniya*. (p.p. 109-111). Minsk (in Russian).
4. Feng, H., Yin, Y. & Tang, J. (2012). Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling. *Food Eng Rev.*, 4. 89–106. <https://doi.org/10.1007/s12393-012-9048-x>
5. Burdo, O.H. (2010). *Evolutsiya sushil'nykh ustanovok [Evolution of drying plants]*. Odesa: Polihraf (in Russian).
6. Burdo, O. H. (2013). *Pishchevye nanoenergotehnologii [Food nanoenergytechnologies]*. Kherson: Hryn' D.S. (in Russian).
7. Akulych P. V. (2002). *Termogidrodinamicheskiye protsessy v tekhnike sushki [Thermohydrodynamic processes in the drying technique]*. Mynsk: YTMO ym. Lykova. (in Russian).
8. Burdo, O. H. (2015). Tekhnologii napravlennoy energeticheskoy deystviya v APK [Technologies of directed energy action in the agro-industrial complex]. *Scientific Works*, 41(1). 42-46 (in Russian).
9. Burdo, O. H., Yarovoy, Y. Y., Ruzhytskaya, N. V., Borshch, A. A. (2012). Novyye printsipy obezvozhivaniya zernovogo syr'ya [New principles of dewatering of grain raw materials]. *Zernovi produkty i kombikorma*, 1. 42-46 (in Russian).
10. Burdo, O.H., Bandura, V. N., Yarovoy, Y. Y. (2015). Osobennosti modelirovaniya protsessov sushki pri elektromagnitnom podvode energii [Features of modeling of drying processes with electromagnetic energy supply]. *Scientific Works*, 39(2). 38-43 (in Russian).
11. Kotov, B.I., Bandura, V.M., Kalinichenko, R.A. (2018). Matematychnye modelyuvannya ta identyfikatsiya teplomasoperenosu v roslynodypersnomu materialy pry sushinni y nahrivanni elektromagnitnim polem nadvisokoyi chastoty [Mathematical modeling and identification of heat and mass transfer in plant dispersed material during drying and heating by an ultrahigh frequency electromagnetic field.]. *Enerhetyka y avtomatyka*, 6. 35 – 50 (in Ukrainian).
12. Tuchnyy, V.P., Kalinin, L. H., Boshkova, I. L., Volhusheva, N. V. (2004). Sushka zerna v mikrovolnovom pole [Drying of grain in a microwave field]. *Zberihannya ta pererobka zerna*, 4. 33-34 (in Russian).
13. Kalinin, L. H., Boshkova, I. L., Volhusheva, N. V. (2004). Razrabotka mikrovolnovykh sushilok dlya zerna [Development of microwave dryers for grain]. *Zberihannya ta pererobka zerna*, 7. 34-35 (in Russian).
14. Hemis, M., Choudhary, R., Gariépy, Y., Raghavan, V. G. S. (2015). Experiments and modelling of the microwave assisted convective drying of canola seeds. *Biosystems Engineering*, 139(4). P.121–127. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.010>
15. Hemis, M., Choudhary, R., Becerra-Mora, N., Kohli, P., Raghavan, V. (2016). Modelling of microwave assisted hot-air drying and microstructural study of oilseeds. *Int J Agric&BiolEng.*; 9(6). 167–177. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160906.2442>
16. Rohov, I.A. Nekrutman, C.B. (1986). *Sverkhvysokochastotnyy nagrev pishchevykh produktov [Ultra-high-frequency heating of food products]*. Moskva: Ahropromyzdat (in Russian).

SUBSTANTIATION OF INTERACTION OF ULTRAHIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD WITH RAPESEED DURING DRYING

Bandura V., Dr. Sci. Tech., Professor

National university of life and environmental sciences of Ukraine, Kyiv

The food industry mainly uses convective drying technologies for grain and oilseeds implemented in driers of various designs, i.e., towel, belt, and drum. Heat transfer to raw materials is realized here using heated air as a drying agent. The technology of microwave seed treatment is a promising way to organize the drying process, it has some differences from traditional methods of dehydration. Microwave heating provides energy to the volume of the material, and the heating temperature is easy to control.

The article presents theoretical and experimental research of rapeseed dielectric heating during drying in a microwave field. Mathematical models of heat and mass transfer developed for modelling microwave drying processes are analysed, and the dielectric properties of oilseeds depending on humidity and temperature are discussed. The principle of microwave energy conversion into heat is based on the effective absorption of moisture of the heated product, microwave energy supplied to it. Thus, the heat generated in the processed product and supplied to the working chamber of the microwave is almost completely absorbed by the seeds, regardless of its shape and weight. The intensity of heating of rapeseed depends on its dielectric properties and microwave field strength.

The coefficient of dielectric loss of rapeseed largely depends on the moisture content because water plays a major role in the process of energy absorption during dielectric heating. The nonlinear dependence of the dielectric

loss coefficient on moisture is due to the variety of moisture forms bond in rapeseed. The decrease in the value of the dielectric loss coefficient, with increasing rapeseed temperature can be explained by the active water loss when heating the seeds.

Keywords: rapeseed, microwave energy, modelling, drying, dielectric loss coefficient.

Список використаної літератури

1. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич К.К. Сушіння зерна: підручник. Київ: Либідь. 1997. 352 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности: монография. М. 1967. 559с.
3. Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Математическое моделирование температурного поля в диэлектрическом материале при действии микроволнового поля. *Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе*: сб. науч. ст. Первых Междунар. Лыков. науч. чтений, посвящ. 105-летию акад. А.В. Лыкова, Москва, 22-23 сент. 2015 г. Курск: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. С. 109-111.
4. Feng H., Yin Y. & Tang J. Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling. *Food Eng. Rev.* 2012. Vol. 4. P.89–106. <https://doi.org/10.1007/s12393-012-9048-x>
5. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Одесса: Полиграф, 2010. 368с.
6. Бурдо О. Г. Пищевые нанотехнологии. Херсон: Гринь Д.С, 2013. 304 с.
7. Акулич П. В. Термогидродинамические процессы в технике сушки. Минск: ИТМО им. Лыкова, 2002. 268 с.
8. Бурдо О. Г. Технологии направленного энергетического действия в АПК. *Наукові праці ОНАХТ*. 2015. Вип.41, Т.1. С. 42-46.
9. Новые принципы обезвоживания зернового сырья / О. Г. Бурдо, И. И. Яровой, Н. В. Ружицкая, А. А. Борщ. *Зерновые продукты и комбикорма*. 2012. №1. С. 42-46.
10. Бурдо О.Г., Бандура В. Н., Яровой И. И. Особенности моделирования процессов сушки при электромагнитном подводе энергии. *Наукові праці ОНАХТ*. 2015. Вип.39, Т.2. С. 38-43.
11. Котов Б.І., Бандура В.М., Калініченко Р.А. Математичне моделювання та ідентифікація тепломасопереносу в рослинному дисперсному матеріалі при сушінні і нагріванні електромагнітним полем надвисокої частоти. *Енергетика і автоматика*, №6, 2018. С.35 – 50.
12. Сушка зерна в микроволновом поле / В.П.Тучный, Л. Г. Калинин, И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева. *Хранение и переработка зерна*. 2004. №4. С. 33-34.
13. Калинин Л. Г., Бошкова И. Л., Волгушева Н. В. Разработка микроволновых сушилок для зерна. *Хранение и переработка зерна*. 2004. №7. С. 34-35.
14. Hemis M., Choudhary R., Gariépy Y., Raghavan V. G. S. Experiments and modelling of the microwave assisted convective drying of canola seeds. *Biosystems Engineering*, 2015.139(4),P.121–127. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.010>
15. Hemis M, Choudhary R, Becerra-Mora N, Kohli P, Raghavan V. Modelling of microwave assisted hot-air drying and microstructural study of oilseeds. *Int J Agric&BiolEng*, 2016; Vol.9. No.6. P. 167–177.<https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160906.2442>
16. Рогов И.А. Некрутман С.В. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов. Москва: Агропромиздат, 1986. 351 с.

Отримано в редакцію 03.04.2021

Прийнято до друку 06.07.2021

Received 03.04.2021

Approved 06.07.2021

ІНЖЕНЕРНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ ГІДРАТАЦІЇ ПРИ ОБРОБЦІ ОЛІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ХВИЛЯМИ

¹Осадчук П. І., д-р техн. наук, доцент,

²Безбах І. В. д-р техн. наук, доцент

¹Одеський державний аграрний університет

²Одеська національна академія харчових технологій

До основних недоліків стандартних ліній гідратації відносяться висока енергоємність, велика витрата холодної води і пари, що зв'язано з використанням сепараторів, а також жорстким температурними режими сушіння фосфоліпідної емульсії. Ці лінії не забезпечують ефективність процесу в цілому через високий залишковий зміст фосфоліпідів в олії і низької харчової цінності одержуваних фосфатидних концентратів унаслідок впливу перекису водню, застосовуваної для знебарвлення. Для усунення цих недоліків було запропоновано використання електромагнітних полів в процесі гідратації олії.

В даній роботі запропоновано інженерні методи розрахунку процесу гідратації при обробці олії електромагнітними хвилями. Проведено моделювання процесу.

Використовуючи метод аналізу розмірностей, отримано критеріальне рівняння для розрахунку продуктивності устаткування. Проведено узагальнення експериментальних даних отриманих в результаті досліджень.

Розроблено алгоритм розрахунку степеневих показників та констант в рівнянні у числах подібності, який реалізовано у середовищі Microsoft Excel. Визначено ступінь впливу напруженості магнітного поля на процес гідратації. Враховано залежить коефіцієнту масопередачі від зміни температури. З отриманого рівняння в числах подібності розраховано ряд теоретичних значень числа Стантона та порівняно з експериментальними даними.

Визначено розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними в межах 18%. Отримане рівняння дає змогу розраховувати об'єм установки та швидкість протікання процесу, задаючись різними режимними параметрами: напруженістю магнітного поля, температурою.

Ключові слова: гідратація, електромагнітне поле, температура, олія.

Вступ. Вкрай бажано вживати в їжу, з фізіологічної точки зору, олії з максимальним вмістом фосфоліпідів. Здійснити практично це не вдається, тому що фосфоліпіди, які легко розчиняються в оліях при температурах їх одержання, надалі мимовільно з них виділяються при охолодженні. За рахунок протікання інтенсивних окисних, ферментативних і гідролітичних процесів утворюється осад, що швидко псується. У процесі виробництва і переробки соняшникової олії, враховуючи це, як правило, її піддають частковій або повній рафінації. [1].

Актуальність. У мережах суспільного і дієтичного харчування збільшується зріст споживчого попиту на рослинні олії у фасованому або нефасованому вигляді, у тому числі для домашньої кулінарії. Однією із самих актуальних задач в умовах ринкової економіки, залишається підвищення конкурентоздатності вітчизняних видів рослинних олій та їх якості, а також досягнення високої стабільності та підвищеної біологічної цінності, які не втрачаються у процесі тривалого зберігання [2].

Аналіз літературних джерел. Літературний огляд показав, що ряд вчених розглядали питання вивчення впливу різного роду фізичних полів при очистці рослинних олій, до них відносяться наступні роботи, які проаналізовані нижче. Вивчаючи наукові праці Elena Roselló-Sotoa та J.Barbaa [3, 4] - де розглядається нове поняття вилучення супутніх домішок з соєбобів і побічних продуктів, які отримуються в процесі виробництва оливкової олії. Наведено вилучення поліфенолів, жирних кислот, барвистих пігментів та інших елементів за допомогою використання електромагнітних імпульсів. Нажаль у даному випадку застосування електромагнітного поля не використовується для очистки готового продукту. Натомість у наукових працях Isabel Odriozola-Serrano [5] наведені експериментальні дослідження, за допомогою яких, виявили позитивний вплив імпульсних електричних полів для різних технологічних процесів у харчовій промисловості. Основна увага приділена тому що, ці технології є цінним інструментом, за допомогою яких може поліпшитись функціональність, екстрагуємість і вивільнення цінних харчових речовин, а також стають біодоступними мікроелементи і компоненти в різноманітних харчових продуктах. Тим паче, зважаючи увагу на те, що встановлено позитивний ефект від використання електромагнітних інтенсифікаторів, у науковій праці не наводиться застосування цих полів при очистці рослинних олій. Вивчаючи роботу Mahnič-Kalamiza S [6], бачимо, що в ній представлено перевагу використання електромагнітних полів над технологіями з термічними інтенсифікаторами, які стандартно використовуються при обробці харчових продуктів рідинного походження. Основ-

ні результати були узагальнені, та висвітлені у рамках інтегрованого проекту FP6 ЄС «NovelQ», він висвітлює вплив електромагнітних полів на основні складових, які впливають на властивості речовин, регламентуючі якість продукції. Не зважаючи на це, досліді наведено для не в'язких рідин, якими не є рослинні олії. Розглядаючи роботу А. А. Netreba [7], де представлено явище електропорації, яке було отримано за допомогою використання імпульсних електричних полів при впливі на харчові тканини, це призводило до покращення зв'язків між внутрішніми та зовнішніми клітинами за допомогою вмісту їх оболонки, що дозволило інтенсифікувати процес утворення коагуляції. Ці досліді проводились не для видалення супутніх речовин з олії, а з метою прискорення процесу льодоутворення. Спираючись на вивчені наукові дослідження можна припустити, що використання електромагнітного поля дозволить спостерігати інтенсифікацію процесу коагуляції при видаленні фосфоліпідів з олій рослинного походження.

Мета досліджень. За допомогою теорії подібності отримати критеріальне рівняння для узагальнення результатів експериментальних досліджень і провести порівняння отриманих експериментальних даних та теоретичних розрахунків процесу видалення фосфоліпідів з рослинних олій.

Результати досліджень. Гідратація - це додавання у олії води чи слабого соленого розчину з нагрівом до 55-60 °С. За допомогою гідратації речовини які утримують фосфор коагулюють і можуть бути видалені.

Розглянемо процес гідратації як стаціонарний масообмінний (рис. 1).

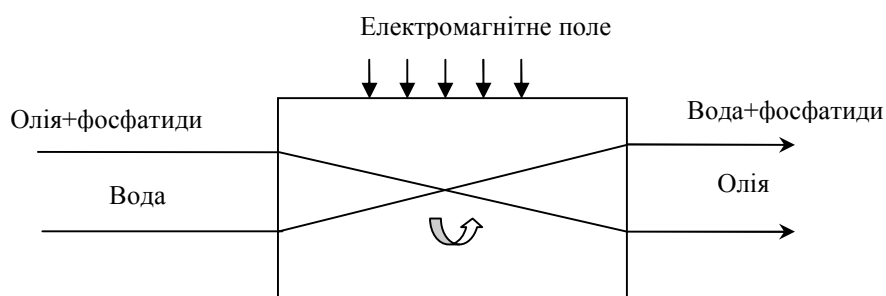


Рис. 1 – Фізична схема процесу гідратації при обробці електромагнітними хвилями

При змішуванні води з олією, мікропластівці зчіплюються, захоплюючи домішки і воду, і утворюють коагуляційну структуру у вигляді великих пластівців.

Основним показником такого процесу буде деякий об'ємний коефіцієнт масопередачі:

$$K_v = \frac{M}{V \cdot a \cdot \Delta C}, \quad (1)$$

Де, V – об'єм апарату; a – питома поверхня контакту фаз ($\text{м}^2/\text{м}^3$); ΔC – різниця концентрації.

Основними факторами, що впливають на процес є: температура; величина дози коагулянту (води), швидкість його змішування і рівномірність розподілу в олії; умови протікання процесу утворення пластівців (вплив електромагнітного поля).

У цьому випадку надійним способом одержання структур критеріальних рівнянь є метод аналізу розмірностей. На основі його загальних принципів установлюємо вид критеріального рівняння для розрахунку продуктивності установки.

Коефіцієнт масопередачі, в такому випадку, залежить від наступних параметрів: напруженості магнітного поля (H), температури (T), швидкості потоку (v).

Використовуючи метод аналізу розмірностей, отримуємо рівняння виду:

$$St = A \cdot H^{k_1} \cdot \theta^{k_2}, \quad (2)$$

Де, $St = K_v/v$ - число Стантона; v - швидкість потоку; $H = H_t/H_0$ – симплекс напруженості електромагнітного поля; H_t - поточне значення напруженості електромагнітного поля; H_0 - початкове значення напруженості електромагнітного поля; $\theta = \theta_t/\theta_0$ – симплекс температури; θ_t - поточне значення температури олії; θ_0 - початкове значення температури олії; A , k_1 , k_2 – константи.

Вихідні дані для обробки отримані в результаті експериментальних досліджень. Також використані деякі табличні значення – теплофізичні властивості олії. Алгоритм (рис. 2) реалізовано в середовищі Microsoft Excel. Використовуючи функції Microsoft Excel, одержуємо показники ступеня в рівнянні в числах подібності.

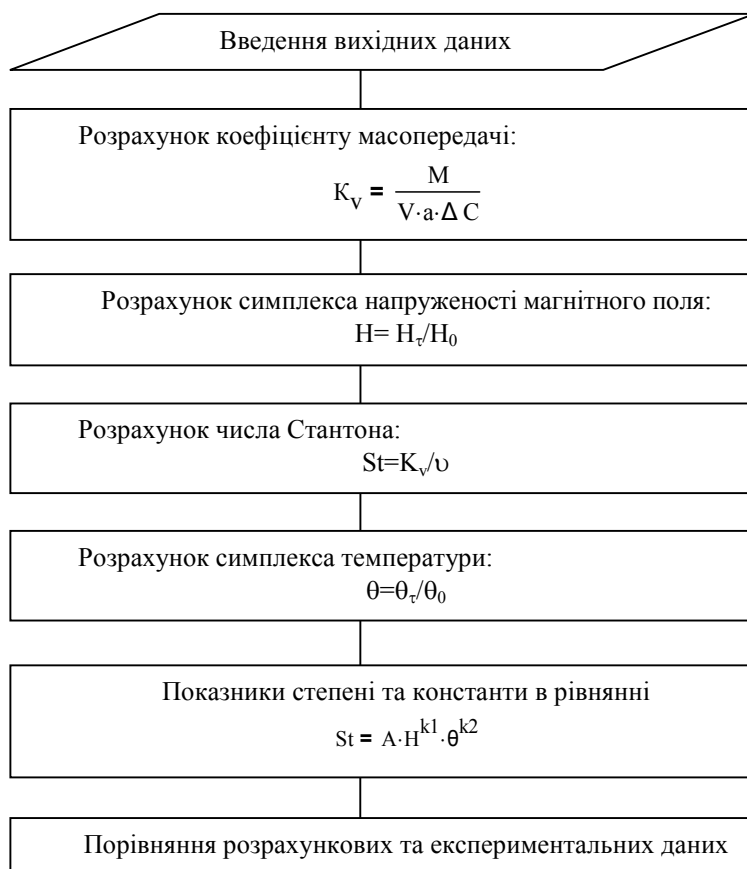


Рис. 2 – Алгоритм узагальнення експериментальних даних при зміні напруженості магнітного поля

Завдання узагальнення даних - отримати показники степені та константи в рівнянні (2).

Необхідно врахувати, як залежить коефіцієнт масопередачі від зміни температури. Будуємо залежність $St = f(\theta)$ у логарифмічних координатах (рис. 3).

Криві розширюються залежно значення симплекса напруженості магнітного поля H_r/H_0 . Тангенс кута нахилу прямих дорівнює 0,8, що є показником ступеня у числа θ .

Далі необхідно визначити ступінь впливу напруженості магнітного поля на процес. Будуємо залежність $H_r/H_0 = f(St/\theta^{0.8})$ у напівлогарифмічних координатах. Тангенс кута нахилу кривих (рис. 4) дорівнює 1,8, що є показником ступеня у числа H_r/H_0 .

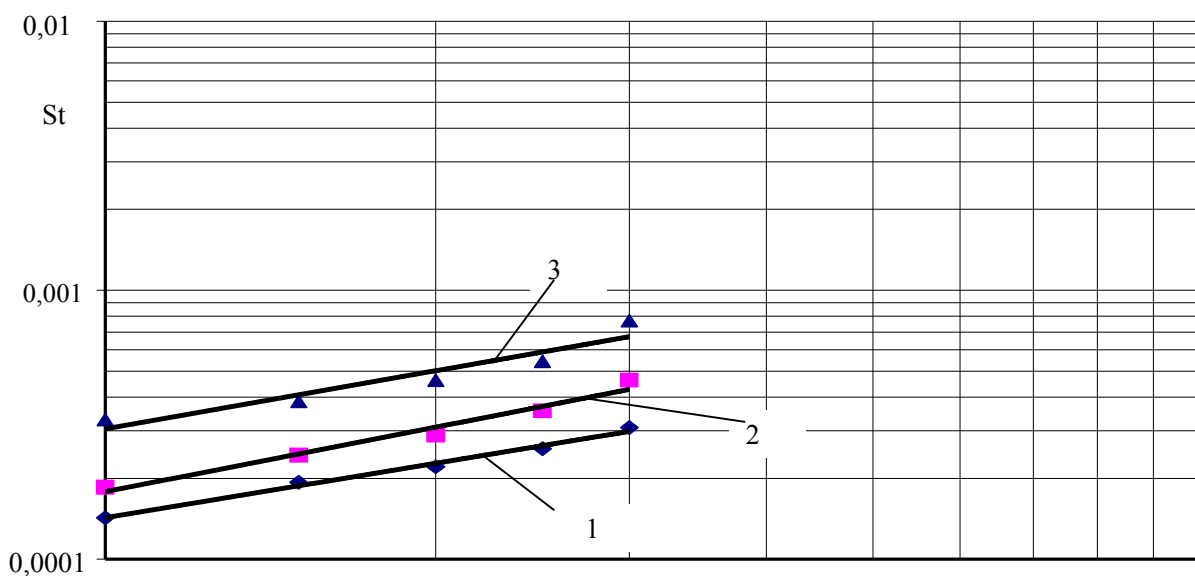
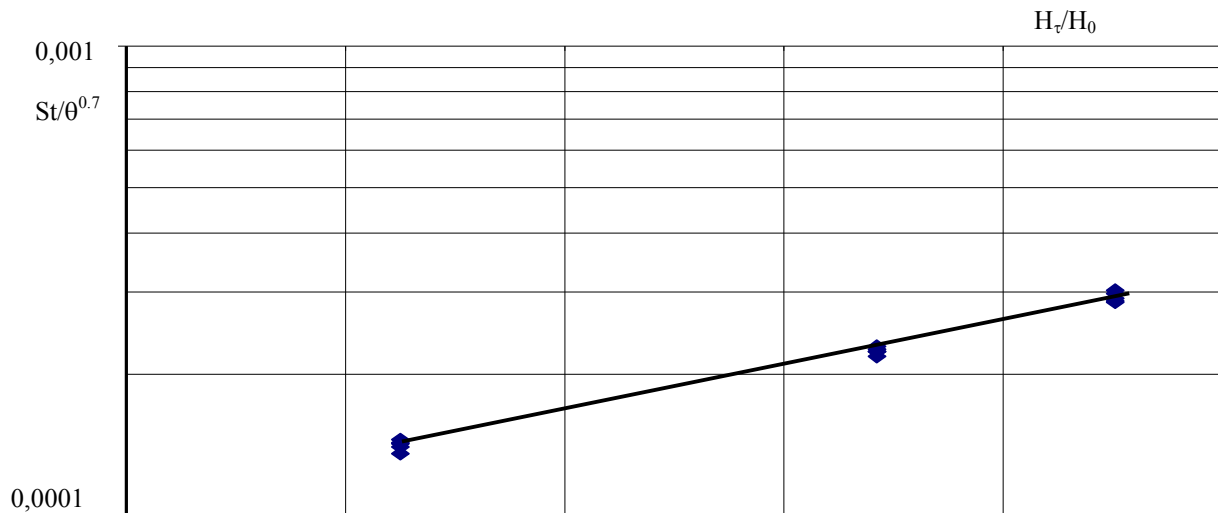


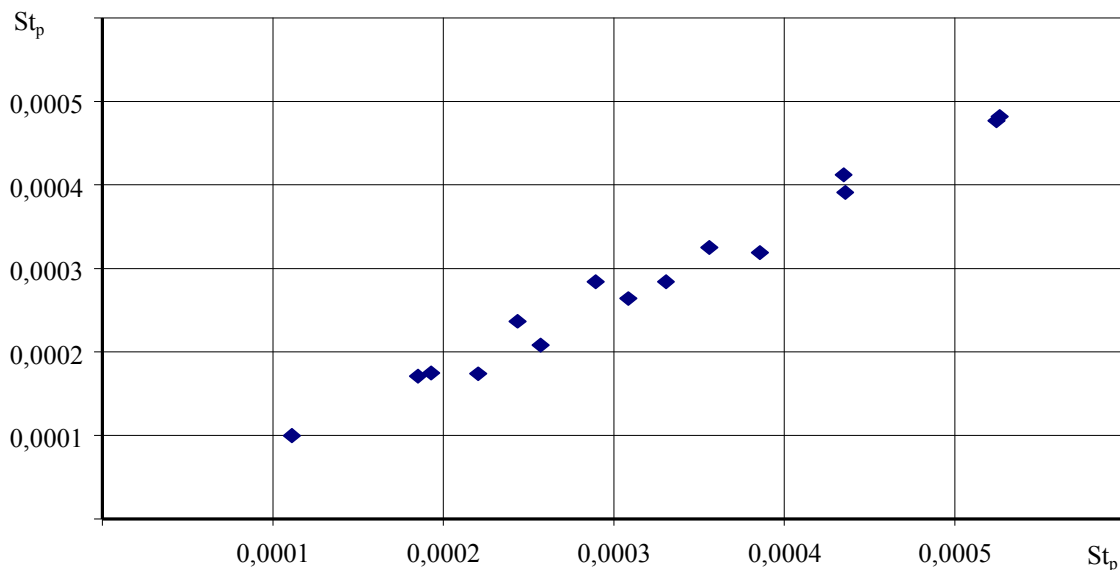
Рис. 3 – Залежність $St = f(\theta)$ при значеннях H_r/H_0 : 1 – 1; 2 – 1,35; 3 – 1,52

Рис. 4 – Залежність $H_{\tau}/H_0 = f(St/\theta^{0.8})$

Остаточний результат обробки - рівняння виду:

$$St_p = 0.0001 \cdot H^{1.8} \cdot \theta^{0.8} \quad (3)$$

Використовуємо отримане рівняння в числах подібності для розрахунку ряду значень St_p . Порівнюємо з експериментальними даними (рис. 5). Для порівняння використовуємо отримані експериментальні дані [9]. Розбіжність в межах 18%. Отримана модель із високою точністю описує отримані експериментальні дані.

Рис. 5 – Порівняння значень St_p і експериментальних St

Використовуючи рівняння (3), зможемо розраховувати об'єм установки, швидкість процесу, задаючись різними режимними параметрами: напруженістю магнітного поля, температурою.

Висновки

Проведене моделювання процесу гідратації із застосуванням електромагнітних коливань показало, що визначальний вплив на процес надає зміна температури та напруженість електромагнітного поля. Це підтверджує і аналіз отриманої моделі (3). Показник ступеня при симплексі H_{τ}/H_0 дорівнює 1,8. Нижчий вплив на процес має температура продукту показник ступеня при симплексі θ дорівнює 0,8.

References

1. Harutyunyan, N.S., Kornena, E.P., Nesterova, E.A. (2004). Rafinatsiya masel i zhиров. Teoreticheskiye osnovy, praktika, tekhnologiya, oborudovaniye [*Refining oils and fats. Theoretical foundations, practice, technology, equipment*]. SPb.: GIORД (in Russian).
2. Harutyunyan N.S, Kornena E.P. (1986). Fosfolipidy rastitel'nykh masel [*Phospholipids of vegetable oils*]. M.: Agropromizdat (in Russian).
3. Elena Roselló-Sotoa, Mohamed Koubaab, Amine Moubarikc, Rita P. Lopesd, Jorge A. Saraivad, Nadia Boussettab, Nabil Grimib, Francisco J. Barbaa. (2016). Emerging opportunities for the effective valorization of wastes and by-products generated during olive oil production process: Non-conventional methods for the recovery of high-added value compounds. *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), 296-310.
4. Francisco J.Barbaa, Oleksii Parniakovb, Sofia A. Pereirac, Artur Wiktord, Nabil Grimib, Nadia Boussettab, Jorge A. Saraivac, Javier Rasoe, Olga Martin-Bellosof, Dorota Witrowa-Rajchertd, Nikolai Lebovskabg, Eugène Vorobievb. (2016). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*, 77(4), 773-798
5. Isabel Odriozola-Serrano, Ingrid Aguiló-Aguayo, Robert Soliva-Fortuny, Olga Martín-Belloso. (2015) Pulsed electric fields processing effects on quality and health-related constituents of plant-based foods. // *Trends in Food Science & Technology*. Volume 29, Issue 2, 98-107
6. Mahnič-Kalamiza S, Vorobiev E, Miklavčič D. (2016). Electroporation in food processing and biorefinery. *The Journal of Membrane Biology*, 247(12), 1279-1304
7. Netreba, A. A., Gladky, F. F., Sadovnichy, G. V., Shkalyar, T. G. (2017). Ispol'zovaniye elektromagnitnogo polya v protsesse vymorazhivaniya podsolnechnogo masla [The use of the electromagnetic field in the process of freezing sunflower oil]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu KhPI. Seriya: Innovatsiyni doslidzhennya u naukovykh robotakh studentiv*, (49), 3-14.
8. Osadchuk, P. I., Domuschi, D. P., Enakiev, Y. I., Peretiaka, S. N., Lipin, A. P. (2020). Study of the effect of ultrasonic field in purifying sunflower oil. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 26 (2) , 486–491
9. Osadchuk P.I. (2019). Vykorystannya elektromagnitnoho polya pry hidratatsiyi roslynnykh oliy [Use of electromagnetic field in hydration of vegetable oils]. *Scientific Works*, 83(1), 98-103 (in Ukrainian).

ENGINEERING METHODS OF CALCULATION OF THE HYDRATION PROCESS DURING OIL TREATMENT BY ELECTROMAGNETIC WAVES

¹Osadchuk P. I., doctor of technical sciences, associate professor,

²Bezbakh I. V., doctor of technical sciences, associate professor

¹Odessa State Agrarian University, m. Odessa

²Odessa National Academy of Food Technologies

The concept of optimal nutrition, which underlies modern ideas about nutrition and health, requires a new approach to the composition and properties of food, which should not only meet the needs of the human body in nutrients and energy, but also provide it with the full range of necessary macro - and micronutrients, contributing to the prevention of food-dependent diseases, maintaining health and longevity. Modern requirements of nutrition science have led to the emergence of new groups of products with new composition and properties. These changes are associated with an understanding of the role of nutrition in human life, the relationship between food quality and disease of civilization, as well as new working conditions and changes in the rhythm of life, the growth of environmental problems. The main disadvantages of standard hydration lines include high energy consumption, high consumption of cold water and steam, which is associated with the use of separators, as well as harsh temperature drying conditions of the phospholipid emulsion. These lines do not ensure the efficiency of the process as a whole due to the high residual content of phospholipids in the oil and the low nutritional value of the obtained phosphatide concentrates due to the influence of hydrogen peroxide used for decolorization. To eliminate these shortcomings, it was proposed to use electromagnetic fields in the process of hydration of oils. In this paper, engineering methods for calculating the hydration process during oil treatment by electromagnetic waves are proposed. The process is modeled. Using the method of dimensional analysis, a criterion equation for calculating the performance of the equipment is obtained. The generalization of experimental data obtained as a result of research is carried out. An algorithm for calculating power indicators and constants in the equation in similarity numbers has been developed and implemented in the Microsoft Excel environment. The degree of influence of the magnetic field strength on the hydration process is determined. The mass transfer coefficient depends on the temperature change. From the obtained equation in the similarity numbers a number of theoretical values of Stanton are calculated and compared with experimental data. The discrepancy between the calculated and experimental data within 18% was determined. The result-

ing equation allows you to calculate the volume of the installation, the speed of the process, given the various mode parameters: magnetic field strength, temperature.

Keywords: hydration, electromagnetic field, temperature, oil.

Список використаної літератури

1. Арутюнян Н.С., Корнена Е.П., Нестерова Е.А. *Рафинация масел и жиров. Теоретические основы, практика, технология, оборудование*. СПб.: ГИОРД, 2004. 288 с.
2. Арутюнян Н. С., Корнена Е. П. *Фосфолипиды растительных масел*. М. Агропромиздат, 1986. 415 с.
3. Elena Roselló-Sotoa et al. Emerging opportunities for the effective valorization of wastes and by-products generated during olive oil production process: Non-conventional methods for the recovery of high-added value compounds. *Trends in Food Science & Technology*. 2016. Volume 45, Issue 2. P. 296-310
4. Francisco J.Barbaa et al. Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*. 2016. Volume 77. Part 4. P. 773-798
5. Odriozola-Serrano I., Aguiló-Aguayo I., Soliva-Fortuny R., Martín-Belloso O. Pulsed electric fields processing effects on quality and health-related constituents of plant-based foods. *Trends in Food Science & Technology*. 2015. Volume 29, Issue 2. P. 98-107
6. Mahnič-Kalamiza S, Vorobiev E, Miklavčič D. Electroporation in food processing and biorefinery. *The Journal of Membrane Biology*. 2016. 247(12). P. 1279-1304
7. A. A. Netreba, F. F. Gladky, G. V. Sadovnichy, T. G. Shkalyar. The use of the electromagnetic field in the process of freezing sunflower oil Herald Nat. tech. Un-that "KPI": Sat. scientific tr. Theme Vol .: Innovative research in the scientific works of students. - Kharkov: NTU "KhPI", 2014. 49 (1091). P. 3-14.
8. Osadchuk P. I. et. al. Study of the effect of ultrasonic field in purifying sunflower oil. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2020. Vol. 26. No 2. P. 486–491.
9. Осадчук П. І. Використання електромагнітного поля при гідратації рослинних олій. *Наукові праці*, 2019. Випуск 1(83). С. 98-103.

Отримано в редакцію 16.03.2021

Прийнято до друку 26.06.2021

Received 16.03.2021

Approved 26.06.2021

ВПЛИВ ПАРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЯБЛУК НА ТЕПЛОТУ ЗНЕВОДНЕННЯ

Гусарова О.В., к.т.н., Михайлик В.А., к.т.н., ст. наук. співр., Шапар Р.О., к.т.н., ст. наук. співр.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Для більш обґрунтованого виявлення можливостей інтенсифікації сушіння та глибшого розуміння процесів, які відбуваються під час зневоднення яблук, методами ТГ та ДТА було досліджено процес видалення води з них. В якості об'єктів дослідження використано свіжі та оброблені паром зразки паренхімних тканин яблук сорту Ренет Симиренко та Джонатан. Дослідження виконано в дериватографі $Q-1000$ в діапазоні $25 \dots 250^\circ\text{C}$ при швидкості нагрівання $3,6 \text{ K/хв}$. Зневоднення яблук здійснювали методом конвективного стадійного сушіння до залишкової вологості 6% (абс).

Визначено температури максимальної швидкості зневоднення, переходу паренхімних тканин в стан, обумовлений вмістом виключно зв'язаної води та температурні інтервали термічного розкладання органічних речовин. У роботі відмічено, що перебіг процесу сушіння в умовах керованого нагріву залежить від стану води. Середня швидкість видалення води з оброблених паром тканин у яблук сорту Ренет Симиренко на 14% більша порівняно зі свіжими.

Вперше для яблук сорту Ренет Симиренко показано, що у оброблених паром зразках через руйнування клітинних мембран відбувся перерозподіл фракційного складу води. У оброблених паром яблуках досліджених сортів зв'язаної води на $\sim 3\%$ менше, ніж у свіжих. Перехід зв'язаної води у вільну підтверджується значеннями середньої питомої теплоти зневоднення, яка для свіжих яблук Ренет Симиренко визначена на рівні 2630 (в діапазоні температур $25 \dots 181^\circ\text{C}$), а для оброблених паром – 2500 кДж/кг (в діапазоні температур $25 \dots 183^\circ\text{C}$). Дослідження підтверджують доцільність тепловологісної обробки паренхімних тканин сировини перед сушінням з метою інтенсифікації зневоднення та зменшення енергетичних витрат. Отримані результати можна використовувати при виборі режиму попередньої тепловологісної обробки яблук та у теплових розрахунках процесу зневоднення.

Ключові слова: дериватографія, сушіння, яблука, обробка паром, середня питома теплота зневоднення, вільна та зв'язана вода.

Вступ та постановка проблеми. Основною вимогою до технологічного процесу перероблення фруктів та овочів на сушені продукти (сухофрукти, чипси, порошки) є зниження енергетичних витрат під час зневоднення та максимальне збереження природних складових сировини. Термолабільні властивості об'єктів сушіння зумовлюють високі вимоги до температурного рівня паротермічної обробки та сушіння. Вивчення закономірностей та характеру їхніх змін залежно від інтенсивності теплового впливу дає змогу обрати й обґрунтувати найкращі режими їхнього проведення та шляхи інтенсифікації процесу.

Яблука є найпоширенішою сировиною для перероблення на сушені продукти в Україні. Їх хімічний склад (рис. 1) багатий та різноманітний. Як і більшість рослинних матеріалів яблука мають високу природну вологість ($85 \dots 89 \%$). Визначальною особливістю їх є значний вміст вуглеводів (до 16%), зокрема цукрів (фруктоза, глюкоза, сахароза) та пектинових речовин (протопектин, пектин, пектинова і пектова кислоти) [1, 2]. Наявність зазначених складових ускладнює процес видалення води під час сушіння.

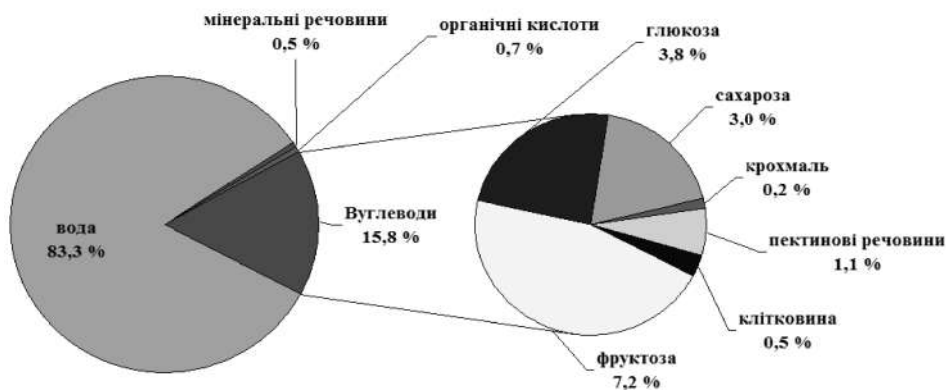


Рис. 1 – Усереднений хімічний склад яблук (у % до загальної маси)

Для інтенсифікації процесу сушіння, зменшення енергетичних витрат та отримання належних органолептичних показників сушеного продукту проводять попередню тепловологісну обробку сировини. Під час сушіння обробленої сировини відбуваються складні процеси, яблука зазнають біологічних, фізико-хімічних

та структурних змін, які можуть впливати на співвідношення вільної та зв'язаної води, що в свою чергу впливає на теплоту зневоднення.

У теплових розрахунках процесу сушіння фруктів, як правило, використовують взяті з довідників питому теплоту випаровування з вільної поверхні чистої води, а також дані отримані на основі аналізу кривих сорбції в області гігроскопічної вологості. Оскільки яблука є цукровмісною сировиною, а величина питомої теплоти випаровування з розчинів цукрів перевищує значення для чистої води [3], то це призводить до заниження енерговитрат при розрахунках. Відомості про зміну стану води в об'єкті сушіння під час зневоднення мають наукове значення та можуть бути використані для теплових розрахунків процесу.

Дериватографія набула широкого використання для отримання інформації про характер змін в сировині та термічну стійкість різних харчових продуктів під час зневоднення [4]. Так, наприклад, у роботі [5] досліджено зміну форм зв'язку води у екстракті чаю зеленого під час сушіння. Автори [6] досліджували перебіг термічного розкладання плодів лікарських рослин залежно від їх хімічного складу. Дериватографія об'єднує методи термогравіметрії (ТГ) та диференціального термічного аналізу (ДТА). Вона дозволяє сумісним аналізом кривих зміни маси (ТГ) та температури зразка (Т), швидкості зміни маси (ДТГ) та різниці температур між зразком та інертною речовиною (ДТА) якісно та кількісно оцінити процеси в сировині, що відбуваються в умовах керованого нагріву [7].

Мета та завдання дослідження. Методами термічного аналізу дослідити процес видалення води зі свіжих та оброблених парою зразків яблук для більш обґрунтованого виявлення можливостей інтенсифікації сушіння та глибшого розуміння процесів, які відбуваються під час зневоднення.

Для досягнення мети було сформульовано наступні завдання:

- дослідити форми зв'язку води в свіжих та оброблених парою паренхімних тканинах яблук;
- визначити вплив попередньої тепловологісної обробки паренхімних тканин яблук на процес сушіння та середню питому теплоту їх зневоднення.

Об'єкти та методи дослідження. В якості об'єкту дослідження використано свіжі та оброблені парою зразки паренхімних тканин яблук сорту Ренет Симиренко та Джонатан.

Дослідження виконано в дериватографі Q-1000 системи Paulik-Paulik-Erdey угорського виробництва (фірма „МОН”) в діапазоні температур 25...250 °C при швидкості нагрівання 3,6 К/хв. У тиглі порівняння як інертну речовину використано оксид алюмінію. Атмосферою слугувало нерухоме повітря. Корекцію шкали температур виконували по температурі плавлення бензойної кислоти. Відхилення температури під час досліджень не перевищувало $\pm 0,5$ К [7].

Свіжий або оброблений парою зразок у вигляді полого циліндру зовнішнім діаметром 6 мм і висотою 7 мм розміщували у відкритий конічний платиновий тигель. Для збору та обробки інформації було використано програмне забезпечення «Derivatograph».

Вивчення кінетики процесу сушіння свіжих та оброблених парою зразків завтовшки $\delta = 3...4$ мм проводили на експериментальному конвективному стенді з системою автоматичного збору та обробки інформації до залишкової вологості $W^c = 6\%$ у режимах стадійного зневоднення за температур сушильного агента $t = 80...60$ °C, вологовмісту $d = 10$ г/кг сухого повітря та швидкості руху $V = 1,5$ м/с.

Результати та їх обговорення. Дериватограми свіжих яблук сорту Ренет Симиренко та Джонатан зображено на рис. 2 та 3, оброблених парою – на рис. 4 й 5 відповідно.

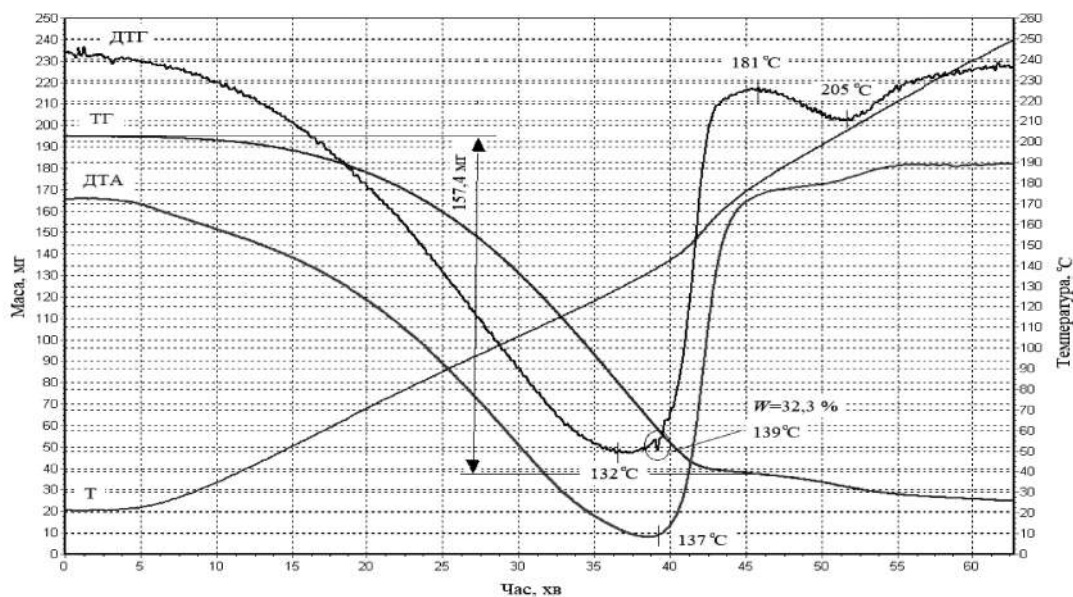


Рис. 2 – Дериватограма паренхімних тканин свіжих яблук сорту Ренет Симиренко [8]

Із рисунків 2 та 3 видно, що видалення води у обох свіжих зразках починається при 25 °С, про що свідчать криві ТГ та ДТГ. Процес іде з поглинанням теплоти, ендотермічність проявляється у відхиленні кривих ДТА до низу від уявної базової лінії. Швидкість зневоднення зразків зростає зі збільшенням їх температури і сягає максимального значення при 132 °С для яблук Ренет Симиренко і 133 °С для яблук Джонатан.

У деяких дослідженнях зроблене припущення, що температура максимуму швидкості сушіння або теплопоглинання, поділяє воду на вільну та зв'язану [5]. Проте в роботах [9, 10] було доведено, що це не так. Вимірювання методом диференціальної скануючої калориметрії показали, що під час зневоднення термолабільної цукровмісної сировини одночасно з випаровуванням вільної води відбувається зменшення питомого вмісту зв'язаної води. Граничний вологовміст, по досягненню якого в паренхімних тканинах яблук залишається лише зв'язана вода, був наведений в [9] і відповідає відносній вологості $W = 32,3 \%$.

По точці на кривій ДТГ (рис. 2 та 3), що відповідає зазначеній вологості, можна визначити температуру (табл. 1), після досягнення якої в зразках залишається тільки зв'язана вода.

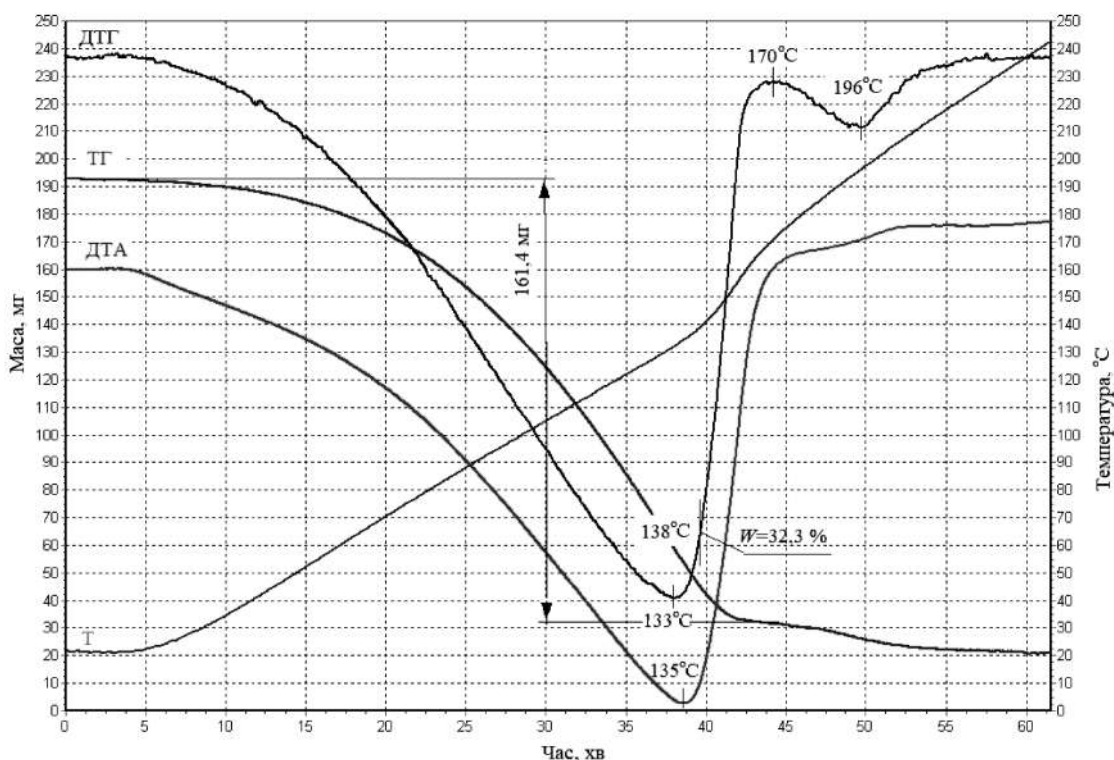


Рис. 3 – Дериватограма паренхімних тканин свіжих яблук сорту Джонатан

Таблиця 1

Результати аналізу дериватограм свіжих та оброблених парою паренхімних тканин яблук

Матеріал (сорт яблук, паренхімні тканини)	Початкова вологість, % відн.	Початкова маса зразка, мг	Маса видаленої води, мг	Кінцева маса зразка, мг	Температура, після дося- гнення якої у зразках лишається лише зв'язана вода, °С	Повне зневоднення, °С	Термічне розкладан- ня, °С
Ренет Симиренко, свіжі	80,72	195	157,4	25,0	139	181	182...249
Ренет Симиренко, оброблені парою	85,56	224,4	192	22,8	145	183	184...251
Джонатан, свіжі	83,63	193	161,4	22,0	138	170	171...242
Джонатан, оброблені парою	88,22	205,4	181,2	15,4	149	177	178...249

По відношенню до загальної маси видаленої води, зв'язаної води у зразках яблук Ренет Симиренко не менше ніж 13,4 % та 10 % у яблуках Джонатан. Відповідно до даних [11] у яблуках міститься 10...25 % зв'язаної води.

Повне зневоднення зразків наступас, коли швидкість зневоднення спадає до нуля. Температура повного зневоднення для яблук сорту Джонатан становить 170 °С, а для яблук Ренет Симиренко – 181 °С.

