

ISSN 2073 – 8730

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ODESA NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

НАУКОВІ ПРАЦІ SCIENTIFIC WORKS

ТОМ 86
ВИПУСК 1

VOLUME 86
ISSUE 1



ОДЕСА

2022

ББК 36.81 + 36.82
УДК 663 / 664

Міністерство освіти і науки України



НАУКОВІ ПРАЦІ

Том 86, Випуск 1

Засновник:
Одеський національний
технологічний університет

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

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

Головний редактор
Заступники головного редактора

Відповідальний редактор

Редакційна колегія:

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

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

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

Реєстраційне свідоцтво
КВ №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 Одеського
національного технологічного університету,
протокол № 02 від 04.10.2022 р.

Мова видання:
українська, англійська

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

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



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

Одеський національний технологічний університет

Наукові праці – Одеса, Одеський національний технологічний університет: 2022. – Том 86, Вип. 1. – 146 с.

Адреса редакції:

вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039, e-mail:
np_onaht@ukr.net
terma_onaft@ukr.net

© Одеський національний технологічний університет, 2022 р.

Founder: **Odesa National
University of Technology**

SCIENTIFIC WORKS

Founded in Odessa, 1937

Volume 86, Issue 1

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

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

Editorial Board:

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

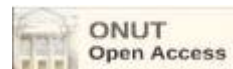
Technical editor: Ruzhitska N.V., Levtrynska Y.O.,
Palamarchuk G.S.

It's recommended for printing and publishing online by
academic council of Odesa National University of
Technology
04 October 2022., protocol № 2

Languages of issue:
Ukrainian, English

Articles are printed in original language.

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



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

Odesa National University of Technology

Scientific Works – Odessa, Odesa National University of Technology: 2022. – Volume 86, Issue 1. – 146 p.

Address of the editorial office:

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

© Odesa National University of Technology, 2022

ОРГАНІЗАЦІЯ ГІБРИДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЗАДАЧАХ УДОСКОНАЛЕННЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Бурдо О.Г., д.т.н., професор, Терзієв С.Г., д.т.н., доцент, Бурдо А.К., к.т.н., доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Наведено розвиток глобальної прогностичної моделі «Римського клубу». Аналізуються шляхи її переведення у практичну площину. Обґрунтовується доцільність впровадження ідей РК у харчові нанотехнології. Показано, що саме там можна в комплексі вирішувати проблеми і енергії, і екології, і їжі. Основним науковим результатом роботи є моделі гібридних процесів. Підкреслено їх місце у розробленій авторами класифікації технологій адресної доставки енергії. Аналізуються можливості електродинамічних систем та апаратів. Проведено порівняння ефективності високочастотних, інфрачервоних та мікрохвильових джерел енергії. Показано революційну перспективу мікрохвильових джерел енергії. Наведено класифікацію гібридних процесів, умови ініціювання за їх допомогою бародифузійних, механодифузійних та пародинамічних потоків. Дана фізична та термодинамічна моделі, які обґрунтовують питання можливості здійснювати роботу та транспортувати рідину із об'єму твердого капілярно-пористого тіла. А це – нові можливості суттєвої інтенсифікації масообмінних процесів. Дано аналіз ефективності гібридних процесів в задачах дегідратації та екстрагування. Головний прикладний результат роботи в тому, що показана можливість переходу харчової індустрії на технології глибокої переробки сировини на безвідходні технології при умовах застосування нанотехнологічних принципів, організації гібридних процесів. Наведено схему переробки зерен кави та отримання рідкого концентрату кави, вилучення із шлему послідовно: кофейну, кофеолу та наливних пелет. Така технологія в умовах лабораторії реалізована. Наведено приклади переробки харчової сировини, в основі яких технології адресної доставки енергії.

Ключові слова: харчові нанотехнології, електродинамічні мікрохвильові апарати, тепломасоперенесення, глобальні прогностичні моделі, гібридні процеси, зневоднення, екстрагування.

Вступ. При визначенні перспективних напрямків розвитку науки та техніки ключову роль має розуміння глобальних змін у майбутньому людства в світі, в Європі та в Україні. Серед глобальних прогностичних моделей виділяються моделі Римського клубу (РК) та індустріального розвитку [1]. Системний аналіз проблем планетарного масштабу, яким відрізняється модель РК, став засадами теоретичних основ глобалістики. Методологія та принципи, що розроблені в моделях РК, мають широко використовуватись при прогнозі напрямків розвитку суспільства, його впливу на довкілля в конкретній країні.

На протязі 50 років в РК видано 44 доповіді. Вражає глибина та проблематика цих доповідей. Роботи РК навіть за заголовками визначають їх суттєву актуальність. Авторитет РК завоювала вже перша доповідь за назвою «Границі росту» [Meadows et al. 1972]. Разом із тим, засновник РК А. Печчеї писав, що глобальні проблеми, які визначені в РК, ніяк не вирішуються. Всі високо цинили створення РК, але ніхто не виявив готовності жертвувати своїми інтересами, повсякденними справами на благо всього людства. Ніхто не готовий був надати навіть якусь долю свого часу, грошей, суспільного статусу на благо майбутнього людства. Визначилась тенденція олігархічної меншості управляти більшістю за допомогою страху, пандемії й, навіть, війни.

Але, виникає питання, а як мала спільнота реагувати на прогнози РК. Чи було запропоновано чітку програму дій, який план мав реалізовуватись? Такі пропозиції досить відсутні. Зрозуміло, що такі пропозиції не можуть бути загальними для всього людства, для всіх країн та для різних галузей економіки. Їх мають розробляти відповідні фахівці. Але, на жаль, естафети від РК отримано не було.

В [1] зроблена пропозиція поєднати модель РК із моделлю індустріального розвитку планети, та перейти від послідовної схеми вирішення проблем «енергія – екологія – їжа» до паралельної. Тобто, вирішення всіх цих проблем почати уже зараз, одночасно. Запропонована ідея почати з агропромислової галузі, де зазначені проблеми стоять найбільш гостро.

Аналіз літературних джерел та формулювання науково-технічної ідеї. Наразі розвиток теоретичних положень глобалізації, які запропоновано РК, пов'язано із переходом в площину практичних додатків. Доцільно починати практичні перетворення в харчовій індустрії. Саме ця галузь є ярким прикладом, де і енергетика, і екологія, і їжа потребують негайних інновацій в усіх країнах. Впровадження безвідходних технологій переробки харчової сировини дозволить вирішити екологічні проблеми та отримати нові резерви повноцінної їжі. А біомаса стане основою для отримання паливних елементів, пелет. Саме харчові виробництва працюють із створеними природою нанорозмірними структурами [2, 3].

Звісно, визначене завдання потребує залучення сучасних, інноваційних принципів. Серед таких розглядаються: принципи адресної доставки енергії до елементів харчової сировини; наноенерготехнології; вакуу-

мні та хвильові технології; комбіновані й гібридні технології; ініціювання бародифузії; механодифузійні та пародинамічні явища.

В [1] проведено порівняння традиційних та інноваційних технологій. Показано, що традиційна схема екстрагування із міжклітинного простору за рахунок дифузійних механізмів складається із етапів: «заповнення каналів екстрагентом – дифузія розчинних речовин в стиснених умовах капіляру – конвективна дифузія від границі розділу в середу». В інноваційних електродинамічних технологіях схема інша: «формування центру пароутворення – підвищення тиску в каналі – вихід компонентів у середу». При цьому, за рахунок дії інерційних сил із каналу виходять не тільки розчинні компоненти, а й нерозчинні, навіть тверді мікрочастинки.

Ініціюють такі процеси технології адресної доставки енергії (рис. 1), які поділяють на градієнтні та безградієнтні. Градієнтні поділяються на технології ЗТП (змішаного теплопідведення), ФС (фільтраційне сушіння), КЕ (кріоелектричні системи) та ДВКС (двофазні випарно-конденсаційні системи). Засновниками ЗТП є харківська наукова школа Потапова В.О. та Погожих М.І., а ФС – львівська Атаманюк В.М. та Гумницького Я.М.

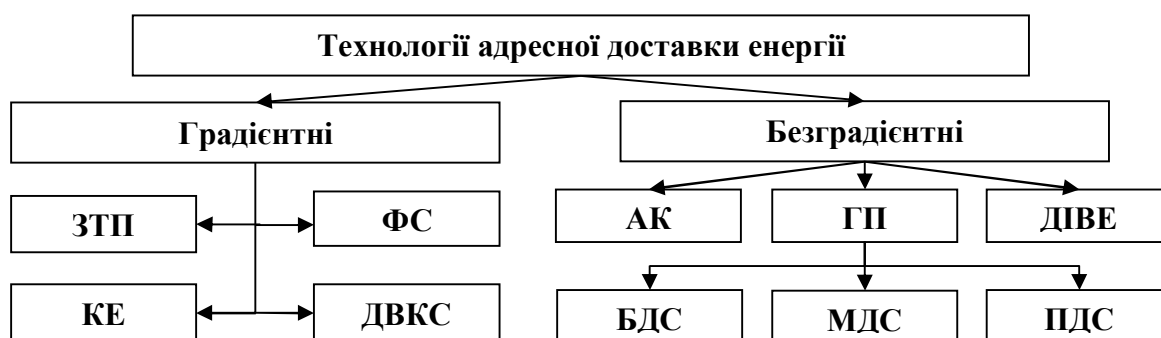


Рис. 1 – Класифікація технологій адресної доставки енергії.