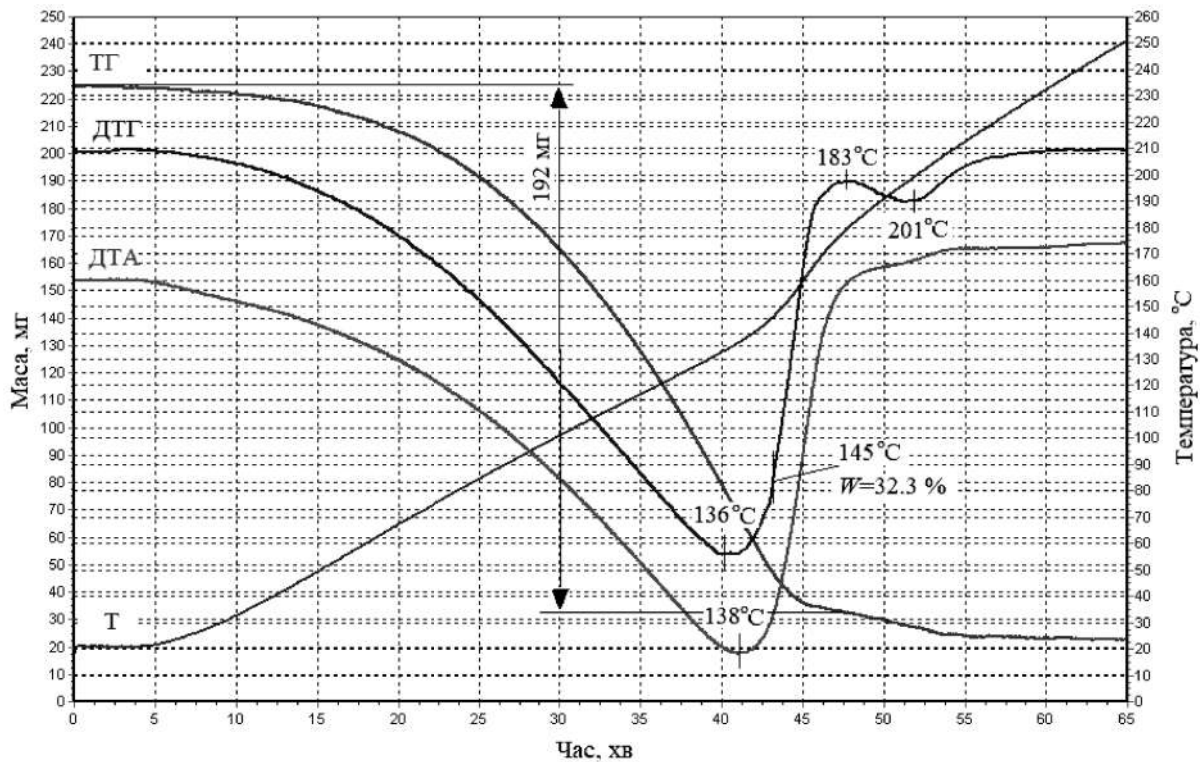


Рис. 4 – Дериватограма оброблених парою паренхімних тканин яблук сорту Ренет Симиренко [8]

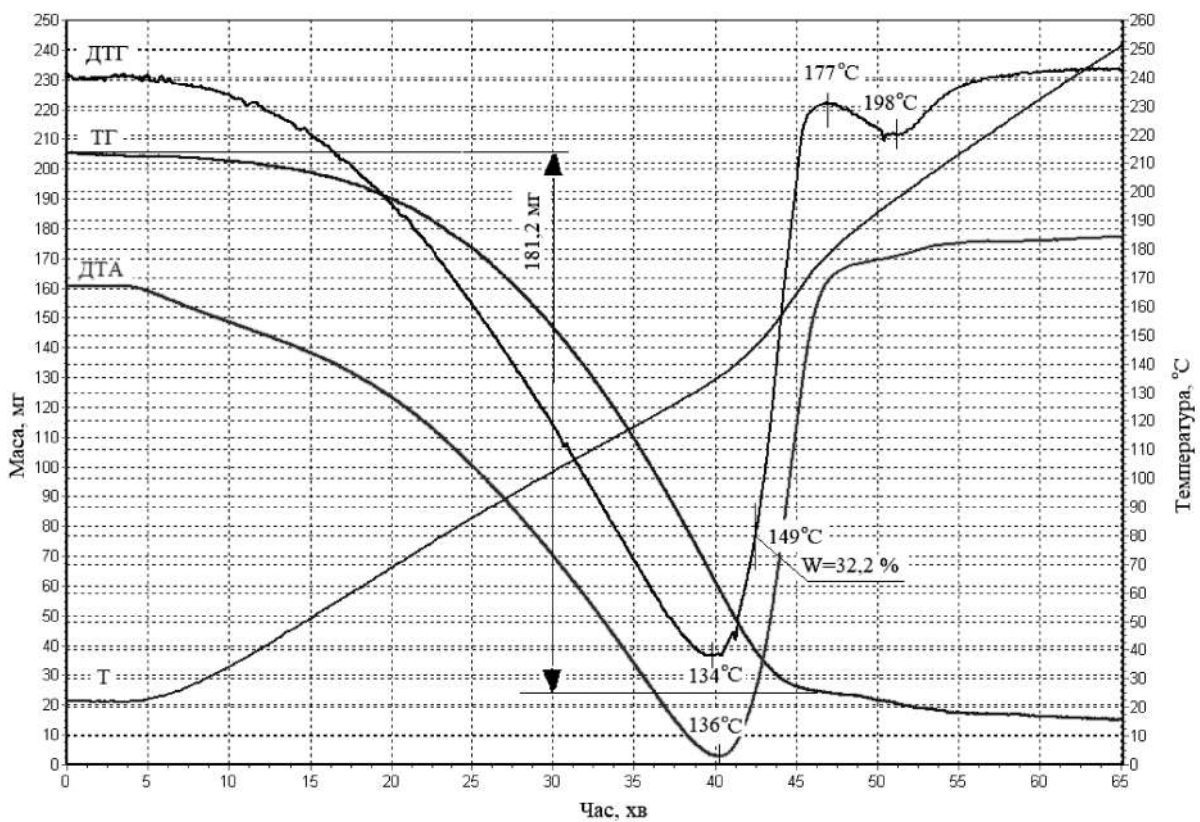


Рис. 5 – Дериватограма оброблених парою паренхімних тканин яблук сорту Джонатан

На кривих дериватограм паренхімних тканин після повного зневоднення в інтервалі температур 182...249 °С (Ренет Симиренко) та 171...242 °С (Джонатан) фіксується втрата маси тканинами з максимумом

швидкості при 205 та 196 °С відповідно. Як видно з кривих ДТА зміна маси зразків відбувається з виділенням теплоти. По характерним ознакам цей процес ідентифікується як термічне розкладання [10].

З рисунків 4 та 5 видно, що дериватограми оброблених парою зразків мають такий же характер, як і свіжих яблук. Сумісний аналіз кривих ДТА свіжих та бланшованих парою зразків показав, що їх форми подібні, максимуми піків практично співпадають (температури 137...138 °С для Ренет Симиренко та 135...136 °С для Джонатан).

За результатами аналізу дериватограм оброблених парою паренхімних тканин визначено характерні температури зневоднення в умовах контрольованого нагріву (табл. 1).

Нами зроблене припущення, що гранична вологість, по досягненню якої в зразках залишається лише зв'язана вода, для оброблених парою яблук буде приблизно такою ж, як і для свіжих, тобто $W = 32,3 \%$.

По відношенню до загальної маси видаленої води, зв'язаної води у оброблених парою зразках яблук Ренет Симиренко не менше ніж 10,7 % та 6,3 % у яблуках Джонатан [8].

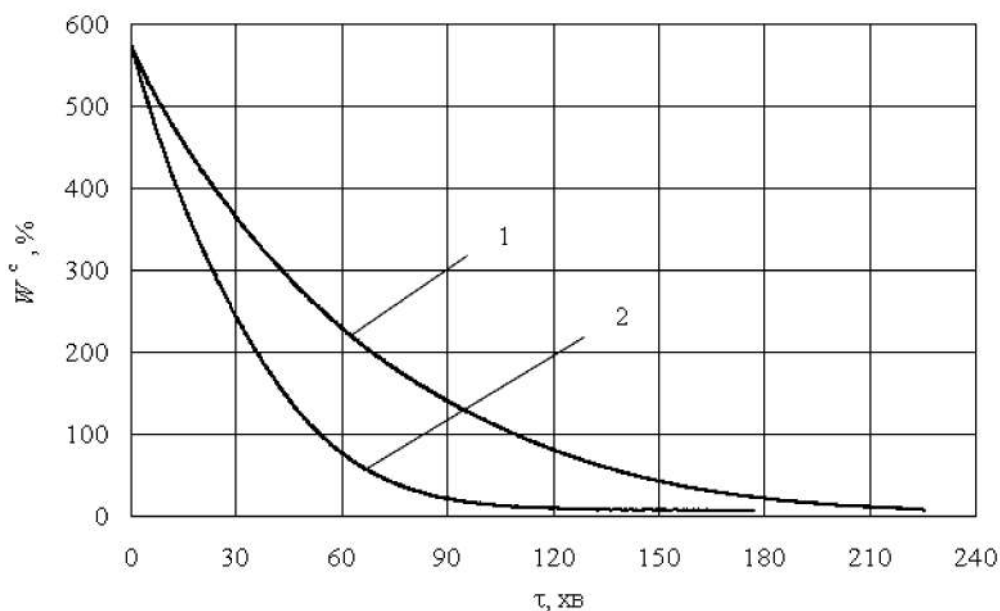
Аналізуючи отримані дані можна відмітити, що процес зневоднення в умовах керованого нагріву відбувається залежно від фракційного складу води. При видаленні вільної води, швидкість зневоднення зростає, досягаючи максимальної величини. Для видалення міцно зв'язаної води потрібні вищі витрати енергії, тому швидкість зневоднення знижується [8].

За нашими розрахунками, середня швидкість видалення води у оброблених парою зразках збільшується на 14 % порівняно із свіжими для яблук Ренет Симиренко та на 5,4 % для яблук Джонатан. Це може бути пов'язано як з вищою вологістю оброблених парою тканин, так і впливом обробки, яка може призводити до зниження їх водоутримуючої здатності [10], тобто до перерозподілу фракцій води – збільшення кількості вільної води, і відповідно – зменшення зв'язаної.

Отримані за допомогою дериватографії результати підтвердили більший вміст зв'язаної води в свіжих тканинах порівняно з обробленими. Дослідження довели, що у оброблених парою яблук обох сортів зв'язаної води приблизно на 3 % менше, ніж у свіжих. Це підтверджується середніми значеннями теплоти витраченої на зневоднення.

За методикою, що викладена в [12] було визначено теплоту, яка витрачена на зневоднення зразків. Так середня питома теплота зневоднення свіжих паренхімних тканин яблука сорту Ренет Симиренко в діапазоні температур 25...181 °С (рис. 2) визначена на рівні 2630, а для оброблених парою в діапазоні температур 25...183 °С (рис. 4) – 2500 кДж/кг [8].

Враховуючи одержані результати, було проведено порівняння кінетики процесу конвективного сушіння в режимі стадійного зневоднення свіжих та оброблених парою зразків яблук сорту Ренет Симиренко (рис. 6).



1 – свіжий зразок, 2 – оброблений парою зразок

Рис. 6 – Криві кінетики сушіння зразків яблук сорту Ренет Симиренко

Від кількості зв'язаної води залежить тривалість процесу зневоднення, а отже і енергетична складова процесу. На підставі узагальнення кінетичних закономірностей процесу визначено, що тривалість зневоднення оброблених парою яблук, порівняно із свіжими, скорочується на 20...25 % [13, 14]. Перерозподіл віль-

ної та зв'язаної води, а також її інтенсивніше випаровування відбувається за рахунок руйнування клітинних мембран в результаті термічної обробки тканин. Отримані кінетичні дані корелюють з результатами одержаними термічними методами аналізу.

Висновки

1. За допомогою методів термічного аналізу визначено температури максимальної швидкості зневоднення, переходу паренхімних тканин яблук в стан, обумовлений вмістом виключно зв'язаної води та температурні інтервали термічного розкладання органічних речовин.

2. Вперше для яблук сорту Ренет Смиренко показано, що у оброблених парою зразках паренхімних тканин через руйнування клітинних мембран відбувається перерозподіл вільної та зв'язаної води, частина зв'язаної води переходить у вільну, що підтверджується значеннями середньої питомої теплоти зневоднення.

3. На підставі узагальнення кінетичних закономірностей процесу сушіння визначено, що тривалість зневоднення оброблених парою яблук, порівняно з свіжими, скорочується на 20...25%.

Дослідження підтверджують доцільність тепловологісної обробки паренхімних тканин сировини перед сушінням з метою інтенсифікації зневоднення та зменшення енергетичних витрат. Отримані результати можна використовувати при виборі виду попередньої обробки яблук та у теплових розрахунках процесу зневоднення.

References

- Skurikhina, I. M., Volgareva, M. N. (1987). *Himicheskiy sostav pischevyih produktov [Chemical composition of food products]: sprav. tablitsyi*. Kn. 2. Moskva: Agropromizdat (in Russian).
- Korobka, S.V. (2016). Obgruntuvannya parametriv ta rezhymiv roboty heliosusharki fruktiv [Foundation of parameters and operating modes of the fruit solar dryer]: dys...kand. tekhn. nauk: 05.05.11. Lviv: *Lvivskiy natsionalnyi ahrarniy universytet* (in Ukrainian).
- Mikhailik, V. A., Dmitrenko, N. V., Snezhkin, Yu. F. (2019). Investigation of the Influence of Hydration on the Heat of Evaporation of Water From Sucrose Solutions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92 (4), 916–922.
- Mihaylik, V.A., Snezhkin, Yu.F., Belinskiy, V.T. (2005). Primenenie derivatografa dlya issledovaniya vliyaniya predvaritelnoy termicheskoy obrabotki na kinetiku sushki rastitelnogo syrya [Application of a derivatograph to study the effect of pre-heat treatment on the kinetics of drying plant raw materials]. *Problemy promyshlennoy teplotekhniki: sbornik tezisev dokladov IV Mezhdunarodnoy konferentsii*. Kiev, 26–30 (in Russian).
- Rubanka, K. V., Terletska, V. A., Zinchenko, I. M. (2013). Doslidzhennia zminy form zviazku volohy pid chas sushinnia ekstraktu chaitu zelenoho [Investigation of changes in moisture binding forms during drying of green tea extract]. *Khranenie y pererabotka zerna*, 11 (176), 46–48 (in Ukrainian).
- Wesołowski, M., Koniecznyński, P., Ulewicz, B. (2000). Influence of the elemental composition of medicinal fruits on the results of their thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 60, 299–304. <https://doi.org/10.1023/A:1010142517579>.
- Derivatograf sistemyi Paulik F., Paulik Y., Erdei L. (1974). Teoreticheskie osnovy. *Vengerskiy opticheskii zavod*. Budapesht, 146.
- Husarova, O.V., Mykhailik, V.A. (2019). Deryvatohrafichnyi analiz form zviazku vody v yablukakh. Resursoenerhozberihaiuchi tekhnolohii ta obladnannya [Derivatographic analysis of water bond forms in apples. Resource-saving technologies and equipment]: *zbirnyk tez dopovidei XVI mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh*. (Kyiv, 22 – 23 kvitnia 2019). Kyiv, 14–16 (in Ukrainian).
- Mikhailik, V. A., Dmitrenko, N. V., Snezhkin, Yu. F. (2014). Change in the specific heat capacity of parenchymal tissues of apples due to dehydration. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87 (1), 45–50.
- Mihaylik, V.A., Dmitrenko, N.V., Mihaylik, T.A. (2007). Vliyanie termicheskogo vozdeystviya na sostoyanie vody v rastitelnykh tkanyakh [The effect of thermal exposure on the state of water in plant tissues]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 29 (7), 212–217 (in Russian).
- Yuzina, A.V., Makarova, N.V. (2009). Napitki na osnove yablochnogo soka [Drinks based on apple juice]. *Izvestiya vuzov. Pischevaya tekhnologiya*, 4, 5–7.
- Mykhailik, V.A., Sniezkin, Yu.F., Korinchevska, T.V., Hornikov, Yu.I. (2015). Vplyv rezhymu konvektyvnoho sushinnia na krystalichnist poroshkiv z yabluk ta tsukrovoho buriaku [Effect of convective drying mode on the crystallinity of apple and sugar beet powders]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 37 (5), 23–37.
- Shapar, R.O., Husarova, O.V. (2019). Vplyv teplovolohoi obrobky na kinetyku sushinnia pektynovmisnykh materialiv [Influence of heat and moisture treatment on the drying kinetics of pectin-containing materials]. *Scientific Works*, 83 (1), 62–66. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1419>.
- Husarova, O., Shapar, R., Sorokova, N. (2020). Intensification of heat and mass transfer during the convective

drying of apple to low final moisture: in monograph Theoretical and practical aspects of the development of the european research area. Riga, Latvia: Publishing House "Baltija Publishing", 191 – 211. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-53-2-52>.

INFLUENCE OF STEAM TREATMENT OF APPLES ON SPECIFIC HEAT OF DEHYDRATION

Husarova O.V., Mykhailik V.A., Shapar R.O.

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

The process of removing water from apples was studied by TG and DTA methods for more reasonable identification of possibilities of intensification of drying and deeper understanding of the processes that occur during dehydration of apples.

Fresh and steamed samples of parenchymal tissues of apples of Renet Simirenko and Jonathan varieties were used as objects of the study. The study was performed in a Q-1000 derivatograph in the range of 25...250 °C at a heating rate of 3.6 K/min. Apples dehydration was carried out by the method of convective drying to a residual moisture content of 6%.

The temperatures of the maximum rate of dehydration, the transition of parenchymal tissues to a state due to the content of exclusively bound water, and temperature intervals of thermal decomposition of organic matter were determined.

In the paper it is noted that the course of the dehydration process under controlled heating depends on the state of the water. The average rate of water removal from steam treated fabrics in Renet Simirenko apples is 14% higher than in fresh ones.

First for apples Reinette Simirenko shown that couple treated samples due to the destruction of cell membranes redistribution of free and bound water, some bound water moved in the free, as evidenced by the average values of the specific heat of dehydration that for fresh apples Reinette Simirenko in the temperature range of 25...181 °C is defined at the level of 2630, and for steam treated in the temperature range of 25...183 °C - 2500 kJ/kg. Steamed apples of both types of bound water are ~ 3% less than fresh ones.

Studies confirm the feasibility of heat and moisture treatment of parenchymal tissues of raw materials before drying in order to intensify dehydration and reduce energy costs. The obtained results can be used when choosing the mode of preliminary heat and moisture treatment of apples and in thermal calculations of the dehydration process.

Keywords: derivatography, drying, apples, steam treatment, average specific heat of dehydration, free and bound water.

Список використаної літератури

1. Скурихина, И. М., Волгарева, М. Н. Химический состав пищевых продуктов: справ. таблицы. Кн. 2. Москва: Агропромиздат, 1987. 360 с.
2. Коробка, С.В. Обґрунтування параметрів та режимів роботи геліосушарки фруктів: дис....канд. техн. наук: 05.05.11. Львів: Львівський національний аграрний університет, 2016. 295 с.
3. Mikhaïlik, V. A., Dmitrenko, N. V., Snezhkin, Yu. F. Investigation of the Influence of Hydration on the Heat of Evaporation of Water From Sucrose Solutions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019. Vol. 92, No 4. pp. 916–922.
4. Михайлик, В.А., Снежкин, Ю.Ф., Белинский, В.Т. Применение дериватографа для исследования влияния предварительной термической обработки на кинетику сушки растительного сырья. Проблемы промышленной теплотехники: сборник тезисов докладов IV Международной конференции. Киев, 2005. С. 26-30.
5. Рубанка, К. В., Терлецька, В. А., Зінченко, І. М. Дослідження зміни форм зв'язку вологи під час сушіння екстракту чаю зеленого. *Хранение и переработка зерна*. 2013. № 11 (176). С. 46 – 48.
6. Wesołowski, M., Koniecznyński, P., Ulewicz, B. Influence of the elemental composition of medicinal fruits on the results of their thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2000. № 60, pp. 299–304. <https://doi.org/10.1023/A:1010142517579>.
7. Дериватограф системы Паулик Ф., Паулик Й., Эрдеи Л. Теоретические основы. Венгерский оптический завод. Будапешт, 1974. 146 с.
8. Гусарова, О.В., Михайлик, В.А. Дериватографічний аналіз форм зв'язку води в яблуках. Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: збірник тез доповідей XVI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. (Київ, 22 – 23 квітня 2019). Київ, 2019.

- С. 14 – 16.
9. Mikhailik, V. A., Dmitrenko, N. V., Snezhkin, Yu. 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. 45 – 50.
 10. Михайлик, В.А., Дмитренко, Н.В., Михайлик, Т.А. Влияние термического воздействия на состояние воды в растительных тканях. *Промышленная теплотехника*, 2007. Т. 29, № 7. С. 212 – 217.
 11. Юзина, А.В., Макарова, Н.В. Напитки на основе яблочного сока. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2009. № 4. С. 5 – 7.
 12. Михайлик, В.А., Снежкін, Ю.Ф., Корінчевська, Т.В., Горніков, Ю.І. Вплив режиму конвективного сушіння на кристалічність порошків з яблук та цукрового буряку. *Промышленная теплотехника*. 2015. Т. 37, № 5. С. 23 – 37.
 13. Шапар, Р.О., Гусарова, О.В. Вплив тепловологої обробки на кінетику сушіння пектиновмісних матеріалів. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2019. Вип. 83. Т. 1. С. 62 – 66. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1419>.
 14. Husarova, O., Shapar, R., Sorokova, N. Intensification of heat and mass transfer during the convective drying of apple to low final moisture: in monograph Theoretical and practical aspects of the development of the european research area. Riga, Latvia: Publishing House “Baltija Publishing”, 2020. P. 191 – 211. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-53-2-52>.

Отримано в редакцію 21.03.2021
Прийнято до друку 23.06.2021

Received 21.03.2021
Approved 23.06.2021

INTENSIFICATION OF HEAT AND MASS TRANSFER AND DEWATERING OF THERMOLABILE ORGANIC MATERIALS

Liashenko A., Candidate of Engineering Sciences, senior research scientist
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Ukraine has a high level of industry, agriculture and consumption. As a result of underutilization of recovered materials and their products into the environment returns significant amount of waste that contaminate soil, water, air. Dumps occupy large areas, long ground beneath them put out of production, they pollute the environment. The main causes of waste, lack of effective processes and capacities of processing residues, spatial and chronological dissociation processes of waste and their use, lack of sufficient market.

Of all the organic waste in Ukraine is one of the main places belong chicken droppings. Fresh droppings quickly oxidizes the soil, humus and inhibits microorganisms, disrupting its natural ecosystem biological community. With some preparation and processing of chicken manure is a high quality fertilizer that contains chemical elements (N, P, K), macro- and micronutrients, humic acid and other components that are essential for growth and fertility of different plants.

For decontamination litter widely used thermal drying at $t = 600 - 800$ °C. This product is well kept dry, easily transported, but using traditional drying facilities for its handling used large amount of heat.

Today continually created and offered new modern technologies for processing chicken manure.

At the Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine many years conducted investigations on the creation of modern technologies and equipment for processing organic waste.

Analysis of the traditional intensification methods and processes of heat and mass transfer during drying of materials was presented in the paper. The author has proved the promising nature of the method of the combined processes of drying and dispersion using a mechanical rotor to intensify the process of drying of high-moisture thermolabile materials.

Keywords: biomass, energy efficiency, resource conservation, technology, equipment.

Introduction

It is now known that drying is a complex technical and technological process that may depend on a large number of known and unknown factors. These factors need to be known for analysis, calculation and influence on the drying process.

The intensity of the drying process depends (or is determined) by the speed of the drying process. When approaching the equilibrium state usually decreases and tends to zero. There are a number of factors that affect the intensity of the drying process, which indicates the real complexity of the drying process and obtaining a mathematical description for it. This applies separately to production conditions. One of the main factors influencing the drying process is the factors that define the material as the object of the drying process. They always characterize the resistance of the material itself to the transfer of moisture, both inside and from its surface to the environment, as well as the strength of the connection of moisture with the material, the ability of the material to absorb heat supplied to it. These factors include the internal structure of the material, its size, thermophysical properties, the time of change of moisture content of the material during drying, the shape and condition of the outer surface [1]. It is important to find ways to intensify the process of heat and mass transfer in the drying process of various materials in practice.

The following traditional methods of intensification of the drying process in the working volume of technological equipment are known, which are as follows: the possibility of intensification of the heat and mass transfer process at the interface of the phases; development of the working surface of the contact phases; increasing the speed of the coolant; by reducing the linear size of the material; by increasing the value of temperature pressure.

It is possible to use different conditions that allow to create artificial turbulence of the flow, if it is technologically acceptable and possible. When drying materials use the effect of artificial turbulence of the coolant flow. It can be obtained by giving the surface of products of different (rational) waviness and / or roughness. This allows to increase the heat transfer coefficient by 45 – 95 % and increase the heat and mass transfer surface [2].

Known vibration methods of flow turbulence. In some types of dryers, studies have shown that they have intensified the heat transfer process. Heat exchange surfaces during vibration in the liquid increase the heat transfer coefficient by 1.5 - 2 times, while in the air in 1.5 - 4 times [3].

Of great interest from a practical point of view are the vibrations of the materials to be dried, especially those of small size. Such vibration can be carried out mechanically in the layer of fibers during drying of the dispersed

moving material and others. Particles of material that have received an electrostatic charge during dispersion or otherwise can also be subjected to vibration in the coolant stream by applying pulsating electric fields.

Intensification of moisture transfer in the middle of the material during drying is very important. It is an interconnected set of processes. This complex consists of the following processes: violation of the connection of moisture with the material; diffusion of moisture through its elements; movement of moisture through capillaries; transfer of steam and gas phases; excitation and formation of polymolecular films; electrostatic connections of moisture with the material and other processes. As a rule, the smaller the size of the material to be dried, the more intense the processes of internal transfer.

The existence of concentration fields has a significant effect on the transfer of moisture in the material, temperature fields and the direction of heat fluxes. When transferring moisture in the material, the main driving force is the concentration gradient.

Thermodiffusion can interfere with or promote moisture transfer. In this regard, the supply of heat in the direction of moisture movement, which is carried out by contact, is promising. The current is conducted through the material or elements that conduct it in it, as well as the possible use of high-frequency and induction heating.

Numerous studies show that the drying process is significantly accelerated by increasing the temperature of the material from 45 to 95 °C. This is due to changes in the viscosity of moisture in the material and the violation of polymolecular films. Of scientific interest are data on the influence of acoustic oscillations of the coolant flow on the process of moisture transfer in the material. This is due to the pulsation of pressure on the surface of the material, which helps to remove moisture from it.

We know from theory that the drying process begins with the formation of a pressure difference above the surface of the material and in the surrounding environment at a temperature difference that provides heat supply, which leads to a change in the physical state of moisture.

A wet body is heated by the supply of heat, and its temperature increases to a value called the temperature of the wet bulb thermometer. Its value depends primarily on the temperature and partial vapor pressure in the surrounding environment. For some time, this temperature remains constant as long as evaporation occurs from the surface of the body, and is not limited by the intensity of the supply of moisture from the deep layers. The rate of moisture removal from the material depends only on the conditions of heat supply to it and the removal of vapors from its surface. During this period, the drying rate is determined only by the rate of heat supply to the material and at a stable mode is constant.

The supply of heat from the deep layers of the material to its surface during this period does not affect the drying process. The period in which the constant temperature of the material and the rate of moisture removal is called - the first period.

Since the speed of the drying process increases while maintaining a safe temperature of the material, in terms of its quality, it is safe to intensify any drying process by supplying heat.

As moisture is removed from the surface layers of the material, the drying process begins to be limited by reducing the rate of moisture supply from the deep layers to the evaporation surface. In the first stage, the evaporation process continues from the surface of the material with a gradual decrease in process speed and increase in material temperature.

In the second stage, the intensity of the movement of moisture decreases, the evaporation zone moves from the surface to the depth of the material with a sharp increase in temperature on its surface. The second period of drying comes. There is a more intense increase in the temperature of the surface layers of the material. Moisture removal is significantly reduced, and most importantly, there is over dried surface layers of material with high temperature. Violation of the connection of moisture with the material and its transfer and determine the speed of this drying period. To speed up the drying process, they must be intensified.

To overcome the thermal and diffusion resistance of materials, there are a number of ways to intensify the drying process in the second period. Here are some examples: drying with high frequency currents, creating an oscillating drying mode and drying with pressure relief.

The above methods of intensification can be partially implemented in the chambers of compatible processes. Under which is understood the complex thermal, mechanical, aerodynamic impact on the material, which leads to a decrease in internal and external resistance to the processes of mass and energy transfer, the amount of motion, while also increasing its integral characteristics. Integral characteristics of the process are the values of volumetric moisture and heat stress.

In practice, the chambers of compatible processes are narrowly specialized designs. Their choice is dictated by the physical, mechanical and structural features of the materials being processed.

Chambers of compatible processes can be classified and divided into the following groups according to the method of their implementation:

- drying and grinding;
- mechanical dehydration and drying;
- drying and granulation (suspensions, melts, solutions, powders);
- heat treatment and drying;
- drying with simultaneous chemical reactions;

- drying with capture and formation of capsules.

As an example, we will give multifunctional devices with a controlled system of hydrodynamics, which are called devices with counter-rounded flows. They are designed for drying and simultaneous dust collection, heat treatment and drying, granulation and dehydration. Of practical interest is also the possibility of the following processes of chemical technology: desorption, conditioning, absorption.

When processing high-moisture thermolabile materials (chicken manure, various organic sludges, sludges after fermentation processes, etc.) it is most expedient to use a mechanical rotor located along the axis of the chamber when implementing the active hydrodynamic mode in the apparatus. This design of the device leads to the creation of a suspended layer of material, twisting of the gas flow of the coolant, reducing the adhesion of the material to the inner surfaces of the chamber, the constant renewal of the heat and mass transfer surface of the material.

From the analysis of the review of recent publications and studies, it follows that these installations are promising for intensifying the process of heat and mass transfer when drying thermolabile pasty materials. Atritor, Niro Atomizer and others are engaged in the production of such installations. The cost of their equipment for domestic enterprises is quite high. Unresolved issues are related to the organization of a stable operating mode when obtaining the final product in the form of granules, the absence of methods for calculating apparatus in publications [4].

Due to the strong adhesion properties of raw materials, at the initial section in the chamber of the combined processes, the walls can stick, which entails an increase in energy consumption for the rotor drive. Due to the insufficient efficiency of the dry-type dust collecting devices in combined process installations, the loss of finely dispersed dusty material with entrainment is possible, which is an extremely undesirable phenomenon. These technological difficulties are tied to the nature of the materials to be processed. Each of them requires an individual approach and study.

Discussions of investigation

The area of experimental research that is of practical interest to the author is marked in gray in Fig. 1. This area is in the range from 1 mm to 3 mm. It can be characterized by a high specific value of the contact surface of the solid and gaseous phases f . The consumption of thermal energy per 1 kg of evaporated moisture is minimized. The consumption of electrical energy to create active aerodynamic motion in the chamber is also characterized by a small value. From the point of view of practice, the work in this interval is of interest in the organization of the removal of the solid phase from the chamber of compatible processes.

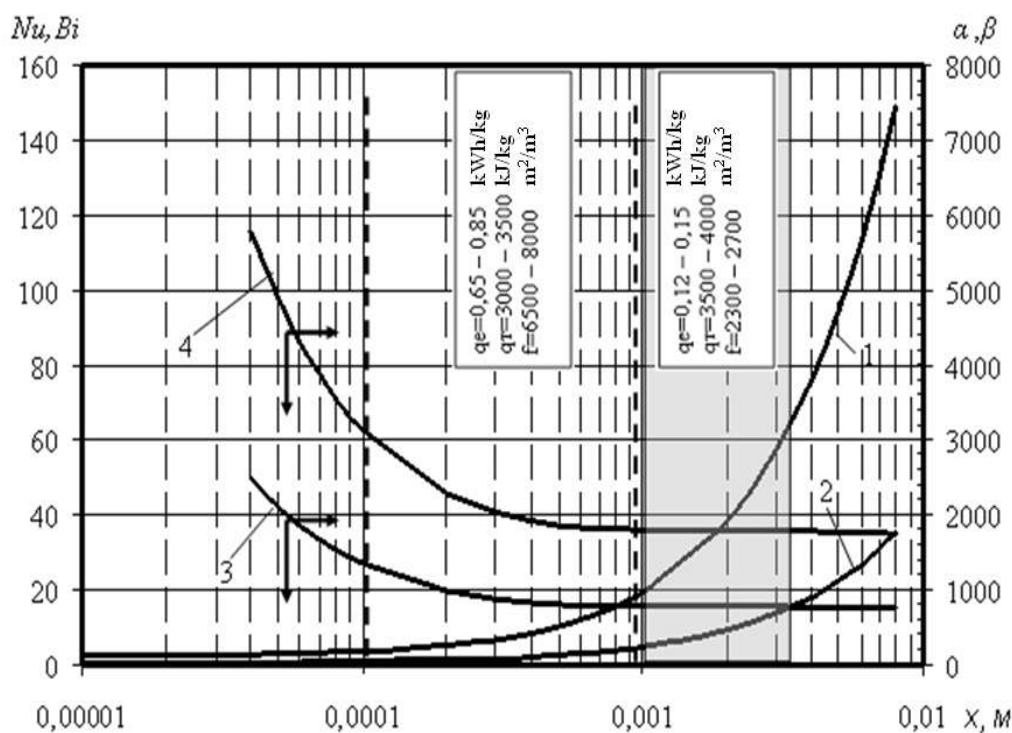
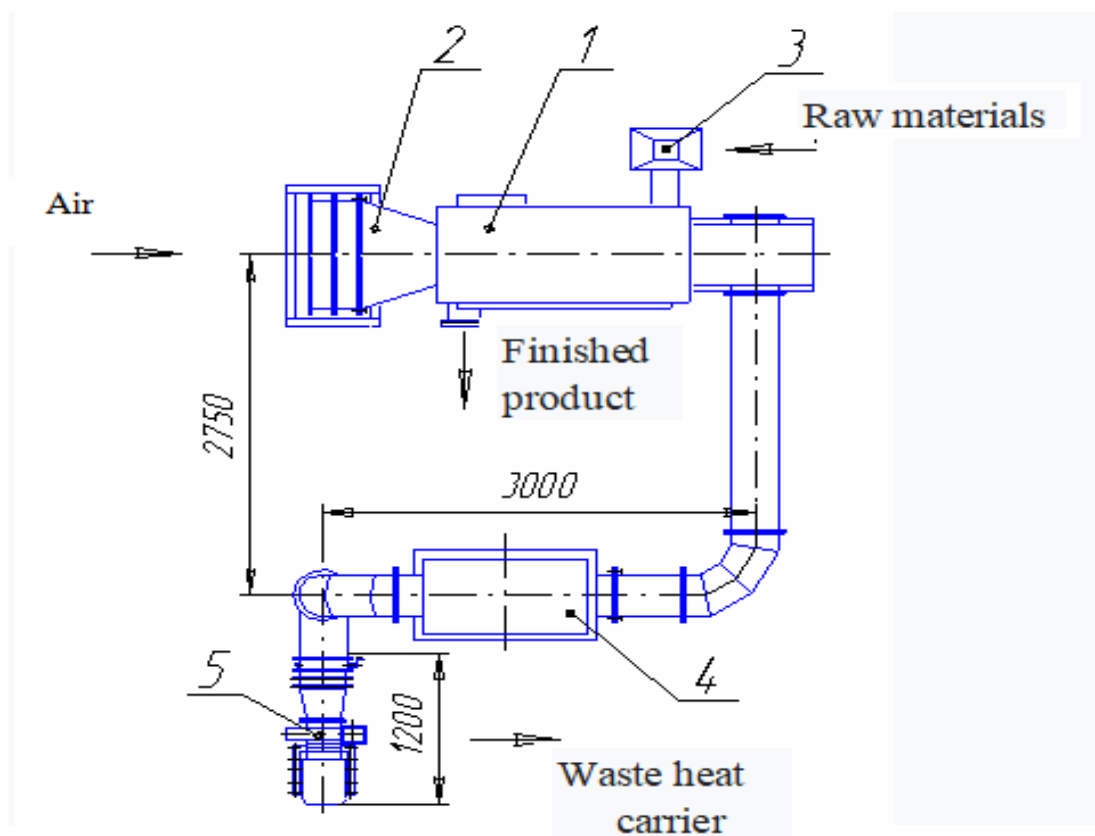


Fig. 1 – Influence of sizes of parts of material on size of criterion characteristics: 1 – Nusselt; 2 – Bio; 3 – heat transfer coefficient α , $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; 4 – mass transfer coefficient β , $kg/(m^2 \cdot hr \cdot atm)$



1 – Chamber for combined grinding and drying (working chamber); 2 – Heat generator; 3 – Feeder; 4 – Dust separating device; 5 – Fan

Fig. 2 – The scheme of the installation for the combined process of drying and dispersion of thermolabile pasty materials

The ITTF NAN of Ukraine has been conducting research on combined grinding and drying processes for a long time, as well as developing installations for heat treatment of finely dispersed labile materials [5, 6].

Research was carried out on drying and grinding green vegetation, clay, flesh, potatoes, bone meal, mucose, etc. Research showed the promise of using the drying method, the possibility of improving structures for various materials, and continuing research on the process of heat and mass transfer in them.

In recent years, a new design of the installation has been created at the ITTF NAN of Ukraine. In it, the disadvantages described above are largely eliminated or reduced.

The developed design provides the following operations: dosed feed of raw materials into the chamber of combined processes, joint grinding and drying of raw materials, implementation, if necessary, of an operating mode to obtain a dry product in granular form at the outlet of the installation.

The working chamber is a rotary device, which is a crusher-granulator of impact action, where the material is simultaneously subjected to mechanical and thermal effects. The design feature consists in dividing the working chamber of the installation along its length into zones and installing special mixing elements on the rotor (Fig. 2).

The installation allows you to process raw materials with almost any moisture content and obtain powders, both high dispersion and granules. In this case, the development of a large surface of heat and mass transfer occurs due to constant grinding and renewal of the heat and mass transfer surface. Overheating of the processed material is excluded. Loss of valuable nutrients is minimized. A short processing time leads to a decrease in the adhesive properties of the material (sticking). Full use of the temperature potential of the gas coolant in a small volume is ensured.

The installation (fig. 3) was tested on waste from a livestock farm. Raw material productivity reached 350 – 400 kg / h with a final moisture content of 12 – 14 %. The results obtained indicate the high efficiency of the installation. In separate specially set experiments, a stable operating mode was organized at the installation with the production of granules at the outlet. It is possible to obtain granules with a diameter of up to 6 mm.

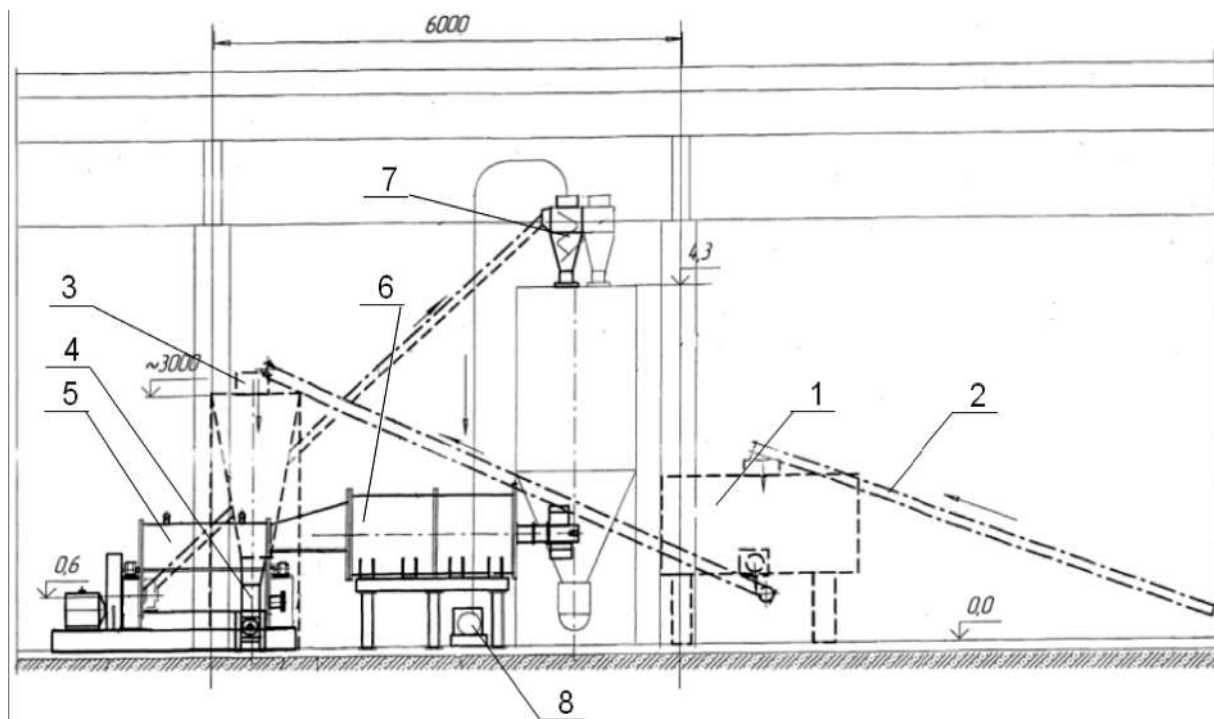


Fig. 3 – General view of the production of organic-mineral fertilizers based on chicken manure using the installation of compatible processes

The main components of the technological scheme (Fig. 3) are: 1 – auxiliary capacity; 2 – conveyor scraper RP - 500Sh - 40M; 3 – drive; 4 – feeder (ITTF equipment); 5 - dryer of compatible processes (ITTF equipment); 6 – heat generator (ITTF equipment); 7 – group of cyclones; 8 – fan.

The introduction of the installation of compatible drying and grinding processes in the production plant of complex organic-mineral fertilizers at EKOTERRA LLC allowed to organize industrial continuous production with a capacity of 2300 t / year of finished fertilizers, reducing energy costs for drying a unit of production by 20-30%, reducing capital costs. construction and lease of premises for production.

With relatively low costs for optimization of production, the payback period of the developed installation is 1.5 – 2 years.

Conclusions

Compared to the existing technology of drying chicken manure, when the process takes place in a drum dryer, it was possible to reduce the dimensions of the dryer by 2-3 times with the same productivity, which saved capital costs for plant design and shop construction.

This technology allowed to organize a smooth production process with maximum intensification of the drying process and automation of technological processes with the minimum possible manual labor. The initial temperature of the coolant was 600 - 800°C. The calculation of specific energy consumption when drying per unit of production showed that the average heat consumption was 3500 kJ / kg of evaporated moisture, which is on average 20 - 30% lower than that of drum dryers.

References

1. Lykov, A. V. (1968). *Teoriya sushki [Drying theory]*. Moscow: «Gos·energoizdat» (in Russian).
2. Kremnev, O. A., Borovskiy, V. R., Dolinskiy, A. A. (1963). *Skorostnaya sushka [High-speed drying]*. Kyiv: «Gostekhzdat USSR» (in Russian).
3. Sazhin B. S. (1984). *Osnovy tekhniki sushki [Basics of drying techniques]*. Moscow: «Khimiya» (in Russian).
4. Yermolenko V. O. (2002). *Biologichno aktivni dobrovya [Biologically active fertilizers]*. Kyiv: NVTs ST «Vybir» (in Ukrainian).
5. Lyashenko A. V., Protsyshin B. N., Gordiyenko P. V., Fishchuk N. U. (2008). Intensifikatsiya protsessu teplomasso-obmena pri sushke termolabil'nykh pastoobraznykh materialov [Intensification of the heat and mass transfer process during drying of thermolabile paste-like materials]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 1. 46 – 49 (in Russian).
6. Lyashenko A. V. (2015). Analiz sposobiv intensyfikatsiyi teplomassoobminu v protsesi sushinnya ta osoblyvosti znevodnennya termolabil'nykh orhanichnykh materialiv [Analysis of methods of intensification of heat and mass transfer in the drying process and features of dehydration of thermolabile organic materials]. *Tekhnologicheskyy audit i rezervy proizvodstva*. 4/4 (24). 16 – 19 (in Ukrainian).

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЗНЕВОДНЕННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ ОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Ляшенко А. В., канд. техн. наук, с. н. с.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

Україна має високий рівень розвитку промисловості, сільського господарства та споживання. Внаслідок неповного використання видобутих речовин та продуктів їх переробки в природне середовище повертається значна кількість відходів, які забруднюють ґрунти, водні об'єкти, повітря. Звалища займають великі площі, надовго земля під ними виведена з виробництва, вони забруднюють природне середовище. Основні причини утворення відходів: недолік ефективних технологічних процесів та потужностей переробки залишкових продуктів, просторова та хронологічна розірваність процесів утворення відходів та їх використання, відсутність достатнього ринку збуту.

З усіх видів органічних відходів в Україні одне з головних місць належить курячому посліду. Свіжий послід дуже небезпечна речовина, що окислює ґрунт, негативно впливає на мікроорганізми та біогумус порушує екосистеми. Необхідна певна підготовка або високотехнологічна переробка свіжого курячого посліду, як нативного так і з підстилкою. Після якісної обробки курячий послід представляє собою високоякісне добриво, з високим вмістом хімічних елементів (N, P, K), з макро- та мікроелементами та іншими компонентами, що необхідні для збільшення родючості різних рослин. Дає можливість зменшення внесення хімічних добрив.

Для знезараження посліду широко застосовують термічну сушку при $t = 600 - 800$ °C. Такий сухий продукт добре зберігається, легко транспортується, але при використанні традиційних сушильних комплексів на його обробку витрачається велика кількість теплової енергії.

На сьогодні постійно створюються та пропонуються нові сучасні технології переробки курячого посліду.

В ІТТФ НАН України також багато років проводяться дослідження зі створення сучасних технологій та обладнання по переробці органічних відходів.

В статті представлений аналіз традиційних способів інтенсифікації процесів тепломасообміну при сушінні матеріалів. Автором показана практична реалізація та перспективність установок, що використовують спосіб сумісного сушіння та диспергування в одному об'ємі за допомоги механічного ротору при інтенсифікації процесу сушки високовологих термолабільних матеріалів.

Ключові слова: біомаса, енергоефективність, ресурсозбереження, технологія, обладнання.

Список використаної літератури

1. Лыков А. В. *Теория сушки*. М.: «Госэнергоиздат», 1968. 472 с.
2. Кремнев О. А., Боровский В. Р., Долинский А. А.. *Скоростная сушка*. К.: «Гостехиздат УССР», 1963. 382 с.
3. Сажин Б. С. *Основы техники сушки*. М.: «Химия», 1984. 320 с.
4. Єрмоленко В. О. *Біологічно активні добрива*. К.: НВЦ СТ «Вибір», 2002. 151 с.
5. Ляшенко А. В., Процышин Б. Н., Гордиенко П. В., Фишук Н. У. Интенсификация процесса тепломассообмена при сушке термолабильных пастообразных материалов. *Промышленная теплотехника*. 2008. №1. С. 46 – 49.
6. Ляшенко А. В. Аналіз способів інтенсифікації тепломасообміну в процесі сушіння та особливості зневоднення термолабільних органічних матеріалів *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 4/4 (24). С. 16 – 19.

Отримано в редакцію 21.03.2021

Прийнято до друку 23.06.2021

Received 21.03.2021

Approved 23.06.2021

КОМПЛЕКСНА ПЕРЕРОБКА СИРОВИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ АДРЕСНОЇ ДОСТАВКИ ЕНЕРГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ПЕКТИНІВ

Яровий І.І., канд. техн. наук, доцент, Алі В.П., аспірантка
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

Розглянуто можливості використання технологій адресної доставки енергії (АДЕ) в процесах комплексної переробки сировини рослинного походження на прикладі комплексу технологічних процесів характерних для виготовлення пектину. Показано актуальність процесів отримання пектинових речовин для сучасної промисловості та перспективні напрямки використання пектину. Наведено приклади реалізації технологій виготовлення пектину вітчизняними та зарубіжними виробниками, та приведено наближену оцінку вартості і складності пектинового виробництва.

Як варіант удосконалення та здешевлення технології виготовлення пектину запропоновано використання технологій АДЕ для основних технологічних операцій пектинового виробництва: сушіння пектиновмісної сировини, екстрагування пектиновмісних речовин, випарювання пектиновмісного екстракту. Для процесу сушіння пектиновмісної сировини приведено результати експериментального дослідження кінетики процесу вологовидалення з оболонок цитрусових плодів, при використанні комбінованого способу сушіння – мікрохвильового енергопідведення та фільтраційного відведення вологи. Запропоновано обґрунтування для використання такої комбінації технологій сушіння та вплив механодифузійного ефекту на кінцеву продуктивність вологовидалення зазначеним комбінованим способом сушіння. Описано загальну конструкцію стрічкової, модульної сушильної установки з комбінованим способом сушіння сипкої рослинної сировини.

Надано оцінку результатів отриманих при дослідженні кінетики процесу сушіння пектиновмісної сировини та загального потенціалу технології АДЕ для процесів швидкісного низькотемпературного сушіння термолабільних матеріалів. Запропоновано шлях для впровадження технологій АДЕ на інших технологічних ділянках виготовлення пектину. Зокрема приведено посилання на інноваційні процеси екстрагування в середовищі електромагнітного поля надвисокої частоти та узагальнено потенціальні переваги та недоліки використання аналогічних технологій у виробництві пектину. Запропоновано використання технології випарювання розчинів у вакуумних випарних апаратах з використанням мікрохвильового енергопідведення для аналогічної технологічної операції при виготовленні пектину.

Ключові слова: пектин, мікрохвилі, електромагнітне поле, екстрагування, випарювання.

Вступ. Виробництво пектину в світовій харчовій індустрії займає далеко не останнє місце і системно зростає. Гелеутворююча здатність пектину робить його постійним компонентом (харчова добавка Е-440) таких харчових продуктів як йогурти, майонез, соуси, кондитерських виробів - желе, мармеладу, цукерок, морозива, зефіру. Важливою областю використання пектину є косметологія та фармацевтика. Відомо про цінність пектину як харчової добавки, що позитивно впливає на кровообіг та систему травлення людського організму, покращує виведення з організму токсинів та важких металів.

Одним з нових напрямів широкого використання пектину може стати виготовлення упаковки здатної біологічно розкладатись в зовнішньому середовищі. Технології створення заміників пластикових плівок на основі пектину – є актуальною темою робіт науковців [1].

Актуальність. Попри високу перспективність пектину як компоненту багатьох продуктів, в світі його виробляється небагато, за деякими оцінками фахівців, це менше 50 тис. тон яблучного та цитрусового пектину на рік [1]. Виробництво пектину зосереджено на промислових потужностях всього семи компаній, серед них: CP Kelco, Cargill, DuPont, H&Fox та декількох менших. У 2019 році до переліку виробників пектину ввійшла українська компанія Т.В.Fruit, ТМ «Galicia», яка стала третім в світі виробником яблучного пектину. Потужність введеного в дію виробництва – 3000 тон на рік. Величина інвестованого у виробництво пектину капіталу становить біля €22 млн. для однієї лінії продуктивністю до 150 т./міс.

Висока вартість існуючих технологій виготовлення пектинових речовин є одним з факторів, що обмежує зростання даного ринку, іншим фактором є складність існуючих технологій виготовлення пектину, їх небезпечність (на окремих етапах використовується спирт) та закритість «клубу виробників».

Технологія виробництва пектину може включати до п'ятнадцяти [2] етапів, кожен з яких сам по собі є достатньо складним технологічним процесом.

В типовому варіанті технологія включає: підготовку пектиновмісної сировини; екстрагування пектину з сировини кислотою; фільтрування екстракту, його освітлення та концентрування; осадження з екстракту пектинових речовин спиртами; очистка та сушіння осадженого пектину.