Безградієнтні об'єднують технології об'ємного підведення енергії та направлені на активацію клітини (АК), дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) й гібридні процеси (ГП). Авторами ДІВЕ технологій є вчені інституту технічної теплофізики [4-7]. АК процеси запропоновано для обробки насіння перед посівом (розвиток напрямку дав проф. Калінін Л.Г. [8]), для інактивації й активації процесів життєдіяльності мікроорганізмів [9-10], для переробки відходів харчових виробництв [11-13]. Активні дослідження впливу мікрохвильового поля на інтенсивність процесів тепломасоперенесення проводяться наразі в світі [14-22]. Всі ці дослідження розглядають електромагнітне поле як альтернативний традиційним джерелам енергії засіб.

В роботі формулюється гіпотеза «узгодження параметрів сировини із характеристиками мікрохвильового поля дасть можливість організувати точковий підвід енергії в локальній зоні сировини, що приведе до дисипації електромагнітної енергії у теплоту та точковому скачку тиску із подальшому використанню надлишкового тиску для здійснення роботи по переміщенню рідини із об'єму сировини до середовища».

Аналітичне та експериментальне моделювання гібридних процесів. Революційні можливості проявили процеси, які ми назвали «гібридні» (ГП). Вони ініціюють процеси в бародифузійних системах (БДС), механодифузійних (МДС) й пародинамічних (ПДС) [14]. Механізм гібридних процесів – це комплекс електродинамічних, механічних, теплових і гідродинамічних процесів, що направлені на рішення задач масопереносу. Саме гібридні процеси будуть предметом подальших досліджень. Розглянемо інноватику систем з електродинамічними джерелами енергії в технологіях тепломасоперенесення.

Комплексні дослідження систем зневоднення з використанням мікрохвильових джерел енергії [3, 14], що проведені авторами, дають змогу вважати, що справедливі 2 висновки.

1. Процеси зневоднення в електромагнітних полях не завжди відповідають уявленням класичного «сушіння». Це більш загальні та різноманітні процеси, які більш коректно називати «дегідратація».
2. Можлива класифікація процесів дегідратації в електромагнітному мікрохвильовому полі по рушійним силам.

Запропонована класифікація (рис. 2) визначає умови, коли діє звичайна дисипація електромагнітної енергії в теплоту, без додаткових ефектів та рушійних сил. Це проста дегідратація, яку можна розглядати як сушіння. Далі розглядаються комбіновані процеси, коли об'єднуються позитивні можливості конвективного сушіння (КС), інфрачервоного поля (ІК), фільтраційного сушіння (ФС). Виходячи із загальних закономірностей кінетики масоперенесення, комбінація різних принципів зневоднення буде ефективною, якщо в результаті підвищаться значення величини рушійної сили або коефіцієнта переносу. Важливим критерієм є, також, й енергетика процесу, значення питомих затрат енергії на вилучення вологи. При цьому, особливий інтерес представляють способи механічного зневоднення.

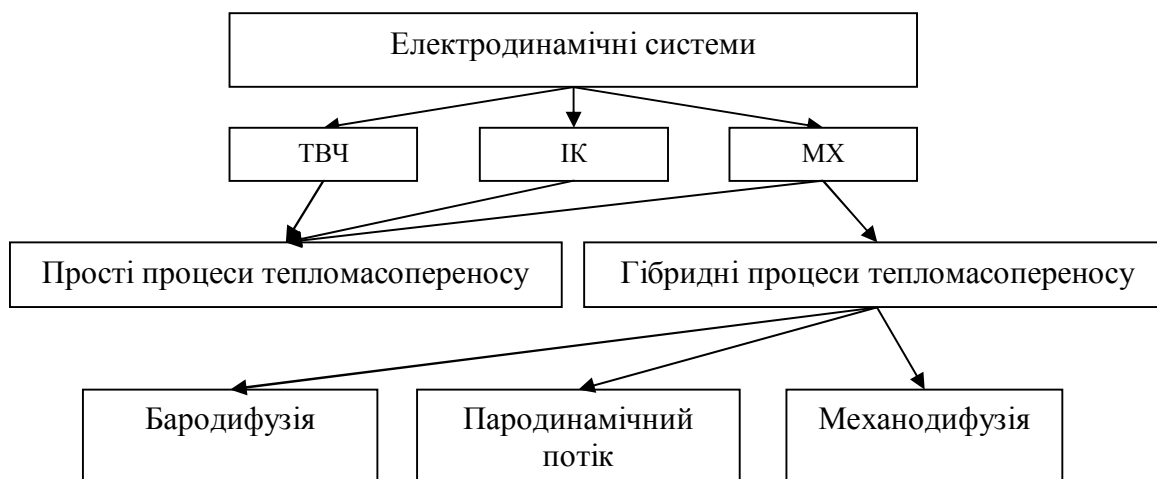


Рис. 2 – Класифікація гібридних процесів масопереносу в електродинамічних системах.

Є можливим механічне відведення вологи з поверхні твердої фази сировини при її доставці до поверхні бародифузійним механізмом, який ініціюється дією імпульсного електромагнітного поля (ІЕМ). В цьому випадку необхідно по-перше, зняти з повітря задачу теплоносія, а залишити тільки задачу «приймальника» вологи. По-друге, організувати зневоднення продукту із мінімальним випаровуванням із нього вологи, тобто підключити бародифузійні процеси. По-третє, використати механічне відведення вологи з поверхні продукту за рахунок продування його повітрям із довкілля. По-четверте, організувати бародифузію із об'єму продукту за допомогою ІЕМ. За такою схемою відведення вологи буде проводитись методами фільтраційного сушіння, а підведення енергії – хвильовими технологіями. Такий комбінований спосіб має ряд суттєвих переваг. По-перше, в традиційних підходах градієнт вологовмісту має напрямок в глибину продукту, а температури – до поверхні. При ІЕМ градієнт температури має напрямок в середину продукту. Саме цей факт дозволяє ініціювати бародифузійний потік вологи до поверхні. По-друге, на нагрів сухої частини продукту витрачається менше енергії. А це – передумова енергетичної ефективності ІЕМ способу дегідратації [3, 14].

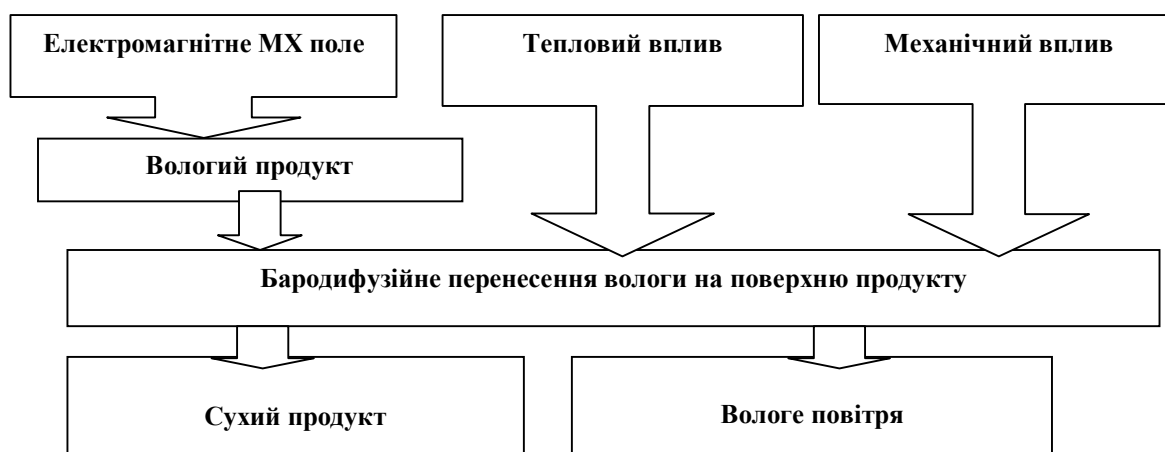


Рис. 3 – Схема комбінованих процесів дегідратації.

Суша частина продукту для більшості рослинної сировини є радіопрозорою. Механізм ІЕМ дегідратації в тому, що електромагнітне випромінювання активно поглинається водою в продукті, тому суха частина безпосередньо від цих променів не нагрівається. Звісно, вода віддає деяку долю теплової енергії сухій частині продукту, але це значно менше, ніж при конвективному сушінні.

Гібридні процеси в електродинамічних системах мають загальні фізичні закономірності. Розглянемо теоретичні основи гібридних процесів транспортування та масопереносу.

Технічна ідея формування гібридного процесу базується на специфічному характері градієнтів температури та вологовмісту в продукті при об'ємному, електромагнітному підведенні енергії (рис. 4).

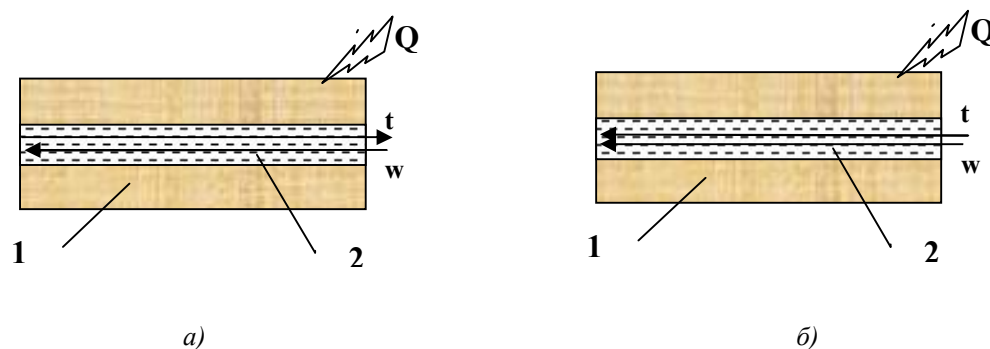


Рис. 4 – Градієнти температур (t) і вологовмістів (w) при традиційному сушінні (а) та гібридних процесах дегідратації (б).

Для аналізу залучимо I закон термодинаміки, по якому вся підведена енергія (Q) витрачається на підвищення внутрішньої енергії (U) та здійснення роботи (A).

$$Q = \Delta U_T + A_T \quad (1)$$

Зміна внутрішньої енергії пропорційна об'єму продукту (V), його щільності (ρ) і різниці ентальпій в кінці (i_K) та на початку процесу (i_H).

$$\Delta U_T = V \rho (i_K - i_H) \quad (2)$$

Індекс (T) в рівняннях (1 і 2) відповідає традиційним процесам, де робота не здійснюється ($A_T = 0$). У випадку інноваційного, гібридного процесу (індекс I).

$$Q = \Delta U_I + A_I \quad (3)$$

Відмінності як в характері джерела енергії $Q = \eta N_E$, потужності магнетрону (N) та його ККД (η), так і в розподілі потоку енергії. Частка його витрачається на підвищення внутрішньої енергії (2), а частка на здійснення роботи.

$$A_I = FL = \frac{\Delta P}{S} L \quad (4)$$

Величина роботи пропорційна силі, що діє на рідину (F) та довжині її транспортування (L). Сила (F) визначається зміною тиску в капілярі (ΔP)

$$\Delta P = \frac{\rho w^2}{2} \left[\frac{\lambda l}{d} + \sum \xi \right] + \rho g l + \frac{\sigma}{d} \quad (5)$$

Відоме рівняння гідравліки доповнено останнім додатком, який враховує сили поверхневого натягу, через коефіцієнт поверхневого натягу (σ) та діаметр капіляру (d) (5). Результируюча цих сил визначить швидкість потоку. З урахуванням сил поверхневого натягу, що характерно для мікро капілярів, значення різниці тисків в капілярі (ΔP) визначається швидкістю руху рідини (w), її щільністю (ρ), сумою місцевих опорів (ξ), силами поверхневого натягу (σ).

Добуток при множенні ΔP на величину об'єму рідини (V), що транспортується, дасть необхідну для реалізації гібридного процесу енергію. Тобто, значення енергії, яка необхідна при механічному впливі на рідину для формування бародифузійного, механодифузійного чи пародинамічного потоку. Значення ΔP визначається потужністю електромагнітного поля й електрофізичними параметрами рідини в капілярі. Саме потужність МХ поля можна управляти гібридним процесом.

Завдяки гібридним процесам вдалось запропонувати безвідходну технологію переробки зерен кави (рис. 5). Після традиційних операцій смаження, помелу та екстрагування, екстракт подається на другу ступень у МХ апарат, де його концентрація зростає вдвічі. Шлам поступово обробляється у МХ екстракторах, де вилучається кофеїн та кофеоль. Із знежиреного шламу в екструдері формуються паливні пелети.

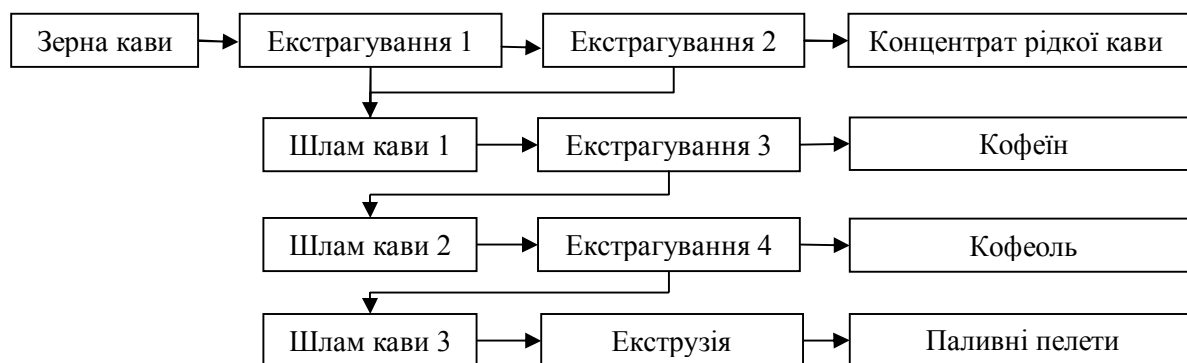


Рис. 5 – Схема безвідходної переробки зерен кави.

Таким чином, без забруднення літосфери здійснено безвідходну технологію: отримано рідкий концентрат кави, кофеїн, олія кави (аналог олії какао) та паливні пелети, теплотворна здатність яких на рівні деревини. Комерційну вартість вилучених за принципами нанотехнологій кофеїну та кавової олії важко переоцінити. Відсутність у технології розпилювальної сушарки дозволяє отримати концентрат кави, який не втратив смакових та функціональних компонентів зерен. Більш за те, в разі зменшуються витрати енергії.

В лабораторних умовах така технологія реалізована.

Висновки. На цей час вже сформульовано та доказано парадигму наноенерготехнологій, наукову концепцію гібридних процесів тепломасоперенесення, які ініціюють ефекти: «пародинамічний», «бародифузійний» та «механодифузійний». Ці концепції є основою системи технологій, які спроможні вирішувати актуальні проблеми сьогодення – переведення харчових виробництв на безвідходні технології. Дозволяють в комплексі вирішувати глобальні проблеми людства – підвищити енергетичну ефективність виробництв, суттєво знизити навантаження на довкілля та отримати резерви повноцінної їжі. Для практичної реалізації технологій розроблено та апробовано унікальне обладнання, яке здійснює процеси адресної доставки енергії. Це конструкції електродинамічних апаратів: дегідраторів та екстракторів. Електродинамічний випарний апарат не має обмежень по кінцевій концентрації готового продукту, від має стабільні параметри по продуктивності випаровування до $(90 - 95)^\circ\text{brix}$. У нього відсутні традиційні проблеми теплопередачі. Апробовано апарат для отримання безалкогольного вина, зневоднення морепродуктів. Створено стрічкова ІЧ сушарка, тепломасоутилізатор, піролізер, кріоконцентратор та ін.

Дослідні зразки інноваційних продуктів, що отримано на цьому обладнанні, мають високі смакові показники. Отримано сушені овочі, фрукти (у вигляді чіпсів, слайсів), пасти, рідкий концентрат кави, кріоконцентрати соків, молока, екстрактів, порошок м'яса.

Із відходів харчоконцентратних, консервних, виноробних виробництв отримано фруктову безглютенову муку, паливні пелети. Отримано порошки цибулі, часнику, екологічно безпечний концентрат рідкого диму, олії, концентрат екстракту кофеїну, фруктові есенції, гідролати, бальзами. Отримані на інноваційному обладнанні продукти практично повністю зберігають функціональні властивості сировини, їх виробництво потребує менших витрат енергії, а безвідходні технології доведуть до мінімуму навантаження на довкілля.