Мета досліджень. Як будь яка складна технологія, виробництво пектину, має містити можливості для її спрощення та удосконалення. Однією з таких можливостей може стати використання інших за принципом діючих впливів на окремих стадіях технологічного процесу. В цьому сенсі технології адресної доставки енергії (АДЕ) можуть бути саме тим фактором, що надасть виробництву пектину достатньо енергії для наступного витку розвитку та удосконалення.

Висока вартість існуючих технологій вимагатиме наявності значних технологічних та/або енергетичних переваг, у альтернатив, що пропонуються на заміну. Розробка та впровадження альтернативної технології виготовлення пектиновмісних речовин вже доступна як компіляція існуючих та частково апробованих інноваційних процесів обробки та перетворення харчових компонентів та їх систем?

Складові елементи таких процесів вже розроблені, тестуються та впроваджуються в інших сферах харчової промисловості. Можливо розробка нової альтернативної технології виготовлення пектиновмісних речовин вже доступна як компіляція існуючих та частково апробованих інноваційних процесів обробки та перетворення харчових компонентів та їх систем?

Колектив науковців кафедри ПОтаЕМ ОНАХТ достатньо довго та успішно працює над технологіями електромагнітного впливу на харчові системи. Ідеологом та науковим керівником даного напрямку досліджень є завідувач кафедри, д.т.н., професор Бурдо О.Г.. Саме його ідеї та наукові передбачення дозволили науковому колективу сформувати «портфоліо» інноваційних технологій використання електромагнітного впливу на типові процеси харчових технологій. Варіативність використання таких технологій досить висока, тому більшість з них об'єднані в групу технологій «адресної доставки енергії» (АДЕ), куди входять технології мікрохвильового енергопідведення, сушіння, знезараження, інтенсифікації, екстрагування, випарювання та комбіновані впливи. Більшість з цих технологій описані та вивчені достатньо повно і готові до впровадження. Саме задачі впровадження технологій АДЕ складають основний комплекс наукових завдань науковців кафедри.

З точки зору використання технологій АДЕ, технологічний процес виробництва пектину має чималий потенціал впровадження. Однією з ділянок де перспективно можливе використання є підготовка пектиновмісної сировини. Особливістю етапу підготовки є необхідність невідкладного та швидкого зневоднення пектиновмісної сировини після її вилучення з технологічного процесу. Швидкість процесу висушування відіграє важливу роль через ті обставини, що якість пектиновмісної сировини критично зменшується вже через декілька годин після її зберігання у вологому вигляді.

В типовому варіанті технологічного процесу використовується конвективні сушіння пектиновмісної сировини, що є значно тривалішим ніж сушіння з використанням АДЕ. В разі використання процесу зневоднення в середовищі мікрохвильового електромагнітного поля, можна високопродуктивно та швидко законсервувати сировину з мінімальною втратою якості.

Результати досліджень. В роботі розглянуто можливість використання технології сушіння оболонки (шкірки) цитрусових комбінованим способом (поєднання мікрохвильового та фільтраційного способів сушіння), отримано результуючі залежності кінетики такого процесу та запропоновано конструкцію сушильного модуля установки з комбінованим способом сушіння. Приклад можливого варіанту такої технологічної лінії приведено на рис. 1. Додаткова функціональність запропонованої конструкції стрічкової мікрохвильової сушарки забезпечується системою фільтраційного сушіння, принцип дії якої полягає в створенні на виході кожної зони мікрохвильового нагріву, ділянки з інтенсивним потоком атмосферного повітря.

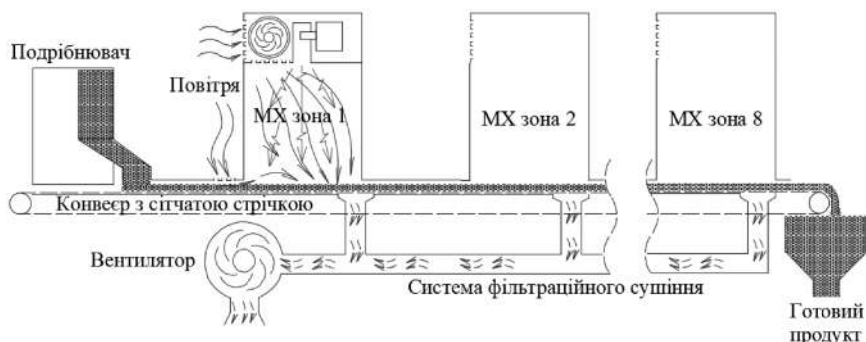


Рис. 1 – Варіант конструкції стрічкової МХ сушарки з комбінованим способом сушіння

При проходженні через таку зону, вологу викинуту на поверхню частинок сировини, внаслідок утворення механодифузійного потоку [3], буде механічно «здуто» з поверхні частинок без її повного випаровування. Експериментальні дослідження режиму механодифузійного видалення вологи підтвердили його ефективність для окремих видів рослинної сировини та дозволили встановити умови виникнення та утримання такого режиму.

Обмеженням для продуктивності та сталості процесу вологовидалення в апараті з комбінованим способом сушіння, може виступати структура поверхні частинок матеріалу. Як показали дослідження високопро-

дуктивне вилучення вологи простіше організувати для сипучих матеріалів з відносно гладкою поверхнею, з розміром частинок в межах 5-10 мм та відносною вологістю від 20 %. Вплив цих факторів можна пояснити наступним: на поверхні частинок матеріалу з гладкою текстурою поверхні (наприклад, бобів гороху) витіснена механодифузійним потоком волога збиратиметься каплями і значно легше зриватиметься з поверхні потоком повітря на ділянці фільтраційного сушіння, одночасно для шару мілкозернистого матеріалу складно створити умови для продування шару з швидкостями потоку повітря в межах 6-8 м/с, що необхідно для продуктивного фільтраційного вологовидалення, а при недостатній початковій вологості матеріалу ініціювання механодифузійного потоку буде ускладнене як швидкоплинністю процесу так і небезпекою перегріву матеріалу.

Необхідною для виникнення явища механодифузії є наявність розвинутої капілярно-пористої структури матеріалу. Саме при таких умовах, в середовищі високочастотного електромагнітного поля, при достатньому енергетичному впливі (потужності МХ випромінювання), внаслідок об'ємного нагрівання вологи в капілярах частинки матеріалу або в заповнених вологою порах, виникають пухирці пари, надлишковий тиск в яких і є рушійною силою для створення потоків невиспареної вологи в тих самих капілярах та порах. Напрямок такого потоку визначається градієнтами тиску, температури та вологості в розрізі шарів частинок вологого матеріалу.

Особливістю мікрохвильового нагрівання є його об'ємність, яка і забезпечує формування названих градієнтів в напрямку від вологого центру кожної з частинок до більш сухої поверхні. Рушійна сила процесу вологовидалення буде визначатись сумарним впливом всіх градієнтів, які не є сталими, і змінюються в ході процесу. Так із зменшенням кількості вологи, при постійній величині енергопідведення буде змінюватись співвідношення потужності МХ поля та кількості вологи в частинках, тобто величина енергетичного впливу на процес буде зростати із зменшенням вологи в матеріалі, а так як процес вологовидалення досить швидкий (десятки хвилин), то сталий енергетичний вплив може легко перевищити допустимі межі, що приведе до перегріву і втрати матеріалом частини властивостей.

Таку особливість можна легко врахувати при використанні модульної стрічкової сушильної установки, на зразок зображеної на рис. 1. При такій конструкції сумарний енергетичний вплив на матеріал буде визначатись пропорційним впливом кожного з сушильних модулів, що за умови програмного керування їх потужністю дозволить модулювати вплив у відповідності до бажаного режиму сушіння.

В найпростішому варіанті, перші модулі мають забезпечити розігрів вологи в матеріалі достатній для ініціювання ефекту механодифузії, тому їх установлена потужність має бути високою, це 1 – 3 модулі, без функції фільтраційного вологовидалення, так як поява вільної вологи на поверхні частинок на даному етапі маловірогідна. Модулі основного процесу, що забезпечують вологовидалення в режимі механодифузії, мають забезпечити достатнє енергопідведення для підтримки механодифузійного режиму, величина установленної потужності для них менша, наявність фільтраційного блоку обов'язкова а кількість таких модулів залежатиме від початкової та кінцевої вологості матеріалу яку бажано отримати при одноразовому проходженні потоку. Модулі ділянки досушування можуть мати встановлену потужність в межах 70-50% від модулів основного процесу, їх кількість залежатиме в першу чергу від необхідності використання режиму «м'якого» сушіння, коли досушування проходитиме при невеликій інтенсивності МХ нагрівання, наявність у модулів досушування фільтраційного блоку також необов'язкова але бажана для уникнення ефекту абсорбування витиснутої вологи самою поверхнею частинки під час транспортування потоку матеріалу між сусідніми модулями.

Приклад залежності кінетики вологовидалення від параметрів комбінованого способу сушіння приведено на рис. 2.

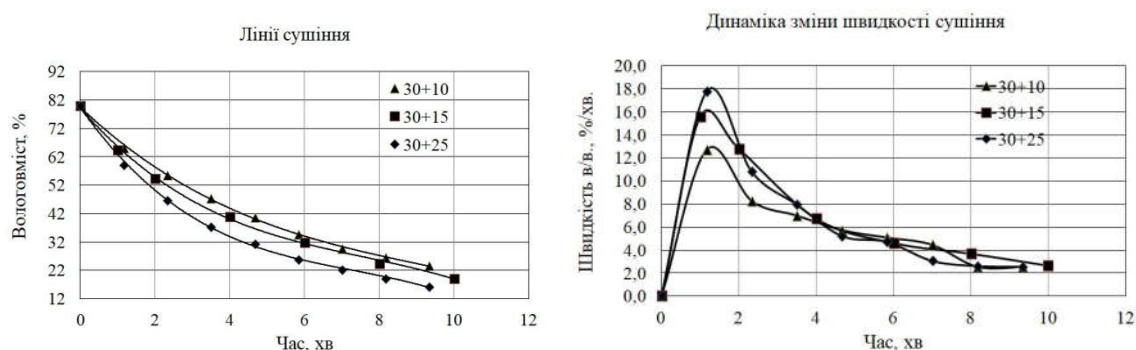


Рис. 2 – Залежність кінетики процесу видалення вологи з шкірок цитрусових від тривалості фази фільтраційного сушіння. Легенда, (30+n): 30-тривалість МХ нагріву, n-тривалість «продувки», с

Отримані результати демонструють високий потенціал комбінованого способу сушіння, зменшення вологості тестового зразка з початкових 80 % вологості до кінцевих 20 % відбулось внаслідок всього восьми

циклів обробки. Кожен цикл включав 30 секунд обробки (об'ємного нагрівання) в мікрохвильовому полі та від 10 до 25 секунд продування матеріалу в режимі «фільтраційного сушіння».

Встановлено, що тривалість «продувки» шару матеріалу після його нагрівання в МХ полі має суттєвий вплив на кількість видаленої вологи лише в перших циклах обробки, коли матеріал має значний резерв вологи, яка інтенсивно виводиться на поверхню частинок. В другій половині процесу тривалість «продувки» мало впливає на кінетику вологовидалення. Слід зазначити, що особливістю досліджуваного матеріалу (оболонки цитрусових) є значний вміст легколетучих речовин (ефірних олій), очевидно саме ці речовини забезпечують високі швидкості вологовидалення (12-18 %/хв.) в першій третині процесу. У попередніх дослідженнях, проведених на інших рослинних матеріалах, типовими швидкостями вологовидалення були 4-10 %/хв., що також є високим показником. Значна різниця в швидкостях вологовидалення пояснюється як особливостями самих досліджуваних матеріалів, зокрема розвинутості їх капілярно-пористої структури та резервом вологи, так і відповідністю обраного режиму комбінованого впливу на вологу в матеріалі. Складність моделювання такого впливу (як при математичному так і при фізичному моделюванні процесу) пояснюється великою кількістю чинників, що впливають як на процес видалення вологи так і на сталість та повноту досягнутого рівня механодифузійного режиму вологовидалення. Проте навіть неповна оцінка потенціалу даного методу, дозволяє припустити, що промислова сушильна установка з комбінованим способом вологовидалення може мати надвисокі показники як по продуктивності так і по швидкості процесу. Можна припустити, що для поточного рівня розвитку прикладних технологій МХ нагрівання, дослідний зразок сушильної установки з комбінованим способом сушіння, для оболонок цитрусових плодів, може мати до 10 сушильних модулів з потужністю встановлених генераторів 3-5 кВт в кожному модулі, блоком фільтраційного сушіння для 7-8 модулів основного циклу та етапу досушування і продуктивністю в декілька десятків кілограм на годину, яка залежатиме від характеристик сировини. Продуктивність процесу у промисловому варіанті можна легко нарощувати як паралелізацією потоків так і збільшенням швидкості потоку матеріалу при умові збільшення кількості сушильних модулів в кожному з потоків. Складність керування процесом можливо компенсувати використанням засобів програмного керування та регулювання параметрів роботи кожного з сушильних модулів а також використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій для організації робочого місця оператора. Для отримання всіх переваг комбінованого способу сушіння необхідно дослідити кінетику процесу вологовидалення для різних типів вологих матеріалів та розробити технологічні карти режимів сушіння для різних цільових процесів, що внаслідок високої складності математичного опису процесу вологовидалення при комбінованому впливі можливо лише в ході експериментального дослідження.

Сушильні апарати з комбінованим способом сушіння є одним з найбільш перспективних напрямів розвитку сушильних технологій. Основними перевагами запропонованого комбінованого способу сушіння та конструкції стрічкової модульної сушильної установки є: висока швидкість вологовидалення, низькі температури процесу (що є важливим для термолабільної рослинної сировини), керованість процесу, екологічна чистота та потенційно-висока енергетична ефективність процесу. Всі ці переваги обумовлені використанням мікрохвильового нагріву в якості системи енергопідведення. Щодо недоліків, можна передбачити відносно високу складність технічного оснащення сушильних МХ установок, та деякі обмеження в системі мікрохвильових генераторів. Промислові зразки магнетронів, що використовуються в якості МХ генераторів, на сьогодні мають обмежений ресурс і потужність в межах 1-5 кВт, а для отримання суттєвої для промислового використання потужності електромагнітного поля їх доведеться використовувати у вигляді груп, що також збільшуватиме конструктивну складність промислової сушильної МХ установки. Мікрохвильові генератори високої потужності (10 – 100 кВт) є складними для використання в переробній галузі та високовартісними рішеннями.

Перспективні напрями дослідження. Ще одним етапом технологічного процесу виробництва пектину, перспективним для впровадження технологій АДЕ, є процес екстракції пектину спиртом. Процес екстрагування розчинних та слабо розчинних речовин в середовищі електромагнітного поля досліджувався науковцями кафедри в багатьох комбінаціях, зокрема спосіб екстрагування в середовищі МХ поля [4], може бути використаний для технології виробництва пектину.

Особливістю технологій АДЕ, при їх використанні для інтенсифікації процесу екстрагування, є можливість використання механодифузійного режиму для інтенсивного видалення екстракційних речовин, що дозволяє в декілька разів (в окремих випадках – в десятки разів) збільшити швидкість процесу екстрагування та повноту вилучення цільового компоненту з первинної сировини.

Саме завдяки механодифузійному ефекту, величина якого може варіюватись в значних межах і залежить від властивостей матеріалу та інтенсивності енергетичного впливу, процес переходу екстрагуємої речовини з матеріалу в екстракт може бути значно інтенсивнішим і більш повним, порівняно з традиційним способом екстрагування. Причиною такої суттєвої інтенсифікації є те, що на відміну від традиційного способу, коли інтенсивність процесу визначається переважно взаємодією розчинника та поверхневого шару частинок матеріалу, при ініціюванні механодифузії виникають потужні гідродинамічні потоки з внутрішніх шарів частинок, що значно збільшує продуктивність процесу і зменшує вимоги до площі поверхні екстрагування, а значить і вимоги до підготовки сировини та габаритних показників екстракційного обладнання. Конструкція та загальні принципи функціонування мікрохвильових екстракторів, доцільні для використання в технологічному процесі виробництва пектину описано в роботах [5 – 6].

Технологія екстрагування в мікрохвильовому електромагнітному полі може бути значно продуктивнішою по цільовому компоненту (порівняно з типовими способами екстрагування) та ощадливішою у використанні спирту. Можна очікувати, що процес екстрагування буде ефективно реалізовано при температурному режимі, для сировини - в межах 35-50 °С, і значно меншій температурі для розчинника (спирту). Використання температур, нижчих від типових для технології, дозволить збільшити пожеже та вибухобезпечність технології а також скоротити непродуктивні втрати розчинника внаслідок його випаровування.

Використовуючи різні за принципом дії конструкції мікрохвильового екстрактора (можлива реалізація апаратів як безперервної так і періодичної дії), можна виконувати різні технологічні задачі. Так екстрактор безперервної дії може реалізувати процес поточного екстрагування з відносно високим вмістом цільового компоненту та заданою поточною продуктивністю. А при використанні апарату періодичної дії, можливо реалізувати процес екстрагування з відносно невисокою поточною продуктивністю, але високим вмістом цільового компоненту, що дозволить значно скоротити та/або спростити наступні етапи виділення пектинової речовини з отриманого екстракту.

Кожен з типів екстракторів може бути реалізований з заданими конструктивними характеристиками. Практично єдиним реальним обмеженням в конструкції мікрохвильового екстрактора є наявність доступних генераторів мікрохвильового поля (магнетронів) високої потужності.

Перспективною для впровадження технологій АДЕ ділянкою виробництва пектину, можна розглядати і один з кінцевих етапів технологічного процесу - концентрування пектинового екстракту у вакуумних випарних апаратах. Серед розробок кафедри наявні як варіанти конструкції вакуумних випарних апаратів з МХ енергопідведенням, можливості яких дозволяють отримати на виході практично готовий для використання желеподібний матеріал. Такий варіант організації технологічного процесу дозволить взагалі виключити з процесу одну з найбільш енергоємних ділянок – сушіння пектиновмісного концентрованого екстракту в розпилювальній сушарці. Методика розрахунку процесу концентрування розчинів у такому апараті приведена в роботі [7].

Висновки. Попередній аналіз можливостей використання технологій АДЕ для комплексної переробки рослинної сировини, на прикладі технологічного процесу виготовлення пектину, а також результати отримані при сушінні пектинової сировини комбінованим способом, дозволяють стверджувати, що технології адресної доставки енергії, як універсальний спосіб енергопідведення в процесах сушіння, екстрагування та випарювання, можуть радикально змінити як технологічні характеристики цих процесів так і їх енерговитратність, забезпечивши одночасно високу якість отриманого продукту, задану продуктивність та енергетичну ощадливість нової технології.

Значним обмеженням у досягненні промислових рівнів продуктивності для апаратів з технологіями АДЕ залишається відносно невисокий рівень потужності електромагнітного поля, що створюється окремо взятим генератором, це обмеження частково компенсується можливістю групового використання генераторів і буде зняте з появою твердотільних генераторів мікрохвильового випромінювання.

References

1. Gouveia, Teresa I.A., Biernacki, Krzysztof, Castro, Maria C.R., Gonçalves, Maria P., Souza, Hiléia K.S. (2019). A new approach to develop biodegradable films based on thermoplastic pectin. *Food Hydrocolloids*, 97. 105 – 175. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105175>
2. Stolyarov, V. A. (Ed.). (2006). *Novyy spravochnik khimika i tekhnologa [The new handbook of chemist and technologist]*. Vol.2: *Syr'ye i produkty promyshlennosti organicheskikh i neorganicheskikh veshchestv [Raw materials and industrial products of organic and inorganic substances]*. SPb.: Professional (in Russian).
3. Yarovyy, I.I., Ali, V.P. (2020). Initsiyuvannya mekhanodyfuziynoho rezhymu vydalennya volohy v protsesakh sushynnya roslynnoyi syrovyny [Initiation of a mechanodiffusion mode for removing moisture in the drying processes of vegetable raw materials]. Proceedings of scientific-practical conference "Enerhiya. Biznes. Komfort" (p.p. 12-77) Одеса (in Ukrainian). URL: <https://www.onaft.edu.ua/download/konfi/2020/Collection-of-abstracts-EBC2020.pdf>
4. Burdo, O. H., Terziyev, S. H., & Ruzhytska, N. V. (2013). Uzahal'ennyya eksperymental'nykh doslidzhen' ekstrakuvannya shlamu kavy [Generalization of experimental studies of coffee sludge extraction]. *Scientific works*, 44(2). 334-337 (in Ukrainian).
5. Terziyev, S., Levtrinskaya, Yu., & Burdo, O. (2017). Sovershenstvovaniye teplotekhnologiy proizvodstva kofe [Improvement of heat technologies for coffee production]. *Scientific Works*, 47. (in Russian). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.405>
6. Burdo, O., Burdo, A., Al'khuri, Yu., & Sirotuk, I. (2016). Massoperenos pri ekstragirovaniy iz lechebnogo rastitel'nogo syr'ya v elektromagnitnom pole [Mass transfer in extraction from medicinal vegetable material in electromagnetic field]. *Scientific Works*, 80(1). 65 – 74 (in Russian). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.224>
7. Ruzhytska, N., Riznychenko, T. & Voytenko, O. (2018). Metodyka rozrakhunku protsesu kontsentruvannya kharchovykh rozchyniv ta ekstraktiv u mikrokhvyl'ovomu vakuum-vyparnomu aparati [Method of calculation

food solutions and extracts concentration process in microwave vacuum evaporator]. *Scientific Works*, 82(1). 139 – 143 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1020>

COMPREHENSIVE PROCESSING OF RAW MATERIALS USING TECHNOLOGIES OF ADDRESSED ENERGY DELIVERY IN THE PRODUCTION OF PECTINS

Yarovy I.I., Ph.D., Ali V.P., graduate student
Odessa National Academy of Food Technologies

Possibilities of using technologies of targeted energy delivery (ADE) in the processes of complex processing of raw materials of plant origin on the example of a set of technological processes characteristic for the production of pectin are considered. The relevance of pectin production processes for modern industry and promising areas of pectin use are shown. Examples of realization of technologies of pectin production by domestic and foreign producers are given, and the approximate estimation of cost and complexity of pectin production is resulted.

As an option to improve and reduce the cost of pectin production technology, the use of ADE technologies for the main technological operations of pectin production is proposed: drying of pectin-containing raw materials, extraction of pectin-containing substances, evaporation of pectin-containing extract. For the process of drying pectin-containing raw materials, the results of an experimental study of the kinetics of the process of moisture removal from the skin of citrus fruits, using a combined method of drying - microwave power supply and filtration removal of moisture. Substantiation for the use of such a combination of drying technologies and the influence of the mechanodiffusion effect on the final moisture removal productivity by the specified combined drying method are offered. The general design of a belt, modular drying unit with a combined method of drying bulk vegetable raw materials is described.

The evaluation of the results obtained during the study of the kinetics of the drying process of pectin-containing raw materials and the overall potential of ADE technology for the processes of high-speed low-temperature drying of thermolabile materials is given. The way for introduction of ADE technologies in other technological sites of pectin production is offered. In particular, reference is made to innovative extraction processes in the environment of the ultrahigh frequency electromagnetic field and summarizes the potential advantages and disadvantages of using similar technologies in the production of pectin. The use of technology of evaporation of solutions in vacuum evaporators with the use of microwave power supply for a similar technological operation in the manufacture of pectin is proposed.

Keywords: pectin, microwave, electro-magnetic field, extraction, evaporation.

Список використаної літератури

1. Gouveia, Teresa I.A., Biernacki, Krzysztof, Castro, Maria C.R., Gonçalves, Maria P., Souza, Hiléia K.S. A new approach to develop biodegradable films based on thermoplastic pectin, *Food Hydrocolloids*, 2019, Volume 97, P. 105 – 175. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105175>
2. Новый справочник химика и технолога: справочное издание / ред. В. А. Столярова. Ч. 2 : Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. СПб. : Профессional, 2006. 1142 с.
3. Яровий І.І., Алі В.П., Ініціювання механодифузійного режиму видалення вологи в процесах сушіння рослинної сировини. *Енергія. Бізнес. Комфорт: матеріали науково-практичної конференції (26 листопада 2020р.)*. Одеса : ОНАХТ, 2020. С. 12-77. - URL: <https://www.onaft.edu.ua/download/konfi/2020/Collection-of-abstracts-EBC2020.pdf>
4. Бурдо О. Г., Терзієв, С. Г., Ружицька, Н. В. Узагальнення експериментальних досліджень екстрагування шламу кави. *Наукові праці*, 2013. Вип. 44(2). С. 334-337.
5. Терзієв, С., Левтринская, Ю., & Бурдо, С. (2017). Совершенствование теплотехнологий производства кофе. *Scientific Works*, 47. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.405>
6. Бурдо, О., Бурдо, А., Альхури, Ю., & Сиротюк, И. (2016). Массоперенос при экстрагировании из лечебного растительного сырья в электромагнитном поле. *Scientific Works*, 80(1). С. 65 – 74. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.224>
7. Ружицька, Н., Різниченко, Т., & Войтенко, О. (2018). Методика розрахунку процесу концентрування харчових розчинів та екстрактів у мікрохвильовому вакуум-випарному апараті. *Scientific Works*, 82(1). С. 139 – 143. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1020>

Отримано в редакцію 01.04.2021
Прийнято до друку 06.07.2021

Received 01.04.2021
Approved 06.07.2021

КОНВЕКТИВНЕ СУШІННЯ ЦУКРОВІСНИХ ПАРЕНХІМНИХ ТКАНИН ДИНІ

Дмитренко Н.В., к.т.н., Шапар Р.О., к.т.н., с. н. с.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

В роботі наведено експериментальні дані щодо особливостей сушіння паренхімних тканин дині, їх здатності до зв'язування води та теплових витрат на їх зневоднення. Представлено узагальнення кінетичних закономірностей вологообміну під час конвективного сушіння тканин дині у вигляді температурних кривих, кривих сушіння та швидкості сушіння. Показано, що процес видалення вологи проходить в періоді постійної та падаючої швидкостей. Обґрунтовано енергозберігаючі ступеневі режими сушіння термолабільних тканин дині. Виявлено, що отримані дані щодо динаміки зміни стану води в тканинах дині та кінетики зміни витрат теплоти на випаровування корелюють з критичними точками процесу сушіння. Зроблено висновок, що вже на початкових етапах сушіння відбувається видалення зв'язаної води з клітратних оболонок простих розчинних вуглеводів, які складають ~ 78 % сухих речовин дині, що зміна теплових витрат на зневоднення на початку сушіння відповідає зміні гідратаційної спроможності розчинних цукрів, а наприкінці – відбувається за класичними уявленнями щодо сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Піковий екзотермічний ефект в діапазоні досягнення тканинами дині вологості 37...27 % відносних ідентифіковано як процес кристалізації розчинних цукрів. Проведені дослідження виявили можливість одержання сушеної дині із закристалізованими цукрами та суттєво підвищити якість і термін зберігання готового продукту.

Ключові слова: сушіння, диня, розчинні цукри, кристалізація.

Вступ. Економічно обґрунтоване становлення України на міжнародному ринку як агровиробника потребує створення надійних механізмів переробки сільськогосподарської сировини і доведення її до споживчої кондиції. Найбільш розповсюдженим та енерговитратним в технологіях переробки сільськогосподарської сировини є процес сушіння.

Формулювання проблеми та аналіз літературних джерел. Висушена диня використовується цілорічно у системі харчування як самостійний продукт або як складовий компонент у приготуванні різноманітних страв. Кліматичні умови східно-південних районів України сприятливі для вирощування плодів дині, але мало сприятливі для їх сушіння природним шляхом. Тож відпрацювання теплотехнологічних режимів сушіння дині є актуальним і перспективним напрямком, що обумовлений необхідністю якнайшвидшого перероблення плодів, через короткий термін їхнього зберігання, та проблемою накопичення нестандартної продукції і відходів дині у вигляді м'якоті, що залишається після видалення насіння.

М'якоть дині є суттєвою та цінною для нашого споживання частиною плода завдяки своєму унікальному складу (таблиця 1 [1, 2]). Цукри в дині представлені глюкозою, фруктозою і сахарозою. Харчова цінність дині посилюється наявністю кислот, ароматичних сполук, мінеральних речовин, вітамінів. Значна кількість фолієвої кислоти робить диню корисною в якості профілактичного засобу при атеросклерозі. Наявність значної кількості заліза дозволяє рекомендувати її для покращання кровотворення і нормалізації перебігу окислювальних процесів.

Таблиця 1

Середній хімічний склад плодів дині [1, 2]

Найменування показників	Значення
Цукри, % на сиру масу	9...18
Ди- та моноцукри, % до загальної кількості цукрів	
сахароза	42,5
глюкоза	25,3
фруктоза	32,2
Пектинові речовини, % на сиру масу	0,4...0,6
Органічні кислоти, у перерахунку на переважну кислотність	0,08...0,2
Вітаміни, мг/%	
С	20...40
каротиноїди	0,6...0,8
Мінеральні речовини (зола), % на сиру масу	0,4...0,7
Вода, % на сиру масу	82...92
Клітковина, % на сиру масу	0,4...0,9

Як об'єкт сушіння диня є колоїдним капілярно-пористим матеріалом, що складається з різних за своєю структурою і складом частин. Вона має ніжну м'якоть, шкірку різного кольору та товщини, насінневе гніздо з насінням у жорсткій оболонці. М'якоть побудована з крупних паренхімних клітин з міжклітинними проміжками. Кожна клітина оточена тонкою клітинною оболонкою всередині якої є протоплазма, а вакуолі заповнені клітинним соком з розчиненими речовинами: цукрами, розчинними формами пектинів і вітамінів, азотистими речовинами, кислотами, ферментами, мінеральними солями.

Основними вимогами, що пред'являються до процесу сушіння плодів дині, як і будь-якої іншої сільськогосподарської культури, є інтенсивність, економічність, забезпечення максимально повного збереження природних властивостей вихідної сировини у кінцевій продукції. Експериментально встановлено, що зміна хімічних, біологічних і структурних властивостей рослинних тканин під час сушіння може

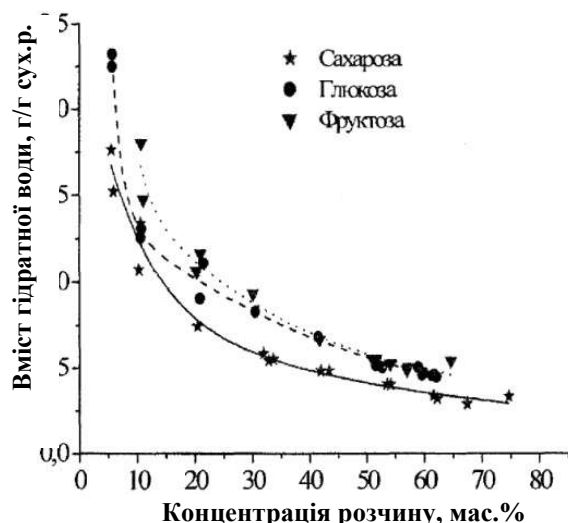


Рис. 1 – Залежність питомого вмісту гідратної води в розчинах сахарози, α-D-глюкози і

Відомо, що збільшення концентрації сахарози у водному розчині призводить до зниження ступеня її гідратації [5, 6, 7], і ступінь її гідратації дещо залежить від температури [8]. Від концентрації водного розчину

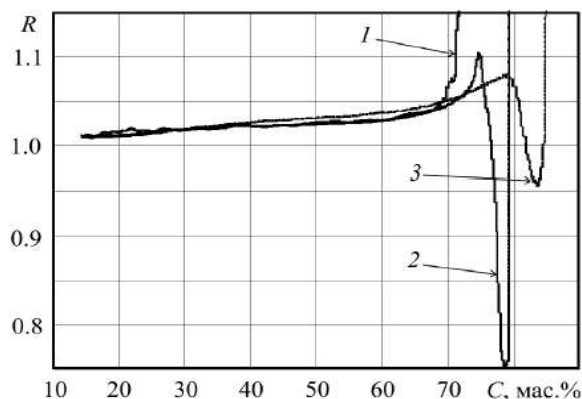


Рис. 2 – Криві залежності приведеної питомої теплоти випаровування води з розчинів сахарози від концентрації при температурі випарювання 40 (1), 60 (2) і 80 °C (3) [12]

першої гідратної оболонки сахарози, яка з'єднана з сахарозою двічі. Всі інші молекули води пов'язані з сахарозою тільки один раз – з її гідроксилами. Важливим для нас результатом цієї роботи є розуміння, як процесу розчинення сахарози у воді, так і зворотної її кристалізації в ході випарювання розчину. Процес випарювання води з концентрованого розчину сахарози можна уявити як агрегацію молекул сахарози в грона, що йде через заміну молекул води з гідратної оболонки гідроксилами інших молекул сахарози. Наступна кристалізація потребує вільного повороту піранозного залишку сахарози до фуранозного і може статися тільки після усунення молекули води, яка утворила жорсткий «містковий зв'язок». Але видалення молекули води,

впливати на співвідношення вільної та зв'язаної води в них та теплоту зневоднення і залежить від тривалості, температурного рівня та інтенсивності теплової обробки. Фактором, що жорстко лімітує технологічні параметри сушіння рослин, є максимально допустима температура зневоднювального матеріалу. Теплотехнологічні фактори процесу сушіння впливають на тканини дині певним чином. Наявність у сировині термолабільних речовин робить плоди дині чутливими до впливу високих температур і обмежує температурний рівень процесу сушіння та можливість його прискорення завдяки підвищенню температури сушіння. Через довготривалість теплового впливу на зневоднювальний матеріал чиняться такі негативні явища, як карамелізація цукрів, утворення меланоїдинових сполук, руйнування вітамінного складу тощо, уникнення яких досягається сушінням дині в режимі конвективно-конденсаційного зневоднення [3, 4]. В міру видалення вологи з паренхімних тканин дині збільшується концентрація цукрів у клітинному соку, внаслідок чого також сповільнюється процес сушіння і зростають витрати теплоти на зневоднення.

Експериментальні данні свідчать про значне зменшення питомого вмісту гідратної (зв'язаної) води при збільшенні концентрації водного розчину цукрів з самого початку випарювання (рис.1 [9]). Характер залежності водоутримуючої здатності цукрів від концентрації водних розчинів свідчить про зміну кількості водневих зв'язків між молекулами цукрів та водою по мірі випарювання. Ця залежність безпосередньо впливає на водоутримуючу здатність, структурні зміни та процес сушіння цукровмісної рослинної сировини [10].

Спроба прояснити особливості зміни гідратаційної здатності сахарози у водному розчині шляхом теоретичного моделювання поведінки системи «вода-сахароза» [11] привели до висновку, що молекула води вставляється між глюкозою-2-О і фруктозою-1-ОН сахарози. Тобто виникає щось типу «містка» з молекули води між піранозним і фуранозним залишками сахарози. Ця молекула води є єдиною в межах

яка двічі зв'язана з молекулою сахарози та заблокована іншими молекулами сахарози всередині грона, є не такою легкою задачею. Тобто, отримав теоретичне пояснення давно відомий експериментальний факт утворення досить сильно пересичених концентрованих водних розчинів сахарози, що передують процесу її кристалізації чи взагалі унеможливають його. На рис. 2 наведено приклад з роботи [12], де відображено таке утворення пересиченого розчину сахарози, яке повністю унеможливило процес її кристалізації при температурі випарювання 40 °С. Натомість, при температурах випарювання 60 та 80 °С бачимо чіткі пікі екзотермічного процесу кристалізації сахарози.

Для нас важливо, що цукри, які дрібно закристалізувалися всередині висушених рослинних тканин, суттєво підвищують як смакові якості сушеного продукту, так і термін його зберігання. При відпрацюванні технологій отримання сушених продуктів з цукристих рослинних тканин іноді вдається, а іноді не вдається, отримати ефект кристалізації цукрів [13]. Зазвичай це залежить від складу цукрів, наявності чи відсутності цукрів, що легко кристалізуються, та технологічних параметрів режиму сушіння. Тканини дині мають значну кількість фруктози і глюкози, процес кристалізації яких не обтяжено наявністю «місткового зв'язку» через двічі зв'язану молекулу води, як у сахарози. Отже мета нашої роботи – відпрацювання технології отримання сушеної дині із закристалізованими цукрами

Матеріали та методи дослідження. Для дослідів використовували свіжі зрізи, завтовшки 1,5...2,5 мм, паренхімних тканин динь сортів «Титовка», «Валенсія».

Дослідження зміни кількості зв'язаної води в паренхімних тканинах дині при зневодненні було проведено на диференціальному сканувальному мікрокалориметрі ДСМ-2М. Для варіювання вологості зразки підсушували в потоці повітря з температурою 60 °С та швидкістю 3 м/с. Кількість зв'язаної води визначали за методикою [14] з точністю не гірше 2 %.

Для встановлення закономірностей процесу сушіння дині були проведені досліди з кінетики конвективного зневоднення в елементарному шарі на експериментальному стенді з системою автоматичного збору та обробки інформації. Після встановлення певного режиму дослідження підготовлені зразки розміщували на піддоні робочої вимірювальної камери, вмикали комп'ютерну систему на основі розробленої програми "Sooshka", яка безперервно реєструє температуру сушильного агента впродовж дослідів, виводить на екран зміну маси досліджуваного матеріалу під час видалення вологи та температуру зразка у координатах $m = f(\tau)$ та $t = f(\tau)$ відповідно. Програма дає змогу накопичувати інформацію про хід процесу сушіння, виконувати необхідні розрахунки та будувати графічні залежності у вигляді кінетики кривих сушіння та швидкості сушіння у координатах $W^e = f(\tau)$, $dW^e/d\tau = f(W^e)$ [15].

Дослідження витрат теплоти на випаровування води з паренхімних тканин дині під час сушіння було проведено на диференціальному мікрокалориметрі випаровування ДМКИ-01 [16]. Прилад являє собою сукупність функціонально поєднаних теплового блоку, аналітичних терезів, компресора, блоку електронного керування і персонального комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням. Ізотермічне конвективно-кондуктивне сушіння відбувалось всередині калориметричної камери теплового блоку калориметра до моменту досягнення тканинами рівноважної з навколишнім середовищем вологості. Питому теплоту випаровування визначили з точністю не гірше 1 %, за методикою [17], шляхом синхронного виміру та покрокового співвідношення зміни маси матеріалу та кількості теплоти, що витрачена на випаровування.

Результати та їх обговорення. З результатів дослідів зміни кількості зв'язаної води в паренхімних тканинах дині при зневодненні за допомогою мікрокалориметру ДСМ-2М (рис. 3) випливає, що видалення зв'язаної води з тканин дині розпочинається задовго до настання заключних етапів сушіння.

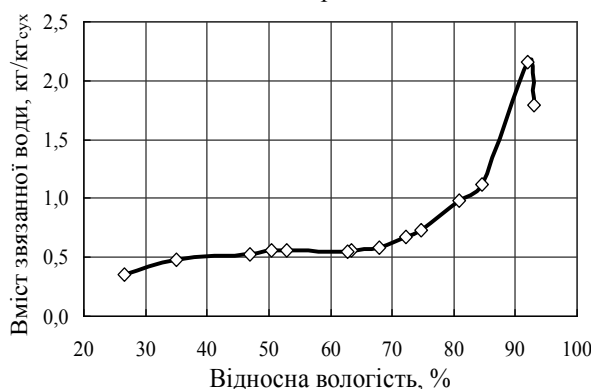


Рис. 3 – Залежність питомого вмісту зв'язаної води в паренхімних тканинах дині від вологості

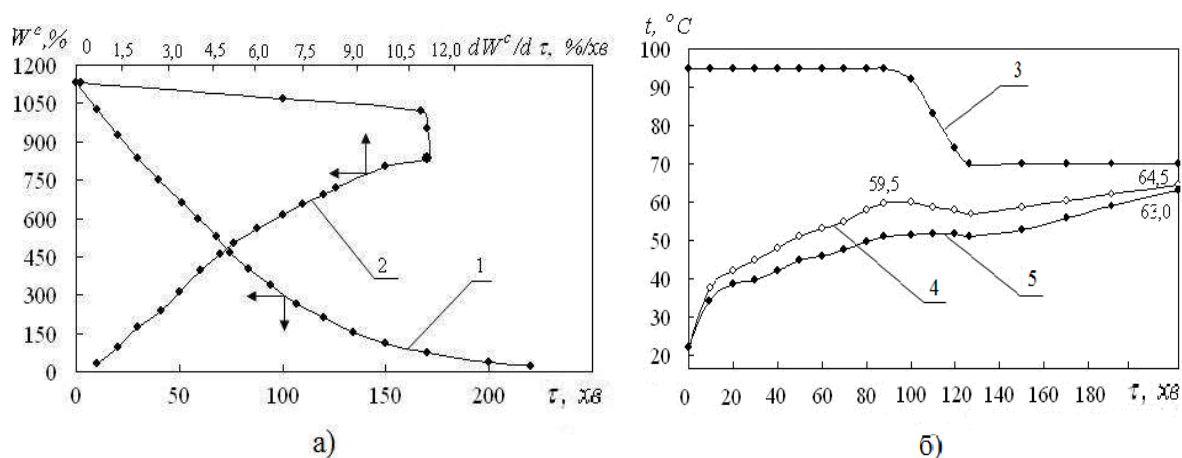
розупорядкування двох фаз матеріалу. Згідно [19] різке збігання тканин на перших етапах низькотемпературного конвективного сушіння може призводити до зменшення діаметру пор та міжклітинних проміжків. Це викликає таке зростання питомої кількості води, зв'язаної силами капілярного утримування, яке здатне ниве-

На підґрунті аналізу результатів цих дослідів, що цілком відповідають літературним даним щодо зміни гідратаційної спроможності цукрів у розчинах (рис. 1), та аналізу хімічного вмісту тканин дині було зроблено висновок, що вже на початкових етапах сушіння відбувається видалення зв'язаної води з клатратних оболонок простих розчинних вуглеводів, які складають ~ 78 % сухих речовин дині.

Також, в даному експерименті, спостерігаємо деяке початкове підвищення питомого вмісту зв'язаної води в тканинах дині. В роботі [18] причиною подібного явища під час сушіння термооброблених паренхімних тканинах картоплі називають ентальпійно-ентропійний характер взаємодії води з компонентами сухих речовин – конкурування процесу тепломасообміну з процесом упорядкування-

лювати її зменшення через структурну деградацію нерозчинних біополімерів та зменшення кількості їх водоутримуючих центрів.

Припущення, що деяке початкове підвищення питомого вмісту зв'язаної води в тканинах дині відповідає етапу видалення з них лише вільної води, підтверджується результатами експериментальних досліджень процесу сушіння в режимі двостадійного зневоднення (рис. 4 [20]).



1 – кінетика сушіння; 2 – швидкість сушіння; 3 – температура теплоносія; 4 – температура зовнішнього шару матеріалу; 5 – температура внутрішнього шару матеріалу.

Рис. 4 – Криві кінетики та швидкості (а) двостадійного конвективного сушіння дині, температури теплоносія і матеріалу (б) ($t = 95 \dots 70 ^\circ C$; $V = 2$ м/с; $d = 10$ г/кг сухого повітря) [20]

Порівняльний аналіз кінетичних і швидкісних характеристик кінетики вологообміну при зазначених параметрах процесу доводить, що зневоднення дині дійсно проходить у періодах постійної (видалення лише вільної води) та падаючої швидкості. На стадії прогрівання швидкість сушіння збільшувалась до свого максимального значення $10,8 \text{ } \%/ \text{хв}$ і залишалась постійною до досягнення матеріалом величини критичної абсолютної вологості $W^c = 835 \text{ } \%$ ($W = 89 \text{ } \%$ відносних), після чого швидкість зневоднення тканин дині поступово знижувалась (рис. 4 а). Використання високої температури на першій стадії позитивно впливає на кінетику вологообміну, інтенсифікуючи процес і скорочуючи його тривалість.

Використання стадійного режиму запобігає небажаним змінам у паренхімних тканинах дині та руйнування термолабільних речовин сировини, оскільки після досягнення матеріалом температури $59,5 ^\circ C$ (рис. 4 б) температуру сушильного агента знижували від $95 ^\circ C$ до $70 ^\circ C$ і підтримували її на такому рівні до кінця сушіння.

Результати дослідів зміни витрат теплоти на випаровування води протягом сушіння тканин дині за допомогою мікрокалориметра ДМКИ-01 представлено у координатах залежності питомих витрат теплоти на

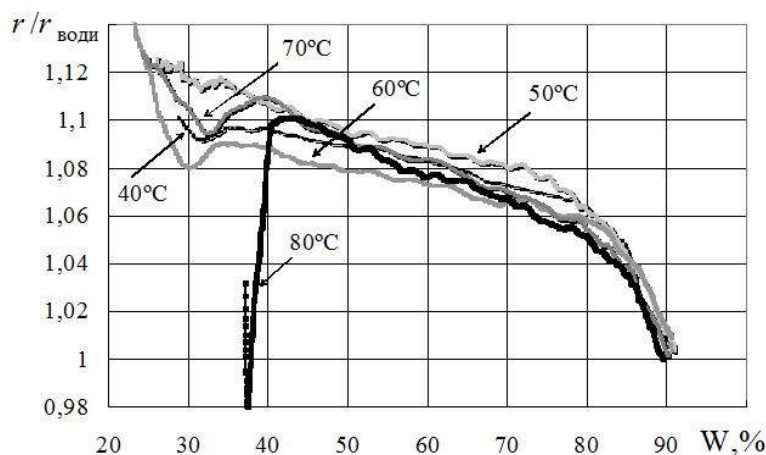


Рис. 5 – Залежності від відносної вологості приведені питомі теплоти випаровування води з тканин дині при різних температурах сушіння ($V = 0,8$ м/с; $d = 4$ г/кг сухого повітря)

випаровування, приведених до табличних для чистої води, від досягнутої тканинами відносної вологості (рис. 5).

Експериментально отримана питома теплота випаровування води з тканин дині починає зростати над теплотою випаровування чистої води ($r/r_{\text{води}} = 1$) з самого початку вимірювання і перевищує табличні значення теплоти випаровування чистої води на $10 \dots 12 \text{ } \%$ наприкінці сушіння (рис. 5). Отриманий результат знаходиться цілком у відповідності до зміни теплових витрат на видалення води при випарюванні розчинів сахарози (рис. 2). Він відповідає і характеру зменшення кількості зв'язаної води в тканинах дині в міру їх висушування (рис. 3) та зростанню енергії зв'язування води у глибших гідратних шарах. Збільшення температури сушіння від 40

до 80 °C мало вплинуло на отримані значення. Тобто, теплота випаровування води з тканин дині зменшується при підвищенні температури сушіння пропорційно зменшенню теплоти випаровування чистої води. Різке зростання значення $r/r_{\text{води}}$ наприкінці сушіння відбувається за класичними уявленнями про сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

На кривих зміни витрат теплоти на випаровування спостерігається ще деякий піковий тепловий ефект в діапазоні досягнення тканинами вологості 37...27 % відносних (58...36 % у абсолютних величинах). При збільшенні температури сушіння початок піку спочатку зсувається в бік меншої вологості тканин, а потім навпаки. Пікове зниження значення $r/r_{\text{води}}$ обумовлено накладанням на ендотермічний процес випаровування води якогось екзотермічного процесу. Найімовірніше – процесу кристалізації розчинних вуглеводів при концентруванні клітинного соку (рис. 2). Величина піку свідчить про меншу, або більшу частину цукрів, які закристалізувалися.

Дещо несподіваний для нас ефект різкого збільшення піку кристалізації цукрів в тканинах дині, сушених за температури 80 °C, можна пояснити більш значним перепадом температур та вологості вздовж шарів зразка при таких умовах сушіння. Це підтверджується і результатами сушіння, наведеними на рис. 4 б, – більший перепад температур зовнішнього і внутрішнього шару тканин дині спостерегається при вищій температурі сушильного агента.

Висновки

На підґрунті аналізу результатів дослідів зі зміни стану води в паренхімних тканинах дині при зневодненні та аналізу хімічного вмісту тканин дині було зроблено висновок, що вже на початкових етапах сушіння відбувається видалення зв'язаної води з клатратних оболонок простих розчинних вуглеводів, які складають ~ 78 % сухих речовин дині.

Аналіз результатів дослідження витрат теплоті на випаровування при сушінні паренхімних тканин дині дозволяє стверджувати, що їх зміна на початку процесу відповідає зміні гідратаційної спроможності розчинних цукрів та зміні теплових витрат на зневоднення їх розчинів, а на наприкінці сушіння відбувається за класичними уявленнями щодо сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

Піковий екзотермічний ефект в діапазоні досягнення тканинами дині вологості 37...27 % відносних, який корелює з наявними даними щодо процесу кристалізації цукрів у розчинах, було ідентифіковано нами, як процес кристалізації цукрів дині.

Отримані висновки калориметричних експериментів добре співпали з результатами конвективного сушіння паренхімних тканин дині.

Отже, проведені дослідження та отримані результати підтверджують наше припущення щодо можливості одержання сушеної дині зі закристалізованими цукрами і, тим самим, суттєво підвищити якість та термін зберігання готового продукту.

References

1. Dynia: khimichniy sklad, kaloriinist, korysni vlastyvoli [Melon: chemical composition, caloric content, useful properties.]. (2021, may, 7). Retrieved from <https://dovidka.biz.ua/dinya-himichniy-sklad-kaloriynist-korisni-vlastyvoli/> (In Ukrainian).
2. Skurikhina, I. M., Volgareva, M. N. (1987). *Khimicheskiy sostav pishchevykh produktov: Spravochnye tablitsy* [Chemical composition of food products: Reference tables], 2 vol. Moscow: Agropromizdat. (In Russian).
3. Sniezkin, Yu.F., Shapar, R.O. (25.11.2013). *Patent 103864, MPK A23B 7/02. Sposib vyrobnytstva sushenoї dyni* [Dried melon production method]. a201302965; declared 11.03.2013, Bulletin No 22. (In Ukrainian).
4. Snezhkin, Yu.F., Shapar, R.A., Gusarova, E.V. (2016). *Energoeffektivnyy konvektivno-kondensatsionnyy metod sushki v tekhnologiyakh proizvodstva chipsov* [Energy-efficient convective-condensation drying method in chip production technologies]. *Povysheniye effektivnosti protsessov i apparatov v khimicheskoy i smezhnykh otraslyakh promyshlennosti. Proceedings of international conference dedicated to the 105-th anniversary of the birth of A.N. Planovsky. (Sept. 8-9, 2016, Moscow)*. (T.2., pp. 45-47). (In Russian).
5. Pasynskiy, A. G. (1946). *Solvatatsiya neyelektrolitov i szhimayemost ikh rastvorov* [Solvation of nonelectrolytes and compressibility of their solutions]. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 20(9), 981-994. (In Russian).
6. Kharin, S. E., Kniga, A. A. (1963). *O vodno-sakharnykh rastvorakh* [About water-sugar solutions]. *Izv. vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*, 5, 47-51. (In Russian).
7. Mikhaylik V.A. (2006). *Eksperimentalnoe issledovanie gidratatsii sakharozy* [Experimental study of sucrose hydration]. *Naukovi pratsi Odeskoї natsionalnoї akademії kharchovikh tekhnologiy*, 28(2), 370-374. (In Russian).
8. Buravleva, V. I., Zubchsnko, A. V., Oleynikova, A. Ya. (1977). *K voprosu o gidratatsii Sakharov* [On the issue of sugar hydration.]. *Izv. vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*, 5, 129-131. (In Russian).
9. Mikhaylik, V.A. (2008). *Osobennosti povedeniya rastvorov sakharov pri obezvozhivani* [Features of the behavior of sugar solutions during dehydration]. *Sovremennye energosberegayushchiye teplovyye tekhnologii. Proceedings of 3th of international conference (Sept. 16-30, 2008, Moscow-Tambov)*. (pp. 240-242). (In Russian).

10. Dmytrenko, N.V. (2018). Vplyv rozchynnykh rehovyn na stan vody v roslynnykh tkanyakh ta kinetyku yikh sushinnia [Effect of soluble substances on the state of water in plant tissues and their drying kinetics]. *Scientific Works*, 82(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1015> (In Ukrainian).
11. Frieder W. Lichtenthaler, Peter Pokinskyj, Stefan Immel. (1996). Saccharose als nachwachsender organischer Rohstoff: Neue, selektive Einstiegsreaktionen via Computersimulation ihrer Lösungskonformationen und der Reaktivität ihrer Hydroxylgruppen. *Zuckerind.* V. 121(3), 174-190.
12. Mikhaylik, V. A., Dmitrenko, N. V., Snezhkin, Yu. F. (2019). Issledovaniye vliyaniya gidratatsii na teplotu ispareniya vody iz rastvorov sakharozy [Investigation of the effect of hydration on the heat of evaporation of water from sucrose solutions]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 92 (4), 945-952. (In Russian).
13. Mykhailyk, V.A., Sniezkin, Yu.F., Korinchevska, T.V., Hornikov, Yu.I. (2015). Vplyv rezhymu konvektivnoho sushinnia na krystalichnist poroshkiv z yabluk ta tsukrovoho buriaku [Effect of convective drying mode on the crystallinity of apple and sugar beet powders]. *Prom. teplotekhnika*, 37(5). <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.03> (In Ukrainian).
14. Deodar, S., Lunsr, F. (1984). Izmereniye soderzhaniya svyazannoy (nezamerzayushchey) vody metodom differentsialnoy skaniruyushchey kalorimetrii [Measurement of the content of bound (non-freezing) water by differential scanning calorimetry]. *Voda v polimerakh. Pod red. S. Roulenda. Per. s angl.* Moscow: Mir. (pp. 273–287). (In Russian).
15. Sniezkin, Yu.F., Shapar, R.O. (2018). *Teplomassoobminni tekhnolohii pererobky pektynovmisnoi syrovyny* [Heat and mass transfer technologies for processing pectin-containing raw materials]. Kyiv: Sik Hrup Ukraina. (In Ukrainian).
16. Sniezkin, Yu.F., Dekusha, L.V., Dubovikova, N.S., Hryshchenko, T.H., Vorobiov, L.I., Boriak, L.A. (2008). *Patent 84075, MPK G01 N25/26, G01 N25/28*. Kalorimetrychnyi prystrii dlia vyznachennia pytomoi teploty vyparovuvannia volohy i orhanichnykh ridyn z materialiv [Calorimetric device for determining the specific heat of evaporation of moisture and organic liquids from materials]. a200613266, declared 15.12.2006, Bulletin No 17. (In Ukrainian).
17. Dubovikova, N.S., Snezhkin, Yu.F., Dekusha, L.V., Vorobyev, L.I. (2013). Teplometricheskiy pribor sinkhronnogo termicheskogo analiza dlya opredeleniya udelnoy teploty ispareniya [A thermometric device of synchronous thermal analysis for determining the specific heat of evaporation.]. *Prom. Teplotekhnika*, 25(2), 87-95. (In Russian).
18. Grishin, M.A., Pogozhikh, N.I., Potapov, V.A. (2001). Effekt dinamicheskogo strukturirovaniya vlagi v protsesse sushki [The effect of dynamic structuring of moisture in the drying process. Industrial heat engineering.]. *Prom. Teplotekhnika*, 23(4-5), 100-105. (In Russian).
19. Potapov, V.A. (2004). *Kinetika sushki: analiz i upravleniye protsessom* [Drying kinetics: process analysis and control]. Kharkov: KhGUPT. (In Russian).
20. Sniezkin, Yu.F., Shapar, R.O. (2013). Obgruntuvannia rezhymiv sushinnia dyni [Justification of melon drying modes]. *Naukovi pratsi Odeskoï natsionalnoï akademii kharchovikh tekhnologiy*, 43(2), 102-104. (In Ukrainian).

CONVECTIVE DRYING OF SUGAR-CONTAINING MELON PARENCHYMAL TISSUES

Dmytrenko N. V., Shapar R.O.

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

The article represents experimental data on the peculiarities of drying of melon parenchymal tissues, on their ability to bind water, on the heat consumption for their dehydration. The generalization of kinetic regularities of moisture exchange during convective drying of melon tissues in the form of temperature curves, drying curves and drying speed curves is presented. It is shown that the process of moisture removal occurs in periods of constant and falling speed. Energy - saving step modes of drying of thermolabile melon tissues are substantiated. The results of calorimetric experiments coincided well with the results of convective drying of melon tissues. It was found that the data on the dynamics of changes in the state of water in melon tissues and the kinetics of changes in heat consumption for evaporation correlate with the decisive points of the drying process. It is concluded that bound water from clathrate shells of simple soluble carbohydrates (which make up ~ 78 % of melon dry matter) is removed already in the opening stages of drying but the removal of water at the final stage is according to the classical ideas of drying colloidal capillary-porous materials. Some initial increase in the specific content of bound water in melon tissues correlates with the stage of constant drying speed. The analysis of heat consumption for evaporation allows us to state that the change in consumption correlates with the change in the hydration capacity of soluble melon sugars and with the change in heat consumption for dehydration of sugar solutions. The peak exothermic effect, which is in the range of melon tissue moisture 37 ... 27 % relative, has been identified as a process of crystallization of soluble

sugars. Studies have shown the possibility of obtaining dried melon with crystallized sugars and significantly improve the quality and shelf life of the finished product.

Keywords: drying, melon, soluble sugars, crystallization.

Список використаної літератури

1. Диня: хімічний склад, калорійність, корисні властивості. [Електронний ресурс]. URL: <https://dovidka.biz.ua/dinya-himichnyi-sklad-kaloriynist-korisni-vlastivosti> (дата звернення 07.05. 2021).
2. Скурихина, И. М., Волгарева, М. Н. Химический состав пищевых продуктов: справ. таблицы. Кн. 2. Москва: Агропромиздат, 1987. 360 с.
3. Пат. 103864, Україна, МПК А23В 7/02, F26В 3/06. Спосіб виробництва сушеної дині / Ю.Ф. Снежкін, Р.О. Шапар. заявл. 11.03.2013; опубл. 25.11.2013 р. Бюл. №22.
4. Снежкін, Ю.Ф., Шапар, Р.А., Гусарова, Е.В. Энергоэффективный конвективно-конденсационный метод сушки в технологиях производства чипсов. Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности : труды междунар. н.-т. конф. посвященной 105-летию со дня рождения А.Н.Плановского. Москва, Россия, 8-9 сентября 2016. Т.2. С. 45–47.
5. Пасынский, А. Г. Сольватация неэлектролитов и сжимаемость их растворов. *Журнал физической химии*. 1946. Т. 20, № 9. С. 981-994.
6. Харин, С. Е., Книга, А. А. О водно-сахарных растворах. *Изв. вузов. Пищевая технология*. 1963. № 5. С. 47–51.
7. Михайлик, В. А. Экспериментальное исследование гидратации сахарозы. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2006. Вип. 28, т.2. С. 370-374.
8. Буравлева, В. И., Зубченко, А. В., Олейникова, А. Я. К вопросу о гидратации сахаров. *Изв. вузов. Пищевая технология*. 1977. № 5. С. 129-131.
9. Михайлик, В.А. Особенности поведения растворов сахаров при обезвоживании. Современные энерго-сберегающие тепловые технологии. СЭТТ–2008: труды III Международной науч.-практ. конференции. Москва-Тамбов, 16–20 сент. 2008. Т. 1. С.240-242.
10. Дмитренко, Н.В. Вплив розчинних речовин на стан води в рослинних тканинах та кінетику їх сушіння. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2018. Т. 82, вип. 1. С. 102-108.
11. Frieder W. Lichtenthaler, Peter Pokinskyj, Stefan Immel. Saccharose als nachwachsender organischer Rohstoff: Neue, selektive Einstiegsreaktionen via Computersimulation ihrer Lösungskonformationen und der Reaktivität ihrer Hydroxylgruppen. *Zuckerind*. 1996. Vol. 121, No. 3. S. 174-190.
12. Михайлик, В. А., Дмитренко, Н. В. Снежкін, Ю. Ф. Исследование влияния гидратации на теплоту испарения воды из растворов сахарозы. *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92, № 4. С. 945-952.
13. Михайлик, В.А. Снежкін, Ю.Ф., Корінчевська, Т.В., Горніков, Ю.І. Вплив режиму конвективного сушіння на кристалічність порошків з яблук та цукрового буряку. *Промышленная теплотехника*. 2015. Т. 37, № 5. С. 23-37.
14. Деодар, С., Лунср, Ф. Измерение содержания связанной (незамерзающей) воды методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Вода в полимерах. Под ред. С. Роуланда. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. С. 273–287.
15. Снежкін, Ю.Ф. Шапар, Р. О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. Київ: Сік Груп Україна, 2018. 228 с. ISBN 978-617-7457-69-4.
16. Пат. 84075, Україна МПК G01 N25/26, G01 N25/28 . Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів / Ю.Ф. Снежкін, Л.В. Декуша, Н.С. Дубовікова, Т.Г. Грищенко, Л.Й. Воробйов, Л.А. Боряк. Заявка № а2006 13266 від 15.12.2006
17. Дубовікова, Н.С., Снежкін, Ю.Ф., Декуша, Л.В., Воробйов, Л.И. Теплотетрический прибор синхронного термического анализа для определения удельной теплоты испарения. *Промышленная теплотехника*. 2013. Т. 25, № 2. С. 87-95.
18. Гришин, М.А. Погожих, Н.И., Потапов, В.А. Эффект динамического структурирования влаги в процессе сушки. *Промышленная теплотехника*. 2001. Т. 23, №. 4-5. С. 100-105.
19. Потапов, В.А. Кинетика сушки: анализ и управление процессом. Харьков: ХГУПТ, 2009. 250 с.
20. Снежкін, Ю.Ф., Шапар, Р.О. Обґрунтування режимів сушіння дині. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса: 2013. Вип.43, т. 2. С. 102-104. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2013_43\(2\)_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2013_43(2)_26).

Отримано в редакцію 31.03.2021
Прийнято до друку 22.06.2021

Received 31.03.2021
Approved 22.06.2021

ВСТАНОВЛЕННЯ РЕЖИМІВ ТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРОБЛЕННЯ М'ЯСА ІНДИЧКИ

Синиця О.В., аспірантка

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

Вимоги сучасного споживача до якості м'ясних продуктів та прагнення виробників залишатися конкурентоспроможними є основною причиною для розроблення нових високоякісних м'ясних продуктів.

У більшості технологій виробництва м'ясних виробів температурне оброблення є ключовою операцією. Від способів та параметрів температурного оброблення залежать показники якості, сенсорні властивості та техніко-економічні характеристики м'ясних продуктів.

Вибір температурно-часових параметрів температурного оброблення м'яса має бути індивідуальний враховуючи вид сировини, її фізико-хімічні особливості та бажані властивості готового продукту.

Перспективною сировиною для отримання високоякісних м'ясних виробів є м'ясо індички. Висока біологічна цінність та дієтичні якості індички дозволяють їй успішно конкурувати зі свининою та яловичиною. А значний вихід забійної тушки та велика частка м'язової тканини робить її економічно привабливою у порівнянні з іншими видами домашньої птиці.

Вагомою проблемою при використанні індички у якості основної сировини в технології виробництва продукту є складність обвалювання в результаті особливостей її морфологічної структури. Вирішенням даної проблеми може стати використання попереднього температурного оброблення з подальшим обвалювання м'яса і використання вареної сировини в технології пастеризованих консервів.

У роботі представлені дослідження впливу температурно-часових режимів на структурно-механічні, фізико-хімічні, органолептичні та мікробіологічні показники гомілки індички. Проведено порівняльну оцінку гідротермічного оброблення м'яса при температурі гріючого середовища 65°C і 90 °C та показано позитивний вплив використання низькотемпературного тривалого гідротермічного оброблення на текстуру продукту та смакові властивості. Встановлено раціональність використання температури 65°C для термооброблення м'яса індички та підтверджено його мікробіологічну безпечність.

Ключові слова: м'ясо індички, температурне оброблення, денатурація, мікробіота, безпечність.

Формулювання проблеми. Технологія приготування будь-якого м'ясного продукту направлена на створення якісного, смачного та безпечного виробу. При цьому базовим критерієм якості при виготовленні є забезпечення температурно-часових параметрів термічного оброблення [1].

В технологічному процесі центральне місце відводиться температурі та тривалості оброблення, в ході якого відбуваються зміни в текстурному профілі м'яса та досягається мікробіологічна безпечність продукту. Крім того, температурне оброблення збільшує засвоюваність м'яса [2].

Швидкість і ступінь цих змін залежить від кількості тепла, яке передається м'ясу та швидкості нагріву. Жорсткі режими термооброблення можуть викликати такі негативні зміни, як втрата поживної цінності білків і ліпідів, утворення токсичних сполук, погіршення сенсорних властивостей [3].

Параметри температурного оброблення повинні бути підібрані у відповідності з особливостями м'ясної сировини (вид м'яса, співвідношення тканин та білків) і бажаними показниками якості готового продукту.

На сьогоднішній день достатньо перспективною сировиною для виробництва м'ясопродуктів є м'ясо індички. Продукти виготовлені з індички, мають високу харчову цінність, що характеризує здатність забезпечувати потреби організму в білках, ліпідах, а також в мінеральних речовинах і вітамінах. Крім того, індичка – одна з найбільших сільськогосподарських птахів і має значний вихід туші (понад 70 %) та велику частку м'язової тканини (понад 60 %), що дає перевагу при переробці в різні м'ясні продукти [4].

Білки м'яса індички є повноцінними, оскільки містять всі незамінні амінокислоти. При цьому жодна з амінокислот не є лімітуючою. Найбільше в м'ясі індички містяться лейцину (8,14 % і 8,42 % для 1-ї та 2-ї категорії відповідно) та лізину (8,39 % і 8,94 % для 1-ї та 2-ї категорії відповідно) [5].

Жир в індичці є легкозасвоюваним, адже в ньому містяться поліненасичені незамінні жирні амінокислоти, в основному представлені лінолевою кислотою та невеликою кількістю ліноленовою.

Високий вміст вітаміну В₉ в м'ясі індички, який бере участь в генерації та підтримці в здоровому стані нових клітин організму, дозволяє віднести його за цим показником до функціональної продукції, так як його вміст в 100 г м'яса відповідає добовій нормі споживання [6].

М'ясо індички містить значну частину калію (212 мг/100 г) та фосфору (227,1 мг/100 г), а також таких мікроелементів як залізо (4,8 мг/100 г) і цинком (2,8 мг/100 г). За кількістю калію, м'ясо індички покриває близько 38 % від добової його норми, а фосфору на 15 %. Крім вищевказаних мінеральних речовин, в індич-

ці з макроелементів також містяться кальцій, магній, натрій, фосфор і сірка, з мікроелементів - йод, мідь, марганець, селен, хром і фтор [7].

Зважаючи на високу харчову цінність м'яса індички, її можна використати як основну сировину для виробництва нових видів кулінарних продуктів із застосуванням індивідуальних режимів температурного оброблення, які будуть мати відмінні споживчі характеристики та високу якість.

Прийнято вважати, що грудна частина птиці більш корисна за інші складові тушки, у тому числі за гомілки, оскільки містить менше жиру та калорій. Проте, в гомілках міститься значна частина колагену та більший вміст вітаміну А і заліза [8]. Продукти виготовлені з використанням даної частини туші будуть більш корисні для людей старшого віку, а також тих, які мають переломи кісток чи страждають на остеохондроз. Крім того, дана сировина має меншу вартість та є економічно доцільною.

Перспективними сьогодні є м'ясні продукти готові до вживання (ready to eat – RTE), до яких відносяться консерви. Завдяки герметичній упаковці вони здатні зберігатись тривалий час без погіршення якісних характеристик та безпечності. Пастеризовані консерви з м'яса птиці користуються великим попитом, оскільки при виробництві використовується біологічно цінна сировина.

Основна проблема використання гомілок індички полягає у складності обвалювання та в більшій жорсткості у порівнянні з філейною частиною або гомілками інших видів птиці.

Використання гідротермічного оброблення м'яса птиці на першому етапі технології виробництва пастеризованих консервів, дозволить раціонально використовувати м'ясну сировину (гомілки індички).

Аналіз останніх досліджень. Для сучасного споживача висока харчова та біологічна цінність, ніжний та соковитий смак м'ясного продукту є основними факторами, що впливають на його вибір. Одним із способів досягнення цих характеристик є виробництво продукту шляхом використання оброблення при низьких температурах протягом тривалого часу (low temperature long time – LTLT). Використання LTLT дає змогу виготовляти м'ясо з високими сенсорними якостями, ніжне та соковите [3,9].

Вперше позитивний вплив низькотемпературного тривалого оброблення на якісні показники готового продукту було вивчено в 1937 на прикладі виробництва продукту із яловичини. Подальші дослідження проведено численними науковцями підтвердили сприятливий вплив LTLT на біологічну цінність, консистенцію, сенсорні показники та вихід готового продукту. Однак, дані роботи були зосереджені в більшості на дослідженні яловичини [10, 11] та свинини [12]. Робіт присвячених використанню низькотемпературного оброблення при виробництві м'ясних виробів із м'яса птиці досить мало.

Експериментальні дані [13] дослідження впливу низьких температур оброблення на напівфабрикати з філе індички в пароконвекційному апараті показали позитивний вплив на якісні характеристики готового продукту. Експериментальні зразки піддавали нагріванню в режимах «варіння парою» та «пароконвекційний режим при знижених температурах». Варіння при знижених температурах дозволило збільшити вихід виробів на 15...18 % у порівнянні з виробами обробленими традиційним способом. Дослідні зразки мали вищі органолептичні показники, м'ясо було соковитіше та ніжніше.

Аналіз доступної науково-технічної літератури показав, що велике значення має морфологічна частина тварини та співвідношення тканин м'яса [3]. Параметри температурного оброблення повинні бути підібрані враховуючи не тільки вид сировини, а й співвідношення м'язових та сполучно-тканинних білків. Зміни білків в процесі оброблення мають різноспрямований характер і залежать від температури та тривалості процесу.

Температури, при яких відбувається денатурація різних фракцій білків м'яса, істотно розрізняються. Денатураційна зміна глобулярних білків (актину, міозин, актоміозину) починалася при температурі 45-50 °C, а при досягненні 60 °C денатурує близько 90 % молекул білків [3].

При нагріванні м'ясної сировини до температури 58-64 °C молекула колагену переходить зі спірального стану в випадково розгорнуту (аморфну) структуру. Необмежені колагенові волокна стискаються при нагріванні від 60 до 70°C. Далі денатурація переходить у підвищену желатинізацію в зв'язку з розривом міжмолекулярних зв'язків через підвищення температури. Хоча повна желатинізація відбувається при температурі вище 65°C, сучасні дані свідчать, що при повільному нагріві (швидкість не більше 5°C/хв.) більшість колагенових волокон в епімізії розчиняється при 59 °C [14-16].

Час оброблення має також істотне значення. Дослідження диференціальної скануючої колориметрії показали майже повну денатурацію міозину у м'ясі після 3 год витримування при 53-54 °C. При обробленні протягом 3 год і температурі близько 60 °C відбувається тривала денатурація колагену [17, 18].

У зв'язку з наявністю значної частини сполучної тканини в складі гомілки індички представляється актуальним вивчення впливу режимів температурного оброблення на зміну фізико-хімічних, структурно-механічних, органолептичних властивостей та показників безпеки обробленого м'яса.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є обґрунтування та встановлення раціональних режимів гідротермічного оброблення гомілок індички, як першого етапу виробництва пастеризованих консервів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити вплив температурно-часових параметрів гідротермічного оброблення на стан сполучної тканини та структурно-механічні показники м'яса індички;
- встановити вплив режимів оброблення на органолептичні показники;

- вивчити показники мікробіологічної безпеки обробленого м'яса.

Матеріали і методи досліджень. Об'єктами дослідження були охолоджені гомілки індички ТМ «Інделі-ка». Дослідження проводились при температурі 65 та 90 °С. Вибір температури 65 °С обґрунтований дослідженнями впливу температур гідротермічного оброблення на м'ясо курчат-бройлерів за результатами яких вона є раціональною. У якості контрольного об'єкту виступали зразки оброблені при температурі 90 °С. Критерієм закінчення тривалості оброблення були органолептичні показники, залишкова активність кислої фосфатази не більше 0,006 % та легка можливість обвалювання м'яса.

Для визначення впливу температурного оброблення на функціонально-технологічні, структурно-механічні, мікробіологічні та органолептичні характеристики м'яса використовувалися загальноприйняті методи дослідження:

- розварювання колагену - по різниці вмісту оксипроліну в сирому і вареному м'ясі після видалення з нього продуктів гідролітичного розпаду колагену [19];
- кінематичну в'язкість бульйону визначали за допомогою капілярного скляного віскозиметра ВПЖ-2 (ГОСТ 10028-81) з діаметром капіляра 0,99 мм;
- структурно-механічні показники – за допомогою приладу Структурометр СТ-1 [20];
- втрати маси при термообробленні розрахунковим методом (зважуванням зразків до і після оброблення [21];

Органолептичні дослідження проводили використовуючи п'яти бальну шкалу оцінювання. В усіх зразках визначали такі показники, як зовнішній вигляд, консистенція, колір, запах та смак [21].

Кількість мезофільних аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів визначали відповідно до ГОСТ 8446:2015 Продукти харчові. Бактерії групи кишкової палички (БГКП) були визначні за допомогою середовища Кесслера відповідно до ГОСТ 998-81. Для визначення сульфитредукуючих клостридій використовували методику посіву 1 см³ надосадової рідини продукту в середовище СЦС і Вільсона-Блера відповідно до ГОСТ 998-81. Патогенні мікроорганізми, серед яких *Salmonella* spp., визначали за допомогою посіву на селективне середовище і встановлювали їх серологічні і ферментативні властивості відповідно до ДСТУ ISO 6579. *Staphylococcus aureus* – згідно ГОСТ 10444.2-94.

Результати досліджень. Беручи до уваги важливість зміни сполучно-тканинних білків при встановленні температурно-часових параметрів гідротермічного оброблення індички, були проведені дослідження ступеня розварювання колагену, кінетичної в'язкості бульйону та встановлено тривалість оброблення (рис.1). Співвідношення м'яса до рідкої частини становило 1:2.

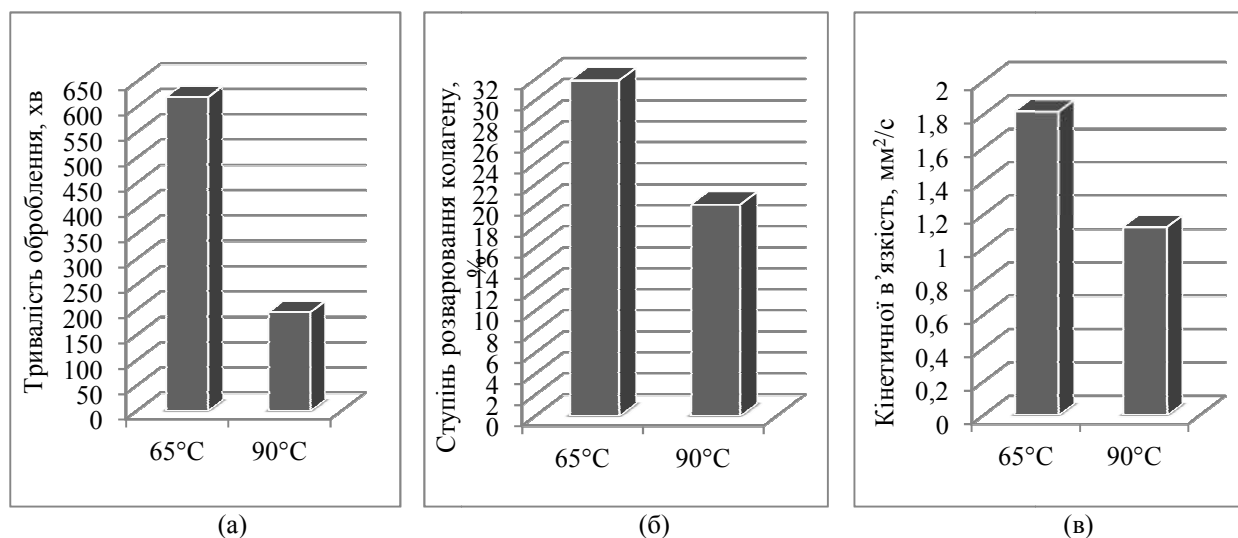


Рис. 1 – Вплив температури гідротермічного оброблення на (а) тривалість, (б) ступінь розварювання колагену та (в) кінетичну в'язкість бульйону

Оброблення при температурі 65 °С протягом 620 хв дозволило досягнути 31,9 % розварювання колагену, що на 11,8 % більше ніж при температурі оброблення 90 °С. Кінетична в'язкість бульйону отриманого в результаті оброблення при 65 °С вища ніж при 90 °С.

Отримані результати ступеня розварювання колагену та в'язкості бульйону вказують на те, що тривале температурне оброблення при 65 °С впливає на трансформацію колагену у більшій мірі ніж менш тривале при температурі 90 °С.

Важливою характеристикою м'яса є його органолептичні показники, особливо смак. Температура оброблення є причиною втрати маси м'яса та зміни структурно-механічних властивостей. На рис.2 представлені результати напруги зрізу та втрати маси, які характеризують жорсткість та міцність м'ясної системи, а на рис. 3 дана профілографіа органолептичних оцінок гідротермічно обробленого м'яса індички.

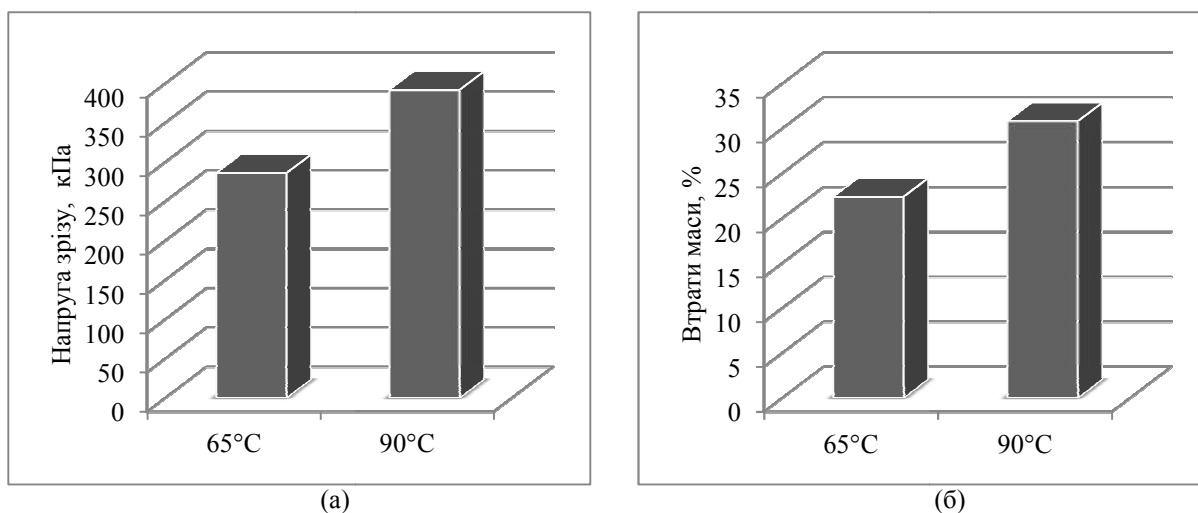


Рис. 2 – Вплив температури гідротермічного оброблення на (а) напругу зрізу та (б) втрати маси

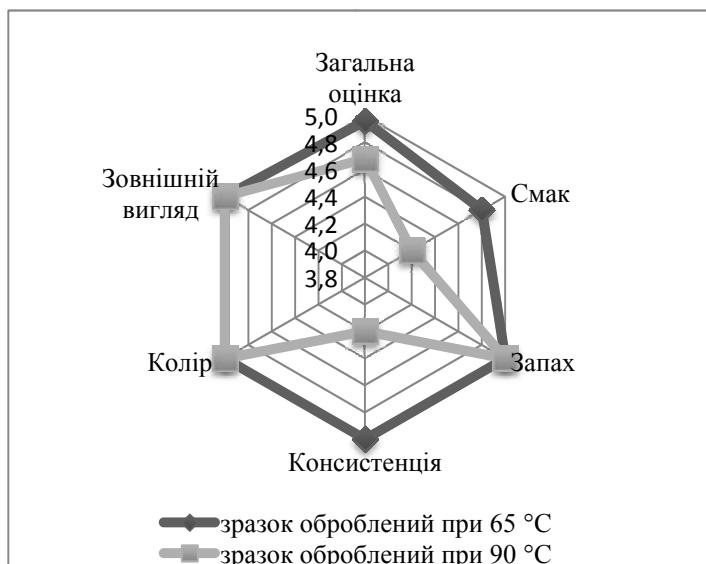


Рис. 3 – Профілограма органолептичних показників

З результатів дослідження видно, що температура у більшій мірі призводить до зміни білків м'яса при нагріванні ніж тривалість оброблення. Графіки дослідження показують, що чим більша температура оброблення тим більші втрати маси та жорсткіше м'ясо. Так, при обробленні м'ясо при 65 °С втрати маси на 11,3 % менші ніж при 90 °С.

Згідно результатів органолептичних досліджень зразки індички оброблені при температурі 65 °С були більш привабливими для дегустаторів.

Дегустаційна комісія відзначила, що м'ясо оброблене при температурі 65 °С дуже ніжне та соковите, а оброблене при 90 °С більш жорстке та сухе.

За кольором та запахом зразки не відрізнялись. М'язова тканина була рівномірно забарвлена, світло-сірого кольору, який властивий вареному м'ясу індички.

Вирішальним показником при виробництві м'ясних продуктів є їх мікробіологічна

безпечність. Оскільки м'ясо було оброблено при низькій температурі необхідним було проведення дослідження ефективності температурного оброблення для інактивації мікроорганізмів. Отримані результати мікробіологічних досліджень представлені в табл.1. До температурного оброблення початкове забруднення м'яса було 520 КУО/г.

Таблиця 1

Результати мікробіологічних досліджень

Показники	Зразок оброблений при 65 °С	Зразок оброблений при 90 °С
МАФАНМ, КУО в 1 г	10	10
БГКП в 1 г.	не виявлено	не виявлено
Сульфитредукувальні клостридії в 1 г	не виявлено	не виявлено
<i>Staphylococcus aureus</i> в 1 г	не виявлено	не виявлено
<i>Salmonella</i> в 25 г.	не виявлено	не виявлено

Згідно представлених результатів можна стверджувати, що температурне оброблення при температурі 65 °С протягом тривалого часу є достатнім для досягнення мікробіологічної безпечності. Важливо відмітити, що після оброблення у зразках не було виявлено патогенних та умовно-патогенних мікроорганізмів.

Оброблення при температурі 65 °C позитивно вплинула на структурно-механічна і смакові властивості м'яса та викликає значно менші втрати маси, проте негативним моментом є велика тривалість такого оброблення. Метою подальших досліджень є пошук шляхів скорочення тривалості оброблення при низькій температурі.

Висновки

1. Проведено порівняльні фізико-хімічні, структурно-механічні, мікробіологічні та органолептичні дослідження м'яса індички, які показали значну перевагу використання гідротермічного оброблення при низькій температурі (65 °C). Так, ступінь розварювання колагену на 11,8 % більше у зразках оброблених при 65 °C, що вкрай важливо для ефективного обвалювання м'яса та отримання необхідної структури продукту. При цьому, напруга зрізу на 106 кПа менша і свідчить про більшу ніжність м'яса обробленого при низькій температурі, що доповнюється кращими органолептичними оцінками зразків оброблених при 65 °C.

2. Встановлено раціональні режими гідротермічного оброблення гомілок індички для технології виробництва пастеризованих консервів, а саме 620 хв при температурі 65 °C.

3. На основі мікробіологічних досліджень доведено безпечність м'яса обробленого при встановлених температурно-часових параметрах гідротермічного оброблення.

4. Наступним етапом роботи є дослідження можливості скорочення тривалості гідротермічного оброблення при температурі 65 °C без погіршення якісних показників м'яса та безпеки готового продукту.

References

- Dominguez-Hernandez, E., Salaseviciene, A., & Erthbjerg, P. (2018). Low-temperature long-time cooking of meat: Eating quality and underlying mechanisms. *Meat Science*, 143, 104-113. doi:10.1016/j.meatsci.2018.04.032.
- Qi, J., Li, X., Zhang, W., Wang, H., Zhou, G., & Xu, X. (2018). Influence of stewing time on the texture, ultrastructure and in vitro digestibility of meat from the yellow-feathered chicken breed. *Animal Science Journal*, 89(2), 474-482. doi: 10.1111/asj.12929.
- Tornberg, E. V. A. (2005). Effects of heat on meat proteins—Implications on structure and quality of meat products. *Meat science*, 70(3), 493-508. doi:10.1016/j.meatsci.2004.11.021.
- Colak, H., Ugurluay, G., Nazli, B., Bingol, E. B. (2011). The effect of humidity absorbing filters used as packing material on the shelf life of turkey meat. *J. Fac. Vet. Med. Istanbul Uni.*, 37 (2), 107-116.
- Gálvez, F., Domínguez, R., Pateiro, M., Carballo, J., Tomasevic, I., & Lorenzo, J. M. (2018). Effect of gender on breast and thigh turkey meat quality. *British poultry science*, 59(4), 408-415. doi:10.1080/00071668.2018.1465177.
- Barbin, D. F., Badaro, A. T., Honorato, D. C., Ida, E. Y., & Shimokomaki, M. (2020). Identification of turkey meat and processed products using near infrared spectroscopy. *Food Control*, 107, 106816. doi:10.1016/j.foodcont.2019.106816.
- Okuskhanova, E., Rebezov, M., Yessimbekov, Z., Suychinov, A., Semenova, N., Rebezov, Y., & Zinina, O. (2017). Study of water binding capacity, pH, chemical composition and microstructure of livestock meat and poultry. *Annual Research & Review in Biology*, 1-7. doi:10.9734/ARRB/2017/34413.
- Vinnikova L.H., Povarova N.M., Synytsia O.V. (2020). Osnovy ptakhivnytstva ta pererobky ptytsi. Kyiv:Osvita Ukraine, 216.
- Christensen, L., Erthbjerg, P., Loje, H., Risbo, J., van den Berg, F. W., & Christensen, M. (2013). Relationship between meat toughness and properties of connective tissue from cows and young bulls heat treated at low temperatures for prolonged times. *Meat science*, 93(4), 787-795. doi:10.1016/j.meatsci.2012.12.001.
- Mortensen, L. M., Frøst, M. B., Skibsted, L. H., & Risbo, J. (2015). Long-time low-temperature cooking of beef: three dominant time-temperature behaviours of sensory properties. *Flavour*, 4(1), 1-10.
- Vaudagna, S. R., Sanchez, G., Neira, M. S., Insani, E. M., Picallo, A. B., Gallinger, M. M., & Lasta, J. A. (2002). Sous vide cooked beef muscles: effects of low temperature-long time (LT-LT) treatments on their quality characteristics and storage stability. *International journal of food science & technology*, 37(4), 425-441. doi:10.1046/j.1365-2621.2002.00581.x.
- Becker, A., Boulaaba, A., Pinggen, S., Krischek, C., & Klein, G. (2016). Low temperature cooking of pork meat—Physicochemical and sensory aspects. *Meat Science*, 118, 82-88. doi:10.1016/j.meatsci.2016.03.026.
- Osipova Yu. N., Fedinishina E. Yu. (2016) Sovershenstvovanie tehnologicheskikh parametrov resursoberegayushey termicheskoy obrabotki myasa indeyki v parokonveksionnykh apparatakh [Improvement of technological parameters of resource-saving heat treatment of turkey meat in steam convection apparatuses.]. Regionalnyi rynek potrebitelskikh tovarov: perspektivy razvitiya, kachestvo i bezopasnost tovarov, osobennosti podgotovki kadrov, 80-82 (in Russian).
- Brüggemann, D. A., Brewer, J., Risbo, J., & Bagatolli, L. (2010). Second harmonic generation microscopy: A tool for spatially and temporally resolved studies of heat induced structural changes in meat. *Food Biophysics*, 5, 1-8. doi: 10.1007/s11483-009-9137-4.

15. Zielbauer, B. I., Franz, J., Viezens, B., & Vilgis, T. A. (2016). Physical aspects of meat cooking: Time dependent thermal protein denaturation and water loss. *Food Biophysics*, 11, 34–42. doi:10.1007/s11483-015-9410-7.
16. Erbjerg, P., & Puolanne, E. (2017) Muscle structure, sarcomere length and influences on meat quality: A review. *Meat Science*, 132, 139-152. doi:10.1016/j.meatsci.2017.04.261.
17. Liu, J., Puolanne, E., & Erbjerg, P. (2014). Temperature induced denaturation of myosin: Evidence of structural alterations of myosin subfragment-1. *Meat Science*, 98, 124–128. doi:10.1016/j.meatsci.2014.05.013.
18. Berhe, D. T., Engelsen, S. B., Hviid, M. S., & Lametsch, R. (2014). Raman spectroscopic study of effect of the cooking temperature and time on meat proteins. *Food Research International*, 66, 123–131. doi:10.1016/j.foodres.2014.09.010.
19. Zhuravskaya N.K., Alekhina L.T., Opryashenkova L.M. (1985). *Issledovanie i kontrol' kachestva myasa i myasop-rodutov [Research and quality control of meat and meat products]*. Moskva: Agropromizdat (in Russian).
20. Kabulov, B. B., Kakimov, A. K., Buyanova, I. V., Mustafaeva, A. K., & Dzhilkisheva, A. G. (2014). Razrabotka metodiki opredeleniya napryazheniya sreza gotovyh produktov [Development of a methodology for determining the shear stress of finished products]. Sbornik nauchnyh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Molodye uchenye-osnova budushchego mashinostroeniya i stroitel'stva», 135-139 (in Russian).
21. Antypova L.V., Hlotova Y.A., Rohov Y.A. (2001) *Metody issledovaniya myasa i myasnykh produktov [Methods of research of meat and meat products]*. Moskva: Kolos, 376 .

TURKEY MEAT HEAT TREATMENT MODE SETTING

Synytsia O., postgraduate student
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa

The demands of the modern consumer for the quality of meat products and the intention of the producers to remain competitive are the main reason for the development of new high-quality meat products.

In most of meat production technologies, the heat treatment is a key operation. The quality parameters, sensor properties, and technical and economic characteristics of the meat products depend on the methods and parameters of heat treatment.

The selection of the temperature and time parameters of heat treatment of the meat shall be individual, taking into account the type of raw material, its physical and chemical properties and the desired properties of the finished product.

Promising raw material for high-quality meat products is turkey meat. The high biological value and dietary properties of the turkey make it possible to compete successfully with pork and beef. The significant yield of slaughtering bird and large share of the muscle tissue makes it economically attractive compared to other species of poultry.

An important problem in the use of turkey as the main raw material in the production technologies is the difficulty of dissection as a result of its morphological structure specifics. The solution to this problem may be application of pre-heat treatment with subsequent dissection of the meat and the use of boiled raw materials in the technology of pasteurized canned food.

The paper presents the studies of the influence of temperature and time modes on structural-mechanical, physico-chemical, organoleptic and microbiological parameters of the turkey thigh. A comparative evaluation of the hydrothermal meat treatment at a heating medium temperature of 65 °C and 90 °C is performed, and the positive effect of using low-temperature long-term hydrothermal treatment of product texture and eating qualities is demonstrated. The rationality of using the temperature of 65 °C for heat treatment of turkey meat is established, and its microbiological safety has been established.

Key words: turkey meat, heat treatment, denaturation, microbiota, safety.

Список використаної літератури

1. Dominguez-Hernandez, E., Salaseviciene, A. Erbjerg, P. Low-temperature long-time cooking of meat: Eating quality and underlying mechanisms. *Meat Science*. 2018. No. 143. P. 104-113. doi:10.1016/j.meatsci.2018.04.032.
2. Influence of stewing time on the texture, ultrastructure and in vitro digestibility of meat from the yellow-feathered chicken breed / Qi, J et al. *Animal Science Journal*. 2018. Vol.89, No. 2. P. 474-482. doi: 10.1111/asj.12929.
3. Tornberg, E. V. A. Effects of heat on meat proteins—Implications on structure and quality of meat products. *Meat science*. 2005. Vol. 70, No. 3. P. 493-508. doi:10.1016/j.meatsci.2004.11.021.

4. Colak, H., Ugurluay, G., Nazlı, B., Bingol, E. B. The effect of humidity absorbing filters used as packing material on the shelf life of turkey meat. *J. Fac. Vet. Med. İstanbul Uni.* 2011. Vol. 37, No. 2. P.107-116.
5. Identification of turkey meat and processed products using near infrared spectroscopy / Barbin, D. F., et al. *Food Control.* 2020. Vol. 107, No. 106816. doi:10.1016/j.foodcont.2019.106816.
6. Effect of gender on breast and thigh turkey meat quality / Gálvez, F., et al. *British poultry science.* 2018. Vol. 59, No. 4. P.408-415. doi:10.1080/00071668.2018.1465177.
7. Study of water binding capacity, pH, chemical composition and microstructure of livestock meat and poultry / Okuskhanova, E., et al. *Annual Research & Review in Biology.* 2017. P.1-7. doi:10.9734/ARRB/2017/34413.
8. Віннікова Л.Г., Поварова Н.М., Синиця О.В. Основи птахівництва та переробки птиці. Київ:Освіта України, 2020. 216 с.
9. Relationship between meat toughness and properties of connective tissue from cows and young bulls heat treated at low temperatures for prolonged times / Christensen, L., et al. *Meat science.* 2013. Vol. 93, No. 4. P. 787-795. doi:10.1016/j.meatsci.2012.12.001.
10. Long-time low-temperature cooking of beef: three dominant time-temperature behaviours of sensory properties / Mortensen, L. M., et al. *Flavour.* 2015. Vol. 4, No. 1. P. 1-10.
11. Sous vide cooked beef muscles: effects of low temperature–long time (LT–LT) treatments on their quality characteristics and storage stability / Vaudagna, S. R., et al. *International journal of food science & technology.* 2002. Vol. 37, No. 4. P. 425-441. doi:10.1046/j.1365-2621.2002.00581.x.
12. Low temperature cooking of pork meat — Physicochemical and sensory aspects / Becker, A., et al. *Meat Science.* 2016. No. 118. P.82–88. doi:10.1016/j.meatsci.2016.03.026.
13. Осипова Ю. Н., Фединишина Е. Ю. Совершенствование технологических параметров ресурсосберегающей термической обработки мяса индейки в пароконвекционных аппаратах. *Региональный рынок потребительских товаров: перспективы развития, качество и безопасность товаров, особенности подготовки кадров.* 2016. С. 80-82.
14. Second harmonic generation microscopy: A tool for spatially and temporally resolved studies of heat induced structural changes in meat / Brüggemann, D. A., et al. *Food Biophysics.* 2010. No. 5. P. 1–8. doi: 10.1007/s11483-009-9137-4.
15. Physical aspects of meat cooking: Time dependent thermal protein denaturation and water loss / Zielbauer, B. I., et al. *Food Biophysics.* 2016. No.11. P. 34–42. doi:10.1007/s11483-015-9410-7.
16. Ertbjerg, P., & Puolanne, E. Muscle structure, sarcomere length and influences on meat quality: A review. *Meat Science.* 2017. No. 132, P. 139-152. doi:10.1016/j.meatsci.2017.04.261.
17. Liu, J., Puolanne, E., & Ertbjerg, P. Temperature induced denaturation of myosin: Evidence of structural alterations of myosin subfragment-1. *Meat Science.* 2014. No. 98. P. 124–128. doi:10.1016/j.meatsci.2014.05.013.
18. Raman spectroscopic study of effect of the cooking temperature and time on meat proteins / Berhe, D. T., et al. *Food Research International.* 2014. No. 66, P. 123–131. doi:10.1016/j.foodres.2014.09.010.
19. Журавская Н.К., Алехина Л.Т., Опрятенкова Л.М. Исследование и контроль качества мяса и мясопродуктов. Москва: Агропромиздат, 1985, 296 с.
20. Разработка методики определения напряжения среза готовых продуктов / Кабулов Б. Б. и др. Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Молодые ученые-основа будущего машиностроения и строительства». 2014. С. 135-139.
21. Антипова Л.В., Глотова И.А., Рогов И.А. Методы исследования мяса и мясных продуктов. Москва: Колос, 2001. 376 с.

Отримано в редакцію 10.03.2021
Прийнято до друку 14.06.2021

Received 10.03.2021
Approved 14.06.2021

ЗАСТОСУВАННЯ АБСОРБЦІЙНОЇ ІЧ - СПЕКТРОСКОПІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ СКЛАДУ ДИМО-ПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ ГОРІННЯ ДЕРЕВИНИ ПРИ КОПЧЕННІ М'ЯСНИХ ВИРОБІВ

Ощипок І. М., д-р техн. наук, професор
Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів

В статті досліджені перспективи виявлення вмісту димо-повітряних компонентів в повітрі, що утворюються при спалюванні деревини. Розглянуті задачі з детектування слідів газоподібних речовин в локальній зоні повітряного середовища. Дане завдання відноситься до числа найбільш складних завдань газового аналізу, що обумовлюється малими концентраціями шуканих речовин і навпаки, високим вмістом сполук, що перешкоджають аналізу. Звернута увага на інтерпретації ІЧ спектрів, які полягають у тому, що враховується не тільки положення максимумів характеристичних смуг, але і на їх інтенсивності, формі, розташуванні щодо інших смуг. Про природу і кількість речовини в димо-повітряній суміші можна судити відповідно по числу і положенню піків в ІЧ-спектрах поглинання (якісний аналіз), а за інтенсивністю цих смуг - про кількість речовини (кількісний аналіз). Поліпшення чутливості і селективності методу можливе шляхом підвищення роздільної здатності приладів, а також використання різних прийомів формування та обробки аналізованого сигналу. Одним із прийомів формування аналізованого сигналу є диференційний метод. Використовуваний метод повинен бути високочутливим, точним, швидкодіючим і забезпечувати селективність виявлення складових димо-повітряної суміші, і може припускати роботу на деякій відстані. Розглянута ідея методу, яка полягає в одночасному пропусканні через димо-повітряну суміш, що знаходиться в термокамері зондуючого випромінювання на двох довжинах хвиль, перша з яких збігається з максимумом смуги поглинання досліджуваної речовини, а друга так звана опорна до неї довжина хвилі, тобто довжина хвилі близька до зондуючої, але яка не лежить в смузі поглинання. Співвідношення сигналів на виході опорного і вимірювального каналів не залежить від стабільності джерела і приймача випромінювання.

Ключові слова: копчення, суміш, димо-повітряна, ІЧ спектроскопія, м'ясні, вироби

Постановка проблеми в загальному вигляді та зв'язок із найважливішими науковими чи практичними завданнями. Копчення є важливим способом консервування м'яса. Через процес копчення м'ясні продукти втрачають частково воду, отримують специфічний запах, збільшується тривалість їх зберігання, поліпшується присмак.

В результаті дії на продукт коптильних речовин, які отримані при неповному згоранні стружки деревини, досягається стійкість м'ясопродуктів до дії гнильної мікрофлори і значно затримується дія кисню повітря на жирову тканину приготовлених м'ясних виробів. Дія коптильних речовин має бактерицидні та антиокислювальні властивості. До складу коптильного диму входять альдегіди, кетони, спирти, органічні кислоти, феноли, тощо. Концентрація елементів диму змінюється залежно від температури тління деревини, її властивості (вологості) та умов отримання диму. Якщо формування диму залежить від вологості деревини коли подається невелика кількість повітря, то виходить густа, насичена волога, темного кольору димо-повітряна суміш. При такій димо-повітряній суміші м'ясні вироби погано забарвлюються. Властивість отриманої димо-повітряної суміші на-самперед залежить від температури тління деревини, яка повинна бути забезпечена в діапазоні температур 250 – 350 °С.

Шкідлива дія на організм людини деяких речовин, полягає в накопиченні небезпечних компонентів диму: формальдегідів, які знижують активність травних ферментів, бензойної кислоти інгібуючої дію пепсину в шлунку, оцтової кислоти підвищуючої кислотність шлунково-кишкового каналу, поліциклічних ароматичних вуглеводів, маючих канцерогенні та мутагенні властивості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні застосовують деякі фізико-хімічні методи реєстрації якісного і кількісного складу димо-повітряної суміші, що утворюється при горінні деревини. До них можна віднести електрохімічні сенсори, оптичні датчики і ІЧ-спектроскопію. Методи на основі електрохімічних датчиків працюють на хімічні реакції аналізованого газу з електролітом, що приводить до виникнення заряджених йонів і електричного струму. Величина електричного струму пропорційна концентрації аналізованого компоненту в пробі. Існує два види газових датчиків, здатних виявляти домішки диму в повітряному середовищі - термохімічні і напівпровідникові. Термохімічні датчики застосовуються в основному для виявлення оксиду вуглецю (СО), але можливе їх застосування і для аналізу вмісту парів етанолу, так як вони реагують на всі горючі гази. Напівпровідникові датчики працюють за принципом зміни електричного опору деяких напівпровідникових матеріалів, що виникає в результаті адсорбції газу. При нагріванні напівпровідникового датчика до робочих температур (близько 400 °С) за допомогою нагрівальної частини, яка виконана конструктивно з сенсором, відбувається абсорбція газоподібної контрольованої речовини яка міститься в

повітрі на поверхні чутливого шару датчика, що має дрібнозернисту структуру. Ступінь абсорбції залежить від концентрації домішки в газі. В результаті поверхневих ефектів змінюється електрична провідність сенсора, тобто відгук датчика проходить через зміну опору залежно від концентрації газу, що змінює ступінь абсорбції на матеріалі датчика. Швидкість відгуку залежить від моделі датчика і конкретної домішки газу. До переваг напівпровідникових датчиків слід віднести їх невисоку вартість і просту схему включення. До недоліків - короткий час безперервної роботи (близько 1 року) внаслідок витрачання робочого шару, який входить у взаємодію з контрольованою речовиною, а також мала чутливість, низька селективність аналізу і достатньо високі значення температур, які не прийнятні при копченні м'ясних виробів. Робота оптичних датчиків відбувається на залежності ряду оптичних властивостей середовища, таких як коефіцієнт заломлення, коефіцієнт відображення і від концентрації кисню.