Тому, революційні технологічні перетворення доцільно починати тут. Більш за те, саме в цьому напрямку в Україні вже є перспективні напрацювання. А успіхи та досягнення в галузі еко- і наноіндустрії харчових виробництв мають бути ефективним стимулом впровадження інновацій в інших сферах діяльності людства.

References

- Burdo O.H. (2021). Innovatyka enerhotekhnologiy kharchovoyi industriyi v umovakh hlobal'nykh problem lyudstva [Innovation of energy technologies of the food industry in the context of global problems of humanity]. *Scientific Works*, 85(1), 4-14. doi: 10.15673/swonaft.v85i1.2082 [in Ukrainian].
- Burdo O.G. (2005). Nanoscale Effects in Food-production Technologies. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 78(1), 90-96.
- Burdo, O.G. (2013). *Pishchevyie nanoenergotekhnologii [Food nanotechnologies]*. Kherson [in Russian].
- Dolinskiy A.A., Maletskaya K.D. (2011). *Raspylitel'naya sushka [Spray drying]* (Vol. 1). Akademperiodika.
- Dolinskiy A.A., Maletskaya K.D. (2011). *Raspylitel'naya sushka [Spray drying]* (Vol. 2). Akademperiodika.
- Snyezhkin Yu.F., Shapar R.O. (2021). Enerhoefektyvni protsesy sushinnya [Energy-efficient drying process] (Vol. 1).
- Snyezhkin Yu.F., Shapar R.O. (2021). Enerhoefektyvni protsesy sushinnya [Energy-efficient drying process] (Vol. 1).
- Kalinin L.G. (1996). Nauchno-tehnicheskiye aspekty shirokogo primeneniya mikrovolnovykh tekhnologiy. [Scientific and technical aspects of the widespread use of microwave technologies. The status of the issue, prob-

- lems, solutions.] Mikrokhvyl'ovi tekhnolohiyi v narodnomu hospodarstvi: Vprovadzhennya. Problemy. – Odesa: OKFA. 62-68.
9. Burdo O.G., Rybina O.B. (2010). *Protsessy inaktivatsii mikroorganizmov v mikrovolnovom pole.* [Processes of inactivation of microorganisms in the microwave field]. Poligraf.
 10. Burdo O.G., Rybina O.B. (2011). Vlianiye mikrovolnovogo elektromagnitnogo polya na rost mikroorganizmov [Influence of a microwave electromagnetic field on the growth of microorganisms]. *Scientific Works* 39(2), 272-276.
 11. Cherny N.K., Burdo O.H., Naumenko K.I. (2016). Vykorystannya nadvysokochastotnoho vyrominyuvannya pry vydilenni polisakharydiv klitynykh stinok drizhdzhiv [The use of ultrahigh-frequency radiation in the isolation of polysaccharides of yeast cell walls.]. *Food science and Technology*, 10 (2).
 12. Burdo, O.G., Sirotyuk, I.V., Shcherbich, M.V., Akimov A.V., Poyan A.S. (2021). Innovation of Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration and Extraction. *Problemele Energeticii Regionale*, 1(49), 86-98. doi: 10.52254/1857-0070.2021.1-49.13
 13. Burdo O.G., Zykov A.V., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V. (2016). The Nanotechnological Innovation in Food Industry. *International Journal of Engineering Research and Applications* 6(3), 144-150.
 14. 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. *Problemele Energeticii Regionale*, 1(36), 58-71. doi: 10.5281/zenodo.1217259
 15. *Za pyat' let prodazhi sushenykh ovoshchey i fruktov v mire uvelichilis' na 10%* [In five years, sales of dried vegetables and fruits in the world have increased by 10%]. Available at: <https://east-fruit.com/novosti/za-pyat-let-prodazhi-sushenykh-ovoshchey-i-fruktov-v-mire-uvelichilis-na-10/> (14.10.2022).
 16. Horuz E., Bozkurt H., Karataş H., Maskan M. (2017). Effects of Hybrid (Microwave-Convectional) and Convectional Drying on Drying Kinetics, Total Phenolics, Antioxidant Capacity, Vitamin C, Color and Rehydration Capacity of Sour Cherries. *Food Chemistry*, 230, 295-305. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.03.046
 17. Yildiz G., Izli G. (2019). Influence of Microwave and Microwave-Convectional Drying on the Drying Kinetics and Quality Characteristics of Pomelo. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(6). doi: 10.1111/jfpp.13812
 18. Bahlul N., Balti M., Guellouze M.S., Kechaou N. (2018). Coupling of Microwave Radiations to Convective Drying for Improving Fruit Quality. *IDS'2018: 21st International Drying Symposium*, 699. doi: 10.4995/ids2018.2018.7794
 19. De Faria R. Q., dos Santos A. R. P., Gariepy Y., da Silva E. A. A., Sartori M. M. P., Raghavan V. (2019). Optimization of the Process of Drying of Corn Seeds with the Use of Microwaves. *Drying Technology*, 38(5-6), 676-684. doi: 10.1080/07373937.2019.1686009
 20. Liu H., Liu H., Liu H., Zhang X., Hong Q., Chen W., Zeng X. (2021). Microwave Drying Characteristics and Drying Quality Analysis of Corn in China. *Processes*, 9(9). doi: 10.3390/pr9091511
 21. Zielinska M., Zielinska D., Markowski M. (2018). The Effect of Microwave-Vacuum Pretreatment on the Drying Kinetics, Color and the Content of Bioactive Compounds in Osmo-Microwave-Vacuum Dried Cranberries (*Vaccinium Macrocarpon*). *Food and Bioprocess Technology*, 11(3), 585-602. doi: 10.1007/s11947-017-2034-9
 22. Qu F., Qiu F., Zhu X., Ai Z., Ai Y., Ni D. (2019). Effect of Different Drying Methods on the Sensory Quality and Chemical Components of Black Tea. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie*, 99, 112-118. doi: 10.1016/j.lwt.2018.09.036

ORGANIZATION OF HYBRID PROCESSES IN THE TASKS OF FOOD TECHNOLOGIES IMPROVEMENT

**Burdo O.G., d.t.s., professor, Terziev S.G., d.t.s., associate professor, Burdo A.C., c.t.s., associate professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine**

Abstract. The development of the global forecasting model of the "Club of Rome" is presented. The ways of its transfer into the practical plane are analyzed. The expediency of implementing the ideas of the "Club of Rome" in food nanotechnology is substantiated. It is shown that it is there that the problems of energy, ecology, and food can be solved in a complex manner. The main scientific results of the work are models of hybrid processes. Their place in the classification of address energy delivery technologies developed by the authors is emphasized. The capabilities of electrodynamic systems and devices are analyzed. A comparison of the efficiency of high-frequency, infrared, and microwave energy sources was made. The revolutionary perspective of microwave energy sources is shown. The classification of hybrid processes, the conditions for their initiation of barodiffusion, mechanodiffusion and vapordynamic flows are given. Physical and thermodynamic models are given, which substantiate the issue of the possibility of carrying out work and transporting liquid from the volume of a solid capillary-porous body. And these are new opportunities for significant intensification of mass exchange processes. An analysis of the effectiveness of

hybrid processes in the tasks of dehydration and extraction is given. The main practical result of the work lies in the possibility of the food industry transition to technologies of raw material deep processing and waste-free technologies under the conditions of nanotechnological principles application and hybrid processes organization. The scheme for processing coffee beans and obtaining a liquid coffee concentrate, extracting caffeine, coffee oil and fuel pellets from the sludge is presented. This technology has been implemented in the laboratory. Examples of food raw material processing based on address energy delivery technologies are presented.

Keywords: food nanotechnologies, electrodynamic microwave apparatuses, heat and mass transfer, global forecasting models, hybrid processes, dehydration, extraction.