В роботах: [1, 2, 6] – описані загальні методи атомно-абсорбційного спектроскопічного аналізу і вплив диму при консервуванні м'яса, [3,4] – розглянуто застосування автоматизованих спектроскопічних засобів в ближній інфрачервоній області спектру і практичне застосування ІЧ спектроскопії, [5] – досліджено застосування ІЧ променів на відстані при проходженні через повітря, [7] – наведені дослідження ІЧ спектрів основних класів органічних сполук, [8] – показані фенольні антиоксиданти в димі вільхи під час промислового консервування м'яса, [9] – визначені мінімальні допустимі концентрації рідких фракцій диму, [10, 11] – надано інформацію про прозорість земної атмосфери і дані про хімічний склад речовин. Досліджень пов'язаних з застосуванням ІЧ-спектроскопії для виявлення складу димо-повітряної суміші при копченні не проводились.

Постановка завдання. При наявності в димо-повітряній суміші речовин з однаковими спектральними характеристиками проблема точного вимірювання якісного і кількісного складу досліджуваного середовища стає актуальною. Крім того, конструктивні і функціональні особливості оптичних і електрохімічних датчиків не дозволяють точно оцінювати концентрацію хімічних сполук, які утворюються, крім кисню і вуглекислого газу, а також вимагають наявності громіздкого обладнання для проведення досліджень. Найбільш підходящими для вирішення поставленого завдання є застосування абсорбційної ІЧ - спектроскопії, заснованої на існуванні певної функціональної залежності між концентрацією речовини в поглинаючому середовищі і одним з параметрів, що характеризує спектральну лінію поглинання [1]. Даний метод позбавлений недоліків вищеописаних способів, крім того він є безконтактним. ІЧ-випромінювання яке проходить через речовину поглинається на частотах, що збігається з власними коливальними і обертальними частотами молекул і коливань кристалічної решітки. В результаті інтенсивність інфрачервоного випромінювання на цих частотах падає - утворюються смуги поглинання. Даний метод проілюструємо на виявленні етанолу в димо-повітряній суміші при спалюванні деревини.

Виклад основного матеріалу дослідження. Довжина хвилі для кожного коливання залежить від того які атоми в ньому беруть участь, тобто для кожної функціональної групи характерні коливання певної довжини хвилі. За інфрачервоними спектрами поглинання можна встановити будову молекул різних органічних і неорганічних речовин з відносно короткими молекулами: антибіотиків, ферментів, алкалоїдів, полімерів та інших. Про природу і кількість речовини в димо-повітряній суміші можна судити відповідно по числу і положенню піків в ІЧ-спектрах поглинання (якісний аналіз), а за інтенсивністю цих смуг - про кількість речовини (кількісний аналіз). На рис. 1, 2 представлені інфрачервоні спектри поглинання етанолу (C_2H_5OH) і аміаку (NH_3), який міститься в димо-повітряній суміші.

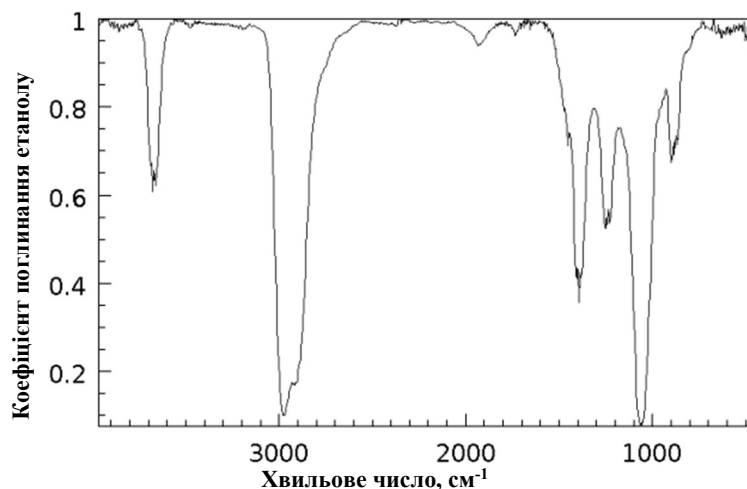


Рис.1 – ІЧ-спектри поглинання етанолу

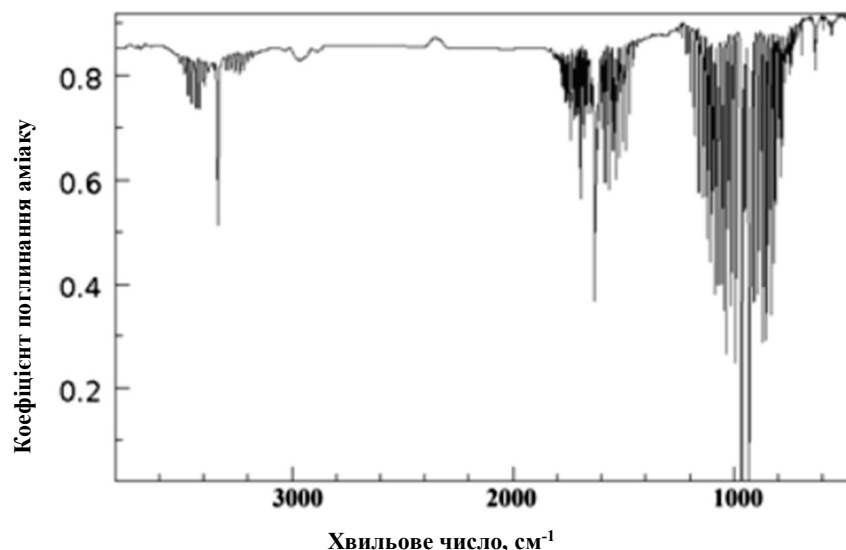


Рис.2 – ІЧ-спектри поглинання аміаку

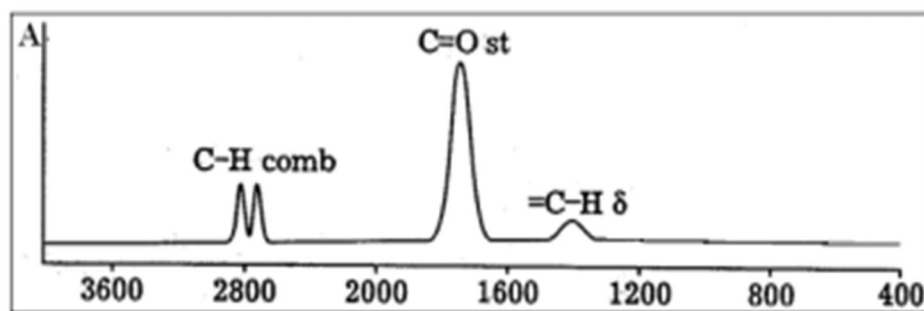


Рис. 3 – Графік ІЧ спектру альдегіду

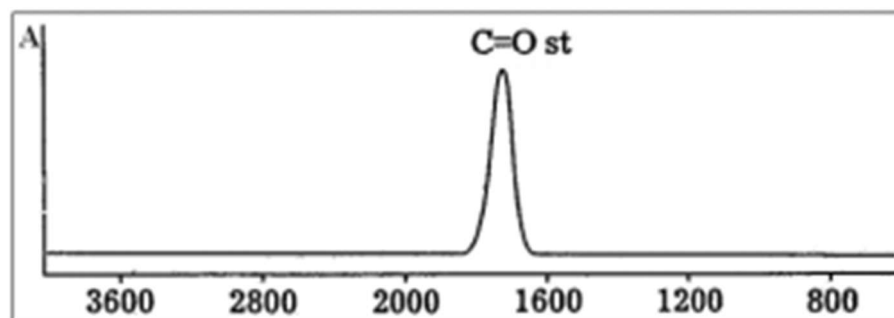


Рис. 4 – Графік ІЧ спектру кетону

На рис. 1 і 2 представлені інфрачервоні спектри поглинання етанолу (C_2H_5OH) та аміаку (NH_3) відповідно. З рисунків видно, що характеристичні смуги поглинання етанолу в ближньому ІЧ-спектрі лежать в області від 3600 до 3000 cm^{-1} (що відповідає діапазону довжин хвиль від 2,77 до 3,33 μm), а аміаку - від 3800 до 3550 cm^{-1} (від 2,6 до 2,81 μm). Для дослідження складу складних газових сумішей, до яких можна віднести димо-повітряну суміш, однією з головних проблем є вибір найбільш інформативної ділянки для аналізу спектра. Димо-повітряна суміш, містить значну кількість летких хімічних сполук, причому наявний вміст у ній молекул H_2O , CO і CO_2 досить великий і може заважати аналізу. Тому важливими критеріями при виборі оптимальної довжини хвилі для дослідження є її інтенсивність, а також розташування її в так званих «вікнах прозорості» в спектрах пропускання H_2O , CO і CO_2 атмосферних газів.

Ідея методу полягає в одночасному пропусканні через димо-повітряну суміш, що знаходиться в термокамері зондуючого випромінювання на двох довжинах хвиль, перша з яких збігається з максимумом смуги поглинання досліджуваної речовини, а друга так звана опорна до неї довжина хвилі, тобто довжина хвилі близька до зондуєчої, але не лежить в смузі поглинання. У досліджуваному об'єкті димо-повітряної суміші втрати на розсіювання обох довжин хвиль будуть приблизно однаковими, а зниження інтенсивності відбитого випромінювання однієї з хвиль буде залежати від концентрації контрольованої речовини. Поглинання

випромінювання в газі опишемо законом Бугера - Ламберта [4], згідно з яким щільність потоку енергії оптичного випромінювання, що пройшов через середовище яке досліджується змінюється за експоненціальним законом:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_a(\lambda)d}, \quad (1)$$

де I_0 – щільність потоку випромінювання, який подається на поглинаюче середовище товщиною d , Вт/м²;

I – щільність потоку випромінювання, що пройшов через поглинаюче середовище, Вт/м²;

$\mu_a(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт поглинання випромінювання, см⁻¹.

Для виключення впливу на результат вимірювання розсіюючих властивостей середовища, нестабільності джерела випромінювання та іншого запропонована двохвильова схема. Довжина хвилі другого (опорного) каналу не збігатиметься зі смугою поглинання контрольованої речовини, але знаходитиметься близько до неї. Співвідношення сигналів на виході опорного і вимірювального каналів не залежить від стабільності джерела і приймача випромінювання. Якщо опромінювати димо-повітряну суміш на опорний і вимірювальний довжинах хвиль, то пройшовши через неї потоки відповідно будуть рівні

$$I_{\lambda_0} = k \cdot I_0 \cdot e^{-\mu_a(\lambda_0)d} \quad (2)$$

$$I_{\lambda_u} = k \cdot I_0 \cdot e^{-\mu_a(\lambda_u)d - \mu'_a(\lambda_u)d} \quad (3)$$

де k – коефіцієнт передачі оптичного каналу, що враховує втрати енергії в ньому, посилення електронної схеми, чутливість приймача випромінювання,

$\mu_a(\lambda_0)$, $\mu_a(\lambda_u)$ – коефіцієнти ослаблення випромінювання від джерела до приймача випромінювань;

$\mu'_a(\lambda_u)$ – коефіцієнт поглинання парів досліджуваної речовини в повітрі, що утворюється в його смузі поглинання.

Оскільки, $\lambda_u \cong \lambda_0$ то, $\mu_a(\lambda_u) \cong \mu_a(\lambda_0)$ логарифм відношення реєстрованих сигналів буде мати наступний вигляд:

$$\ln(I_{\lambda_u} / I_{\lambda_0}) = -d \cdot \mu'_a(\lambda_u) \quad (4)$$

Коефіцієнт поглинання пов'язаний з концентрацією поглинаючого диму. Згідно із законом Бера - кожна молекула або атом незалежно від відносного розташування інших молекул або атомів поглинає одну і ту ж частку енергії випромінювання, тобто

$$\mu'_a = A \cdot C_p \quad (5)$$

де A – молярний коефіцієнт поглинання, що характеризує поглинальні властивості речовини. Має розмірність л моль⁻¹ см⁻¹;

C_p – концентрація шуканої речовини, моль/л,

Отже:

$$C_p = -\frac{\ln(I_{\lambda_u} / I_{\lambda_0})}{d \cdot A_{\lambda_u}} \quad (6)$$

Фізичний зміст A полягає в тому, що якщо прийняти $C_p = 1$ моль/л і $d = 1$ см, то молярний коефіцієнт поглинання дорівнюватиме оптичній щільності одномолярного розчину (D) при товщині шару 1 см. Величина A залежить від довжини хвилі світла, що проходить, природи світлопоглинальної речовини і температури і не залежить від концентрації шуканої речовини, товщини поглинаючого шару і інтенсивності випромінювання. Оптична щільність дорівнює десятковому логарифму відношення потоку випромінювання I_0 , що падає на прошарок димо-повітряної суміші, до ослабленого в результаті поглинання і розсіяння потоку I_u , який пройшов через цей прошарок:

$$D = \lg(I_0 / I_u). \quad (7)$$

Монохроматична оптична щільність прошарку не розсіюючого середовища (без урахування поправок на відбивання від передньої і задньої границі прошарку) дорівнює:

$$D = 0,4343 \cdot A \cdot C_p \cdot d \quad (8)$$

В інфрачервоних спектрах оптична щільність поглинання етанолу лежить в області від 2,73 до 3,33 мкм (рис. 5.).

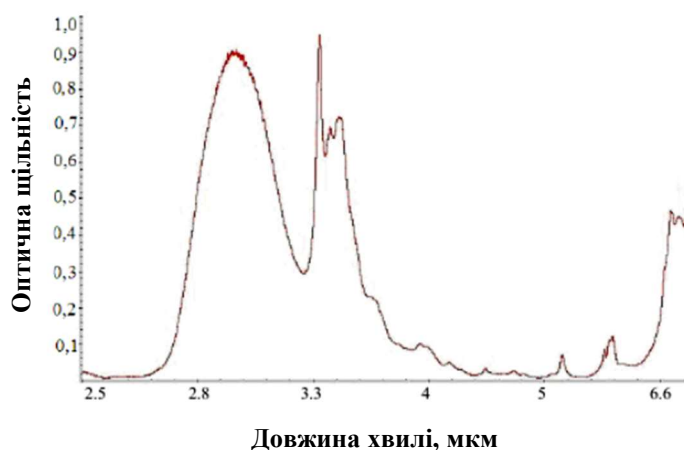


Рис. 5 – Оптична щільність поглинання етанолу

вході і виході оптичної системи матимуть вигляд:

$$U_{\lambda u} = U_{\lambda u} \pm \xi_m \quad (9)$$

$$U_{\lambda 0} = U_{\lambda 0} \pm \xi_m \quad (10)$$

де – $U_{\lambda u}, U_{\lambda 0}$ – сигнали на вході і виході оптичної системи при λ_u і λ_0 відповідно;

ξ_m – випадкова величина, що характеризує шуми в приймально-передавальних каналах.

Отже, для успішної реєстрації величини концентрації речовин в димо-повітряній суміші, необхідно забезпечити наступне співвідношення:

$$\frac{1/D}{\xi_m} < 1 \quad (11)$$

Таке співвідношення досягається при дослідженні спалювання деревини при копченні м'ясних виробів.

Висновки. Рішення завдання з виявлення вмісту димо-повітряних компонентів в повітрі, що утворюються при спалюванні деревини, зводиться до задачі з детектування слідів газоподібних речовин в локальній зоні повітряного середовища. Дане завдання відноситься до числа найбільш складних завдань газового аналізу, що обумовлено малими концентраціями шуканих речовин і навпаки, високим вмістом сполук, що перешкоджають аналізу.

При інтерпретації ІЧ спектрів важливо звертати увагу не тільки на положення максимумів характеристичних смуг, але і на їх інтенсивності, формі, розташуванню щодо інших смуг. Поліпшення чутливості і селективності методу можливо шляхом підвищення роздільної здатності приладів, а також використання різних прийомів формування та обробки аналізованого сигналу. Одним із прийомів формування аналізованого сигналу є диференційний метод.

Аналогічно до описаного методу виявлення етанолу в димо-повітряній суміші виявляються й інші її компоненти, які цікавлять з точки зору правильності проведення копчення м'ясних продуктів, а саме рівень і величина наявності в димо-повітряній суміші формальдегідів, бензойної кислоти, оцтової кислоти, поліциклічних ароматичних вуглеводів, маючих канцерогенні та мутагенні властивості.

References

1. Britske, M.E. (1982). *Atomno-absorbtsionnyy spektrokhimicheskiy analiz [Atomic absorption spectrochemical analysis]*. M.: Khimiya. 224 (in Russian)
2. Bal'-Prylypko, L.V. (2010). *Tekhnolohiya zberihannya, konservuvannya ta pererobky m'yasa [Technology of meat storage, canning and processing: textbook]*. Kyiv (in Ukrainian).
3. Dubyahin, B.V. & Zhylyakov, D.V. (2018). Udoskonalennya pidkhodiv do zastosuvannya avtomatyzovanykh spektroenergetychnykh zasobiv v blyzhiy infrachervoniy oblasti spektru [Improvement of approaches to the use of automated spectral energy tools in the near infrared region of the spectrum]. *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya «Teoretychni ta prykladni aspekty rozvytku nauky»*. (pp. 23-26). Kyiv (in Ukrainian).
4. Kross, A. (1961). *Vvedeniye v prakticheskuyu infrakrasnyuyu spektroskopiyu [Introduction to practical infrared spectroscopy]*. M.: Izdatel'stvo inostrannoy literatury (in Russian).
5. Levitskaya, Ye.A. (2011). *Razrabotka sistemy skrytoy otsenki psikhofiziologicheskogo sostoyaniya sub'yekta [Development of a system of hidden assessment of the psychophysiological state of the subject]*. *Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. (188-191). Tomsk (in Russian).
6. Mezenova, O.YA., Kim, I.N. & Bredimkhin, S.A. (2011). *Proizvodstvo kopchenykh pishchevykh produktov [Production of smoked food products]*. M.: Kolos (in Russian).

7. Tarasevich, B.N. (2012). IK spektry osnovnykh klassov organicheskikh soyedineniy [IR spectra of the main classes of organic compounds]. *Spravochnyye materialy*. M.: MGU (in Russian).
8. Kjallstrand, J., and G. Petersson. (2001). *Phenolic antioxidants in alder smoke during industrial meat curing*. Food Chemistry 74:85-89.
9. Milly, P.J., R.T. Toledo, and S. Ramakrishnan. (2005). *Determination of the minimum inhibitory concentrations of liquid smoke fractions*. J. Food Sci. 70(1):M12-M17.
10. Prozrachnost' zemnoy atmosfery. URL:: http://femto.com.ua/articles/part_2/3115.html.– (data zvernennya 12.08.2021).
11. NIST Chemistry WebBook. URL:: <http://webbook.nist.gov>.– data zvernennya 12.08.2021).

APPLICATION OF ABSORPTION IR SPECTROSCOPY TO DETECT THE COMPOSITION OF THE SMOKE-AIR WOOD BURNING MIXTURES AT SMOKING MEAT PRODUCTS

Oshchypok I.M., Dr. Sci. Tech., Professor
Lviv trade and economic University, Lviv, Ukraine

The article investigates the prospects of detecting the content of smoke-air components in the air formed during wood combustion. Problems of detecting traces of gaseous substances in the local zone of the air environment are considered. This task is one of the most difficult tasks of gas analysis, due to the low concentrations of the desired substances and, conversely, the high content of compounds that interfere with the analysis. Attention is paid to the interpretation of IR spectra, which consists in taking into account not only the position of the maxima of the characteristic bands, but also their intensity, shape, location relative to other bands. The nature and quantity of a substance in a smoke-air mixture can be judged by the number and position of peaks in the IR absorption spectra, respectively, and by the intensity of these bands by the quantity of the substance (quantitative analysis). Improving the sensitivity and selectivity of the method is possible by increasing the resolution of the devices, as well as the use of various techniques for generating and processing the analyzed signal. One of the methods of forming the analyzed signal is the differential method. The method used must be highly sensitive, accurate, fast and provide selectivity for the detection of components of the smoke-air mixture, and may involve work at some distance. The idea of the method is considered, which consists in simultaneous passage through the smoke-air mixture located in the thermal chamber of probing radiation at two wavelengths, the first of which coincides with the maximum absorption band of the test substance, and the second so-called reference wavelength. the wave is close to the probe, but which does not lie in the absorption band. The ratio of signals at the output of the reference and measuring channels does not depend on the stability of the source and receiver of radiation.

Keywords: smoking, mixture, smoke-air, IR spectroscopy, meat, products

Список використаної літератури

1. Брицке М.Э. Атомно-абсорбиционный спектрохимический анализ. М.: Химия, 1982. 224 с.
2. Баль-Прилипка Л.В. Технологія зберігання, консервування та переробки м'яса: підручник. Київ, 2010, 469 с.
3. Дубягін Б.В., Жилияков Д.В. Удосконалення підходів до застосування автоматизованих спектродіагностичних засобів в ближній інфрачервоній області спектру. Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні та прикладні аспекти розвитку науки». Київ, 11-12 грудня. 2018, С. 23-26.
4. Кросс А. Введение в практическую инфракрасную спектроскопию. М.: Издательство иностранной литературы, 1961, 111 с.
5. Левитская Е.А. Разработка системы скрытой оценки психофизиологического состояния субъекта. Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2011, С. 188-191.
6. Мезенова О.Я., Ким И.Н., Бредимхин С.А. Производство копченых пищевых продуктов. М.: Колос, 2011, 208 с.
7. Тарасевич Б.Н. ИК спектры основных классов органических соединений. *Справочные материалы*. М.: МГУ, 2012, 55с.
8. Kjallstrand, J., and G. Petersson. Phenolic antioxidants in alder smoke during industrial meat curing. *Food Chemistry*, 2001, 74, С. 85-89.
9. Milly P.J., R.T. Toledo, Ramakrishnan S. *Determination of the minimum inhibitory concentrations of liquid smoke fractions*. J. Food Sci., 2005, 70(1), M12-M17.
10. Прозрачность земной атмосферы. URL:: http://femto.com.ua/articles/part_2/3115.html.– (дата звернення 12.08.2021).
11. NIST Chemistry WebBook. URL:: <http://webbook.nist.gov>.– (дата звернення 12.08.2021).

Отримано в редакцію 12.03.2021
Прийнято до друку 02.07.2021

Received 12.03.2021
Approved 02.07.2021

КІНЕТИКА ТА ЕНЕРГЕТИКА ПРОЦЕСІВ ЕКСТРАГУВАННЯ З ДЕРЕВИНИ ДУБА В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ

Акімов О.В., аспірант, Молчанов М.Ю., магістр,
Войтенко О.К., канд. техн. наук, доцент,
Бурдо О.Г. проф., д-р. техн. наук, професор
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

У статті розглянутий новий перспективний метод екстрагування з використанням електромагнітних технологій. Надані переваги методу екстрагування у електромагнітному полі перед традиційним методами.

Головною проблемою традиційних технологій є неповнота вилучення цільових компонентів та тривалість процесу екстрагування. Розглянуто можливості та перспективи використання дубових екстрактів у різних галузях промисловості. Сформульовано головне науково-технічне протиріччя процесу екстрагування. Запропонована гіпотеза екстрагування у електромагнітному полі.

Приводиться методика дослідження та детальний опис установок, на яких проводилися експериментальні дослідження. Приведені параметри, при яких проводилися експериментальні дослідження. Представлені порівняння термограм, зміни коефіцієнтів світлопропускання та витрат електроенергії п'ятьох серій експериментів, де екстрагентом виступала вода, проведено їх аналіз. Представлені дані щодо концентрації сухих речовин у отриманих екстрактах.

Проведено серію експериментальних дослідження з екстрагування дубової деревини етиловим спиртом, представлені термограми процесів та зміни коефіцієнта світлопропускання. Проведено порівняння концентрації сухих речовин у отриманих екстрактах.

Запропонована інноваційна технологія отримання вискоекстрактивних вин з використанням МХ технологій та дубової деревини, як альтернатива витримки в дубових бочках. Дана коротка органолептична характеристика отриманих екстрактів та вискоекстрактивних вин.

Доведена гіпотеза о можливості отримання поліекстрактів при використанні розчинника із полярними молекулами та в умовах мікрохвильового поля. Підтверджено дію механодифузійного ефекту. Визначено, що вихід цільових компонентів у МХ екстракторах в 2,5...5 разів вищий, ніж у традиційних при зниженні енергетичних витрат у 1,5...2 рази.

Визначено, що найбільш привабливими є плівкові та циркуляційні екстрактори, вони мають переваги щодо отримання якісних поліекстрактів з дубової деревини, з більш повним вилученням компонентів та перспективами промислового впровадження.

Ключові слова: екстрагування, електромагнітне поле, кінетика, енергетика, дубова деревина.

Вступ

Перспективним методом отримання екстрактів з рослинної сировини у різних галузях промисловості є використання електромагнітних технологій. Такі технології активно вивчаються. Однією з переваг електромагнітних технологій перед традиційними є те, що процес може проводитись при більш низьких температурах, що виключає деградацію термолабільних компонентів сировини та дозволяє суттєво скоротити тривалість процесу екстрагування. А використання в якості екстрагенту полярних розчинників дозволяє вилучити такі компоненти, які традиційні технології без використання додаткових етапів підготовки сировини не здатні.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми

В промисловості екстрагування є одним з головних технологічних процесів переробки сировини. А повнота вилучення цільових компонентів та тривалість процесу – є ключовими факторами, що впливають на якість кінцевих екстрактів, витрати енергії, та економічні показники. Традиційні технології отримання екстрактів не можуть задовольнити ці потреби. Як відомо, вплив високих температур погіршує смак і аромат продуктів, сприяє окисленню або руйнування біологічно активних речовин, таких як вітаміни, поліненасичені жирні кислоти, пігменти [1]. А екстрагування за традиційними методами проводиться при відносно високих температурах, які можуть спричинити руйнування цільових компонентів сировини. Значна тривалість процесу екстрагування сприяє підвищеним витратам електроенергії та коштів на процес виробництва екстрактів. Неповнота вилучення цільових компонентів з сировини і неповна переробка вторинної сировини негативно впливає на довкілля та економічні показники.

Значимість процесу екстрагування пояснюється його здатністю забезпечити практично вичерпне вилучення екстрагованих речовин при невисокій температурі, що є запорукою отримання витягів високої якості. Тому, в промисловість поступово почали впроваджувати електрофізичні методи обробки харчових продуктів: струми ВЧ і НВЧ, електростатичне поле, ультразвук, інфрачервоне випромінювання, струми промислової частоти та ін. Використання цих способів в технологіях переробки сировини дозволяє скоротити тривалість теплової обробки, забезпечити раціональні температурні режими, знизити питомі витрати енергії, що в свою чергу підвищує якість продукції і дає значний економічний ефект [2]. Серед вищезазначених способів, особливу популярність поступово набирає надвисокочастотна (НВЧ) енергетика, яка знайшла широке застосування в різних галузях виробництва, що обумовлено її високою ефективністю і розвитком виробництва промислових генераторів різної потужності [3]. Важливим фактором поступового переходу на використання НВЧ обробки в харчовій промисловості є перехід людства на здорове і функціональне харчування, обізнаність людства про користь споживання повноцінної і здорової їжі, споживання більшої кількості вітамінів, мінералів, антиоксидантів з продуктами харчування [4]. У зв'язку з цим розробляються і поліпшуються нові методи отримання екстрактів, які дозволяють максимально витягти всі необхідні компоненти, а також будуть екологічними.

У зв'язку із зростанням попиту на екстракти з рослинної сировини, орієнтир на здорове харчування, необхідність задовольнити харчову, фармацевтичну, косметичну, парфумерну і хімічну галузі потрібні все більші обсяги виробництва екстрактів, потрібно прискорити процес екстрагування. Традиційні методи не дозволяють в повній мірі задовольнити запити сучасного виробництва, неповнота вилучення компонентів рослинної сировини та екологічна ситуація, що склалася, ставить досить актуальною проблему дбайливого та повного використання рослинної сировини, а це, в свою чергу, підштовхує на розробку нових, більш продуктивних та енергоефективних методів отримання екстрактів [5 – 9].

У сучасній технології фітопрепаратів відомі так звані поліекстракти (поліфракційний екстракти) – препарати, які отримують з лікарської рослинної сировини декількома розчинниками послідовною екстракцією, наприклад, зі зростаючою полярністю [10].

Екстракти з дубової деревини використовуються в різних галузях промисловості: харчовій, виноробній, фармацевтичній та парфумерній. Особливу привабливість дані екстракти можуть представляти для фармацевтичної та косметичної промисловості, а також, в перспективі, для виноробної промисловості для виробництва високоекстрактивних вин, як альтернатива витримки в дубових бочках або на дубових чіпсах, та виробництва коньяків за прискореним методом. В якості використання у медицині дубовий екстракт проявляє антисептичну, протизапальну і протигрибкову дію, є антиоксидантом.

Науково-технічне протиріччя процесу екстрагування

Таким чином, температура процесу екстрагування є ключовим фактором. З одного боку – підвищення температури позитивно впливає на продуктивність екстрактора. З іншого боку підвищення температури негативно впливає на збереження цільових компонентів. У відходах різних галузях харчової промисловості залишається істотна частина функціональних компонентів, комерційна цінність яких часто перевищує вартість готового продукту. Тому, основним, ставиться завдання знайти рішення цих протиріч, отримати кінетичні та енергетичні залежності при екстрагуванні дубової деревини в умовах використання електромагнітного поля.

Гіпотеза дослідження

Основною науково-технічною гіпотезою екстрагування у електромагнітному полі є те, що використання у якості екстрагенту полярних розчинників та використання адресної доставки енергії дозволить здійснити вихід цільових компонентів з рослинної сировини у вигляді двох потоків: традиційного дифузійного, який є дуже повільним і залежить від багатьох факторів, на які складно впливати, і другого – гідродинамічного, який потужніший за дифузійний, і яким можна управляти та прискорювати. Гідродинамічний потік дозволить забезпечити вихід більшої кількості компонентів, як розчинних і слабозрозумінних так і нерозчинних, що дозволить отримати поліекстракти.

Експериментальне моделювання та методика дослідження

Для проведення експерименту в якості сировини використовували дубову деревину у виді кубиків розміром приблизно 2 на 2 см, термічно оброблених. Термічна обробка проводилася для кращого вилучення екстрактивних речовин з дубової деревини. В якості екстрагенту використовували дистильовану воду та етанол. Експерименти проводилися на чотирьох екстракційних установках. Експериментальне моделювання екстрагування за традиційним методом проводилося на водяній бані. Схеми установок, що моделюють інноваційні методи представлені на *рис. 1-3*. Замір температури проводився пірометром (FLIR TG54), витрати енергії вимірювалися електронним лічильником (Енергометр ТМ55), визначення коефіцієнту світлопропускання спектрофотометром (Spekol). Концентрацію сухих речовин отримували методом висушування певного об'єму отриманих екстрактів у сушильній шафі, замір ваги проводився на аналітичних електронних вагах високої точності.

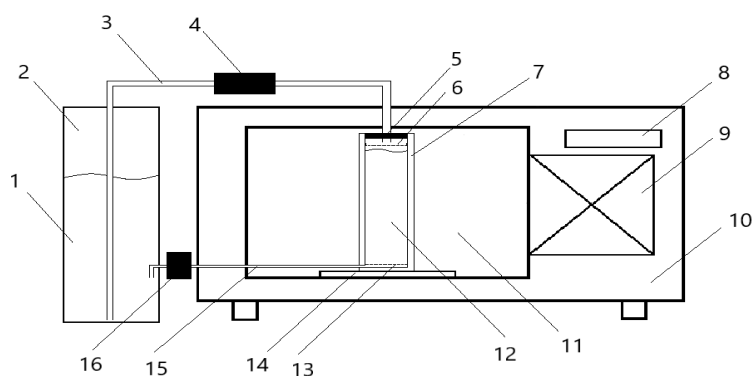


Рис. 1 – Плівковий МХ екстрактор

Плівковий МХ екстрактор складається з таких елементів: 1 – екстрагент; 2 – ємність для екстрагента; 3 – підвідний патрубок; 4 – насос; 5 – кришка реактора; 6 – пристрій для розпилення; 7 – реактор; 8 – пульт керування; 9 – магнетрон; 10 – корпус; 11 – мікрохвильова камера; 12 – сировина; 13 – фільтрувальна сітка; 14 – підставка; 15 – відвідний патрубок; 16 – кран.

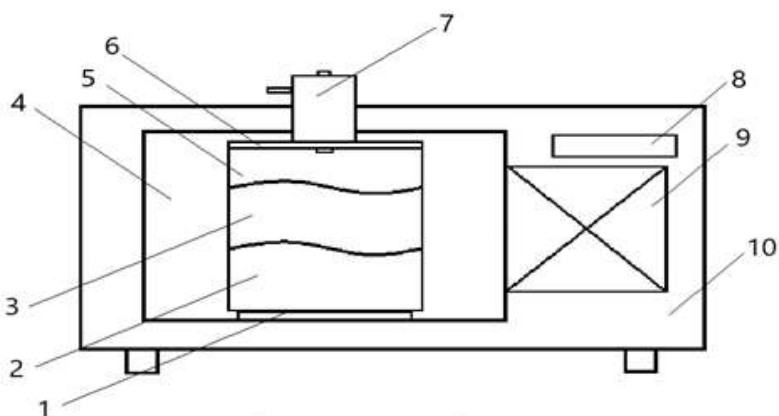


Рис. 2 – Вакуумний МХ екстрактор

Вакуумний МХ екстрактор складається з таких компонентів: 1 – підставка; 2 – сировина; 3 – екстрагент; 4 – мікрохвильова камера; 5 – ємність; 6 – кришка ємності; 7 – зворотний холодильник; 8 – пульт керування; 9 – магнетрон; 10 – корпус. Даний екстрактор дозволяє працювати як при вакуумі, так і проводити процес при атмосферному тиску.

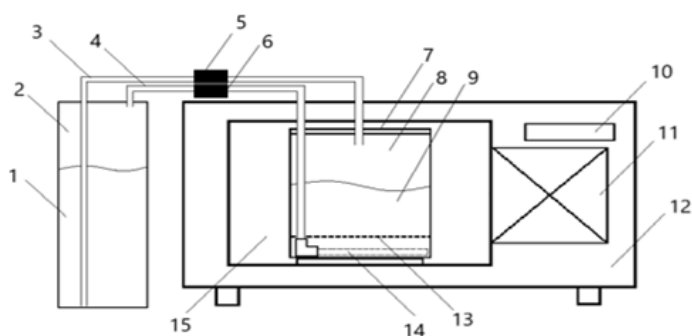


Рис. 3 – Циркуляційний МХ екстрактор

Основними вузлами циркуляційного МХ екстрактора є: 1 – екстрагент; 2 – ємність для екстрагенту; 3 – підвідний патрубок; 4 – відвідний патрубок; 5 – підвідний насос; 6 – відкачуючий насос; 7 – кришка; 8 – ємність для сировини; 9 – сировина; 10 – пульт керування; 11 – магнетрон; 12 – корпус; 13 – перфорована тefлонова підставка; 14 – фільтр; 15 – мікрохвильова камера.

Всього було проведено 5 серій експериментальних досліджень з екстрагування дубової деревини водою на чотирьох екстракційних установках та 6 серій експериментальні дослідження з екстрагування дубової деревини етиловим спиртом та червоним вином міцністю 10 % об. Параметри експериментальних досліджень представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри процесу екстрагування

№ серії.	Екстрактор	Маса деревини, г	Екстрагент	Маса екстрагенту, г	Тиск, кПа	Температура процесу, °С	Встановлена потужність, Вт	Тривалість, хв
1	Водяна баня (ВБ)	100	вода	500	100	до 50		300
2	Плівковий МХ екстрактор (ПМХЕ)	100	вода	500	100.	до 55	127	90
3	Вакуумний МХ екстрактор (ВМХЕ)	100	вода	500	15	до 55	127	30
4	МХ екстрактор (МХЕ)	100	вода	500	100.	до 55	127	30
5	Циркуляційний МХ екстрактор (ЦМХЕ)	100	вода	500	100	до 55	200	50
6	Плівковий МХ екстрактор (ПМХЕ)	140	етиловий спирт	420	100	до 60	255	16
7	Циркуляційний МХ екстрактор (ЦМХЕ)	180	етиловий спирт	540	100	до 50	255	16
8	Циркуляційний МХ екстрактор (ЦМХЕ)	180	етиловий спирт 72%	540	100	до 55	255	20
9	Плівковий МХ екстрактор (ПМХЕ)	100	червоне вино	500	100	до 40	127	36
10	Плівковий МХ екстрактор (ПМХЕ)	100	червоне вино	500	100	до 40	127	18
11	Вакуумний МХ екстрактор (ВМХЕ)	100	червоне вино	500	100	до 40	127	28

Результати експериментальних досліджень та їх обговорення. В ході проведення експериментів з екстрагування дубових кубиків водою були отримані наступні дані: термограми процесів екстрагування (рис. 5), зміна коефіцієнту світлопропускання (рис. 6), витрати енергії (рис. 7). Термограма процесів екстрагування усіх п'ятих серій експериментів представлена на *рис.5*.

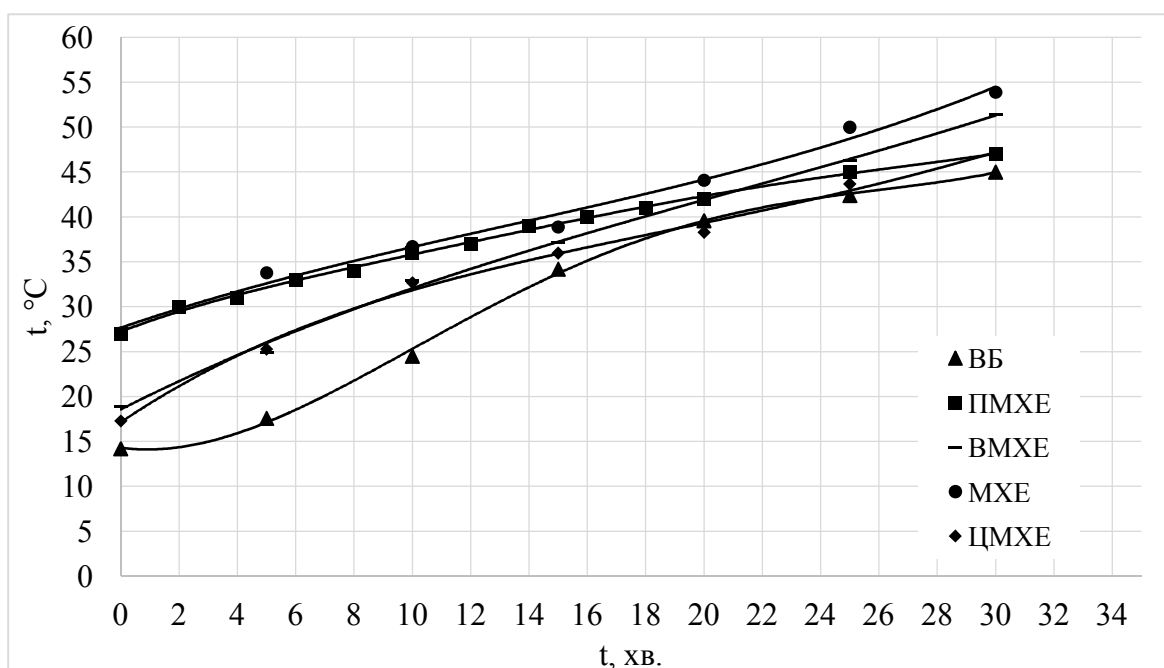


Рис. 5 – Порівняння термограм процесів при екстрагуванні водою

Данні (рис.5) свідчать, що темпи зростання температури найнижчі у ЦМХЕ, незважаючи на те, що в цих дослідках була встановлена найбільша потужність магнетронів. Тобто, в такій конструкції ефективність використання енергії вища, вірогідність організації потужних механо-дифузійних процесів більш очікувана. За циркуляційними по ефективності використанні енергії визначились плівкові екстрактори. Взагалі, в усіх конструкціях екстрагування проводилось у м'яких режимах.

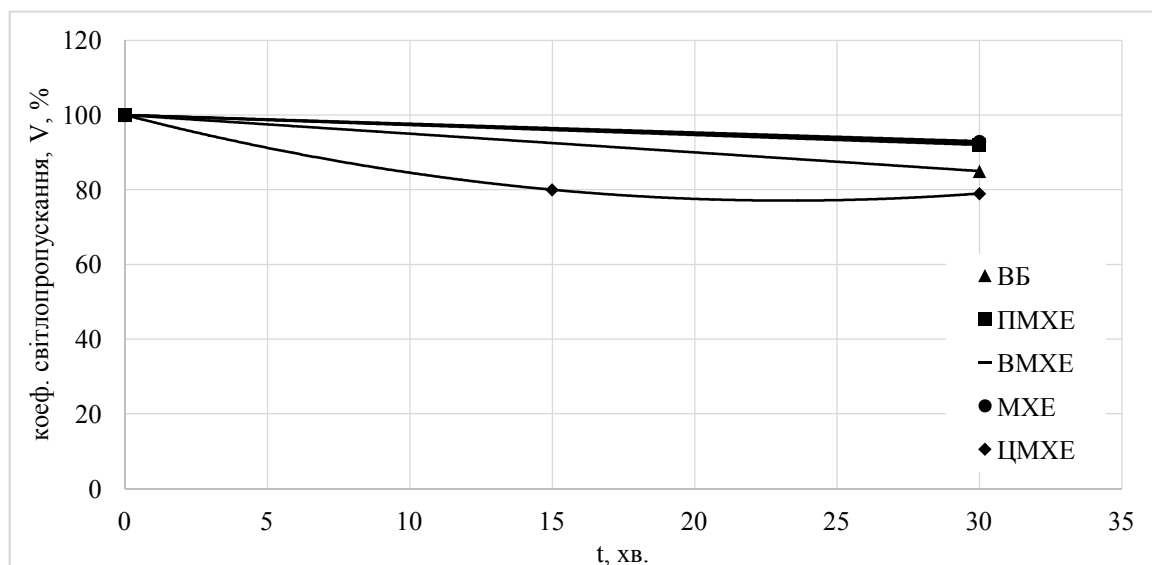


Рис. 6 – Кінетика масоперенесення за коефіцієнтом світлопропускання

Висновок із (рис.5), що у циркуляційному екстракторі повинен бути найбільш потужний механодифузійний потік підтверджує аналіз рис.6. Саме у цій конструкції визначився самий низький коефіцієнт світлопропускання. Занурення кубиків у об'єм екстракту блокувало організацію механодифузійних процесів. Ці процеси характеризувались низькими показниками коефіцієнту світлопропускання. Так, для ВМХЕ та МХЕ вони становлять – 92,5 % та 93 % відповідно рис. 6, що свідчить про те, що у екстрагент з дубової деревини перейшла дуже мала кількість екстрактивних компонентів. Отримані екстракти мали дуже слабкий аромат дубової деревини та майже не мали забарвлення.

Експеримент на водяній бані мав високу тривалість процесу – 5 годин, при цьому коефіцієнт світлопропускання становив 75 %, що значно краще за два попередні зразки. Після 60 хвилин температура процесу перейшла в усталений режим і практично не змінювалася. Не дивлячись на відносно високий показник коефіцієнту світлопропускання даний метод є дуже тривалим, що є економічно невигідним. Отриманий екстракт мав ярко виражений аромат дубової деревини і світло-коричневе забарвлення.

Що стосується циркуляційного екстрактору, то в нього найкращі показники по коефіцієнту світлопропускання у кінцевому зразку екстракту – 74 %. Отриманий екстракт мав ярко виражений, характерний аромат дубової деревини та світло-коричневе забарвлення, схоже на слабо заварений чорний чай. Наступним етапом аналізу є енергетика процесів (рис.7)

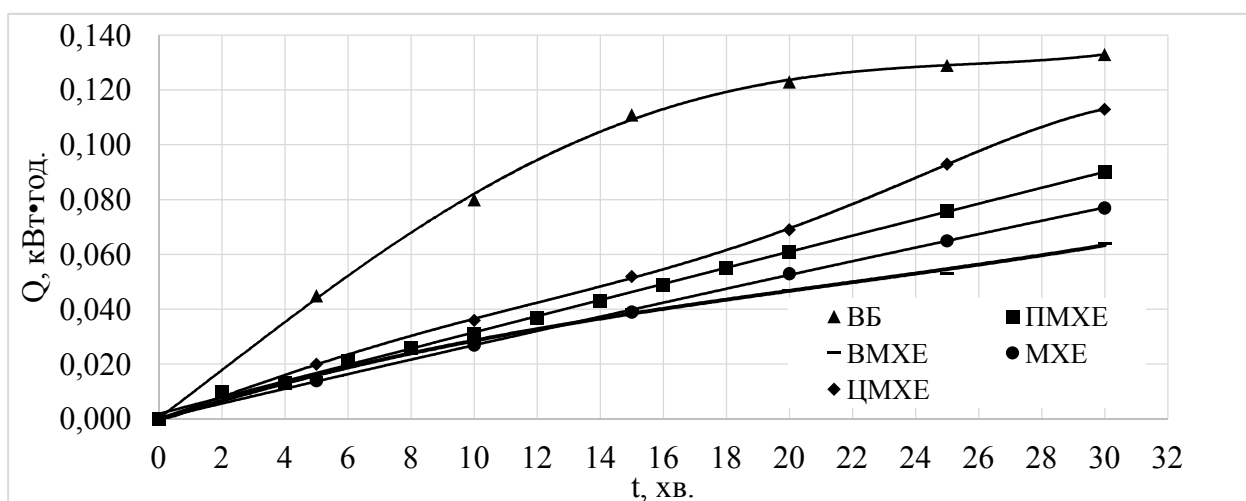


Рис. 7 – Порівняння витрат енергії

Аналіз (рис. 7) показує, що апарати із МХ генераторами мають значно нижчі витрати енергії, ніж традиційні екстрактори. Найнижчі затрати електроенергії у ВМХЕ та МХЕ. Більш високі затрати електроенергії у ПМХЕ та ЦМХЕ можна пояснити тим, що крім магнетрону, в установках додатково працюють насоси: 1

насос у ПМХЕ та 2 насоси у ЦМХЕ. Більш за те, конструкція циркуляційного екстрактору мала потужність майже вдвічі більшу.

Таким чином, для порівняння конструкцій із МХ генераторами, процеси в яких відрізнялись гідромодулем, масою твердої фази, потужністю магнетронів необхідно запропонувати загальний питомий показник, який дозволить би визначити їх ефективність. За такий показник пропонується прийняти відношення маси вилучених із твердої фази цільових компонентів до одиниці розчину у одиницю часу (рис.8).

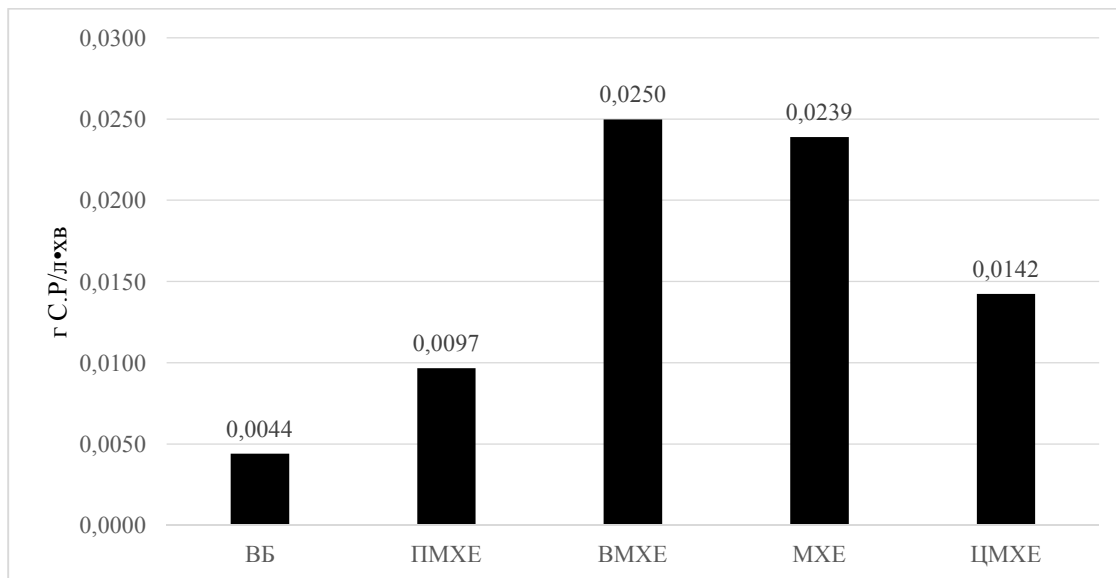


Рис. 8 – Питомі показники ефективності екстракторів

Аналіз рис.8 показує, що показники ефективності МХ екстракторів у рази перевищують ефективність традиційних конструкцій. Екстракти отримані у циркуляційних екстракторах відрізняються ярко вираженим, характерним ароматом дубової деревини та темно-коричневим кольором, кольором міцно завареного чорного чаю.

В серіях дослідів 6 – 8 (табл.1) проводилося екстрагування дубової деревини етиловим спиртом міцністю 62 об.%, (в екстракторах ПМХЕ та ЦМХЕ) та 72 об.% (в екстракторі ЦМХЕ). Температури процесу у ПМХЕ дещо вищі за температури у ЦМХЕ екстракторі (рис. 9), імовірно, це пов'язано з тим, що гідромодуль ЦМХЕ вищий за гідромодуль ПМХЕ.