Список використаної літератури

1. Бурдо О.Г. (2021). Інноватика енерготехнологій харчової індустрії в умовах глобальних проблем людства. Scientific Works, 85(1), 4-14. doi: 10.15673/swonaft.v85i1.2082
2. Burdo O.G. (). Nanoscale Effects in Food-production Technologies. J. Eng. Phys. Thermophys., 78(1), . – pp. 90-96.
3. Бурдо О.Г. Пищевые наноэнерготехнологии. Херсон, 2013.
4. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка (Т. 1). Академперіодика, 2011
5. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка (Т. 2). Академперіодика, 2015.
6. Снежкін Ю.Ф. (Ред.), Шапар Р.О. (Ред.). (2021). Енергоефективні процеси сушіння (Т. 1).
7. Снежкін Ю.Ф. (Ред.), Шапар Р.О. (Ред.). (2021). Енергоефективні процеси сушіння (Т. 2).
8. Калинин Л.Г. (1996). Научно-технические аспекты широкого применения микроволновых технологий. Состояние вопроса, проблемы, решения. Мікрохвильові технології в народному господарстві: Впровадження. Проблеми. – Одеса: ОКФА. 62-68.
9. Бурдо О.Г., Рыбина О.Б. (2010). Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле. Полиграф.
10. Бурдо О.Г. Рыбина О.Б. (2011). Влияние микроволнового электромагнитного поля на рост микроорганизмов. Наукові праці ОНАХТ, 39(2), 272-276.
11. Черно Н.К., Бурдо О.Г., Науменко К.І. (2016). Використання надвисокочастотного випромінювання при виділенні полісахаридів клітинних стінок дріжджів. Харчова наука та технологія, 10(2).
12. Burdo, O.G., Sirotiyuk, I.V., Shcherbich, M.V., Akimov A.V., Poyan A.S. (2021). Innovation of Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration and Extraction. Problemele Energeticii Regionale, 1(49), 86-98. doi: 10.52254/1857-0070.2021.1-49.13
13. Burdo O.G., Zykov A.V., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V. (2016). The Nanotechnological Innovation in Food Industry. International Journal of Engineering Research and Applications 6(3), 144-150.
14. Burdo O.G., Syrotiyuk I.V., Alhury U., Levtrinska J.O. (2018). Microwave Energy as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polyextract Formation. Problemele Energeticii Regionale, 1(36), 58-71. doi: 10.5281/zenodo.1217259
15. Електронний ресурс: <https://east-fruit.com/novosti/za-pyat-let-prodazhi-sushenykh-ovoshchey-i-fruktoy-v-mire-uvlechilis-na-10/> (Дата звернення: 14.10.2022).
16. Horuz E., Bozkurt H., Karataş H., Maskan M. (2017). Effects of Hybrid (Microwave-Convectional) and Convectional Drying on Drying Kinetics, Total Phenolics, Antioxidant Capacity, Vitamin C, Color and Rehydration Capacity of Sour Cherries. Food Chemistry, 230, 295-305. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.03.046
17. Yildiz G., Izli G. (2019). Influence of Microwave and Microwave-Convectional Drying on the Drying Kinetics and Quality Characteristics of Pomelo. Journal of Food Processing and Preservation, 43(6). doi: 10.1111/jfpp.13812
18. Bahlul N., Balti M., Guellouze M.S., Kechaou N. (2018). Coupling of Microwave Radiations to Convective Drying for Improving Fruit Quality. IDS'2018: 21st International Drying Symposium, 699. doi: 10.4995/ids2018.2018.7794
19. De Faria R. Q., dos Santos A. R. P., Garipey Y., da Silva E. A. A., Sartori M. M. P., Raghavan V. (2019). Optimization of the Process of Drying of Corn Seeds with the Use of Microwaves. Drying Technology, 38(5-6), 676-684. doi: 10.1080/07373937.2019.1686009
20. Liu H., Liu H., Liu H., Zhang X., Hong Q., Chen W., Zeng X. (2021). Microwave Drying Characteristics and Drying Quality Analysis of Corn in China. Processes, 9(9). doi: 10.3390/pr9091511
21. Zielinska M., Zielinska D., Markowski M. (2018). The Effect of Microwave-Vacuum Pretreatment on the Drying Kinetics, Color and the Content of Bioactive Compounds in Osmo-Microwave-Vacuum Dried Cranberries (Vaccinium Macrocarpon). Food and Bioprocess Technology, 11(3), 585-602. doi: 10.1007/s11947-017-2034-9
22. Qu F., Qiu F., Zhu X., Ai Z., Ai Y., Ni D. (2019). Effect of Different Drying Methods on the Sensory Quality and Chemical Components of Black Tea. Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie, 99, 112-118. doi: 10.1016/j.lwt.2018.09.036

Отримано в редакцію 17.06.2022

Прийнято до друку 26.09.2022

Received 17.06.2022

Approved 26.09.2022

ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЛАКТОЗИ В МОЛОЧНІЙ СИРОВАТЦІ

Іваницький Г.К., д.т.н., с.н.с., Целень Б.Я., к.т.н., с.н.с., Радченко Н.Л., к.т.н., с.н.с.
Інститут технічної теплофізики НАНУ, м. Київ

Анотація. Проведено аналіз проблем у галузі переробки молочної сироватки. В ході якого встановлено перспективність даного напрямку, сформульовано мету і завдання досліджень. В рамках роботи розглянуто існуюче в Україні і світі обладнання, зокрема, його переваги і недоліки. На основі чого авторами було запропоновано використання роторно-пульсаційного апарата спеціальної конструкції типу ротор-статор-ротор. Проведені дослідження на запропонованому експериментальному обладнанні дозволили вивчити вплив гідродинамічної обробки на процес кристалізації молочної сироватки та досягти покращення перебігу процесу кристалізації лактози в сироватці. Зокрема, в роботі доведено, що обробка сироватки з використанням в комплексі вакуумної камери та роторно-пульсаційного апарата спеціальної конструкції типу ротор-статор-ротор перед стадією кристалізації лактози дозволяє отримувати кристали меншого розміру з вузьким дисперсним розподілом в діапазоні від 5,0 до 6,5 мкм, у порівнянні, з традиційними технологіями, де розміри кристалів досягають 20 мкм. Запропонована конструкція дозволяє підвищити продуктивність, забезпечити рівномірну обробку потоку рідини, а також збільшити швидкість обертання ротора для більш інтенсивного гідродинамічного впливу на рідину. У підсумку проведеної роботи авторами було рекомендовано використання даного обладнання в технологіях сушіння сироватки молока, з метою отримання продукту високої якості. Рекомендований режим рециркуляції протягом 2 хв. перед стадією кристалізації лактози.

Ключові слова: молочна сироватка, роторно-пульсаційний апарат, гідродинамічна кавітація, кристали лактози.

Вступ. Проблема переробки сироватки завжди була і залишається актуальною. Оскільки постійне зростання світових обсягів виробництва сирів веде до збільшення кількості сироватки, як побічного продукту переробки молока. На теперішній час її обсяги зросли до 170 млн. т в рік. В свою чергу, це стає причиною зниження ефективності виробництва, а також забруднення оточуючого середовища. В світі на сьогоднішній день найбільші об'єми молочної сироватки виробляють країни Європи, Північної Америки і Океанії, що пов'язане з розвиненою галуззю виробництва сирів. При цьому, від 50 до 95 % її ресурсів переробляється на продукти харчування. За кордоном переробка молочної сироватки розповсюджена і вигідна, навіть при високих енерговитратах, оскільки розміри штрафів занадто високі за несанкціонований злив її у каналізацію.

В Україні ситуація з переробки сироватки складніша, оскільки більшість підприємств не мають достатнього фінансування для модернізації виробництва та налагодження переробки побічних продуктів з молока. Тому досить часто молочну сироватку не використовують і просто зливають попередньо нейтралізуючи в каналізацію.

Залежно від технології виробництва одержують наступні види сироватки молока:

- солодку (при сквашуванні молока сичужним ферментом). Переважно вона використовується для виробництва молочного цукру, концентрату сироваткових білків, для виробництва альбумінових сирів, на корм тваринам, а також для підживлення рослин. Однак, найчастіше її висушують з метою отримання сухого продукту.

- кислу (при сквашуванні молока молочнокислими бактеріями). Використання кислої сироватки більш обмежене через високі показники БПК (30-60 г O_2 на літр). Найчастіше її використовують як корм для ВРХ або нейтралізуючи, зливають в каналізацію. В Україні переважає виробництво саме кислої сироватки. У зв'язку з цим і слабо розвинена галузь її переробки. Найчастіше відбувається її зливання в каналізацію, що створює значне навантаження на очисні споруди. З іншої сторони молочна сироватка є продуктом, що містить цінні компоненти тому проблема її утилізації та переробки є актуальною [1].

Вирішувати дану проблему можна двома напрямками. Перший передбачає приведення нормативних показників (кислотності, споживання кисню тощо) кислої сироватки молока до вимог щодо стічних вод і зливання в каналізацію. Другий напрямок спрямований на досягнення нормативних показників по кислотності і солемісту (впливають на агрегаційну здатність білків і співвідношення між кристалічною та аморфною формами лактози при її кристалізації), а також кількістю мікроорганізмів з метою отримання сировини для подальшої переробки.