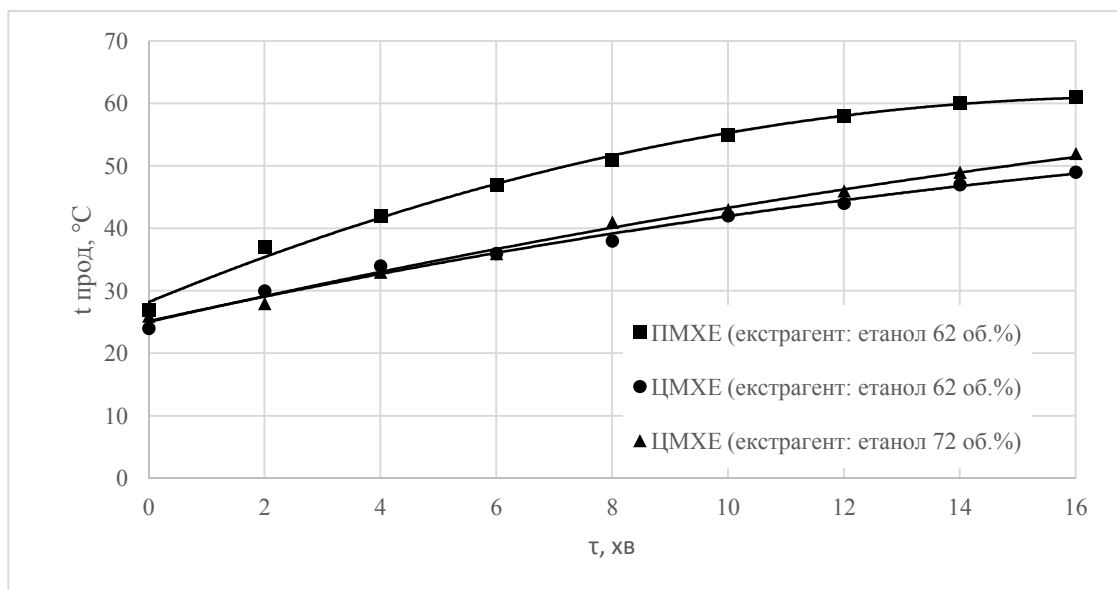


Рис. 9 – Термограми процесів екстрагування етанолом

Кінцеве значення сухих речовин у екстракті становить 3 г/л, що суттєво вище за попередні показники. Показники сухих речовин кінцевих екстрактів представлені на рис. 10.

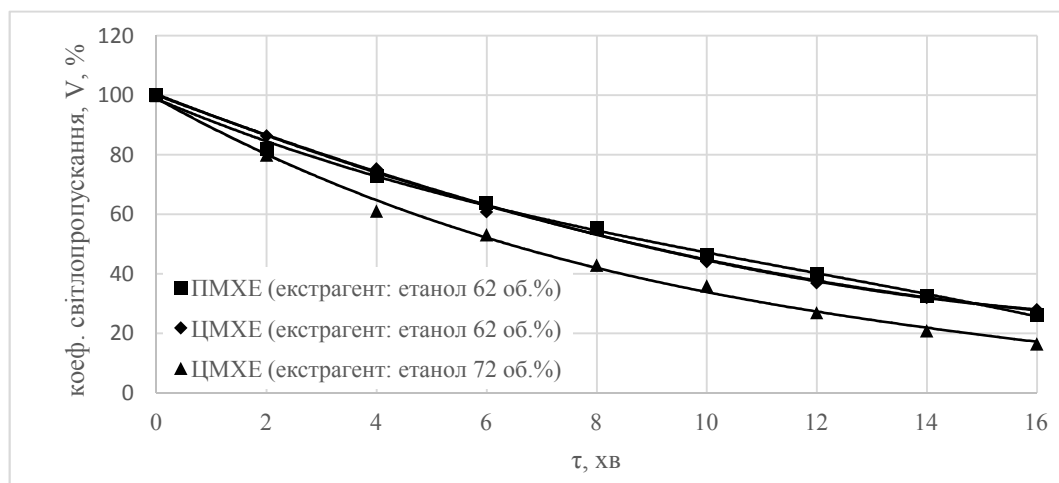


Рис. 10 – Порівняння зміни коефіцієнту світлопропускання

Отримані дані щодо зміни коефіцієнту світлопропускання (рис. 10) під час екстрагування етиловим спиртом свідчать про те, що за однаковий період часу, при однаковій потужності, з однаковим гідромодулем, ПМХЕ і ЦМХЕ показують схожі результати щодо зміни коефіцієнту світлопропускання і становлять 26,2 % та 28 % відповідно. Трохи вищий показник ЦМХЕ можна обґрунтувати тим, що кількість екстрагенту була трохи вища за ПМХЕ. Кінцеве значення сухих речовин у отриманих екстрактах на ПМХЕ та ЦМХЕ становить 2,45 г/л та 2,35 г/л відповідно. Екстракти отримані даним методом відрізняються ярко вираженим ароматом дубової деревини, колір світло-коричневий.

Слід відмітити, що при використанні в якості екстрагенту етилового спирту з більшою концентрацією – 72 об.%, коефіцієнт світлопропускання значно нижчий. В серіях 9 – 11 проведено дослідження можливості альтернативного використання дубової деревини у виноробній промисловості. Пропонується інноваційна технологія виробництва вискоекстрактивних вин з використання МХ технологій та дубової деревини. Параметри процесу екстрагування представлені в таблиці 1. Термограми процесів отримання вискоекстрактивних вин наведені на рис. 11.

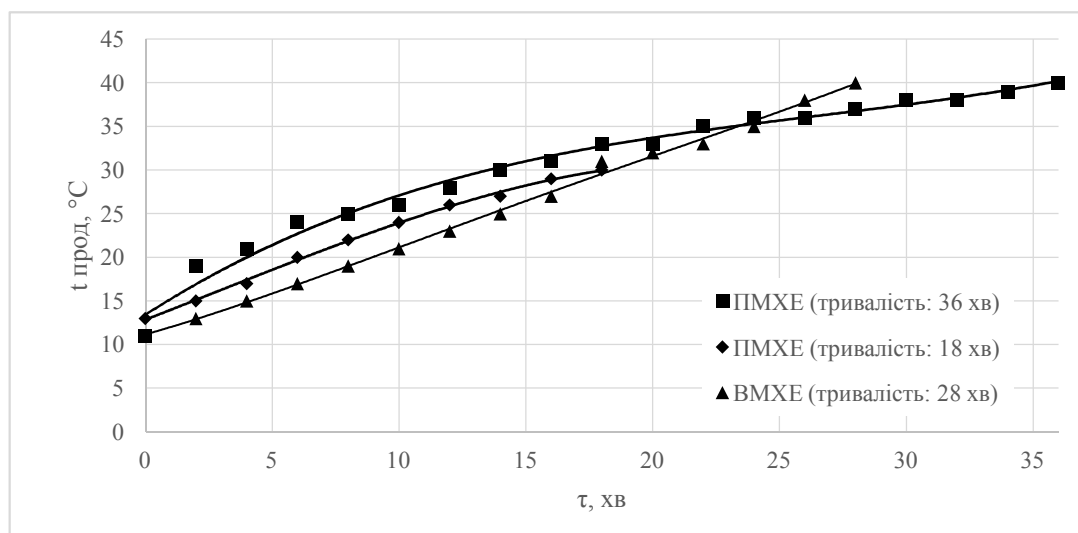


Рис. 11 – Порівняння термограм процесів отримання вискоекстрактивних вин

Аналіз рис 11., показує, що температура у всіх експериментах підвищується рівномірно і набирають приблизно однакову температуру в близьких на графіку точках. Витрати електроенергії для ПМХЕ (час 36 хв.) складають 0,116 кВт·год, для ПМХЕ (час 18 хв.) – 0,055 кВт·год, для ВМХЕ (час 28 хв.) складають – 0,07 кВт·год.

Органолептична характеристика вин. Після закінчення процесу екстрагування дубових кубиків вином, отриманим вином дали охолонути і потім провели дегустацію. Всі зразки отриманих вин не мали ярко вираженого аромату дуба, їхній смак мав ноти увареності. Надалі винам дали можливість відпочити після екстрагування для асиміляції екстрактивних речовин з дуба у вині. Вина витримували у скляних пляшках приблизно 2 тижні. Після закінчення терміну була проведена повторна дегустація.

Перший зразок вина (ПМХЕ, час 36 хв.) мав виражений тонкий ненав'язливий аромат дуба та ванілі, смак приємний, відчуваються дубильні речовини, екстрактивність, спостерігався характерний тон витримки, з'явилася округлість. Але був присутній легкий тон термообробки. Початковий зразок вина не мав вищезазначених характеристик. Другий зразок вина (ПМХЕ, час 16 хв) мав трохи кращу ароматику вина, трохи більше танінності, сильніша терпкість, загалом другий зразок, менш гармонійний у порівнянні з першим зразком. Тому було рекомендовано до подальшої витримки. Третій зразок (ВМХЕ, час 28 хв) теж мав тони дубової бочки, не гармонійний, відсутній так званий стрижень вина. Імовірно, це пов'язано з тим, що процес проводився у вакуумі, де дубова деревина знаходилася в об'ємі вина, і вино поглинало більшу частину МХ енергії, через що спирт з вина почав випаровуватися і завдяки зворотному холодильнику накопичувався на ньому і стікав у загальний об'єм вина з кубиками назад. І саме цей процес міг зруйнувати так званий стрижень вина, через що воно і відчувалось негармонійним.

Висновки. В результаті комплексних експериментальних досліджень доказана гіпотеза о можливості отримання поліекстрактів при використанні розчинника із полярними молекулами та в умовах мікрохвильового поля. За косвеними показниками (такими як: температура, концентрація екстракту, енергетичні витрати) підтверджено дію механоффузійного ефекту. Вихід цільових компонентів у мікрохвильових екстракторах в 2,5...5 разів вищий, ніж у традиційних при зниженні енергетичних витрат у 1,5...2 рази. Визначено енергетичні переваги циркуляційного екстрактору із імпульсним підведенням мікрохвильової енергії. При цьому гарантується висока якість продукту, можливість отримання поліекстрактів.

Мікрохвильові екстрактори мають перспективи в технологіях переробки рослинної сировини для отримання фіто екстрактів лікарських препаратів. Ефективні при виробництві поліекстрактів із дубової деревини. Спроможні вирішувати проблемні питання у виноробній індустрії, при створенні високо екстрактивних вин, брендів. Серед конструкцій наразі привабливими є плівкові та циркуляційні екстрактори. Такі екстрактори мають переваги щодо отримання якісних поліекстрактів з дубової деревини, з більш повним вилученням компонентів та перспективами промислового впровадження.

References

1. Burdo, O. H., Ruzhytskaia, N. V., Makarenko, T. A., & Malashevych, S. A. (2015). Kontsentrirovaniye ekstraktov stevii v mikrovolnovoy vakuum-vyparnoy ustanovke [Concentration of stevia extracts in a microwave vacuum evaporation plant]. *Scientific Works*, 47, 67–70 (in Russian). <https://doi.org/doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.401>
2. Poperechnyi, A. M. (2014). *Protsesy i aparaty kharchovykh vyrobnytstv [Processes and apparatuses of food production]*. In O. V. Bohomolova, & V. I. Maiak (eds.), Kharkiv: Svit Knyh (in Ukrainian).
3. Rakhmankulov, D. L., Shavshukova, S. Yu., & Vykhareva, Y. N. (2008). Prymenenye mykrovolnovoho yzlucheniya v pyshchevoi otrasly [Application of microwave radiation in the food industry]. *Bashkyskyi Khymycheskyi Zhurnal*, 15(1), 1–3 (in Russian).
4. Puligundla, P., Abdullah, S. A., Choi, W., Jun, S., Oh, S., & Ko, S. (2013). Potentials of Microwave Heating Technology for Select Food Processing Applications - a Brief Overview and Update. *Journal of Food Processing & Technologies*, 4(11), 1–9. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000278>
5. Burdo, O. G., Syrotyuk, I. V., Alhury, U., & Levtrinska, J. O. (2018). Microwave Energy as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polyextract Formation. *Problems of the Regional Energetics*, 36(1), 58–71. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1217259>
6. Romancova, N. A., Mandzhigoladze, T. YU., & Kuznecova, L. S. (2015). Resheniye problemy resursosberezheniya pri poluchenii ekstrakta zhidkogo iz sbora lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya [Solving the problem of resource saving when obtaining a liquid extract from the collection of medicinal plant raw materials]. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Centra Rossijskoj Akademii Nauk*, 17(5), 188–192 (in Russian).
7. Oboturova, N. P., Sudakova, N. P., Kokoeva, V. S., & Zajcev, A. S. (2013). Primenenie ekstraktov rastitel'nogo syr'ya pri proizvodstve pishchevykh produktov [The use of extracts of plant raw materials in the production of food products]. *Pishchevaya Promyshlennost'*, 6, 48–50 (in Russian).
8. Georgiesh, E.V. (2015) Intensifikaciya processa teplomassoperenosa pri ekstragirovanii biologicheski aktivnykh veshchestv iz rastitel'nykh materialov v usloviyakh dejstviya mikrovolnovogo polya [Intensification of the heat and mass transfer process during the extraction of biologically active substances from plant materials under the action of a microwave field]. dis. kand., tekhn. nauk, ONAPT (in Russian).
9. Ermolaeva, E. O., & Poznyakovskij, V. M. (2004). Razrabotka novoy promyshlennoy tekhnologii sukhikh rastitel'nykh ekstraktov [Development of a new industrial technology of dry plant extracts]. *Sovremennyye naukoemye tekhnologii*, 6, 10–13 (in Russian).
10. Chueshov V.I., Gladuh E.V, Sajko I.V. et al. (2014) Tekhnologiya lekarstv promyshlennogo proizvodstva [Technology of medicines of industrial production]. Vol. 1. Vinnytsya: Nova Kniga (in Ukrainian).
11. Kalla, A. M., & Devaraju, R. (2017). Microwave energy and its application in food industry : A reveiw Microwave energy and its application in food industry : A reveiw. *Journal of Dairying, Foods & Home Sciences*. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.v0iOF.7303>

KINETICS AND ENERGETICS OF EXTRACTION PROCESSES OF OAK WOOD IN ELECTROMAGNETIC FIELD

Akimov O.V., postgraduate student, Molchanov M.Y., graduate student, Voytenko A.K., Ph.D., associate professor, Burdo O.G., Dr. Sci. Tech., professor
Odesa national academy of food technologies, Odesa

New and perspective method of extraction with usage of electromagnetic field is reviewed. The article provides advantages of using extraction in electromagnetic field over traditional methods of extractions. The main problem of traditional extraction technologies are retrieval incompleteness of targeted components and duration of the process. The article considers possibilities and perspectives of using oak wood extracts in different industries. The main scientific and technical contradiction of extraction was formulated. New hypothesis of extraction in electromagnetic field was proposed. The article provides methodology of experimental research, detailed description of devices which were used in the study and parameters of conducted experiments where water was used as extractant. Thermograms, changing of light transmission index and electricity consumption of all five series of experimental research are given in the article. Concentration comparison of dry matter in final extracts are given. The series of experimental research of extraction of oak wood using ethyl alcohol as extractant were also conducted, the parameters of research, thermograms, changing of light transmission index, electricity consumption and comparison of concentrations of dry matter are represented in the article. Article offers new innovative technology of highly extractive wines based on usage of microwave technologies and oak wood as an alternative to wines aging in oak barrels. Short organoleptic descriptions of obtained extracts and wines are given. The hypothesis about obtaining polyextracts by using polar extractants in electromagnetic field was proved. The mechanodiffusion effect was confirmed. It was confirmed that extraction of targeted components in MW extractors is 2,5...5 times higher than in traditional methods of extraction, energy consumption is 1,5...2 times lower than in traditional ones. It was defined that film and circulating extractors have advantages in obtaining high quality polyextracts from oak wood with higher rate of extraction of targeted components and have perspectives of industry application.

Key words: extraction, electromagnetic field, kinetics, energetics, oak wood.

Список використаної літератури

1. Бурдо, О. Г., Ружицкая, Н. В., Макаренко, Т. А., та ін. Концентрирование экстрактов стевии в микроволновой вакуум-выпарной установке. *Наукові праці*. 2015. Том 47. С. 67–70.
2. Поперечний, А. М. Процеси і апарати харчових виробництв: / за ред., О. В. Богомоллова, В. І. Маяк. Харків: Світ Книг, 2014. 495с.
3. Рахманкулов, Д. Л., Шавшукова, С. Ю., Вихарева, И. Н. Применение микроволнового излучения в пищевой отрасли. *Баширский химический журнал*. 2008. Том 15, №. 1. С. 1–3.
4. Puligundla, P., Abdullah, S. A., Choi, W., та ін. Potentials of Microwave Heating Technology for Select Food Processing Applications - a Brief Overview and Update. *Journal of Food Processing & Technologies*. 2013. Vol. 4, No. 11. p. 1–9.
5. Burdo, O. G., Syrotyuk, I. V., Alhury, U., et. al. Microwave Energy as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polyextract Formation. *Problems of the Regional Energetics*. 2018. Vol. 36, No. 1. С. 58–71.
6. Романцова, Н. А., Манджиголадзе, Т. Ю., Кузнецова, Л. С. Решение проблемы ресурсосбережения при получении экстракта жидкого из сбора лекарственного растительного сырья. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015. Том. 17, №. 5. С. 188–192.
7. Оботурова, Н. П., Судакова, Н. В., Кокоева, В. С., та ін. Применение экстрактов растительного сырья при производстве пищевых продуктов. *Пищевая промышленность*. 2013. Том. 6. С. 48–50.
8. Георгиев Е.В. Интенсификация процесса тепломассопереноса при экстрагировании биологически активных веществ из растительных материалов в условиях действия микроволнового поля: дис. канд., техн. наук. Одесса, 2015. – 185 с.
9. Ермолаева, Е. О., Позняковский, В. М. Разработка новой промышленной технологии сухих растительных экстрактов. *Современные наукоемкие технологии*. 2004. №. 6. С. 10–13.
10. Технология лекарств промышленного производства: учебник для студ. высш. учеб. завед.: перевод с укр. в 2 ч. Ч. 1 ; перевод с укр. яз. / В.И. Чуешов, Е.В. Гладох, И.В. Сайко и др. Винница: Нова Книга, 2014. 696с.
11. Kalla, A. M., Devaraju, R. Microwave energy and its application in food industry : *Journal of dairying, foods & home sciences*. 2017.

Отримано в редакцію 10.03.2021
Прийнято до друку 26.06.2021

Received 10.03.2021
Approved 26.06.2021

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВАКУУМ-ВИПАРНОГО МОДУЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

Сиротюк І.В., аспірант

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Україна

Проведено аналіз досліджень впливу мікрохвильових технологій на процес випаровування. Виділено основні переваги застосування електромагнітного впливу на сировину при випаровуванні поряд з традиційними технологіями концентрування харчових розчинів.

Висвітлено один з головних недоліків існуючих дослідних стендів випарних апаратів з електромагнітним підведенням енергії, а саме періодичність дії. Визначено основні проблеми, що перешкоджають організації процесу випаровування в безперервному режимі в умовах об'ємного підведення енергії і вакууму.

На основі аналізу цих проблем запропонована конструкція мікрохвильового вакуум-випарного модуля, яка дозволяє забезпечити безперервний режим роботи без порушення герметичності системи і при відсутності витоків мікрохвильового поля протягом усього процесу концентрування.

Головне завдання даної роботи полягає в проведенні експериментальних досліджень розробленого модуля в умовах безперервної роботи. Досліди проводилися на прикладі цукрового розчину.

Концентрації початкової сировини, що поступала до модуля, і готового продукту, що вивантажувався, протягом усього процесу становили 30 °brіx і 40-42 °brіx відповідно. Тиск в системі в ході випробувань модуля залишався незмінним і знаходився в межах 0,01 МПа.

На основі отриманих результатів експериментальних досліджень можна стверджувати про працездатність розглянутої конструкції мікрохвильового вакуум-випарного модуля безперервної дії і про можливість проектування і реалізації його напівпромислового зразка.

За допомогою застосування методу компонування таких модулів надається можливість сконструювати багатоступеневу випарну установку, що в свою чергу дозволяє отримати готовий продукт будь-якої кінцевої концентрації сухих речовин без втрати якості. Крім того, подібна конструкція відрізняється достатньою легкістю в обслуговуванні через незалежність кожного модуля.

Ключові слова: випаровування, концентрування, мікрохвильові технології, моделювання, тепломасообмін.

Вступ

Вимоги сучасного суспільства до якості готового продукту неухильно ростуть. Поряд з постійним збільшенням темпу життя підвищується попит на готові до вживання харчові концентрати, що володіють високим вмістом вітамінів та інших корисних компонентів, необхідних для задоволення максимально можливої кількості поживних потреб організму людини [1-3]. Одними з найбільш вживаних продуктів харчоконцентратного виробництва є концентрати фруктових і овочевих соків [4-6]. Вищевказані якісні показники готового продукту безпосередньо залежать від технології їх отримання. Крім того, варіативність процесів концентрування обумовлює і різні рівні споживання енергоресурсів, що в свою чергу суттєво позначається на собівартості соків.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми

Серед існуючих методів концентрування харчових розчинів найбільш поширеним є випаровування, що забезпечує отримання якісного харчового концентрату при відносно невисоких витратах на обладнання [7, 8]. Досить високу популярність набувають дослідження даного процесу з використанням мікрохвильових (МВ) технологій на прикладі різних фруктових і овочевих соків: ананасу [9, 10], яблука [11], кокосу [12], гранату, винограду, моркви [13]. Подібний науковий ажіотаж обумовлюється високими якісними показниками готового продукту, оскільки при електромагнітному підводі енергії відсутня класична теплопередача, що в свою чергу унеможливує утворення прикордонного шару і, як наслідок, продукт не набуває присмаку варіння. Також, вищевказаний принцип нагріву дозволяє отримати в процесі випаровування абсолютно тверду фазу, що практично неможливо в традиційних випарних установках [14].

Однак, узагальнюючи результати, висвітлені в вищевказаних зарубіжних статтях, можна з упевненістю сказати, що представлені інноваційні випарні апарати не можуть бути використані на харчових підприємствах через малий об'єм сировини, що завантажується, відсутності вакууму і, в кінцевому підсумку, через роботу в режимі періодичної дії. Установки даного типу зумовлюють виникнення певних проблем в умовах тоннажного виробництва, оскільки харчоконцентратні підприємства більшою мірою характеризуються се-

зонною роботою, перерви якої викликані вивантаженням продукту і завантаженням сировини є неприйнятними. Організація безперервного режиму концентрування харчових розчинів за допомогою об'ємного підведення енергії в умовах вакууму є досить складним завданням. Під загрозою недотримання виявляється цілий ряд обов'язкових умов безпечної та якісної роботи системи: герметичність, ізоляція МВ поля, узгодження безперервної подачі сировини з вивантаженням готового продукту і пароутворенням. В результаті аналізу вищевказаних проблем в ОНАХТ була розроблена конструкція мікрохвильового вакуум-випарного модуля безперервної дії, який має досить високу герметичність і при належному рівні заповнення сировиною абсолютно виключає витік електромагнітного випромінювання. У даній роботі була поставлена задача провести експериментальні дослідження, що підтверджують працездатність такого модуля в режимі безперервної роботи.

Модель інноваційного модуля

Основою запропонованої конструкції модуля (рис. 1) є циліндричний корпус (3) виготовлений з радіо-непроникного металу. У корпусі є спеціальне вікно для магнетрона (6), мікрохвильова енергія якого впливає на сировину через Радіопрозорий корпус (5), виконаний з тefлону. З торцевих частин корпусу за допомогою шпильок (4) приєднані верхній (2) і нижній (7) фланці. Верхній фланець обладнаний патрубком (1) для відкачування повітря перед початком процесу випарювання, а також для виходу вторинної пари. У нижньому фланці є патрубки для безперервної подачі сировини (8) і безперервної вивантаження готового продукту (9).

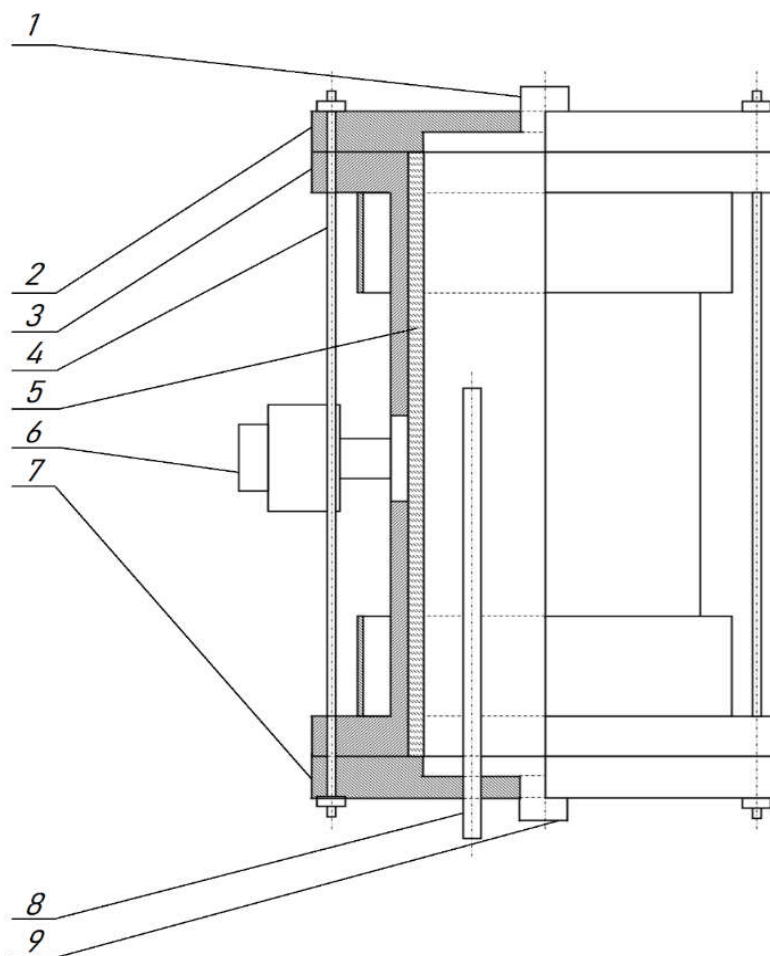
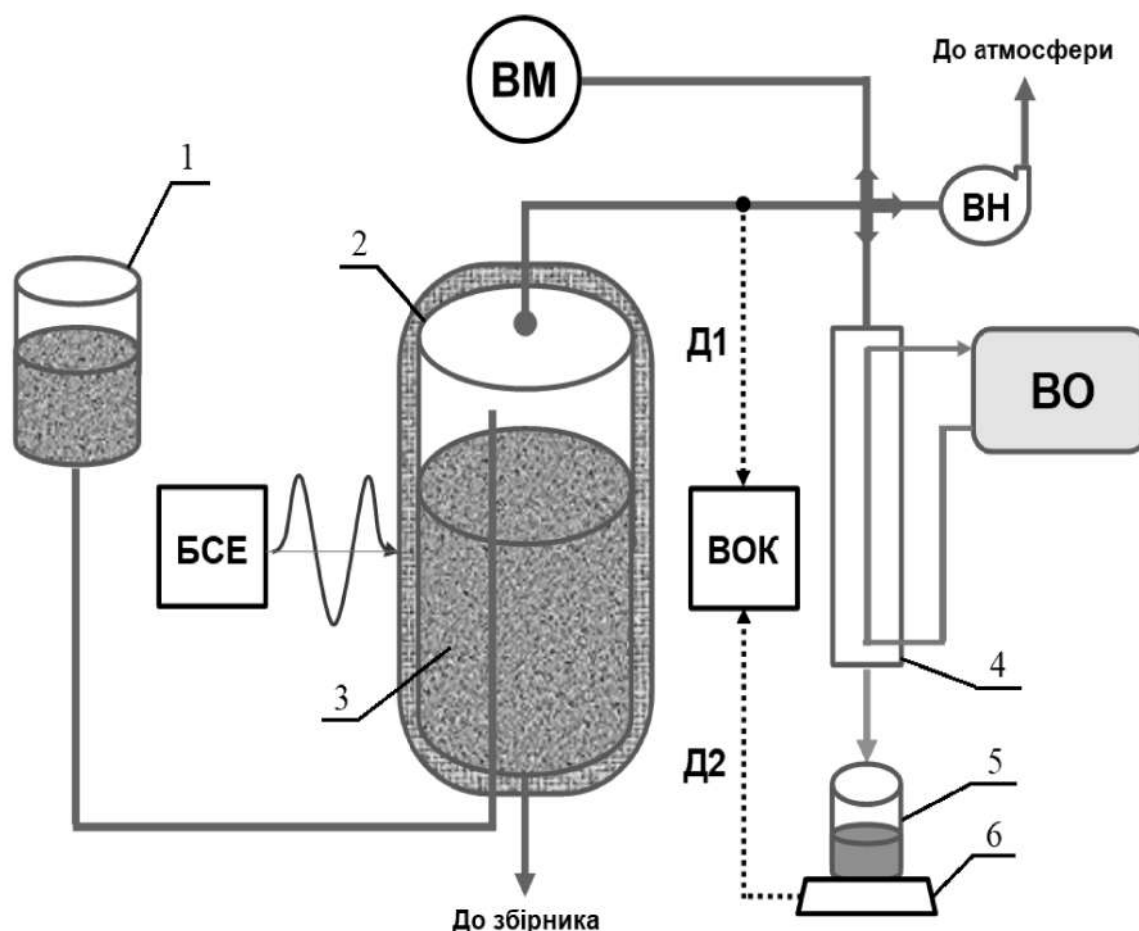


Рис. 1 – Схема запропонованої конструкції мікрохвильового вакуум-випарного модуля

Основними елементами експериментального стенду (рис. 2) є: ємність вихідного продукту (1), реакційний об'єм (2), вакуум-насос (ВН), конденсатор (4), водоохолоджувач (ВО), збірник конденсату (5) і вимірювально-обчислювальний комплекс (ВОК).



1 – ємність початкового продукту, 2 – реакційний об'єм, 2 – продукт, 4 – конденсатор, 5 – збірник конденсату, 6 – ваги, ВМ – вакуумметр, ВН – вакуум-насос, ВО – водоохолоджувач, БСЕ – блок силової електроніки, ВОК – вимірювально-обчислювальний комплекс, Д1 – сигнал температури пари, Д2 – сигнал електронних ваг.

Рис. 2 – Схема експериментального стенду для дослідження МХ вакуум-випарного модуля

Реакційний обсяг за допомогою паропроводу з'єднаний з конденсатором. Контроль вакууму в системі здійснюється за допомогою зразкового вакуумметра. Блок силової електроніки за сигналами блоку управління, що складається з регулятора потужності і таймера, організовує підведення електромагнітної енергії до продукту. Водоохолоджувач працює за таким же принципом, як і в схемі з МВ ВВУ періодичної дії [15]. Поточні показання вимірювача температури пари на виході (Д1) і електронних ваг (6) через інтерфейс надходять на процесор ВОК для подальшої обробки. В якості вимірювальних приладів були використані: електронні ваги ТВЕ-0,21-0,01 і датчик температури Dallas DS 18B20. Збір інформації здійснювався за допомогою планшета CHUWI CW1506. Програма реєстрації та обробки даних була реалізована на базі SCADA-системи Simp Light.

Випробування модуля в режимі безперервної роботи

Режим безперервної роботи є ефективним для умов тоннажного виробництва. Дослідження проводилися при рівні потужності, що підводиться, в 600 Вт і мінімальному тиску (10 кПа). В якості вихідної сировини був використаний цукровий розчин з початковою концентрацією 30°Brix. Протягом всього процесу підтримувався постійний рівень продукту 2,2 л.

Вирішення поставленого завдання лежить у чіткому узгодженні матеріальних потоків: надходження сировини дорівнює сумі потоків готового продукту і конденсату.

Циклічне надходження сировини і відведення концентрату є допустимим за умови безперервного відведення та конденсації парів розчинника. Оптимізація управління цими процесами є самостійною задачею, як в теоретичному аспекті, так і при технічній реалізації системи такого регулювання. Представлені залежності (рис. 3, 4) отримані при ручному регулюванні витрат.

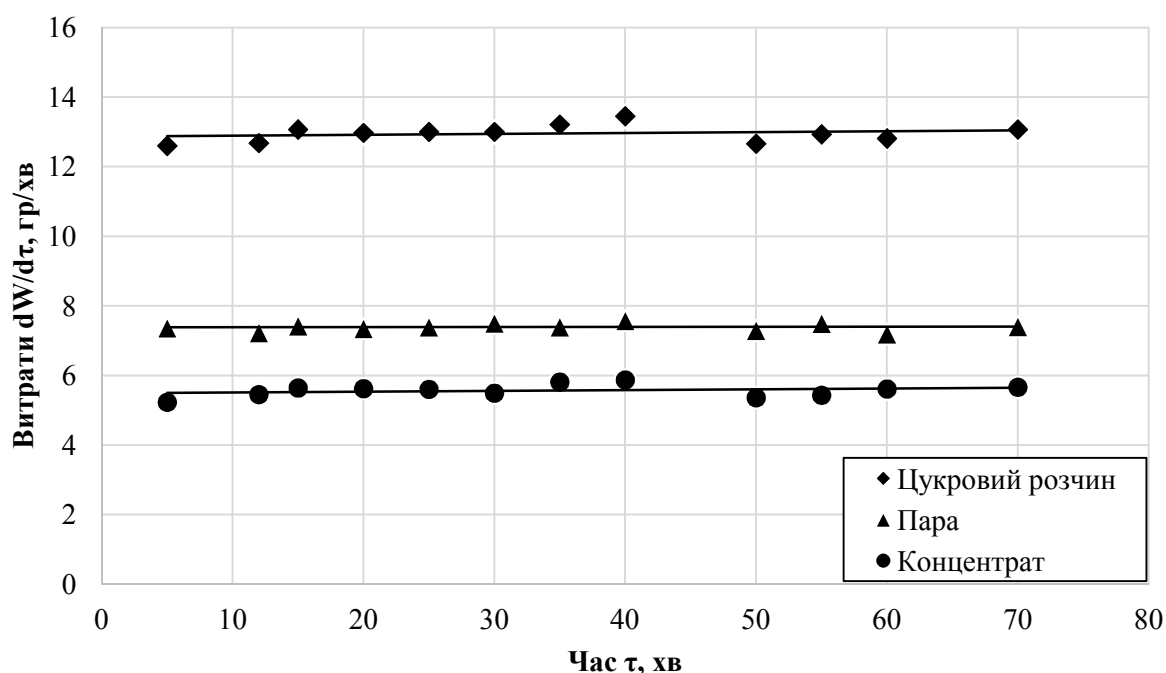


Рис. 3 – Витрати сировинних потоків при безперервному режимі роботи модуля

Виходячи з отриманої графічної залежності, можна зробити висновок, що узгодження матеріальних потоків було виконано успішно.

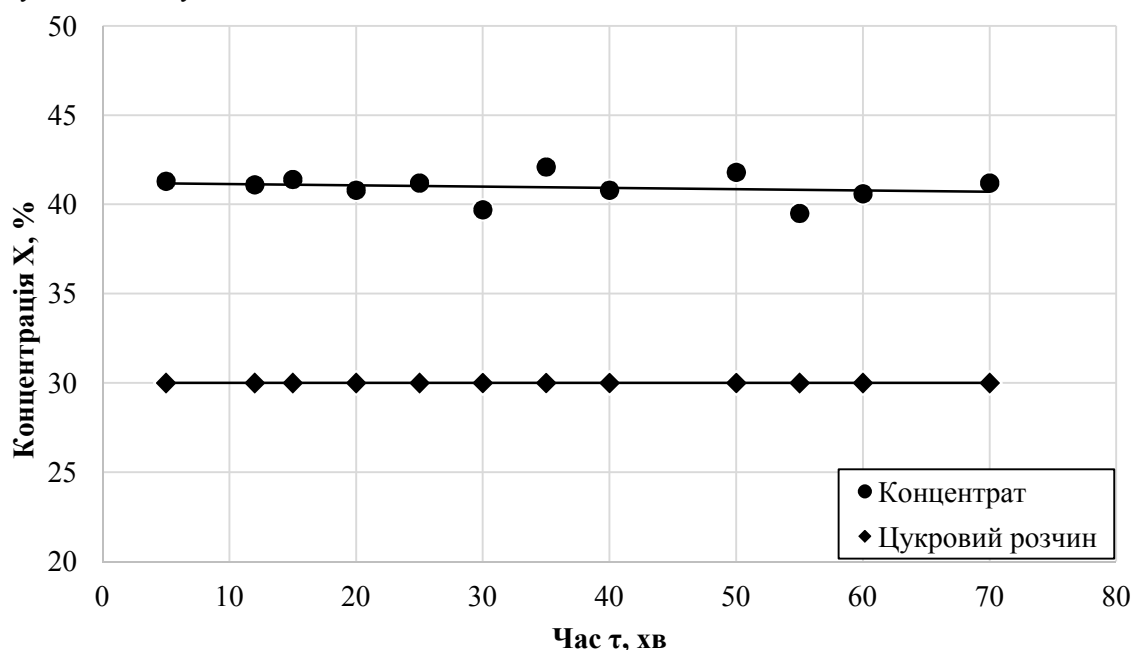


Рис. 4 – Концентрація продукту на вході і на виході модуля в режимі безперервної роботи

Підвищення кінцевої концентрації готового продукту майже на 50 % (рис. 4) в режимі безперервної роботи в умовах вакууму є результатом успішного виконання поставленого завдання в даній роботі.

Висновок. Головний висновок за результатами випробувань – це підтвердження практичної працездатності розробленого експериментального зразка модуля, можливість стабільного підвищення концентрації продукту на одному ступені на 10-30°Brіх в залежності від концентрації сировини на вході. Наведені залежності (рис. 3, 4) є базою для організації роботи модуля в умовах виробництва.

References

1. Peng, J., Bi, J., Yi, J., Allaf, K., Besombes, C., Jin, X., Wu, X., Lyu, J., Asghar Ali, M. N. H. (2019). Apple juice concentrate impregnation enhances nutritional and textural attributes of the instant controlled pressure drop (DIC) dried carrot chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. doi:10.1002/jsfa.9898

2. Jiménez-Sánchez, C., Lozano-Sánchez, J., Segura-Carretero, A., & Fernández-Gutiérrez, A. (2015). Alternatives to conventional thermal treatments in fruit-juice processing. Part 2: Effect on composition, phytochemical content, and physicochemical, rheological, and organoleptic properties of fruit juices. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(3), 637–652. doi:10.1080/10408398.2014.914019
3. Brunda, G., Kavyashree, U., Shetty, S. S., Sharma, K. (2021). Comparative study of not from concentrate and reconstituted from concentrate of pomegranate juices on nutritional and sensory profile. *Food Science and Technology International*. doi: 10.1177/10820132211003707
4. Salehi, F. (2020). Physicochemical characteristics and rheological behaviour of some fruit juices and their concentrates. *Journal of Food Measurement and Characterization*. doi:10.1007/s11694-020-00495-0
5. Putnik, P., Pavlić, B., Šojić, B., Zavadlav, S., Žuntar, I., Kao, L., Kitonić, D., Kovačević, D. B. (2020). Innovative Hurdle Technologies for the Preservation of Functional Fruit Juices. *Foods*, 9(6), 699. doi:10.3390/foods9060699
6. Lorenzoni, G., Minto, C., Vecchio, M. G., Zec, S., Paolin, I., Lamprecht, M., Mestroni, L., Gregori, D. (2019). Fruit and Vegetable Concentrate Supplementation and Cardiovascular Health: A Systematic Review from a Public Health Perspective. *Journal of Clinical Medicine*, 8(11), 1914. doi:10.3390/jcm8111914
7. Burdo, O. G., Terziev, S. G., Gavrilov, A. V., Sirotiyuk, I. V., Shcherbich, M. V. (2020). Sistema innovatsionnykh energotekhnologiy obezvozhvaniya pishchevogo syr'ya [System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials]. *Problemele Energeticii Regionale*, 2(46), 93-107 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.3898317
8. Potapov, V. O., Evlash, V. V., Pedorich, I. P. (2018). Analiz sirovini, protsesiv ta obladnannya dlya otrimannya kharchovikh poroshkiv [Analysis of raw materials, processes and equipment for the production of food powders]. *Zbirnik naukovikh prats' XVII mizhnarodnoyi naukovoï konferentsiyi Udoskonalennya protsesiv i obladnannya kharchovikh i khimichnikh virobilstv 3-8 veresnya Odesa*. 149–152 (in Russian).
9. Chua, L. S., Leong, C. Y. (2020). Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. *Journal of Food Processing and Preservation*. doi:10.1111/jfpp.14786
10. Kumar, A., Shrivastava, S. L. (2019). Temperature, concentration, and frequency dependent dielectric properties of pineapple juice relevant to its concentration by microwave energy. *Journal of Food Process Engineering*, e13013. doi:10.1111/jfpe.13013
11. Bozkir, H., & Baysal, T. (2017). Concentration of apple juice using a vacuum microwave evaporator as a novel technique: Determination of quality characteristics. *Journal of Food Process Engineering*, 40(5), e12535. doi:10.1111/jfpe.12535
12. Asghar, M. T., Yusof, Y. A., Noriznan Mokhtar, M., Yaacob, M. E., Ghazali, H. M., Varith, J., Chang, L. S., Manaf, Y. N. (2020). Processing of Coconut Sap into Sugar Syrup using Rotary Evaporation, Microwave and Open-Heat Evaporation Techniques. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. doi:10.1002/jsfa.10446
13. Dinçer, C., Çam, I. B., Torun, M. Gülmez, H. B., Topuz, A. (2019). Mathematical modeling of concentrations of grape, pomegranate and black carrot juices by various methods. *The Journal of Food*, 44(6). 1092–1105. doi: 10.15237/gida.GD19080
14. Burdo, O. G., Trishyn, F. A., Terziev, S. G., Gavrilov S. G., Sirotiyuk, I. V. (2021). Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 57, 330–344. doi: 10.3103/S1068375521030030
15. Burdo, O. G., Burdo A. K., Sirotiyuk, I. V., Pour D. R. (2017). Tekhnologii selektivnogo podvoda energii pri vyparivanii pishchevykh rastvorov [Technologies of selective energy supply during evaporation of food solutions]. *Problemele Energeticii Regionale*, 1(33), 100-109 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.1193622

RESEARCH OF A MICROWAVE VACUUM EVAPORATOR MODULE OF THE CONTINUOUS ACTION

**Sirotiyuk I.V., postgraduate student
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine**

The analysis of studies of the microwave technologies influence on the evaporation process is carried out. The main advantages of using electromagnetic action on raw materials during evaporation along with traditional technologies for concentrating food solutions are highlighted. One of the main disadvantages of the existing research stands of evaporators with electromagnetic energy supply, namely the frequency of action, is highlighted. The main problems that hinder the organization of the evaporation process in a continuous mode under conditions of volumetric energy and vacuum supply are determined. Based on the analysis of these problems, a design of a microwave vacuum-evaporation module has been proposed, which makes it possible to ensure continuous operation without breaking the tightness of the system and in the absence of microwave field leakage during the entire concentration process. The main task of this work was to conduct experimental studies of the developed module in continuous operation. The experiments were carried out using a sugar solution as an example. The concentrations of the incom-

ing feedstock and the finished product discharged throughout the entire process were 30°brix and 40-42°brix, respectively. The pressure in the system during the tests of the module remained unchanged and was within 0.01 MPa. Based on the results of experimental studies, it can be argued about the operability of the considered design of a microwave vacuum-evaporation module of continuous operation and about the possibility of designing and implementing its semi-industrial sample. By using the method of assembling such modules, it is possible to design a multi-stage evaporator unit, which in turn makes it possible to obtain a finished product of any final concentration of dry substances without loss of quality. In addition, this design is quite easy to maintain due to the independence of each module.

Key words: evaporation, concentration, microwave technologies, modeling, heat and mass transfer.

Список використаної літератури

1. Peng, J., Bi, J., Yi, J., Allaf, K., Besombes, C., Jin, X., Wu, X., Lyu, J., Asghar Ali, M. N. H. Apple juice concentrate impregnation enhances nutritional and textural attributes of the instant controlled pressure drop (DIC) dried carrot chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019. doi:10.1002/jsfa.9898
2. Jiménez-Sánchez C., Lozano-Sánchez J., Segura-Carretero A., Fernández-Gutiérrez A. Alternatives to conventional thermal treatments in fruit-juice processing. Part 2: Effect on composition, phytochemical content, and physicochemical, rheological, and organoleptic properties of fruit juices. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2015. Vol. 57. № 3. P. 637–652. doi:10.1080/10408398.2014.914019
3. Brunda G., Kavyashree U., Shetty S. S., Sharma K. Comparative study of not from concentrate and reconstituted from concentrate of pomegranate juices on nutritional and sensory profile. *Food Science and Technology International*. 2021. doi: 10.1177/10820132211003707
4. Salehi, F. Physicochemical characteristics and rheological behaviour of some fruit juices and their concentrates. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2020. doi:10.1007/s11694-020-00495-0
5. Putnik, P., Pavlić, B., Šojić, B., Zavadlav, S., Žuntar, I., Kao, L., Kitonić, D., Kovačević, D. B. Innovative Hurdle Technologies for the Preservation of Functional Fruit Juices. *Foods*, 2020. Vol. 9. № 6. P. 699. doi:10.3390/foods9060699
6. Lorenzoni G., Minto C., Vecchio M. G., Zec S., Paolin I., Lamprecht M., Mestroni L., Gregori D. Fruit and Vegetable Concentrate Supplementation and Cardiovascular Health: A Systematic Review from a Public Health Perspective. *Journal of Clinical Medicine*. 2019. Vol. 11. № 8. doi:10.3390/jcm8111914
7. Бурдо О. Г., Терзиев С. Г., Гаврилов А. В., Сиротюк И. В., Щербич М. В. Система інноваційних енерготехнологій обезводження пищевого сир'я. *Problemele Energeticii Regionale*. 2020. Т. 46. № 2. С. 93–107. doi: 10.5281/zenodo.3898317
8. Потапов В. О., Євлаш В. В., Педорич І. П. Аналіз сировини, процесів та обладнання для отримання харчових порошків. *Удосконалення процесів і обладнання харчових і хімічних виробництв : зб. наук. праць XVII міжнар. наук. конф., м. Одеса, 3-8 вересня 2018. Одеса, 2018. С. 149–152.*
9. Chua, L. S., Leong C. Y. Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. doi:10.1111/jfpp.14786
10. Kumar A., Shrivastava S. L. Temperature, concentration, and frequency dependent dielectric properties of pineapple juice relevant to its concentration by microwave energy. *Journal of Food Process Engineering*. 2019. e13013. doi:10.1111/jfpe.13013
11. Bozkir H., Baysal T. Concentration of apple juice using a vacuum microwave evaporator as a novel technique: Determination of quality characteristics. *Journal of Food Process Engineering*. 2017. Vol. 40. № 5. e12535. doi:10.1111/jfpe.12535
12. Asghar M. T., Yusof Y. A., Noriznan Mokhtar M., Yaacob M. E., Ghazali H. M., Varith J., Chang L. S., Manaf Y. N. Processing of Coconut Sap into Sugar Syrup using Rotary Evaporation, Microwave and Open-Heat Evaporation Techniques. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020. doi:10.1002/jsfa.10446
13. Dinçer C., Çam I. B., Torun M. Gülmez H. B., Topuz A. Mathematical modeling of concentrations of grape, pomegranate and black carrot juices by various methods. *The Journal of Food*. 2019. Vol. 44. №6. P. 1092–1105. doi: 10.15237/gida.GD19080
14. Burdo O. G., Trishyn F. A., Terziev S. G., Gavrilov S. G., Sirotyuk I. V. Electrodynamics Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems. *Surf. Engin. Appl. Electrochem*. 2021. Vol. 57. P. 330–344. doi: 10.3103/S1068375521030030
15. Бурдо О. Г., Бурдо А. К., Сиротюк И. В., Пур Д. Р. Технологии селективного подвода энергии при выпаривании пищевых растворов. *Problemele Energeticii Regionale*. 2017. Т. 33. № 1. С. 100–109. doi: 10.5281/zenodo.1193622

Отримано в редакцію 10.03.2021
Прийнято до друку 26.06.2021

Received 10.03.2021
Approved 26.06.2021

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ХАРЧОВИХ ТА ОЛІЙНИХ ВИРОБНИЦТВ

Терзієв С.Г., д-р техн. наук, доцент,

Ружицька Н.В., канд. техн. наук, асистент, Щербич М., аспірант, Альхурі Юсеф, канд. техн. наук

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

У статті розглядаються питання утилізації відходів олійної, харчоконцентратної, консервної промисловості. Пропонується задіяти технології екстрагування для вилучення цінних компонентів, які залишаються у відходах після виробництва основного продукту. Розглянуто можливість вилучення олій з лушпиння кави та макухи амаранту. Також досліджено екстрагування водо- та лугорозчинних фракцій з макухи амаранту як стадія вилучення цінного білка. Розглянуто екстрагування водорозчинних компонентів зі свіжих яблучних вичавок – фруктових-ягідних відходів. Інтенсифікувати процес екстрагування запропоновано шляхом підведення енергії у вигляді мікрохвильового випромінювання, яке викликає у структурах сировини явище бародифузії, та забезпечення режиму кипіння екстрагенту, який організує постійний контакт свіжих порцій екстрагенту з сировиною. Для збереження термолабільних речовин та запобігання денатурації білка в екстракторі кипіння здійснюється у вакуумі. Показано результати вилучення олій та спирторозчинних компонентів лушпиння кави та макухи амаранту. Отримано кінетичні криві процесу екстрагування макухи амаранту водою та лужним розчином в умовах дії мікрохвильового поля та вакууму. Наведено порівняння кінетики екстрагування лугорозчинної фракції макухи амаранту із застосуванням адресної доставки енергії та при традиційному енергопідведенні. Показано значну інтенсифікацію процесу. Визначено питомі енерговитрати процесу. Отримано кінетичні криві процесу екстрагування яблучних вичавок водою при різних гідромодулях. Встановлено відсоток сухих речовин твердої фази, який переходить до екстракту. Визначено питомі енерговитрати на процес одержання екстракту. Одержано продукт з ароматом яблук та вираженими желуючими властивостями.

Ключові слова: відходи, макуха амаранту, мікрохвильове екстрагування, яблучні вичавки, вакуум.

Вступ. Нераціональне використання харчової сировини створює суттєву екологічну проблему утилізації великих обсягів відходів. Проте такі відходи можуть містити значну кількість цінних харчових компонентів: білків, олій, клітковини, пігментів. Після екстрагування або пресування з сировини вилучається головним чином лише певна група компонентів. Так при виробництві розчинної кави з зерен вилучаються лише водорозчинні речовини, у виробництві олій – тільки ліпіди та жиророзчинні речовини, після віджиму фруктових соків залишаються вичавки, які містять пектини, цукри, вітаміни, поліфеноли [1 – 3]. Одним зі шляхів переробки харчових відходів є екстрагування цільових компонентів різними екстрагентами. Це може бути вода, етанол, полярні розчинники. Відомі дослідження з екстрагування олій та водорозчинних компонентів зі шламу кави із застосуванням мікрохвильового підведення енергії [2]. Також проводились досліді з екстрагування кавового лушпиння етанолом та водою які показали високий вихід кофеїну [4], встановлено жирнокислотний склад олій [5]. Поряд із адресною доставкою енергії до мікро- та наноструктур рослинної сировини та виникненням явища бародифузії, інтенсифікація процесу екстрагування відбувається за рахунок турбулізації потоку екстрагенту, яка забезпечує постійний контакт свіжих порцій екстрагенту з твердою фазою. Досягти режиму кипіння екстрагенту при низьких температурах можна за рахунок створення в екстракторі вакууму. Використання вакууму одночасно з адресною доставкою енергії показало обнадійливі результати в досліді з ефіроолійною сировиною, сухими сливовими вичавками, кавовим лушпинням [4].

Формулювання завдань досліджень. Для екстрагування ряду компонентів, особливо таких термолабільних, як білки, принципово важливі низькі температури процесу. Зменшення контакту олій, багатих ненасиченими жирними кислотами та інших чутливих до окиснення сполук з повітрям також позитивно впливає на якість кінцевого продукту. Завданням досліджень є збільшення виходу цільових компонентів з відходів харчових та олійних виробництв, зменшення питомих енерговитрат зі збереженням термолабільних сполук.

Об'єкти досліджень. В якості олієвмісних відходів розглядалися макуха амаранту, шлам та лушпиння кави. Макуха амаранту після вилучення олій пресуванням може містити від 2 до 8 % жирів, 15...22 % білків, 57...78 % вуглеводів [3,6]. Білок амаранту за амінокислотним складом наближається до ідеального білка [3,7]. Вміст жирів у дослідних зразках складав 2,1...2,8 %. Таким чином, з даних відходів можливо вилучити залишки олій, білок, крохмаль та клітковину. Шлам та лушпиння кави містять цінні олії, які можуть бути вилучені екстрагуванням. Якщо шлам кави містить 16...20 % олій, то лушпиння – близько 3 %, за жирнокислотним складом ці олії значно відрізняються [5].

З відходів фруктов-ягідної сировини в якості об'єкту дослідження було обрано яблучні вичавки, оскільки в Україні саме яблуна на першому місці за площиною вирощування та врожайністю. Відходи переробки яблук представлені вичавками (28...36 %), витерками (10...18 %), лушпинням (30...40 %) [8]. Яблучні вичавки на 95 % складаються зі шкірки та м'якоті [1]. Проте на підприємствах свіжі вичавки не зберігаються,



Рис.1 – Мікрохвильовий вакуум-екстрактор

оскільки швидко починається процес бродіння. В сухих вичавках міститься близько 44 % безазотистих екстрактивних речовин, 6 % цукру, 28 % клітковини, до 18 % пектину, 8 % білку [9]. Свіжі вичавки містять 0,7 % білка, 1,3 % ліпідів, 9,1 % цукрів, 2,5 % пектинів [1]. На сьогоднішній день відходи переробки яблук пропонують додавати до комбікормів [8], в якості ароматизатора у пакувальних матеріалах [10], у вигляді порошків як добавку до хлібобулочних, кондитерських виробів, харчоконцентратів, на основі пектиновмісних екстрактів розроблено рецептури функціональних напоїв [11].

Результати досліджень. Екстрагування цільових компонентів з відходів проводили у мікрохвильовому вакуум-екстракторі періодичної дії (рис.1), який складається з мікрохвильової камери, конденсатору та вакуум-наосу. Діапазоні тисків складав 11...101кПа, потужність НВЧ-інтенсифікатора становила 120...250 Вт. Об'єм продукту, який завантажували у камеру складав 1...2 л.

Для екстрагування в умовах заданої постійної температури без дії мікрохвильового поля була використана водяна баня лабораторна ВБ-2.

Проведено порівняння ефективності вилучення сухих речовин етанолом з макухи амаранту, шламу та лушпиння кави (табл. 1). Температура процесу дорівнювала температурі кипіння етанолу, гідромодуль складав 1:9.

Таблиця 1

Вихід сухих речовин з олієвмісних відходів при мікрохвильовому екстрагуванні етанолом в умовах атмосферного тиску

Відходи	Температура, °C	Кінцева концентрація екстракту, %	Вміст олії, %	Вилучена частка від маси вихідної сировини, %
Шлам кави	70...75	1,3	16...20	11,05
Лушпиння кави	70...75	0,81	3	5,14
Макуха амаранту	70...75	1,14	2,1...2,8	9,69
Макуха амаранту	45	0,8	2,1...2,8	3,2

Знаючи вихідний вміст олії в сировині, можна зробити висновок, що до екстракту з лушпиння кави та макухи амаранту переходять не тільки олія а й інші спирторозчинні компоненти. Для виділення чистої олії необхідне додаткове розділення таких екстрактів. Крім того, після проведення аналізу збідненої макухи амаранту встановлено, що при 45 °C етанолом було вилучено близько 50 % олії. Таким чином, за температур, які не викликають денатурацію білків амаранту, з 1 кг макухи вилучається не більше 15...16 г олії. Додатковості такої переробки потребує додаткових економічних розрахунків. Це стосується й лушпиння кави.

Після вилучення олії (знежирення) проводились дослідження з екстрагування водо- та лугорозчинної фракції з макухи амаранту. Щоб запобігти денатурації білків та клейстеризації крохмалю, досліді проводились за температури 40...45 °C та тиску 11кПа. Гідромодуль складав 1:9. Результати наведено на рис. 2

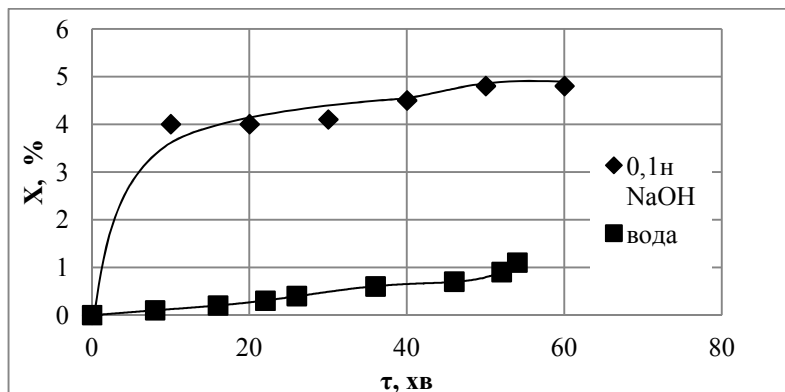


Рис. 2 – Порівняння кінетики вилучення сухих речовин з макухи амаранту різними екстрагентами

З графіків видно, що при екстрагуванні лужним розчином основне зростання концентрації сухих речовин відбувається протягом перших 10 хвилин. Найменша швидкість вилучення сухих речовин спостерігалась у дослідях з водою.

Встановлено, який відсоток маси твердої фази макухи амаранту переходить в екстрагент (табл. 2).

Таблиця 2

Вихід сухих речовин з макухи амаранту при екстрагуванні різними екстрагентами при 40...45 °С

Екстрагент	Кінцева концентрація екстракту, %	Частка від маси вихідної сировини, яка переходить у екстрагент, %
0,1н розчин NaOH	4,8	48
Вода	1,1	11
Етанол	0,8	3,2

У лугорозчинній фракції близько 70 % сухих речовин складає крохмаль. Вода вилучає альбумін, цукри, сапоніни. Таким чином всі одержані екстракти потребують подальшого розділення на цільові компоненти фізичними або хімічними способами.

Також визначався вплив попереднього знежирення сировини на вихід водорозчинної фракції (рис. 3)

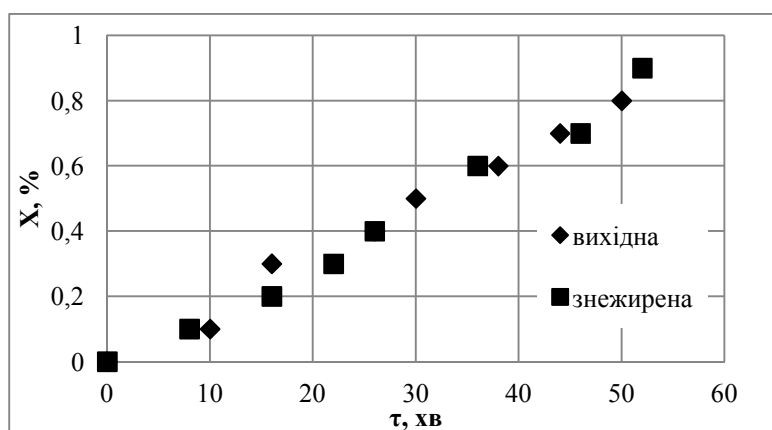


Рис. 3 – Кінетика вилучення водорозчинної фракції з макухи амаранту

Суттєвого впливу попереднього знежирення на кінетику екстрагування водорозчинних компонентів з макухи амаранту не виявлено.

Порівняння кінетики екстрагування лугорозчинної фракції в умовах дії мікрохвильового поля та в умовах традиційного підігріву до 40 °С наведено на рис. 4. Питоме підведення енергії на процес складало 105...110 Вт/кг продукту.

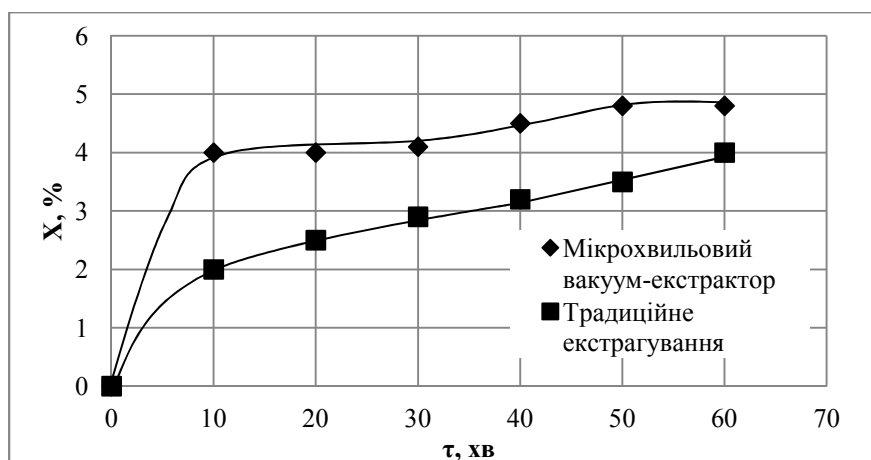


Рис. 4 – Вплив адресної доставки енергії на інтенсивність екстрагування білку та сухих речовин з макухи амаранту

Встановлено, що у мікрохвильовому вакуум-екстракторі концентрація екстракту в перші 10 хвилин обробки до екстракту перейшло 83 % вилучених сухих речовин. За традиційними технологіями екстрагування такий результат досягається протягом 60 хвилин. Таким чином, для вилучення такої ж кількості екстрактивних речовин, за 10 хвилин у мікрохвильовому екстракторі необхідно витратити енергії 72 кДж/кг екстракту, в той час як при традиційному енергопідведенні доведеться підвести 300...400 кДж/кг (в залежності від початкової температури сировини та екстрагенту та навколишнього середовища). Таким чином ефект адресної доставки енергії відкриває суттєві резерви до збільшення енергоефективності процесу екстрагування білку за макухи амарнту.

Свіжі яблучні вичавки, як фруктово-ягідна сировина, принципово відрізняються за властивостями та хімічним складом від відходів виробництва розчинної кави, або олії. Досліди проводились з водою в якості екстрагента, в мікрохвильовому вакуум-екстракторі за температури 35...40 °C та тиску 11кПа та з гідромодулями 1:6 та 1:4. Питоме підведення енергії складало 120 Вт/кг. Оскільки вологість сировини складає 79...82 %, використання високих гідромодулів недоцільне. Кінетичні криві екстрагування водорозчинних компонентів яблучних вичавок з різними гідромодулями наведено на рис. 5.

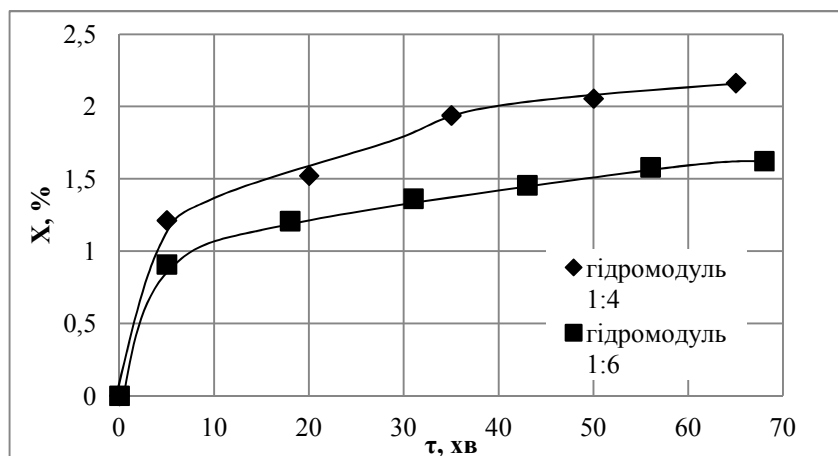


Рис. 5 – Кінетика екстрагування водорозчинної фракції з яблучних вичавок за зміною концентрації екстракту

Найбільше зростання концентрації сухих речовин в екстрактах спостерігається в перші п'ять хвилин процесу, але в цих точках вилучено близько 50% від сухих речовин, що переходять до екстракту. Постійною концентрація екстракту стає після 60 хвилин обробки.

Про ефективність збільшення гідромодуля можна судити за вичерпанням твердої фази. Кінетика процесу наведена на рис. 6.

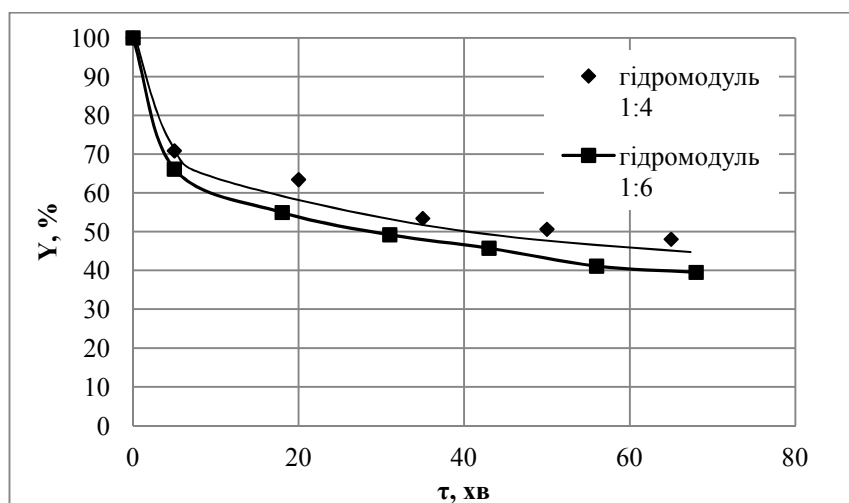


Рис. 6 – Кінетика екстрагування водорозчинної фракції з яблучних вичавок за вичерпанням твердої фази

Постійні питомі енерговитрати у дослідях зберігались за рахунок однакової маси води в екстракційній ємкості, пропорційно змінювалась маса твердої фази. Збільшення гідромодуля веде до збільшення рушійної

сили процесу, проте при подальшому концентруванні екстракту витрати енергії на видалення більшої кількості екстрагенту також суттєво зростають. Крім того екстрагент вода поглинає енергію мікрохвильового поля, тому збільшення гідромодуля веде й до збільшення питомих витрат енергії на процес екстрагування. Таким чином, для визначення раціонального гідромодуля необхідно враховувати співвідношення рушійної сили процесу екстрагування, питомих енерговитрат на процес екстрагування, та енерговитрат на процес концентрування екстракту.

В результаті дослідів було вилучено до 46 % від маси сухих речовин вичавок. Екстракт мав смак та аромат яблука, після концентрування та сушіння утворився продукт желеподібної консистенції.

Питомі енергетичні витрати склали 0,7...0,8 МДж/кг екстракту.

Висновки

Комбінування вакууму та адресної доставки енергії знаходить застосування у технологіях переробки відходів олійної та харчової промисловості, оскільки дозволяє проводити екстрагування за низьких температур. Встановлено значну інтенсифікацію екстрагування лугозорозчинної фракції з макухи амаранту для вилучення білків у мікрохвильовому вакуум-екстракторі, зменшення питомих енерговитрат у 3...5 разів в порівнянні з традиційними технологіями.

Доцільність вилучення олій з кавового лушпиння та макухи амаранту потребує економічного обґрунтування і залежить від початкового вмісту олії у сировині.

У переробці яблучних вичавок інтенсифікація процесу екстрагування у мікрохвильовому вакуум-екстракторі дозволяє вилучити більше 40...45 % сухих речовин та отримати високоякісний за органолептичними показниками пектиновмісний екстракт при низьких температурах, що запобігає руйнуванню біологічно активних сполук. Такий екстракт може бути використаний в технології приготування напоїв та джемів, конфітурів.

References

1. Nigmatullina I. M., Agafonova S. V. (2019). Issledovaniye protsessa fermentativnogo gidroliza uglevodov vtorichnogo yablochnogo syr'ya [Investigation of the process of enzymatic hydrolysis of carbohydrates of secondary apple raw materials]. *Vestnik molodezhnoy nauki*. 4 (21). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-fermentativnogo-gidroliza-uglevodov-vtorichnogo-yablochnogo-syrya>.
2. Burdo O.G., Terziyev S.G., Ruzhitskaya N.V., Makiyevskaya T.L. (2014). *Protsessy pererabotki kofeynogo shlama [Coffee sludge processing processes]*. K.: EnterPrint (in Russian).
3. Fedorov A.A., Antipova L.V. (2010). Primeneniye zhmykha iz semyan amaranta v proizvodstve kombinirovannykh myasnykh produktov [The use of cake from amaranth seeds in the production of combined meat products]. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*. 4. 11-13 (in Russian).
4. Terziyev, S., Ruzhyts'ka, N., Syrotyuk, I., Akimov, O., Shcherbych, M. (2020). Innovatsiyni protsesy oderzhannya fitoekstraktiv i kontsentrativ dlya kharchovoyi, farmatsevtichnoyi ta parfumerno-kosmetichnoyi promyslovosti [Innovative processes for obtaining phytoextracts and concentrates for the food, pharmaceutical, perfume and cosmetics industries]. *Scientific Works*, 84(1). 73-78 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1873>
5. Honcharov, D. S., Ruzhyts'ka, N. V., Akimov, O. V. (2020). Analiz zhynokyslotnoho skladu ekstraktiv ta oliy kavy [Analysis of the fatty acid composition of coffee extracts and oils]. *Enerhiya. Biznes. Komfort : materialy rehion. nauk.-prakt. konf. Odesa: ONAKhT*. 38-39 (in Ukrainian).
6. Naumenko, K.I., Chernov, N.K., Shatalova, D.M. (2021). Amarant – perspektyvne dzherelo otrymannya bilkovykh komponentiv [Amaranth is a promising source of protein components]. *Zbirnyk tez dopovidey 81-yi naukovoї konferentsiyi vykladachiv akademiyi, Odesa: ONAKhT*, 384 – 385 (in Ukrainian).
7. Hulak, O.V., Polishchuk, H.Ye., Kalinina, H.P., Yanyuk, T.I. (2007). Amarantove boroshno – perspektyvna kharcho-va dobavka u vyrobnytstvi morozyva [Amaranth flour is a promising food additive in the production of ice cream]. *Produkty i ingredienty*. 74 – 76 (in Ukrainian).
8. Egorov, B. V., Tsyundik, A. G., Orekhova, V. G. (2015). Perspektivy pererabotki i ispol'zovaniya yablochnykh vyzhimok [Prospects for the processing and use of apple pomace.]. *Zernovi produkty i kombikormy*, 59(1). 38-43 (in Russian).
9. Gol'dberg, M. A. (2017). Osnovnyye napravleniya ispol'zovaniya yablochnykh vyzhimok [The main directions of using apple pomace]. *Sbornik materialov 73-y studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Minsk : BNTU*. 66-69 (in Russian).
10. Makarova, N.V., Eremeyeva, N.B., Davydova, Ya.V. (2020). S'yedobnaya upakovka iz otkhodov pererabotki yablok [Edible packaging from apple processing waste]. *Vestnik KamchatGTU*, 51. 26 – 33 (in Russian).
11. Chaldayev P.A., Svechnikov A.Yu. (2014). Primeneniye yablochnykh vyzhimok dlya proizvodstva produktov pitaniya [Application of apple pomace for food production]. *Pishchevaya promyshlennost'*, 4. 40 – 41 (in Russian).

INTENSIFICATION OF THE EXTRACTION PROCESS IN FOOD AND OILSEED PRODUCTIONS WASTE UTILIZATION TECHNOLOGIES

Terziyev S.H., Doctor of Engineering Science, Associate Professor,
Ruzhytska N.V., PhD, assistant, Shcherbych M.V., postgraduate student, Alhuri Yusef, PhD
Odessa National Academy of Food Technologies

The article deals with the issues of waste utilization in the oilseed, food concentrate, and canning industries. It is proposed to use extraction technologies to extract valuable components that remain in waste after the manufacturing of the main product. The possibility of extracting oils from coffee husks and amaranth cake is considered. Extraction of water - and alkali-soluble fractions from Amaranth cake as a stage of extraction of valuable protein was also studied. Extraction of water-soluble components from fresh apple pomace – fruit and berry waste is considered. It is proposed to intensify the extraction process by supplying energy in the form of microwave radiation, which causes the phenomenon of barodiffusion in the structures of raw materials, and providing a boiling mode of the extractant, which organizes constant contact of fresh portions of the extractant with the raw material. To preserve thermolabile substances and prevent protein denaturation in the extractor, boiling is carried out in a vacuum. The results of extraction of oil and alcohol-soluble components from coffee husk and amaranth cake are shown. Kinetic curves of the extraction process of amaranth cake with water and an alkaline solution under the influence of a microwave field and vacuum are obtained. The kinetics of extraction of the alkali-soluble fraction from amaranth cake using targeted energy delivery and traditional energy delivery are compared. A significant intensification of the process is shown. The specific energy consumption of the process is determined. Kinetic curves of the extraction process of apple pomace with water at various hydraulic modules are obtained. The percentage of solid phase dry matter that passes to the extract is determined. Specific energy consumption for the extract production process is determined. The obtained product has the aroma of apples and obvious gelling properties.

Keywords: waste, amaranth cake, microwave extraction, apple pomace, vacuum

Список використаної літератури

1. Нигматуллина И. М., Агафонова С. В. Исследование процесса ферментативного гидролиза углеводов вторичного яблочного сырья. *Вестник молодежной науки*. 2019. №4 (21). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-fermentativnogo-gidroliza-uglevodov-vtorichnogo-yablochnogo-syrya>.
2. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Ружицкая Н.В., Макиевская Т.Л. Процессы переработки кофейного шлама. К.: ЭнтерПринт, 2014. 228с.
3. Федоров А.А., Антипова Л.В. Применение жмыха из семян амаранта в производстве комбинированных мясных продуктово. *Известия вузов. Пищевая технология*, 2010. № 4., С. 11-13
4. Терзієв, С., Ружицька, Н., Сиротюк, І., Акімов, О., Щербич, М. Інноваційні процеси одержання фітоекстрактів і концентратів для харчової, фармацевтичної та парфумерно-косметичної промисловості. *Наукові праці*, 2020. Вип. 84(1), С. 73-78. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1873>
5. Гончаров Д. С. Аналіз жирнокислотного складу екстрактів та олій кави / Д. С. Гончаров, Н. В. Ружицька, О. В. Акімов. *Енергія. Бізнес. Комфорт : матеріали регіон. наук.-практ. конф.*, Одеса, 20 груд. 2019 р., 2020. Одеса: ОНАХТ. С. 38–39
6. Науменко К.І., Черно Н.К., Шаталова Д.М. Амарант – перспективне джерело отримання білкових компонентів. *Збірник тез доповідей 81-ї наукової конференції викладачів академії*, Одеса: ОНАХТ, 2021, С. 384 – 385.
7. Гулак О.В., Поліщук Г.Є., Калініна Г.П., Янюк Т.І. Амарантове борошно – перспективна харчова добавка у виробництві морозива. *Продукты и ингредиенты*, 2007, С. 74 – 76.
8. Егоров Б. В., Цюндик А. Г., Орехова В. Г. Перспективы переработки и использования яблочных выжимок. *Зерновые продукты и комбикормы*, 2015, Том 1 № 59. С.38-43
9. Гольдберг, М. А. Основные направления использования яблочных выжимок Сборник материалов 73-й студенческой научно-технической конференции. Минск : БНТУ, 2017. - С. 66-69.
10. Макарова Н.В., Еремеева Н.Б., Давыдова Я.В. Съедобная упаковка из отходов переработки яблок. *Вестник КамчатГТУ*, 2020, №51, С. 26 – 33.
11. Чалдаев П.А., Свечников А.Ю. Применение яблочных выжимок для производства продуктов питания. *Пищевая промышленность*, 2014, № 4, С. 40 – 41.

Отримано в редакцію 14.03.2021
Прийнято до друку 02.07.2021

Received 14.03.2021
Approved 02.07.2021

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТРІЧКОВИХ СУШАРОК З КОМБІНОВАНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЕНЕРГОПІДВЕДЕННЯМ ДЛЯ СУШІННЯ НАСІННЯ КУКУРУДЗИ, СОНЯШНИКУ ТА СОЇ

Маренченко О.І., PhD, Зиков О.В., д.т.н.

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

На основі детального аналізу літературних джерел з досліджуваного використання інфрачервоного та мікрохвильового підведення енергії в процесі сушіння сировини зроблено висновок про перспективність розробки обладнання, що реалізує комбінований вплив інфрачервоного та мікрохвильового випромінювання для сушіння олійної сировини, зокрема кукурудзи, соняшнику та сої. Попередні дослідження кінетики сушіння кукурудзи, соняшнику та сої дозволили отримати рівняння для визначення часу сушіння цих продуктів в таких сушарках, що, в свою чергу, стало відправною точкою для створення методик проектного та перевірного розрахунків таких сушарок. Аналіз цих досліджень дозволяє зробити висновок, що використання мікрохвильового випромінювання прискорює перенесення вологи з середини матеріалу назовні, а інфрачервоне випромінювання ефективно передає енергію вологи на поверхню матеріалу. Таким чином, поєднання послідовного впливу мікрохвильового та інфрачервоного випромінювання може значно прискорити процес сушіння та покращити його енергоефективність. Мета конструктивного розрахунку сушарки - визначити габаритні розміри сушарки та потужність встановлених випромінювачів. На першому етапі розрахунку такі властивості продукту, як рівноважна вологість продукту та коефіцієнт активності води, визначаються параметрами продукту та навколишнього середовища. Далі визначаються парціальний тиск водяної пари в атмосферному повітрі та теплофізичні властивості водяної пари, такі як тиск насиченої водяної пари, питома теплота випаровування та коефіцієнт дифузії водяної пари у повітрі. На наступному етапі ми визначаємо швидкість руху конвеєра. Далі визначаємо відповідні значення коефіцієнтів масообміну та узагальненого коефіцієнта масообміну. Величина узагальненого коефіцієнта масообміну визначає швидкість висихання в перший період та час висихання. Тривалість установився та кількість модулів масообміну визначаються визначеним значенням часу перебування продукту в установці. На останньому етапі розраховується потужність ІЧ-випромінювачів окремого ІЧ-модуля та потужність НВЧ-випромінювачів одного мікрохвильового модуля.

Ключові слова: сушіння, мікрохвильове випромінювання, інфрачервоне випромінювання, сушарка, зерносушіння, енергоефективність, швидкість сушіння.

Вступ. Специфікою заготовчої системи агропромислової сфери є необхідність переробки в короткий термін великої кількості продукту для забезпечення можливості його подальшого безпечного зберігання і транспортування. Найбільш розповсюдженим способом післязбиральної термообробки є сушіння. В більшості випадків сушіння є визначним фактором при забезпеченні збереження зернового продукту. Також сушіння є досить енергоємним процесом і підвищенню енергетичної ефективності на теперішній час сушарок приділяється багато уваги в Україні та світі. Крім того в Україні, також, існує проблема пов'язана з можливістю забруднення продукту, що висушується продуктами згорання, у випадку, коли для зменшення енергетичних витрат на процес сушіння, продукт висушується за допомогою суміші топкових газів з повітрям. Тому задача розробки сушильної техніки, що забезпечує зниження енергоємності процесу при забезпеченні екологічної безпеки продукту є доцільною і актуальною задачею.

Процеси сушіння і обладнання для їх реалізації безперервно удосконалюються. В останні часи в Україні і світі спостерігається тенденція до розробки сушарок, що задля зменшення теплових викидів передають енергію безпосередньо до продукту. Це як сушарки з змішаним теплопідведенням, так і сушарки, що використовують різні види електромагнітного випромінювання. На кафедрі ПОЕМ ОНАХТ багато досліджень присвячено підвищенню економічної ефективності та екологічної безпеки процесу сушіння, створюється нове енергоефективне обладнання для сушіння, що використовує у якості джерела теплоти інфрачервоне або надвисокочастотне електромагнітне випромінювання. Результати попередніх досліджень свідчать про наявність потенціалу для розвитку з комбінованим підведенням теплоти, але таке удосконалення потребує дослідження кінетики процесу сушіння продукту в таких сушарках з метою розробки методик визначення конструктивних та режимних параметрів обладнання, що створюється.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інфрачервоне сушіння - це метод зневоднення, який має високу енергоефективність у порівнянні з конвекційними та іншими методами сушіння. [1]. За умов застосування ІЧ-випромінювання значно скорочується тривалість термічної обробки, що обумовлено відсутністю термічного опору пограничного шару продукту променистому потоку, енергія якого безпосередньо поглинається поверхнею частинок сировини. Оскільки відбувається швидке і рівномірне нагрівання і через те, що

ІЧ-випромінювання проникає безпосередньо у внутрішній шар матеріалу, не нагріваючи навколишнє повітря, витрата енергії при інфрачервоному сушінні нижча порівняно з іншими методами. [2 – 4]. Так як передача ІЧ-енергії від джерела нагрівання до поверхні матеріалу здійснюється без нагрівання навколишнього повітря, то кількість тепла, яке доставляється до матеріалу містить майже всі тепло, яке надходить від джерела випромінювання, що призводить до зменшення часу сушіння. [5] Також, інфрачервоні випромінювачі мають низьку теплову інерцію [4]. Час вимикання інфрачервоних ламп також може легко регулюватися відповідним регулюванням температури, що може скоротити час сушіння. [6]. Використання в якості джерел енергії інфрачервоних випромінювачів забезпечує високий ступінь керування процесом сушіння, як просторовий (керування розподіленням потоків енергії всередині об'єму), так і тимчасовий (динамічне керування енергетичним навантаженням в процесі сушіння). Низькі температури в робочих об'ємах дозволяють суттєво спростити конструктивні рішення ІЧ сушильних пристроїв, так як вони не потребують герметизації об'єму та його теплоізоляції.

В останні роки росте цікавість до технологій зневоднення в електромагнітному полі. Одним із способів такої технології є сушка в мікрохвильовому полі. У мікрохвильовій системі передача маси відбувається насамперед завдяки загальному градієнту тиску, встановленому через швидке утворення пари всередині матеріалу (Schiffmann) [7]. Більшість вологи видаляється з матеріалу у вигляді пари. Але, якщо матеріал спочатку дуже сирий і тиск всередині його підвищується дуже швидко, рідина може бути видалена з зразка під впливом загального градієнта тиску. Чим вище початкова вологість, тим більший вплив градієнта тиску на швидкість перенесення вологи в матеріалі. Таким чином, існує своєрідна дія «перекачування», витіснення рідини на поверхню, часто у вигляді пари [8 – 10]. Це призводить до дуже швидкого висихання без необхідності перегріву матеріалу і сушильного агента, що, можливо, спричиняє загалку або інші явища перегріву поверхні. Тривалість процесу сушіння з підводом мікрохвильової енергії на 40...90 % менше тривалості сушіння традиційними способами [11 – 13].

Мікрохвильове сушіння з як кінцева стадія конвективного сушіння скорочує час сушіння та збільшує теплову ефективність. Малежик [14] експериментально дослідив сушіння морквяних вичавок у полі-НВЧ і з'ясував, що тривалість сушіння безпосередньо залежить від величини теплового потоку і складає 23 хв. при величині теплового потоку 100 Вт/см², 19 хв. – при 200 Вт/см² і 14 хв. – при 300 Вт/см², при величині теплового потоку 450 Вт/см² – 8 хв., при 600 Вт/см² – 5 хв. та при 700-800 Вт/см² – 4 хв.

Сушарки з псевдозрідженим шаром є найбільш ефективним обладнанням і підходять для різноманітних застосувань для сушіння. Однак головним недоліком сушарок з псевдозрідженим шаром є довгий час сушіння протягом другого періоду та низька енергоефективність (Chen et al., 2001) [15]. Використання мікрохвильового нагріву забезпечує ефективний засіб подолання цього обмеження. Експериментальні дані проф. Бурдо по сушці нуту запропонованим способом підтвердили позитивний ефект [16]. Псевдозрідження здійснювалося повітрям температури навколишнього середовища. Перспективний крок в еволюції сушильних установок пов'язаний із завданням організації часткового механічного зневоднення, що можливо при комбінації бародифузійних технологій і принципів фільтраційної сушки. В роботі Бурдо [17] сформульовано вимоги до установки для зневоднення рослинної сировини при комбінованому імпульсному впливі мікрохвильовим полем і фільтрацією шару. Досліди узгодження потужності мікрохвильового поля з кількістю продукту в камері були проведені під керівництвом Погожих [18]. Але результати отримані для нагрівання води в циліндричних ємностях мають часний характер і не можуть бути розповсюджені для широкого кола задач, що виникають при сушінні матеріалів. Виходячи з наведеного вище, очікується що комбінація ІЧ та НВЧ випромінювання може стати ефективною в процесі сушіння таких культур як соняшник, соя та кукурудза.

Поєднання інфрачервоного, мікрохвильового та конвективного сушіння було розроблено Ragab та іншими [19] з метою вивчення часу висушування та якості бураяка. Вони заявляли, що застосування мікрохвильової енергії має бути на першій стадії сушіння, коли зразок має значну вологість, оскільки він має здатність нагрівати весь об'єм зразка, оскільки ІЧ нагріває поверхню та прискорює випаровування вологи на поверхні. Про застосування продуктів комбінованого мікрохвильового, інфрачервоного та гарячого повітря для харчових продуктів також обговорювали Датта та Ні [20]. Поєднання мікрохвильового та інфрачервоного нагрівання було вивчено Вангом і Шенгом [21] для сушіння шматочків персика. Вони констатували свої спостереження у чотирьох результатах: (1) споживання енергії зменшилось, а швидкість зневоднення зростає зі збільшенням мікрохвильової та інфрачервоної потужності; (2) як для інфрачервоного, так і для мікрохвильового висушування було два падіння швидкості; (3) вплив взаємодії інфрачервоної енергії та вологообміну впливають як на споживання енергії, так і на якість; і (4) якість та енергоспоживання лінійно зменшувалися зі збільшенням вологообміну та мікрохвильової потужності відповідно. Інші дослідники також використовували мікрохвильову сушку з інфрачервоним нагріванням для визначення умов сушіння в ІЧ та мікрохвильовій сушарці для виробництва сухарів [22]. Вони використовували звичайну мікрохвильову, інфрачервону та інфрачервону-мікрохвильову сушарки окремо та в поєднанні для висушування тіста з сухарями приблизно від 40,9 до 8 % вмісту вологи. Загальну різницю кольорів та вплив потужності на зміну кольору вивчали за будь-яких умов; значення загальної різниці кольорів були вищими при інфрачервоному сушінні та нижчі при мікрохвильовій сушці, хоча не спостерігалось впливу потужності на зміну кольору. Roknul та ін. [23]

представили експериментальні результати та аналіз чотирьох методів сушіння, а саме. конвективне сушіння, конвективне сушіння на НВЧ-сушарці, інфрачервоне сушіння та конвективне сушіння з НВЧ-підігрівом, за кольором, мікроструктурою, щільністю, здатністю до регідrataції та текстурою після регідrataції шматочків салатного салату (*Lactuca sativa* L.). Результати показали, що час сушіння, необхідний для шматочків салатного салату з використанням НВЧ, був найкоротшим (120 хв.), після чого сушили гарячим повітрям з НВЧ підігріванням (140 хв), і інфрачервоним сушінням (180 хв); конвективне сушіння вимагало найдовшого часу (360 хв.). Зокрема, НВЧ дало рівномірне висушування і якість висушених зразків з використанням НВЧ також була найкращою серед цих чотирьох методів сушіння.

Аналіз приведених досліджень дозволяє зробити висновок, що використання НВЧ випромінювання прискорює перенесення вологи з середини матеріалу назовні, а ІЧ випромінювання ефективно передає енергію до вологи на поверхні матеріалу. Таким чином комбінація послідовного впливу НВЧ та ІЧ випромінювання може істотно прискорити процес сушіння і покращити його енергоефективність. Для реалізації такої технології була запропонована стрічкова сушарка з комбінованим енергопідведенням [24 – 26], але промислове виробництво такого обладнання потребує розробки методик його проектного та перевірного розрахунків.

Метою роботи є визначення параметрів функціонування стрічкової сушарки з комбінованим мікрохвильовим та інфрачервоним підведенням енергії, що забезпечують раціональні режими сушіння соняшника, кукурудзи та сої та розробка методик розрахунку таких сушарок.

При розрахунках нового типорозміру стрічкової сушарки на основі отриманої інформації на стадії науково-випробувальних і дослідно-технологічних робіт, формуються вихідні данні, в які входить продуктивність і тип стрічкової сушарки, властивості висушуваної сировини як об'єкту сушіння (вологість, температура сировини, теплофізичні характеристики) і вимоги до якості готової продукції (вологість, морфологічні та структурні характеристики).

Метою конструктивного розрахунку сушарки є визначення габаритних розмірів сушарки та потужність встановлених випромінювачів. Враховуючи, що ширина установки регламентована шириною встановлених масообмінних модулів, основним параметром, що визначає геометрію установки є її довжина $L_{уст}$, яка може бути визначена як:

$$L_{уст} = \omega_{стр} \cdot \tau_{суш} \quad (1)$$

де $\omega_{стр}$ – швидкість стрічки, $\tau_{суш}$ – час сушіння

Швидкість стрічки може бути визначена як:

$$\omega_{стр} = G_n / (B \cdot h \cdot \rho_n) \quad (2)$$

де G_n – продуктивність установки, B – ширина стрічки, h – висота шару сипкого матеріалу на стрічці, ρ_n – насипна густина сипкого матеріалу.

Ширина стрічки однозначно визначається в залежності від ширини масообмінних модулів. Максимальна висота шару сипкого матеріалу на стрічці регламентована умовами запобігання виходу НВЧ поля за межі установки, тобто конструкцією хвильоводів.

Час сушіння та швидкість сушіння в першому періоді визначається за методиками, що наведено в [26–29], де питома поверхня матеріалу визначається за даними [12].

Коефіцієнт масовіддачі β визначається як:

$$\beta = Sh \cdot D / L_k \quad (3)$$

де L_k – розмір камери, D – коефіцієнт дифузії водяної пари в повітря.

Для комбінованого типу сушіння Коефіцієнт масовіддачі визначається за рівнянням адитивності як:

$$\beta = \beta_{ІЧ} + \beta_{НВЧ} \quad (4)$$

де $\beta_{ІЧ}$ – Коефіцієнт масовіддачі, в умовах ІЧ випромінювання, $\beta_{НВЧ}$ – коефіцієнт масовіддачі, в умовах НВЧ випромінювання.

Для розрахунку числа Bu за методиками [26–29] в чисельнику знаходиться відповідна складова загальної потужності установки: потужність ІЧ випромінювачів для розрахунку $\beta_{ІЧ}$ та потужність НВЧ випромінювачів для розрахунку $\beta_{НВЧ}$. В знаменнику в якості питомої видаленої вологи $W_{пт}$ прийнято витрату вологи, що видаляється при одиницьковому зниженні вологовмісту продукту в першому модулі.

$$W_{пт} = G \cdot 0,01 \quad (5)$$

Алгоритм конструктивного розрахунку сушарки представлено на рис.1. Вхідними даними для розрахунку є:

- технологічні параметри – початковий і кінцевий вологовміст продукту $W_{п}$, $W_{к}$, продуктивність установки G_n , початкова температура продукту t_n ;
- вид продукту та його властивості – висота шару продукту, насипна густина продукту, питома поверхня продукту або геометричні розміри часток продукту та маса 1000 зерен;
- регламентовані параметри установки – довжина камери L_k , ширина стрічки транспортера B , задана потужність установки та співвідношення між потужністю НВЧ та ІЧ випромінювачів.
- параметри навколишнього середовища – температура повітря, відносна вологість повітря.

На першому етапі розрахунку за параметрами продукту та навколишнього середовища визначаються властивості продукту, такі як рівноважний вологовміст продукту та коефіцієнт активності води. Далі визна-

чається парціальний тиск водяної пари в навколишньому повітрі та теплофізичні властивості водяної пари, такі як тиск насиченої водяної пари, питома теплота пароутворення та коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі.

На наступному етапі визначаємо швидкість руху стрічки транспортеру за рівнянням 2. Далі визначаємо питомої видаленої вологи $W_{пт}$ за формулою 5, та число Пекле і число енергетичної дії. Використовуючи отримані значення чисел подібності в залежності від типу продукту, що висушується, та способу підведення енергії розраховується число Шервуда для кожного типу енергопідводу та відповідні значення коефіцієнтів масовіддачі. Узагальнений коефіцієнт масовіддачі визначається за рівнянням адитивності 4. По значенню узагальненого коефіцієнта масовіддачі визначається швидкість сушіння в першому періоді, яка є максимальною швидкістю сушіння за даних умов N_{max} . Знаючи швидкість сушіння в першому періоді, визначають час сушіння $\tau_{суш}$ який є часом знаходження продукту в установці.

За визначеним значенням часу знаходження продукту в установці по формулі 1 визначається довжина установки $L_{уст}$. Далі визначається кількість масообмінних модулів як:

$$n = L_{уст} / (L_k + L_{дон}) \quad (6)$$

де $L_{дон}$ – відстань між масообмінними модулями.

На останньому етапі розраховується потужність ІЧ випромінювачів окремого ІЧ модуля $N_{ІЧ}$ та потужність НВЧ випромінювачів окремого НВЧ модуля $N_{НВЧ}$ за рівнянням:

$$N_{ІЧ} = 2N_{уст} \cdot k_{ІЧ} / n \quad (7)$$

$$N_{НВЧ} = 2N_{уст} \cdot (1 - k_{ІЧ}) / n \quad (8)$$

де $k_{ІЧ}$ – відстань між масообмінними модулями.

Для з'ясування параметрів установки, що існує необхідно виконати перевірний розрахунок, алгоритм якого наведено на рис 2.

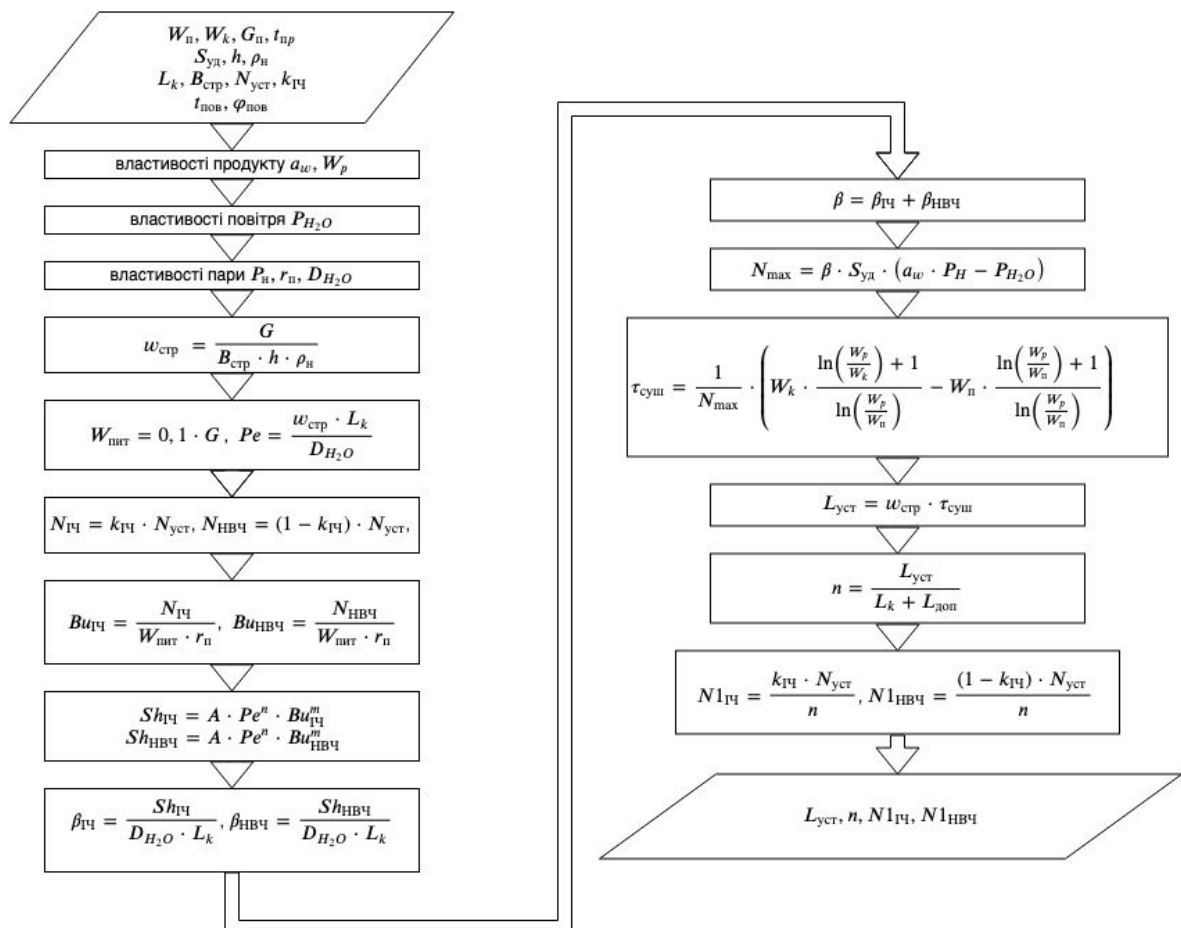


Рис. 1 – Алгоритм конструктивного розрахунку сушарки

Метою перевірного розрахунку сушарки є визначити чи відповідає час знаходження продукту в установці потрібному часу сушіння.

Вхідними даними для перевірного розрахунку є:

- технологічні параметри – початковий і кінцевий вологовміст продукту W_n, W_k , продуктивність установки G_n , початкова температура продукту t_n ;

- вид продукту та його властивості – висота шару продукту, насипна густина продукту, питома поверхня продукту або геометричні розміри часток продукту та маса 1000 зерен;
- регламентовані параметри установки – довжина камери L_k , ширина стрічки транспортера B , задана потужність НВЧ та ІЧ випромінювачів та кількість масообмінних модулів n .
- параметри навколишнього середовища – температура повітря, відносна вологість повітря.

На першому етапі розрахунку за параметрами продукту та навколишнього середовища визначаються властивості продукту, такі як рівноважний вологовміст продукту та коефіцієнт активності води. Далі визначається парціальний тиск водяної пари в навколишньому повітрі та теплофізичні властивості водяної пари, такі як тиск насиченої водяної пари, питома теплота пароутворення та коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі.

На наступному етапі визначаємо швидкість руху стрічки транспортеру за рівнянням 2 та довжину установки як:

$$L_{уст} = (L_k + L_{дон}) / n \quad (9)$$

Час знаходження продукту в установці визначаємо як:

$$\tau_{суш} = L_{уст} / \omega_{стр} \quad (10)$$

Розраховується загальна потужність ІЧ випромінювачів $N_{устІЧ}$ загальна та загальна потужність НВЧ випромінювачів $N_{устНВЧ}$ за рівнянням:

$$N_{устІЧ} = N_{ІЧ} \cdot n / 2 \quad (11)$$

$$N_{устНВЧ} = N_{НВЧ} \cdot n / 2 \quad (12)$$

Далі визначаємо питомих видаленої вологи $W_{пт}$ за формулою 5, та число Пекле і число енергетичної дії для кожного з видів енергопідведення.

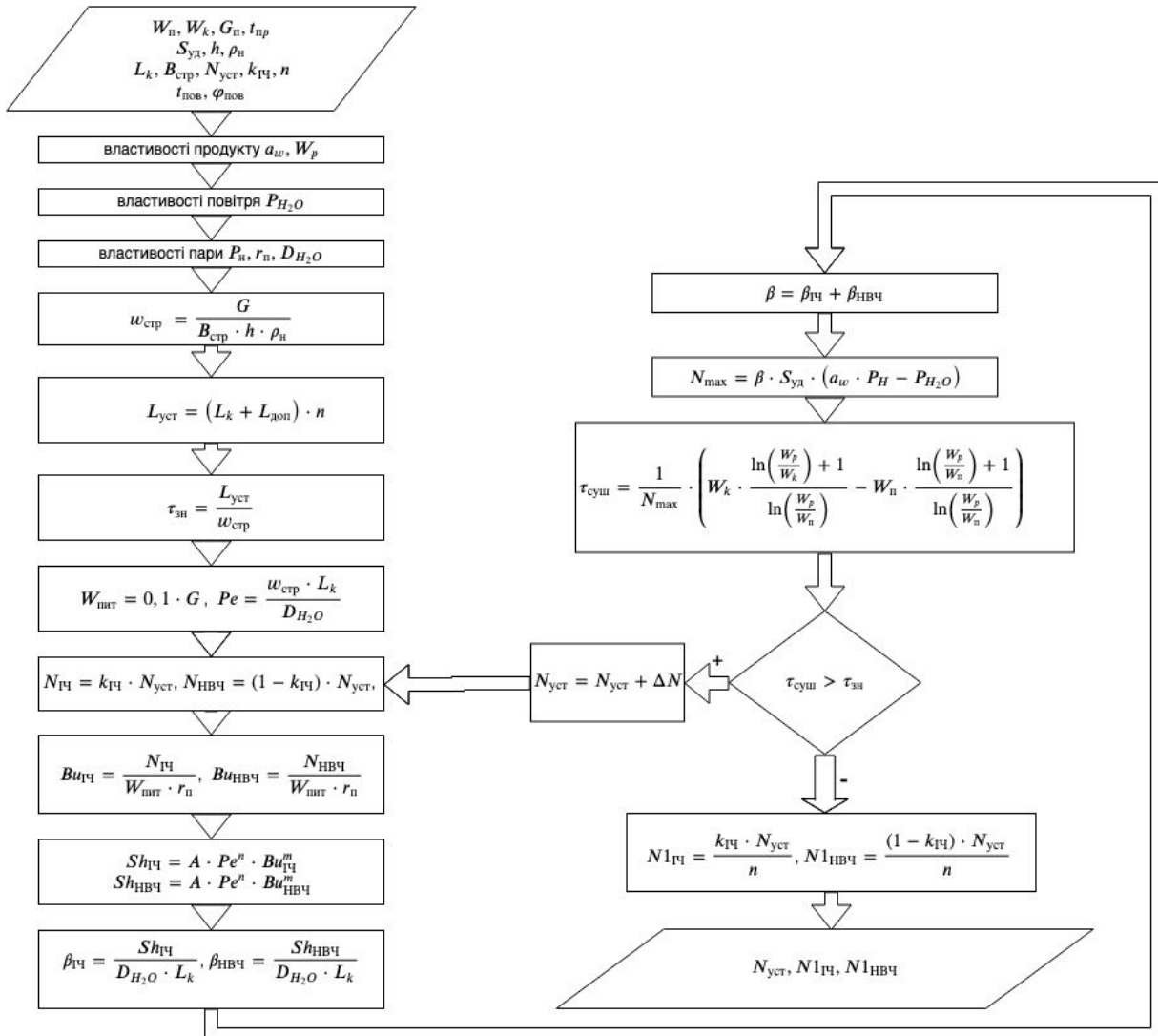


Рис. 2 – Алгоритм перевірочного розрахунку сушарки

Використовуючи отримані значення чисел подібності в залежності від типу продукту, що висушується, та способу підведення енергії розраховується число Шервуда для кожного типу енергопідводу та відповідні значення коефіцієнтів масовіддачі. Узагальнений коефіцієнт масовіддачі визначається за рівнянням адитивності 4. По значенню узагальненого коефіцієнта масовіддачі визначається швидкість сушіння в першому періоді, яка є максимальною швидкістю сушіння за даних умов $N_{\max}$. Знаючи швидкість сушіння в першому періоді визначають час сушіння $\tau_{\text{суп}}$.