Аналіз останніх досліджень. Існуючі способи сушіння сироватки дозволяють отримувати продукти необхідної якості. Однак, існує можливість удосконалення процесу сушіння за рахунок усунення проблеми

нерівномірності розподілу розмірів кристалів лактози, яка є основою складу сироватки. Головне завдання процесу сушіння полягає у переведенні лактози, що міститься в сироватці з аморфного стану в кристалічний. Кількість лактози і кухонної солі визначає режими і тривалість сушіння. Загальна технологічна схема процесу виробництва сироватки молочної сухої складається з наступних етапів: збір сироватки та її охолодження з наступним сепаруванням для знежирення і пастеризації. Процес пастеризації проводять при 72-74 °С протягом 15-20с. (для солодкої сироватки) та при 58-62 °С протягом 15-20с. (для кислої сироватки). Наступним етапом є охолодження під згущення на мембранній установці до вмісту сух. реч. 18-24 %. Далі проводиться згущення в ВВУ до вмісту сух. реч. 55 %, кристалізація (ступінь кристалізації 60-70 %), охолодження до температури кристалізації та сушка і упаковка. При цьому, є певні особливості у веденні процесу сушіння, зокрема, при сушінні концентрату з низьким вмістом сухих речовин, спостерігаються підвищені втрати порошку з повітрям, що виходить, так як частинки порошку мають меншу вагу і розмір, погіршується розчинність готового продукту (дрібні частинки мають меншу здатність до змочування і занурювання). Також може знижуватись продуктивність сушильної установки на 20-30% при сушінні сироватки з некристалізованою лактозою та одночасним зниженням якості готового продукту (збільшується гігроскопічність, розчинність і сипучість). У випадку сушіння розпиленням сироватки з підвищеною кислотністю, відбувається налипання готового продукту на стінки циклонів і сушильної камери. Накопичення відкладень порошку в циклонах і розвантажувальних пристроях призводить до зупинки сушильної установки для додаткової чистки, процес сушіння нестабільний, збільшується гігроскопічність і збікаємість сухої сироватки, зменшується розчинність.

Далі розглянемо сучасні технології переробки молочної сироватки. Кристалізація лактози є одним із ключових етапів виробництва молочного цукру. Найчастіше його реалізують в апаратах періодичної дії недоліками яких є складнощі в управлінні процесом та забезпеченні однорідності розмірів утворюваних частинок кристалів [2]. Перелічені недоліки дозволяє усунути використання апаратів безперервної дії. Зокрема, досягти однорідності дисперсності кристалів, що в 3-4 рази менша, у порівнянні, з апаратами періодичної дії, а також скоротити енерговитрати, металоємність обладнання та виробничі площі. Представниками апаратів даної групи є дискові роторно-пульсаційні апарати (далі РПА) та апарати ультразвукової дії.

- апарати ультразвукової дії дозволяють досягти зменшення часу індукції кристалізації і збільшення швидкості зародження в ряді процесів, включаючи кристалізацію жирів і лактози. В роботі [3] показано, що ультразвукова кавітація дозволяє підвищити швидкість реакції і покращити масообмін в рідині. Більшість літературних даних розглядають апарати побудовані на безпосередньому контакті рідини з ультразвуком. При цьому ультразвуковий зонд занурюється безпосередньо в продукт [4]. Оскільки щільність енергії є найбільшою на поверхні, то з часом це призводить до поступової корозії та забруднення оброблюваного продукту, що є безумовним недоліком. Існує безконтактна альтернатива безпосередній контактній обробці ультразвуком. Принцип роботи таких конструкцій побудованих на поширенні звукових хвиль через поверхню металу, долаючи ерозію сонотрода і покращуючи розподіл енергії. Поверхні генерують хвилі меншої амплітуди, аніж сонотроди, але ефективно ініціюють зародження лактози і ріст кристалів. Проте, механізм впливу ультразвуку на кристалізацію лактози в концентрованій сироватці залишається на сьогоднішній день ще невідомим.

Загальним недоліком ультразвукового обладнання є низька продуктивність, проблема рівномірності обробки через утворення хмари кавітаційних бульбашок, високі вимоги до умов ведення процесу, підвищені питомі енерговитрати та відповідно висока вартість продукту. До того ж всі ультразвукові установки перебувають на стадії лабораторних та не можуть бути реалізовані в промислових масштабах.

- роторно - пульсаційні апарати дискового типу оснащені приводами з частотними перетворювачами, а їх робочі органи складаються з набору рухомих і нерухомих дисків [5]. Рухомі диски оснащені виступами зі спеціальними проточками, які забезпечують кавітаційний режим течії. В процесі гідродинамічної обробки в апарат насосом-дозатором впорскується затравка, яка розподіляється по об'єму оброблюваної сироватки.

Основні недоліки апаратів дискового типу полягають у нерівномірності кутової швидкості і, відповідно, нерівномірності обробки сировини в каналах.

Проаналізувавши стан проблеми та врахувавши досвід наукових досліджень і оцінивши недоліки існуючого обладнання нами запропоновано використання РПА спеціальної конструкції типу ротор-статор-ротор (далі РСР) [6]. Пропонована конструкція дозволить підвищити продуктивність, забезпечити рівномірну обробку потоку рідини, а також збільшити швидкість обертання ротора для більш інтенсивного гідродинамічного впливу на рідину.

Формулювання мети та постановка завдання.

Об'єкт досліджень – пастеризована сироватка одержана при виробництві сирів всіх видів відповідно до ДСТУ 7515:2014.

Мета і завдання.

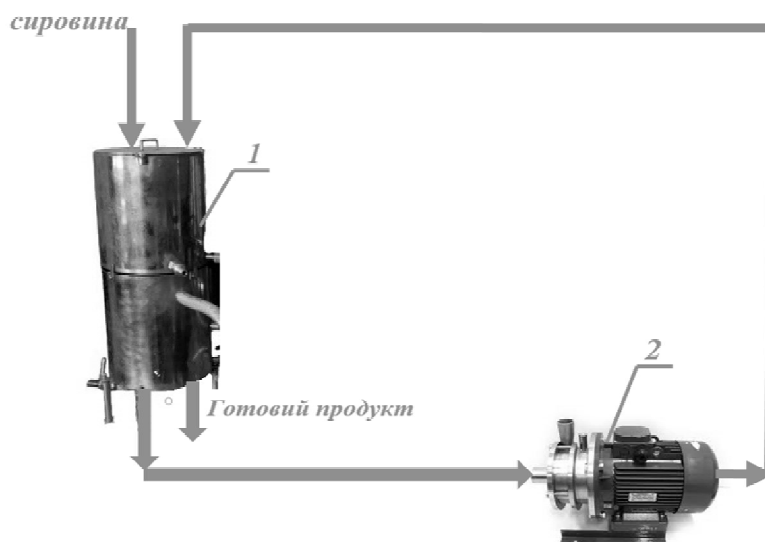
- Вивчення механізму впливу гідродинамічної кавітації створюваної в РПА спеціальної конструкції РСР на процес кристалізації лактози.

- Визначення закономірності впливу регульованих параметрів процесу на особливості формування

кристалів лактози. Зокрема, впливу кількості обертів робочих органів РПА на загальну кількість кристалів, їх розміри і мікроструктуру.

Проведення експериментальних досліджень. Дослідження процесу кристалізації молочної сироватки проводили на лабораторному стенді, основою якого є вакуумна камера і пропонувані роторно-пульсаційний апарат рис.1. Суть роботи стенда полягає в тому, що молочна сироватка кімнатної температури порціями об'ємом 40л. подається спочатку у вакуумну камеру 1 для дегазації, а звідти в режимі рециркуляції перекачується роторно - пульсаційним апаратом спеціальної конструкції РСР 2 для гідродинамічної обробки. Час обробки в режимі рециркуляції для першого експерименту становить 2хв., для другого – 4хв., для третього – 6хв. В кінці кожного експерименту готовий продукт відкачується. Під час проведення кожного з трьох експериментів варіатором здійснюється регулювання кількості обертів від 1800 до 3600об/хв. з відбором проб у рівних проміжках заданого діапазону. Відбір проб сироватки проводиться також до обробки і в кінці обробки.

Для першого експерименту час рециркуляції (обробки) становив 2хв. Протягом цих двох хвилин поступово регулювали число обертів від 1800 до 3600об/хв з відбором проб у рівні проміжки часу. Відбір проб проводився у скляні колби об'ємом 400мл. Для другого експерименту час обробки склав 4хв., а для третього – 6хв. з аналогічним відбором проб при різних кількостях обертів. Далі кожна відібрана проба упарювалась на водяній бані при температурі 55-60 °С до концентрації сухих речовин 55 %. Після згущення проби поступово охолоджували до температури 10-15 °С з періодичним перемішуванням з метою ініціювання початку процесу кристалізації лактози. Для продовження і завершення даного процесу зразки витримували ще протягом 24 годин. Далі промиті кристали лактози сушилися при 60-65 °С в сушильній шафі з наступним зважуванням висушених зразків.



1 – вакуумна камера; 2 – РПА.

Рис. 1 – Експериментальний стенд для дослідження процесу кристалізації молочної сироватки

Дослідні зразки піддавались наступним аналізам:

- Визначали лінійні розміри кристалів лактози та їх загальну кількість, а також особливості утвореної мікроструктури. Дослідження велись за допомогою світлового мікроскопу Axio Imager Z1m з об'єктивом 40x/0,75 M27. Обробка масиву даних проводилась в програмі Excel.

- Визначали вплив кількості обертів робочих органів РПА на кількість утворених кристалів і їх середній розмір при кристалізації лактози в згущеній сироватці до 55% вмісту сухих речовин.

- Визначали зміни фізико-хімічних параметрів сироватки, зокрема, зміну окисно-відновного потенціалу, концентрацію розчиненого кисню без контакту сироватки з повітрям і електропровідність. Вимірювання окисно-відновного потенціалу і електропровідності проводили на портативному приладі рН-метр/кондуктометр/ОВП-метр) згідно стандартної інструкції по експлуатації. Вимірювання концентрації розчиненого кисню в зразках сироватки проводили на оксиметрі згідно стандартної інструкції по експлуатації без контакту сироватки з повітрям.

Аналіз результатів. Згідно методики експериментів, дослідну сироватку піддавали обробці на лабораторному стенді. Відібрані зразки сироватки до та після обробки наведено на рис.2а, рис.2б. Одержані дані дозволили встановити механізм впливу обробки в РПА безперервної дії зі спеціально розробленою конструкцією РСР на особливості перебігу процесу кристалізації лактози сироватки.



а) б)

а) – зразки сироватки до обробки; б) – зразки сироватки після обробки

Рис. 2 – Зразки сироватки молочної

Зокрема, експериментально встановлено характер впливу частоти обертання робочих органів РПА в режимі рециркуляції рис.3 на середній розмір кристалів лактози в згущеній молочній сироватці при 55 % сух.реч. Аналіз отриманих залежностей вказує на те, що збільшення частоти обертання веде до зменшення середнього розміру кристалів лактози. Закономірність зберігається не залежно від часу рециркуляції. Під час

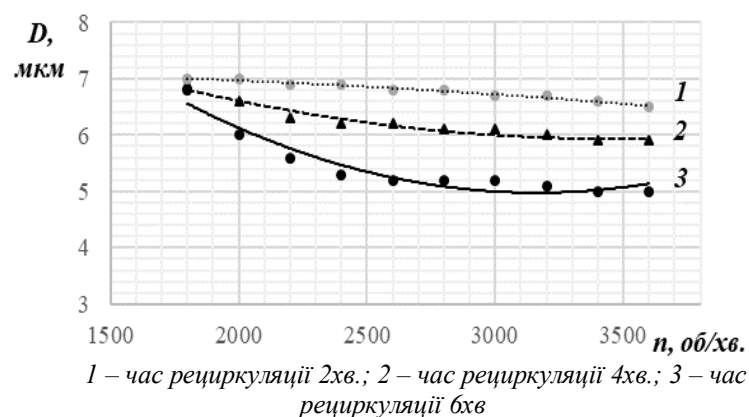


Рис. 3 – Залежність середнього розміру кристалів лактози в згущеній молочній сироватці (55% сух.реч.) від частоти обертання робочих органів РПА

ний об'єм потоку рідини. Також серед досягнутих переваг пропонованої конструкції, у порівнянні з дисковими, є відсутність насосу в схемі обробки за рахунок створюваного в роторах перепаду тиску. В подальшому даний ефект можна посилювати за рахунок доповнення РПА крильчаткою.

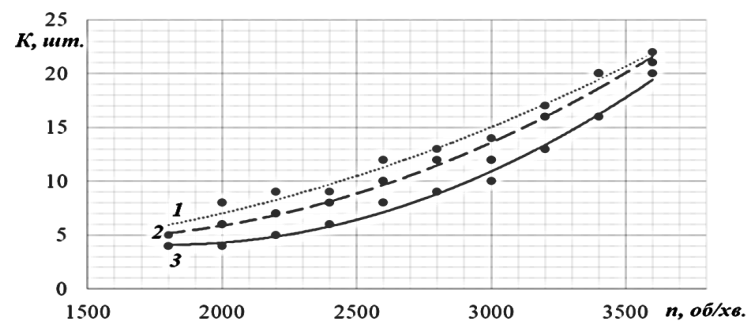


Рис. 4 – Залежність кількості кристалів лактози в згущеній молочній сироватці (55% сух.реч.) від частоти обертання робочих органів РПА

кількість. При цьому застосування в комплексі вакуумної камери та РПА спеціальної конструкції РСР в режимі рециркуляції дозволить одночасно реалізувати гідродинамічний і акустичний вплив на рідину. Базуючись на проведених дослідженнях, використання РПА роторного типу дозволить в подальшому підвищити якість сироватки молока перед її сушінням. По результатам було обрано оптимальний час рециркуляції, який становить 2хв. Однак, в залежності від необхідної продуктивності можна збільшити час обробки до 4хв.

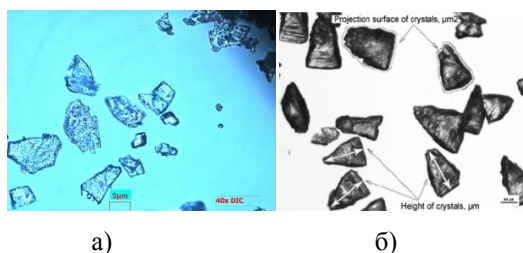
проходження потоку через робочі органи РПА при регульованій частоті від 1800 до 3600об/хв. середній розмір кристалів зменшується від 6,8мкм. до 5,0мкм. при рециркуляції 6хв. – від 6,8мкм до 6,5мкм. При цьому, характерним є вузький дисперсний розподіл, який знаходиться в діапазоні від 5мкм. до 6,5мкм., що є безумовною перевагою даного способу обробки, у порівнянні з апаратами періодичної дії.

Одержані результати пояснюються особливостями конструкції ротор – статор – ротор, яка дозволяє рівномірно розподілити потік по всьому робочому об'єму РПА та комплексно піддавати гідродинамічному та акустичному впливу кожен елементарний об'єм рідини.

Проаналізовано ступінь впливу частоти обертання робочих органів РПА на кількість утворених після обробки кристалів лактози в згущеній молочній сироватці рис.4. Було встановлено, що збільшення обертів від 1800 до 3600об/хв. веде до росту числа кристалів від 5 до 20шт. Аналогічна закономірність зберігається при збільшенні часу рециркуляції.

Отже отримані результати вказують на те, що збільшення швидкості обертання ротора дозволить зменшити розмір кристалів і підвищити їх

На основі обраних режимів ведення процесу було оброблено сироватку на лабораторному стенді та відібрано зразки для дослідження її мікроструктури (рис.5а) і порівняння з необробленими зразками сироватки (рис.5б). Аналіз показав, що розміри кристалів не обробленої сироватки коливаються в діапазоні від 20 до 320 мкм. [7], а розміри кристалів після обробки складають від 6,8 мкм. до 5,0 мкм. При цьому, варто відмітити вузький діапазон розмірів утворених кристалів. Досягнуті результати можна пояснити одночасною дією ефектів акустичної кавітації при якій звуковий діапазон частот складав від 115 Гц до 3 кГц та гідродинамічної кавітації. При цьому, дія акустичної кавітації створює значні пульсації тиску, інтенсивну кавітацію, ударні хвилі та нелінійні акустичні ефекти. Одночасно дія гідродинамічної кавітації викликає значні зсувні напруження, розвинену турбулізацію та пульсації тиску і швидкості потоку рідини. Вплив цих ефектів на елементарний об'єм і визначає високу якість обробки в РПА, що підтверджується вузьким діапазоном утворюваних частинок.



а – після обробки в режимі рециркуляції; б - не оброблена [7]

Рис. 5 – Мікроструктура кристалів лактози

В подальшому таке тонке диспергування дозволить спростити умови ведення процесу у вакуум випарних установках. Отримані результати при обробці кислої неконцентрованої сироватки молока вказують на можливість зміни її фізико-хімічних показників для розширення можливостей подальшого використання. Тому нами проведено дослідження зміни фізико-хімічних параметрів кислої неконцентрованої сироватки молока після її обробки при вибраних режимах. При цьому, в дослідних зразках було зафіксовано зміну окисно-відновного потенціалу зі 155 мВ до 196 мВ, концентрації розчиненого кисню з 1,27 мг/л до 5,05 мг/л (контакту з повітрям при обробці не було) і електропровідності з 332 мкСм до 233 мкСм.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження дозволили досягти покращення перебігу процесу кристалізації лактози в сироватці. Зокрема, встановлено, що обробка сироватки з використанням вакуумної камери та РПА спеціальної конструкції РСР в режимі рециркуляції 2хв перед стадією кристалізації лактози дозволяє отримувати кристали меншого розміру з вузьким дисперсним розподілом в діапазоні від 5,0 до 6,5 мкм. Також отримані дані при обробці кислої неконцентрованої сироватки молока вказують на те, що існує можливість зміни її фізико-хімічних показників для розширення можливостей її подальшого використання. Зокрема, отримані результати дозволяють в подальшому рекомендувати використання запропонованого обладнання в технологіях сушіння сироватки молока з метою отримання продукту високої якості. Потенційною галуззю впровадження розглядається виробництво сухої сироватки та молочного цукру (лактози), заміників незбираного молока, а також комбікормів для сільськогосподарських тварин і птиці.