Якщо визначений час сушіння не є меншим за час знаходження продукту в установці, то збільшують потужність випромінювачів наперед задану величину і повторюють розрахунки часу сушіння для нових значень потужності.

За допомогою розроблених методик була розрахована та створена експериментальна стрічкова установка для зневоднення рослинної сировини електромагнітним полем МХ і ІЧ призначена для сушіння рослинної сировини. Особливістю стрічкової сушарки є те, що нагрів рухомого, щільного шару сировини здійснюється за рахунок нагріву вологого діелектричного матеріалу частин сировини (зерна) в середовищі мікрохвильового та інфрачервоного електромагнітного поля. Розрахункова продуктивність експериментальної установки 58 кг/год, при зниженні вологості з 25 до 14 %.

Висновки

Розроблена методика дозволяє розраховувати параметри інноваційних сушарок з комбінованим ІЧ та НВЧ енергопідведенням та може бути використана при проектуванні сушильної техніки. Наразі постає задача оптимізації режимних та конструктивних параметрів таких установок.

References

1. Togrul, H. (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering*, 71(3), 311–323.
2. Hashimoto, A. & Kameoka, T. (1999). Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials. *Drying Technology*, 17(7–8), 1613–1626.
3. Swasdisevi, T.; Devahastin, S.; Sa-Adchom, P. & Soponronnarit, S. (2009). Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering*, 92(1), 100–106.
4. Arsoy, S. (2008). Temperature-controlled infrared drying characteristics of soils. *Drying Technology*, 26(12), 1477–1483.
5. Wang, J. & Sheng, K.C. (2004). Modeling of multi-layer far-infrared dryer. *Drying Technology*, 22(4), 809–820.
6. Chua, K.J.; Chou, S.K.; Mujumdar, A.S.; Ho, J.C.; & Hon, C.K. (2004). Radiant–convective drying of osmotic treated agro-products: Effect on drying kinetics and product quality. *Food Control*, 15(2), 145–158.
7. Burdo O. G. (2012) Novye principy obezvozhivaniya zernovogo syr'ya [New principles of dehydration of grain raw materials]. *Zernovye produkty i kombikorma*. № 1. P. 42–46 (in Russian).
8. Burdo O.G., Shit M.L., Zykov A.V., Reznichenko D.N., & Zhuravlev A.A. (2016) Tehnologii adresnoj dostavki jenerгии i termotransformacii pri proizvodstve produktov pitaniya [Technologies of targeted energy delivery and thermal transformation in food production]. *Problemele Energeticii Regionale*. 2 (31) (in Russian). Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-adresnoj-dostavki-enerгии-i-termotransformatsii-pri-proizvodstve-produktov>
9. O. G. Burdo, V. N. Bandura, Yu. O. Levtrinskaya (2017) Elektrotehnologii adresnoj dostavki energii pri obrabotke pishchevogo syr'ya [Electrical technologies of targeted energy delivery in the processing of food raw materials]. *EOM*. №3. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektrotehnologii-adresnoj-dostavki-enerгии-pri-obrabotke-pischevogo-syrya>.
10. Burdo, O.G., Sirotuk, I.V., Al'khuri, Yu., Levtrinskaya, Yu.O. (2018) Mikrovolnovaja jenergiya, kak fa-ktor intensivatsii teplomassoperenosa [Microwave energy as a factor of heat and mass transfer intensification]. *Problemele Energeticii Regionale*. 1(36) (in Russian). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrovolnovaya-energiya-kak-faktor-intensifikatsii-teplomassoperenosa>.
11. Burdo O.G. (2013). *Pishhevyje nanoenergotehnologii [Food nanoenergy technologies]*. Kherson (in Russian).
12. Burdo O.G., Zikov O.V., Gayda S. (1999). Novi printsipi termoobrobki zerna [New principles of grain heat treatment]. *Naukovi praci ODAKhT*, 31. 223–229 (in Ukrainian).
13. Burdo, O. G., Yaroviy, I. I., Ruzhitska, N. V. (2010). Doslidzhennya kinetiki sushinnya nerukhomogo sharu zerna v elektromagnitnomu poli [Investigation of the kinetics of drying a fixed grain layer in an electromagnetic field]. *Naukovi praci ODAKhT*, 38 (1). 101–105 (in Ukrainian).
14. Malezhyk, I.F., Bessarab, O.S., Bandurenko, H.M., Levkivs'ka, T.M. (2014). Doslidzhennya protsesu nvch-sushinnya morkvyanikh vichavok pri oderzhanni karotinovmisnogo zbagachuvacha [Investigation of the kinetics of drying a fixed grain layer in an electromagnetic field]. *Naukovi praci ONAKhT*. 45(2). 51–55 (in Ukrainian).
15. Chen, G., Wang, W. & Mujumdar, S. (2001). Theoretical study of microwave heating patterns on batch fluidized bed drying of porous material. *Chemical Engineering Science*. 56. 6823–6835.

16. Burdo, O.G., Kazmiruk, Yu.A. (2008). Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti pri sushke dispersnykh produktov [Ways to increase energy efficiency when drying dispersed products]. *Problemele Energeticii Regionale*. 1. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-povysheniya-energeticheskoy-effektivnosti-pri-sushke-dispersnyh-produktov>.
17. Burdo, O.G., Terziyev, S.G., Yarovoy, I.I., Borshch, A.A. (2012) Elektromagnitnyye tekhnologii obezvozhivaniya syr'ya [Electromagnetic technologies of raw material dewatering]. *Problemele Energeticii Regionale*. 1. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektromagnitnye-tehnologii-bebezvozhivaniya-syrya>.
18. Pohozhykh, M. I., Tsurkan, M. M. (2011). Vyznachennya ratsional'noho navantazhennya doslidnoyi NVCh-kamery [Determination of the rational load of an experimental microwave camera]. *Prohresyvi tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli*, 1. 112-115. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2011_1_21.
19. Ragab, K., Zhongli, P., Adel, S., Bruce, R.H. & Sherief, M. (2011). Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *Food Science and Technology*, 44(81), 1126–1132.
20. Datta, A.K., & Ni, H. (2002). Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. *Journal of Food Engineering*, 51(4), 355–364.
21. Wang, J. & Sheng, K.C. (2006). Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT - Food Science and Technology*, 39(3), 247–255.
22. Tireki, S., Sumnu, G. & Esin, A. (2006). Production of bread crumbs by infrared-assisted microwave drying. *European Food Research and Technology*, 222(1–2), 8–14.
23. Roknul, A.S.M., Zhang, M., Mujumdar, A.S. & Wang, Y. A (2014). Comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (*Lactuca sativa* L.). *Drying Technology*, 32(6), 657–666.
24. Bandura, V.M., Yarovy, I.I., Marenchenko, O.I., Pylypenko, Ye.O. (2018). Aparaty dlya sushinnya roslynnoyi syrovyny elektromagnitnym polem [Devices for drying vegetable raw materials by electromagnetic field]. *Scientific Works*, 82(2). 123-129.
25. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Zozulyak, I., Levtrinskaya, J. & Marenchenko E. (2017). Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 4 (11 (88)), 34-42
26. Burdo, O. et al (2017). Using of the Wave Technologies in Intensification Processes of Heat and Mass Transfer. *EUREKA Phys. Eng.* 4. 18–24.
27. Bandura, V.M., Marenchenko, O.I., Pylypenko, Ye.O. (2017). Sushinnya nasinnya sonyashnyku v elektromagnitnomu poli [Drying of sunflower seeds in an electromagnetic field]. *Tekhnika, energetika, transport APK*. 3(98). 63-68.
28. Bandura, V.N., Marenchenko, O.I., Pylypenko, Ye.O. & Katasonov O.V. (2017). Kinetyka sushinnya oliynoyi syrovyny v elektromagnitnomu poli [Kinetics of drying oilseeds in an electromagnetic field]. *Scientific Works*, 81(1). 94-98.
29. Burdo O.G., Marenchenko, O.I., Pylypenko, Ye.O. & Balagura V.V. (2017). Matematicheskaya model' mikrovolnovoy lentchnoy sushilki [Mathematical model of a microwave belt dryer]. *Materialy VI Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Innovatsiyi enerhotekhnolohiyi»*. Odesa:ONAKhT. 226-232.

METHOD OF CALCULATION OF TAPE DRYERS WITH COMBINED ELECTROMAGNETIC ENERGY SUPPLY FOR DRYING CORN, SUNFLOWER AND SOYBEAN SEEDS

Marenchenko O.I., PhD, Zykov O.V., Dr. Sci. Tech.
Odessa National Academy of Food Technologies

Based on a detailed analysis of the literature on the use of infrared and microwave energy supply in the drying of raw materials, the conclusion is made about the prospects of developing equipment that combines the combined effects of infrared and microwave radiation for drying oil-containing raw materials, including corn and soybeans. Analysis of these studies allows us to conclude that the use of microwave radiation accelerates the transfer of moisture from the middle of the material to the outside, and infrared radiation effectively transmits energy to moisture on the surface of the material. Thus, the combination of sequential exposure to microwave and infrared radiation can significantly accelerate the drying process and improve its energy efficiency. Previous studies of the drying kinetics of corn, sunflower and soybeans have yielded equations for determining the drying time of these products in such dryers, which, in turn, has become a starting point for creating methods of design and verification calculations of such dryers. The purpose of the constructive calculation of the dryer is to determine the overall dimensions of the dryer and the power of the installed emitters. At the first stage of calculation, the properties of the product, such as

the equilibrium moisture content of the product and the coefficient of water activity, are determined by the parameters of the product and the environment. Next, the partial pressure of water vapor in the ambient air and the thermophysical properties of water vapor, such as the pressure of saturated water vapor, the specific heat of vaporization and the diffusion coefficient of water vapor in the air, are determined. At the next stage we determine the speed of the conveyor belt. Next, we determine the corresponding values of the mass transfer coefficients and the generalized mass transfer coefficient. The value of the generalized mass transfer coefficient determines the drying rate in the first period and the drying time. The length of the installation and the number of mass transfer modules are determined by the determined value of the product residence time in the installation. At the last stage, the power of the IR emitters of a separate IR module and the power of the microwave emitters of a single microwave module are calculated.

Keywords: drying, microwave radiation, infrared radiation, dryer, grain drying, energy efficiency, drying speed.

Список використаної літератури

1. Togrul, H. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering* 2005, 71(3), P. 311–323.
2. Hashimoto, A., Kameoka, T. Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials. *Drying Technology*. 1999, 17(7–8), P. 1613–1626.
3. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice / Swasdisevi, T. et. al.. *Journal of Food Engineering* 2009, 92(1), P. 100–106.
4. Arsoy, S. Temperature-controlled infrared drying characteristics of soils. *Drying Technology* 2008, 26(12), P. 1477–1483.
5. Wang, J.; Sheng, K.C. Modeling of multi-layer far-infrared dryer. *Drying Technology* 2004, 22(4), P. 809–820.
6. Radiant–convective drying of osmotic treated agro-products: Effect on drying kinetics and product quality / Chua, K.J. et al. *Food Control* 2004, 15(2), 145–158.
7. Бурдо О. Г. Новые принципы обезвоживания зернового сырья. *Зерновые продукты и комбикорма*. 2012. № 1. С. 42–46.
8. Технології адресної доставки енергії та термотрансформації при виробництві продуктів харчування / О.Г. Бурдо та ін. *Проблеми регіональної енергетики*. 2016. №2 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-adresnoy-dostavki-energii-i-termotransformatsii-pri-proizvodstve-produktov-pitaniya> (дата звернення: 19.01.2020).
9. Бурдо О. Г., Бандура В. Н., Левтринська Ю. О. Електротехнології адресної доставки енергії при обробці харчового сировини. *ЭОМ*. 2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektrotehnologii-adresnoy-dostavki-energii-pri-obrabotke-pischevogo-syrnya> (дата звернення: 19.01.2020).
10. Мікрохвильова енергія, як фактор інтенсифікації тепломасопереносу / О.Г. Бурдо та ін. *Проблеми регіональної енергетики*. 2018. №1 (36). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrovolnovaya-energiya-kak-faktor-intensifikatsii-teplomassopere-nosa> (дата звернення: 19.01.2020).
11. Бурдо О.Г. Харчові нанотехнології. Харків, 2013. 294с.
12. Бурдо О.Г., Зиков О.В., Гайда С. Нові принципи термообробки зерна. *Наук. Пр. ОДАХТ*. Одеса., 1999. №31. С. 223–229.
13. Бурдо О. Г., Яровий І. І., Ружицька Н. В. Дослідження кінетики сушіння нерухомого шару зерна в електромагнітному полі. *Наукові праці ОНАХТ*, 2010, №38 (1). С. 101–105.
14. Дослідження процесу нвч-сушіння морквяних вичавок при одержанні каротиновмісного збагачувача / І. Ф. Малешко та ін. *Наукові праці ОНАХТ*. 2014. Т. 2, № 45. С. 51–55.
15. Chen, G., Wang, W. and Mujumdar, S. Theoretical study of microwave heating patterns on batch fluidized bed drying of porous material. *Chemical Engineering Science*. 2001. №56. P. 6823–6835.
16. Бурдо О. Г., Казмирук Ю. А. Пути повышения энергетической эффективности при сушке дисперсных продуктов. *Проблеми регіональної енергетики*. 2008. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-povysheniya-energeticheskoy-effektivnosti-pri-sushke-dispersnyh-produktov> (дата звернення: 19.01.2020).
17. Електромагнітні технології обезвоживання сировини / О.Г. Бурдо та ін. *Проблеми регіональної енергетики*. 2012. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektromagnitnye-tehnologii-obezvozhvaniya-syrnya> (дата звернення: 19.01.2020).
18. Погосов М. І., Цуркан М. М. Визначення раціонального навантаження дослідної НВЧ-камери. *Прогресивні техніки та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2011. Вип. 1. С. 112–115. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2011_1_21.
19. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. / Ragab, K. et al. *Food Science and Technology*. 2011, 44(81), P. 1126–1132.
20. Datta, A.K.; Ni, H. Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. *Journal of Food Engineering*. 2002, 51(4), P. 355–364.
21. Wang, J.; Sheng, K.C. Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT. Food Science and Technology*. 2006. 39(3). P. 247–255.

22. Tireki, S., Sumnu, G.; Esin, A. Production of bread crumbs by infrared-assisted microwave drying. *European Food Research and Technology*. 2006, 222(1–2), P. 8–14.
23. A comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (*Lactuca sativa* L.). / Roknul, A.S.M. et al. *Drying Technology* 2014, 32(6), P. 657–666.
24. Апарати для сушіння рослинної сировини електромагнітним полем / В.Н. Бандура та ін.. *Наукові праці*. 2018. Т.82, вип. 2. С. 123-129.
25. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. / O Burdo, et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №4 (11 (88)), P. 34-42
26. Using of the Wave Technologies in Intensification Processes of Heat and Mass Transfer / Burdo O. et al. *EU-REKA Phys. Eng.* 2017. Т. 4, № 4. P. 18–24.
27. Бандура В.Н., Маренченко О.І., Пилипенко Є.О. Сушіння насіння соняшнику в електромагнітному полі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 3(98). С. 63-68.
28. Кінетика сушіння олійної сировини в електромагнітному полі / Бандура В.Н. та ін. *Наукові праці*. 2017. Т.81, вип. 1. С. 94-98.
29. Бурдо О.Г., Маренченко О.І., Пилипенко Є.О. Математическая модель микроволновой ленточной сушки. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології» 4 – 8 вересня 2017 р. Одеса:ОНАХТ, 2017. С. 226-232.

Отримано в редакцію 30.03.2021
Прийнято до друку 01.07.2021

Received 30.03.2021
Approved 01.07.2021

ЗНЕВОДНЕННЯ КОЛАГЕНОВОГО РИБ'ЯЧОГО КЛЕЮ В УМОВАХ ДІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Левтринська Ю.О., к.т.н., асистент

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

Проблеми використання енергії та утилізація відходів є глобальними проблемами людства, згідно з даними Всесвітньої організації торгівлі та Організації Об'єднаних націй. Зниження використання енергетичних ресурсів та збільшення частки біорозкладаної тари у харчовій промисловості дозволяє знизити навантаження на оточуюче середовище екології. Дослідження виконано з метою використання методу зневоднення у мікрохвильовому полі, що дозволяє знизити енергетичні витрати. Аналіз публікацій в Україні та світі показує, що такі способи зневоднення до колагенових клеїв не застосовують. Висушування у сушильних шафах за низьких температур, яке використовують у промисловості, тривале, вимагає багато енергетичних витрат. Окрім того, через тривалість процесу у клеї додаються антисептики, що сповільнюють мікробіологічне псування продукту. У статті представлено експериментальні дослідження процесу зневоднення колагенового клею у мікрохвильовому полі. Оскільки продукт є термолабільним, проаналізовано декілька температурних режимів: 40 °C, 60 °C, 80 °C у мікрохвильовому апараті, та 60 °C у термостаті. Зразки клею зневоднювалися до вологості 17%, що відповідає вологості продукту, який виробляється промислово. Згідно літературних даних, під впливом високої температури колагенові клеї втрачають свої адгезивні властивості. Наразі, не досліджено, як мікрохвильове поле може вплинути на якість клею. Із використанням зразків зневоднених за різних режимів проведено експеримент з перевірки клейового з'єднання до механічних деформацій. Зразки зневоднені у мікрохвильовому успішно пройшли випробування міцності на розрив. Усі зразки витримали навантаження у 1,5 кН. Випробування міцності на зсувові навантаження показало диференціювання результатів для зразків оброблених за нижчих температур та зразку обробленого за 80 °C і вище. Навантаження на клейове з'єднання до розщеплення показало, що оброблені за температур нижче 60 °C є більш міцними.

Ключові слова: риб'ячий клей, мікрохвильове поле, адгезивні властивості, механічне руйнування клейового з'єднання, енергоефективність.

Аналіз проблематики та останніх досліджень. Проблеми використання енергії та утилізація відходів є глобальними проблемами людства, згідно з даними Всесвітньої організації торгівлі та Організації Об'єднаних націй. Зниження використання енергетичних ресурсів та збільшення частки біорозкладаної тари у харчовій промисловості дозволяє знизити навантаження на навколишнє середовище, зробити технології виробництва більш дружніми до екології. Окрім проблеми використання пластику для пакування та зниження його частки у відходах, що не надходять на переробку велику проблему становить пакування, яке не може бути направлено на переробку [1]. Якщо мова іде про пластикові PET пляшки, полістирол та поліхлорвініл – це матеріали які можна переробляти та використовувати повторно. Щодо комбінованих матеріалів, на кшталт тетрапак – тут ситуація погіршується тим, що цей матеріал є поєднанням пластику, металу та паперу, що суттєво ускладнює, а подекуди і унеможливує переробку таких матеріалів. Картонна та паперова тара займає значний сегмент пакувальних матеріалів у харчовій промисловості та інших галузях. Перевагою целюлозних пакувальних матеріалів є їхня придатність до компостування. Однак, при використанні полімерних клеїв знову з'являється проблема впливу пакування на навколишнє середовище. Не усі типи пакування можливо скріплювати без використання клеїв, складані коробки не зможуть гарантувати збереження продукції у належній якості [2]. Таким чином, органічні клеї необхідні для того, щоб зробити тару більш безпечною для навколишнього середовища.

Натуральні органічні адгезиви відомі людству та використовуються досить тривалий час. Однак, їхнє промислове виробництво та використання пов'язано з низкою проблем. Першою є проблеми експлуатації цих матеріалів, пов'язані із їхніми властивостями – нестійкість до води, високих температур, органічного розкладання мікроорганізмами. Якщо казати про харчову промисловість – строки та умови зберігання продукції тотожні строку розкладання натуральних адгезивів, тому це не становить проблеми. Друга проблема – витрати енергетичних ресурсів на виробництво натуральних клеїв. Значні витрати теплової енергії зумовлюють високу собівартість виробництва. Перший етап отримання органічних адгезивів – екстрагування. При виробництві колагенових клеїв сировиною слугує тваринна сировина – шкіра тварин або риби, кістки та луска. Для виготовлення клеїв високої якості використовують плавальні міхури риб. Основний етап виробництва – виварювання, яке є регламентованим технологічним процесом, втручання у який потребує цілковитої зміни технології. Другий етап, на якому витрачається значна кількість енергії зневоднення клею. Колагенові клеї висушуються, оскільки у рідкому стані вони швидко псуються під впливом гнилісних мікроорга-

нізмів. Оскільки колаген є природним вологоутримувачем, видалення води ускладнено. Використання високих температур неприпустиме, тому що білкові структури, що забезпечують в'язучі властивості клею, руйнуються. Відповідно, процес тривалий, потребує великих витрат ресурсів, зокрема – енергії, та внесення антисептиків у сировину для унеможливлення псування протягом технологічного процесу [3]. Така технологія, вочевидь, потребує великих витрат і робить використання колагенового клею для пакування нераціональним з економічних міркувань. Виключення використання антисептиків та зниження витрат енергії на етапі зневоднення дозволить змінити цю ситуацію.

Оскільки сьогодні промисловість задовольняє потреби у адгезивних матеріалах за рахунок полімерних клеїв переважно нафтохімічного виробництва, технологія виробництва риб'ячих клеїв є традиційною і не переглядається. Процеси виробництва клеїв з риб'ячої сировини переважно поліпшуються з застосуванням нових антисептичних домішок, що пригнічують розвиток мікроорганізмів [4]. Застосовуються більш нові моделі сушильних шаф із вакуумом [5], але спеціалізованих рішень для виробництва цього продукту у відкритих джерелах не знайдено. Патентний пошук технологій зневоднення риб'ячого клею також не показав застосування електромагнітного впливу, зокрема мікрохвильового у виробництві. Зокрема, серед останніх запатентованих способів виробництва фігурують різні підходи до вибору способів розмочування сировини та екстрагування колагену [6], проте для зневоднення використовуються методи конвективного сушіння.

Застосування риб'ячого клею не обмежено використанням для склеювання деревини, целюлози та реставраційних робіт. Колагенові клеї використовуються для освітлення харчових розчинів, зокрема освітлення дорогих сортів вин. У фармацевтичній промисловості риб'ячі клеї використовуються як скріплювальні домішки для таблеток, гранул та капсул [5]. Відповідно, у риб'ячого клею є одразу декілька галузей для застосування. Мікрохвильове випромінювання використовується для інтенсифікації масообмінних процесів вченими у різних галузях та країнах світу, зокрема: в процесах екстрагування у Франції [7] та Малайзії [8], Ірландії [9], у процесах сушіння та зневоднення у Китаї [10], Нідерландах та Словенії [11], Малайзії та Польщі [12], Тунісі [13]. З використанням мікрохвильового поля для зневоднення вже проводились успішні дослідження вченими кафедри процесів, обладнання та енергетичного менеджменту Одеської національної академії харчових технологій зі зневоднення овочевих та фруктових соків та екстрактів [14], білкових продуктів [15]. Результати попередніх досліджень з використанням лабораторної установки свідчать про позитивний ефект при застосуванні методу зневоднення. Для зневоднення клею даний метод застосовується вперше. Для подальшої імплементації цього методу у дослідженнях та практиці важливим питанням є, чи не впливає негативно використання мікрохвильового поля на адгезивні властивості клею.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є дослідження впливу мікрохвильового поля на якість адгезивного матеріалу, а саме – колагенового риб'ячого клею. Застосування мікрохвильового поля у процесі зневоднення риб'ячого клею має на меті зменшення енергетичних витрат та суттєве скорочення тривалості процесу, що дозволяє уникнути потреби використання антисептиків у процесі зневоднення. Таким чином, можна спростити технологію отримання адгезивів з рибної сировини, що дасть можливість розглядати їх як заміну екологічно шкідливим полімерним адгезивам та зробити переробку відходів виробництва риби більш економічно привабливою.

Матеріали і методи досліджень. Об'єктами дослідження є технологія зневоднення рідкого риб'ячого клею у мікрохвильовому апараті. Дослідження проведено з використанням готового висушеного риб'ячого клею, виробленого промислово з дотриманням технологічних регламентів. Використання перевіреного продукту дає можливість виключити порушення технології у процесі отримання сировини, таким чином виключити багатофакторність процесу та порівняти результати з контрольними зразками.

Для зневоднення використано установку (рис.1) [14], створену вченими кафедри процесів, обладнання та енергетичного менеджменту Одеської національної академії. Якщо визначним є лише вплив температури, як і в традиційному процесі зневоднення тепловим способом, то метод можна розглядати, як актуальну альтернативу з перспективами впровадження.

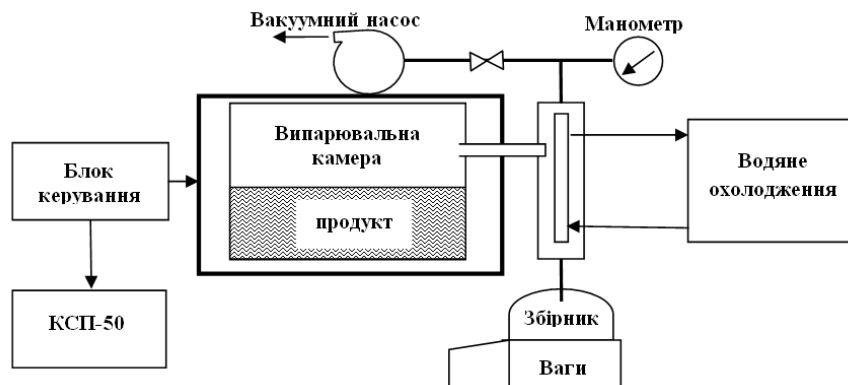


Рис. 1 – Дослідна установка для випарювання [14]

Сушений риба́чий клей розведено водою та підготовано до випарювання у співвідношенні 1:7. Експеримент проведено за трьох режимів роботи установки, за підтримки розрідження у камері за допомогою вакуумного насосу. Один зразок висушено у лабораторному термостаті за температури близька 60 °С при атмосферному тиску.

Для перевірки стійкості до механічних руйнувань використано лабораторну установку, що складається з динамометру, системи кріплень та передачі механічної енергії до зразку.

Для склеювання обрано бруски натуральної деревини (сосна), однакового розміру. Розмір брусків для склеювання $d \times ш \times в = 120 \times 45 \times 20$ мм. Зразки клею та зразки склеєної деревини оцінювалися візуально.

Температуру під час процесу вимірювали інфрачервоним пірометром випромінювання (-50...380°C). Контроль маси конденсату для визначення зміни вологовмісту здійснювали за допомогою лабораторних ваг ТВЕ-0,21-0,001. Для вимірювання питомої потужності використано мультифункціональний комплекс КСП-51. Для розчинення клею та підготовки його до експерименту та розчинення після зневоднення використано водяну баню «ІТЖ Термостат водяний».

Результати досліджень. При використанні мікрохвильової установки присутні температурні коливання ± 8 °С. З термограми процесу зневоднення видно, що температура, за виключенням незначних коливань, стала. Для висушування у термостаті показано лише ділянку термограми для 60 хв (рис 2, а), загалом процес тривав приблизно у 7 разів довше, ніж у мікрохвильовому апараті для зразку у 3 рази меншого за обсягом.

За час експерименту відносна вологість продукту знижена з 86% до 17%. Готові зразки мали вигляд твердої структури з гладкою поверхнею. Зневоднений риба́чий клей легко кришився та відламувався, мав склоподібну структуру (рис. 2, б).

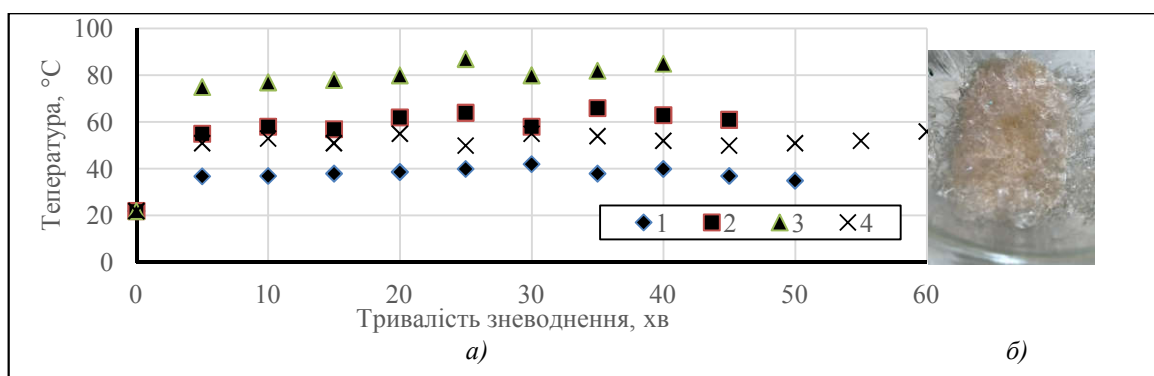


Рис. 2 – Термограма процесу зневоднення риба́чого клею та вигляд кінцевого продукту

Оскільки температура кипіння залежить від тиску, при зниженні інтенсивності впливу мікрохвильового поля є можливість використовувати більш низький тиск. Таким чином тривалість процесу на різних режимах слабо відрізняється, як можна бачити з табл. 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

	Режим обробки	Питома споживана потужність установки, кВт/год	Середнє значення температури, °С	Середнє значення тиску в апараті, кПа	Тривалість процесу, хв	Початкова маса висушеного вологого зразку, кг
1	Мікрохвильове поле, вакуум	0,35	40	0,10	45	0,15
2	Мікрохвильове поле, вакуум	0,65	60	0,15	42	0,15
3	Мікрохвильове поле, вакуум	1,5	80	0,20	38	0,15
4	Термостат	1,85	55	1	380	0,05

Вологовміст, що дорівнює $\omega = (G_{\text{вол}}/G_{\text{сух}}) \cdot 100\%$, де $G_{\text{вол}}$ – маса води у матеріалі, а $G_{\text{сух}}$ – маса вологого матеріалу, розраховано експериментально за масою збираного конденсату. Досліджено три режими роботи мікрохвильового апарату (рис. 3). Протягом процесу вологовміст знижувався з постійною швидкістю, що характерно для подібних процесів, як можна судити з вигляду залежності (рис.3). Незначне зниження швидкості спостерігається наприкінці процесу. Це може бути пов'язано з формуванням твердої скоринки на поверхні висушених бульбашок риба́чого клею, що утворилися у процесі інтенсивного кипіння зразків (рис.2, б).

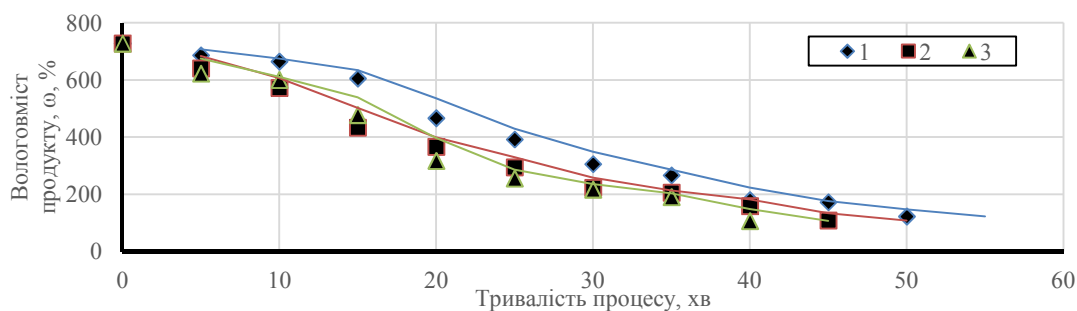


Рис. 3 – Кінетика зміни вологовмісту при зневодненні рибачого клею

Зневодненні у мікрохвильовому полі, у термостаті та контрольний зразки підготовано рекомендовано до інструкції з використання сухого рибачого клею. За температури близько 60 °C зразки витримано до розчинення на водяній бані у співвідношенні клей : вода=1:7. Зразки використано для склеювання деревини. Бруски підготованої деревини промазано клеєм та витримано під пресом протягом однієї доби у сухому чистому приміщенні без протягів. Склеєні зразки перевірено на дослідній установці на три способи механічних деформацій. Результати наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Дослідження механічної міцності зразків.

	Режим обробки	Зусилля деформації на розрив, кН	Зусилля деформації зсуву, кН	Зусилля деформації розщеплення, кН
1	Мікрохвильове поле, вакуум	1,5	1,5	1,4
2	Мікрохвильове поле, вакуум	1,5	1,3	1,2
3	Мікрохвильове поле, вакуум	1,5	1,3	1
4	Термостат	1,5	1,2	1,1
5	Контрольний зразок	1,5	1,5	1,5

За результатами цього дослідження можна зробити висновок, що після зневоднення у мікрохвильовому полі рибачий клей зберігає свої адгезивні властивості. Вплив високої температури знижує міцність клею, проте зразки здатні витримати значне навантаження. Це можна пояснити нетривалим впливом високих температур. Таким чином, при зниженні тривалості процесу можна казати, що якість отриманого продукту є задовільною. Необхідна подальша більш ґрунтовна економічна оцінка цього методу.

Висновки. Застосування мікрохвильового поля дозволяє інтенсифікувати процес зневоднення рибачого клею. Отримані зразки стійкі до механічних деформацій, що свідчить про збереження адгезивних властивостей при зневодненні колагенового рибачого клею у мікрохвильовому полі. Використання цього способу зневоднення для колагенових клеев є новим підходом, який може забезпечити суттєве зниження собівартості рибачого клею та розширення його використання, зокрема у якості екологічно безпечного клею для тари та пакування.

References

1. Tverdi pobutovi vidkhody v Ukraini: potentsial rozvytku. Stsenarii rozvytku haluzi povo-dzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy [Solid household waste in Ukraine: development potential. Scenarios for the development of the solid waste management industry]. Zvit Mizhnarodnoi finansovoi korporatsii (IFC, Hrupa Svitovo-ho banku). (2015) 114, <https://tinyurl.com/p9mh7v9c>
2. Toennissen M. (2018). Packaging Materials: 10. Adhesives for Food Packaging Applications. By Report commissioned by the packaging materials task force. 37.
3. Hetmanchuk, Yu., & Pasalskyi, B. (2010). Zastosuvannia polimeriv dlia vyhotovlennia pakuvalnykh materialiv [Application of polymers for the manufacture of packaging materials]. *Tovary i rynky*, (2), 154-164 (in Ukrainian).
4. Kulikov, P. I. (1971). *Proizvodstvo muki, zhira i belkovo-vitaminnykh preparatov v rybnoy promyshlennosti* [Production of flour, fat and protein-vitamin preparations in the fishing industry]. M: Pischevaya promyshlennost. 274 (in Russian).
5. Koliada, M. K. (2021). Stvorennia kompleksnykh ekolohichno bezpechnykh tekhnolohichnykh protsesiv pererobky kolahenvmisnykh vidkhodiv [Creation of complex environmentally friendly technological processes for processing collagen-containing waste]. 174 (in Ukrainian).
6. Dvoryaninova, O. P., & Sokolov, A. V. (2020). Sposob polucheniya rybnogo kleya iz kostey promyslovnykh ryb [A method for obtaining fish glue from the bones of commercial fish] (in Russian).

7. Chemat, F., Vian, M. A., Fabiano-Tixier, A. S., Nutrizio, M., Jambrak, A. R., Munekata, P. E. & Cravotto, G. (2020). A review of sustainable and intensified techniques for extraction of food and natural products. *Green Chemistry*, 22(8), 2325-2353.
8. Idris, F. N., Nadzir, M. M., & Abd Shukor, S. R. (2020). Optimization of solvent-free microwave extraction of Centella asiatica using Taguchi method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103766.
9. Garcia-Vaquero, M., Ummat, V., Tiwari, B., & Rajauria, G. (2020). Exploring ultrasound, microwave and ultrasound-microwave assisted extraction technologies to increase the extraction of bioactive compounds and antioxidants from brown macroalgae. *Marine drugs*, 18(3), 172.
10. Shen, L., Zhu, Y., Liu, C., Wang, L., Liu, H., Kamruzzaman, M., ... & Zheng, X. (2020). Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying. *Biosystems engineering*, 195, 64-88.
11. Kocbek, E., Garcia, H. A., Hooijmans, C. M., Mijatović, I., Lah, B., & Brdjanovic, D. (2020). Microwave treatment of municipal sewage sludge: Evaluation of the drying performance and energy demand of a pilot-scale microwave drying system. *Science of the Total Environment*, 742, 140541, p.1-13, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140541.
12. Ali, A., Oon, C. C., Chua, B. L., Figiel, A., Chong, C. H., Wojdylo, A., ... & Łyczko, J. (2020). Volatile and polyphenol composition, anti-oxidant, anti-diabetic and anti-aging properties, and drying kinetics as affected by convective and hybrid vacuum microwave drying of Rosmarinus officinalis L. *Industrial Crops and Products*, 151, 112463.
13. Chahbani, A., Fakhfakh, N., Balti, M. A., Mabrouk, M., El-Hatmi, H., Zouari, N., & Kechaou, N. (2018). Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.). *Food Bioscience*, 25, 32-38.
14. Burdo, O., Alhurie, U., Syrotyuk, I., Levtrynskaya, J., & Davar, R. P. (2018). The using of mechanodiffusion effect in the pro-duction of concentrated polyextracts. *Kharchova nauka i tekhnolohiya*, 12 (3), 97-108.
15. Burdo, O., Syrotyuk, Y., Shcherbych, M., Akymov, A., & Poian, A. (2021). Innovation of Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration and Extraction. *Problemele Energeticii Regionale*, 49(1), 86-98.

DEHYDRATION OF COLLAGEN FISH ADHESIVE IN CONDITIONS OF ACTION OF MICROWAVE RADIATION

Levtrynskaya Yu.O., PhD, assistant
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa

The problems of energy use and waste disposal are global problems of humanity, according to the World Trade Organization and the United Nations. Reducing the use of energy resources and increasing the share of biodegradable packaging in the food industry can reduce the burden on the environment. This study was performed in order to use the method of dehydration in the microwave field, which reduces energy costs. Analysis of research in Ukraine and around the world shows that such methods of dehydration are not used for collagen adhesives. Drying in ovens at low temperatures, which is used in industry, is long, requires a lot of energy. In addition, due to the duration of the process, antiseptics are added to the adhesive, which slows down the microbiological spoilage of the product. This article presents experimental studies of the process of dehydration of collagen glue in a microwave field. Since the product is thermolabile, several temperature regimes were analyzed: 40 °C, 60 °C, 80 °C in a microwave apparatus, and 60 °C in a thermostat. The glue samples were dehydrated to a moisture content of 17%, which corresponds to the moisture content of the product, which is produced industrially. According to the literature, under the influence of high temperature collagen adhesives lose their adhesive properties. It is currently unexplored how the microwave field can affect the quality of the adhesive. An experiment was performed using dehydrated samples in different modes to test the adhesive joint for mechanical deformation. Samples dehydrated in the microwave have successfully passed the tensile strength test. All samples withstood a load of 1.5 kN. Shear strength testing showed differentiation of results for samples treated at lower temperatures and samples treated at 80 °C and above. Loads on the adhesive joint before splitting showed that treated at temperatures below 60 °C are stronger.

Key words: fish glue, microwave field, adhesive properties, mechanical destruction of the adhesive joint, energy efficiency.

Список використаної літератури

1. Тверді побутові відходи в Україні: потенціал розвитку. Сценарії розвитку галузі поводження з твердими побутовими відходами. Звіт Міжнародної фінансової корпорації (IFC, Група Світового банку)., 114 с., Київ, 2015, URL: <https://tinyurl.com/p9mh7v9c> (дата звернення: 18.03.2021).
2. Packaging Materials: 10. Adhesives for Food Packaging Applications. By Monika Toennissen Report commissioned by the packaging materials task force, October 2018, 37 p.

3. Гетьманчук Ю., Пасальський Б. Застосування полімерів для виготовлення пакувальних матеріалів. *Товари і ринки*. 2010. №. 2. С. 154-164.
4. Куликов П. И. Производство муки, жира и белково-витаминных препаратов в рыбной промышленности. М: Пищевая промышленность. 1971, 264 с.
5. Коляда М. К. Створення комплексних екологічно безпечних технологічних процесів переробки колагенвмісних відходів.: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01 / наук. кер. В.П. Палаван. Київ: КНУТтаД, 2021. 174 с.
6. Способ получения рыбного клея из костей промысловых рыб: патент на изобретение. №220.017.F8F3/Дворянинова О.П., Соколов А.В. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет инженерных технологий" (ФГБОУ ВО "ВГУИТ") № 0002711801; 22.01.2020.
7. Chemat F. et al. A review of sustainable and intensified techniques for extraction of food and natural products. *Green Chemistry*. 2020. T. 22. №. 8. С. 2325-2353.
8. Idris F. N., Nadzir M. M., Abd Shukor S. R. Optimization of solvent-free microwave extraction of *Centella asiatica* using Taguchi method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020. Vol. 8. Issue. 3. 103766.
9. Garcia-Vaquero M. et al. Exploring ultrasound, microwave and ultrasound–microwave assisted extraction technologies to increase the extraction of bioactive compounds and antioxidants from brown macroalgae. *Marine drugs*. 2020. V. 18. Issue 3. P. 172.
10. Shen L. et al. Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying. *Biosystems engineering*. 2020. V. 195. P. 64-88.
11. Kocbek E. et al. Microwave treatment of municipal sewage sludge: Evaluation of the drying performance and energy demand of a pilot-scale microwave drying system. *Science of the Total Environment*. 2020. V. 742. 14054.
12. Ali A. et al. Volatile and polyphenol composition, anti-oxidant, anti-diabetic and anti-aging properties, and drying kinetics as affected by convective and hybrid vacuum microwave drying of *Rosmarinus officinalis* L. *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 151. P. 112463.
13. Chahbani A. et al. Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.). *Food Bioscience*. 2018. Vol. 25. P. 32-38.
14. Burdo O. et al. The using of mechanodiffusion effect in the production of concentrated polyextracts. *Харчова наука і технологія*. 2018. №. 12, Вип. 3. С. 97-108.
15. Burdo O. et al. Innovation of Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration and Extraction. *Problemele Energeticii Regionale*. 2021. Vol. 49. №. 1. P. 86-98.

Отримано в редакцію 10.03.2021
Прийнято до друку 29.06.2021

Received 10.03.2021
Approved 29.06.2021

ЗМІСТ

ІННОВАТИКА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ ХАРЧОВОЇ ІНДУСТРІЇ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ ПРОБЛЕМ ЛЮДСТВА	
Бурдо О.Г.	4
ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ АДСОРБЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ ВІКРИТОГО ТИПУ ДЛЯ ПІДГРІВУ ПРИПЛИВНОГО ПОВІТРЯ	
Беляновська О.А., Литовченко Р.Д., Сухий К.М., Сергієнко Я.О., Сухий М.П., Суха І.В.	15
ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ГОЛОЗЕРНОГО ВІВСА В ДІЄТИЧНИХ ПРОДУКТАХ БЕЗ ГЛЮТЕНУ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ СТРУКТУРИ ЗЕРНА В ПРОЦЕСІ ЕКСТРУЗІЙНОЇ ОБРОБКИ	
Іваницький Г.К., Целень Б.Я., Ганзенко В.В., Радченко Н.Л.	21
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ТЕМПЕРАТУРИ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ПІД ДІЄЮ ПІДВИЩЕНОГО ТИСКУ	
Потапов В.О., Якушенко Є.М., Гриценко О.Ю.	28
КОМПЛЕКСНА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЯ ОДЕРЖАННЯ АНТИОКСИДАНТНОГО БУРЯКОВО-ТОМАТНОГО БАРВНИКУ ТА НАСІННЯ ТОМАТІВ	
Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Самойленко К.М.	34
ОБГРУНТУВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НАДВИСОКОЇ ЧАСТОТИ З НАСІННЯМ РІПАКУ В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ	
Бандура В.М.	42
ІНЖЕНЕРНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ ГІДРАТАЦІЇ ПРИ ОБРОБЦІ ОЛІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ХВИЛЯМИ	
Осадчук П. І., Безбах І. В.	49
ВПЛИВ ПАРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЯБЛУК НА ТЕПЛОТУ ЗНЕВОДНЕННЯ	
Гусарова О.В., к.т.н., Михайлик В.А., к.т.н., ст. наук. співр., Шапар Р.О.	55
ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЗНЕВОДНЕННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ ОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ	
Ляшенко А. В.	63
КОМПЛЕКСНА ПЕРЕРОБКА СИРОВИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ АДРЕСНОЇ ДОСТАВКИ ЕНЕРГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ПЕКТИНІВ	
Яровий І.І., Алі В.П.	69
КОНВЕКТИВНЕ СУШІННЯ ЦУКРОВІСНИХ ПАРЕНХІМНИХ ТКАНИН ДИНІ	
Дмитренко Н.В., Шапар Р.О.	75
ВСТАНОВЛЕННЯ РЕЖИМІВ ТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРОБЛЕННЯ М'ЯСА ІНДИЧКИ	
Синиця О.В.	82
ЗАСТОСУВАННЯ АДСОРБЦІЙНОЇ ІЧ - СПЕКТРОСКОПІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ СКЛАДУ ДИМОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ ГОРІННЯ ДЕРЕВИНИ ПРИ КОПЧЕННІ М'ЯСНИХ ВИРОБІВ	
Ощипок І. М.	89
КІНЕТИКА ТА ЕНЕРГЕТИКА ПРОЦЕСІВ ЕКСТРАГУВАННЯ З ДЕРЕВИНИ ДУБА В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ	
Акімов О.В., Молчанов М.Ю., Войченко О.К., Бурдо О.Г.	95
ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВАКУУМ-ВИПАРНОГО МОДУЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ	
Сиротюк І.В.	104
ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ХАРЧОВИХ ТА ОЛІЙНИХ ВИРОБНИЦТВ	
Терзієв С.Г., Ружицька Н.В., Щербич М., Альхурі Юсеф.	110
МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТРІЧКОВИХ СУШАРОК З КОМБІНОВАНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЕНЕРГОПІДВЕДЕННЯМ ДЛЯ СУШІННЯ НАСІННЯ КУКУРУДЗИ, СОНЯШНИКУ ТА СОЇ	
Маренченко О.І., Зиков О.В.	116
ЗНЕВОДНЕННЯ КОЛАГЕНОВОГО РИБ'ЯЧОГО КЛЕЮ В УМОВАХ ДІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	
Левтринська Ю.О.	125

CONTENTS

INNOVATION OF ENERGY TECHNOLOGIES OF FOOD INDUSTRY IN THE CONTEXT OF GLOBAL PROBLEMS OF HUMANITY	
Burdo O.G.	4
THERMAL CONDITIONS OF ADSORPTIVE HEAT STORAGE DEVICE OPERATING IN OPEN-MODE FOR HEATING INFLOWING AIR	
Belyanovskaya E.A., Lytovchenko R.D., Sukhyi K.M., Serhiienko Ya.O., Sukhyi M.P., Sukha I.V.	15
PROSPECTS OF USING NAKED OATS IN GLUTEN-FREE DIETARY PRODUCTS. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE GRAIN STRUCTURE CHANGES DURING EXTRUSION PROCESSING	
Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya., Ganzenko V.V., Radchenko N.L.	21
EXPERIMENTAL STUDIES OF TEMPERATURE KINETICS DURING FILTRATION DRYING UNDER THE ACTION OF HIGH PRESSURE	
Potapov V.O., Potapov V.O., Hrytsenko O.Y.	28
COMPLEX ENERGY EFFICIENT HEAT TECHNOLOGY OBTAINING OF ANTIOXIDANT RED BEETROOT-TOMATO DYE AND TOMATO SEEDS	
Petrova Zh., Paziuk V., Samoilenko K.	34
SUBSTANTIATION OF INTERACTION OF ULTRAHIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD WITH RAPESEED DURING DRYING	
Bandura V.	42
ENGINEERING METHODS OF CALCULATION OF THE HYDRATION PROCESS DURING OIL TREATMENT BY ELECTROMAGNETIC WAVES	
Osadchuk P. I., Bezbakh I. V.	49
INFLUENCE OF STEAM TREATMENT OF APPLES ON SPECIFIC HEAT OF DEHYDRATION	
Husarova O.V., Mykhailik V.A., Shapar R.O.	55
INTENSIFICATION OF HEAT AND MASS TRANSFER AND DEWATERING OF THERMOLABILE ORGANIC MATERIALS	
Lyashenko A.	63
COMPREHENSIVE PROCESSING OF RAW MATERIALS USING TECHNOLOGIES OF ADDRESSSED ENERGY DELIVERY IN THE PRODUCTION OF PECTINS	
Yarovy I.I., Ali V.P.	69
CONVECTIVE DRYING OF SUGAR-CONTAINING MELON PARENCHYMAL TISSUES	
Dmytrenko N. V., Shapar R.O.	75
TURKEY MEAT HEAT TREATMENT MODE SETTING	
Synytisia O.	82
APPLICATION OF ABSORPTION IR SPECTROSCOPY TO DETECT THE COMPOSITION OF THE SMOKE-AIRWOOD BURNING MIXTURES AT SMOKING MEAT PRODUCTS	
Oshchypok I.M.	89
KINETICS AND ENERGETICS OF EXTRACTION PROCESSES OF OAK WOOD IN ELECTROMAGNETIC FIELD	
Akimov O.V., Molchanov M.Y., Voytenko A.K., Burdo O.G.	95
RESEARCH OF A MICROWAVE VACUUM EVAPORATOR MODULE OF THE CONTINUOUS ACTION	
Sirotyuk I.V.	104
INTENSIFICATION OF THE EXTRACTION PROCESS IN FOOD AND OILSEED PRODUCTIONS WASTE UTILIZATION TECHNOLOGIES	
Terziyev S.H., Ruzhytska N.V., Shcherbych M.V., Alhuri Yusef.	110
METHOD OF CALCULATION OF TAPE DRYERS WITH COMBINED ELECTROMAGNETIC ENERGY SUPPLY FOR DRYING CORN, SUNFLOWER AND SOYBEAN SEEDS	
Marenchenko O.I., Zykov O.V.	116
DEHYDRATION OF COLLAGEN FISH ADHESIVE IN CONDITIONS OF ACTION OF MICROWAVE RADIATION	
Levtrynskaya Yu.O.	125