References

1. Sychevskiy M., Romanchuk I., Minorova A. (2019). Milk whey processing prospects in Ukraine. *Food Science and Technology*, 13(4), 58-68
<https://journals.ontu.edu.ua/index.php/foodtech/article/view/1557/1776>
2. Syrovatka molochna sukha. Rozdil knyhy URL: http://ni.biz.ua/4/4_2/4_28623_sivorotka-molochnaya-suhaya.html (data zvernennia: 15.05.2022).
3. Yanira Ivonne Sánchez-García, Sukhvir Kaur Bhangu, Muthupandian Ashokkumar and Néstor Gutiérrez-Méndez (2018). Sonocrystallization of lactose from whey, 51-69. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74759>
4. Luis M. Carrillo-Lopez, Ivan A. Garcia-Galicia, Juan M. Tirado-Gallegos and other. (2021). Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. *J. Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 1-35. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105467>
5. Basok B., Grabova T. (2006). Ocenka effektivov dyspergyrovanyya vkluchenyy v rotorno-pul'sacyonnom apparate dyskovo-cylindricheskogo typu. *Prom.teplotekhnika*, 28(6), 37-43
<http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/61456/06-BasokNEW.pdf?sequence=1>
6. Shuliak V. V., Tselen B. Ya., Radchenko N. L., Dolinskyi A. A., Konyk A. V., Shurchkova Yu. O., Markin O. V., Hartviih A.P. (2017). *Prystij dlia dehzatsii, neitralizatsii ta koryhuvannia fizyko-khimichnykh vlastyvostei vodnykh system*. (UA Patent No 115628).

7. Pisponen A., Pajumägi S., Mootse H., Karus A. (2013). The lactose from Ricotta cheese whey: the effect of pH and concentration on size and morphology of lactose crystals. Dairy Science and Technology, 93 477-486 Retrieved from DOI 10.1007/s13594-013-0120-y

USE OF HYDRODYNAMIC CAVITATION TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE LACTOSE CRYSTALLIZATION PROCESS IN MILKY WHEY

**Ivanitsky G.K., SciD., Tselen B.Ya PhD., Radchenko N.L. PhD.
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv**

Abstract. The current article deals with the existing problems in the sphere of milky whey processing. According to the results of the analysis, the prospects of this direction were established and the purpose and objectives were formulated. As a part of the work, the existing samples of equipment in Ukraine and the world has been studied, in particular, their advantages and disadvantages have been considered. According to the results of the equipment analysis, the authors of the current article proposed the use of a rotary-pulsation apparatus of a special design such as a rotor-stator-rotor. The studies have been conducted on the proposed experimental equipment and allowed to study the effect of hydrodynamic treatment on the process of crystallization of milky whey and to achieve an improvement in the process of crystallization of lactose in milky whey. In particular, it is proved that the processing of milky whey using a special design such as rotor-stator-rotor in the complex of a vacuum container and a rotary-pulsation apparatus before the stage of lactose crystallization allows to obtain crystals of smaller size with a narrow dispersed distribution. The range of crystals ranges from 5.0 to 6.5 microns, compared to traditional technologies, where the size of crystals reaches 20 microns. The proposed design allows to increase productivity and to ensure uniform processing of fluid flow, as well as to increase the speed of rotation of the rotor for a more intense hydrodynamic effect on the liquid. According to the results of the work, the authors have advised to use the studied equipment in the technologies of whey drying, in order to obtain a product of high quality. Recommended recirculation mode is for 2 minutes before the lactose crystallization stage.

Key words: milk whey, rotor-pulsation apparat, hydrodynamic cavitation, crystals of lactose.

Список використаної літератури

1. Sychevskyi M., Romanchuk I., Minorova A. (2019). Milk whey processing prospects in Ukraine. Food Science and Technology, 13(4), 58-68
2. Калинівський машинобудівний завод. Офіційний портал: веб-сайт. URL: <https://kmbp.com.ua/produksiya/molochna-promislovist/kompleksni-rishennya/virobnitstvo-sukhikh-molochnikh-produktiv/310-sirovatka-molochna-sukha> (дата звернення 23.05.2022).
3. Yanira Ivonne Sánchez-García, Sukhvir Kaur Bhangu, Muthupandian Ashokkumar and Néstor Gutiérrez-Méndez (2018). Sonocrystallization of lactose from whey, 51-69. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74759>
4. Luis M. Carrillo-Lopez, Ivan A. Garcia-Galicia, Juan M. Tirado-Gallegos and other. (2021). Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. J. Ultrasonics Sonochemistry, 73, 1-35. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105467>
5. Басок Б., Грабова Т. Оценка эффектов диспергирования включений в роторно-пульсационном аппарате дисково-цилиндрического типа. Промышленная теплотехника. 2006. №28(6). С. 37-43. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/61456/06-BasokNEW.pdf?sequence=1> (дата звернення 10.04.2022).
6. Пристрій для дегазації, нейтралізації та коригування фізико-хімічних властивостей водних систем: пат. 115628 Україна C02F 1/34, C02F 1/36, C02F 1/20 №а 2016 06178; заявл. 07.06.2016; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22.
7. Pisponen A., Pajumägi S., Mootse H., Karus A., Poikalainen V. The lactose from Ricotta cheese whey: the effect of pH and concentration on size and morphology of lactose crystals. Dairy Science and Technology. 2013. №93. P. 477-486.

Отримано в редакцію 11.06.2022
Прийнято до друку 26.09.2022

Received 11.06.2022
Approved 26.09.2022

STUDY OF THE HEAT OF DEHYDRATION OF D-FRUCTOSE SOLUTION

Mykhailiyk¹ V., Ph.D., Senior Research Scientist, Dmytrenko¹ N., Ph.D., Korinchevska¹ T., Ph.D., Parniakov² O., Ph.D., Snezhkin¹ Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor¹Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv²Elea Technology GmbH, Quakenbrück, Germany

Abstract. The heat of evaporation of water is the main component of the consumption during the drying of bio raw materials. Its share in the consumption depends not only on the initial moisture content of the drying object. As our previous studies have shown, the state of water in the material affects the total heat consumption. The state of water is determined by its chemical composition and structure. Drying objects rich in sugars deserve special attention. Sugars have a high tendency to hydration, are concentrated in the juice and determine both the kinetics and heat of dehydration. The most reliable data on glucose and fructose hydration are analyzed and presented. Measurement of the specific heat of evaporation of water r from fructose solutions with an initial concentration of 12.5 wt. % was performed in the evaporation calorimeter. Continuous registration of changes in heat flows and mass of the sample was ensured during the measurement process. The dependence of the reduced specific heat of evaporation of water ($R = r/r_{\text{tab}}$) on the concentration of fructose was obtained in the isothermal mode at 40, 60 and 80 °C. The presented curves reflect the thermal processes occurring in the solution during water removal. The processes are characterized by an endothermic period of dehydration and an exothermic period of simultaneous dehydration and spontaneous homogeneous crystallization of fructose. It was found that the change in the degree of hydration of fructose in solution from 12.5 to 5 mol/mol occurs with increasing, almost linear, specific heat consumption. Removal of water from the first coordination sphere, when the degree of hydration decreases to values <5 , the increase in specific heat of evaporation is steeper and reaches the excess over the tabular values of heat of evaporation of pure water r_{tab} by 6 – 7 %. The heat of spontaneous crystallization of fructose has a power greater than the power of endothermic heat consumption for dehydration, therefore, a general exothermic effect is recorded. It is shown that the measured specific heat of water evaporation increases with increasing concentration of solutions despite a decrease in the degree of hydration of fructose. It was established that water has a strong hydrogen bond with sugar in solutions in which the degree of hydration of fructose is less than ~ 5 . Assumptions about strongly and weakly bound hydrated water in solutions of monosaccharides are substantiated.

Key words: heat of evaporation, solution, glucose, fructose, hydration, free and hydrated water.

Introduction. Drying of sugar-containing raw materials has a number of features related to the chemical composition. More than half of the dry matter of many fruits and berries [1] and vegetables [2] are sugars. Thus, their content in apples can reach 66 % (fructose ~ 40.2 %, glucose ~ 14.6 %, sucrose ~ 11.0 %). Due to the good solubility in water, they are concentrated in juice, the amount of which is not infrequently 97 %. The juice concentration increases reaching 88 – 90 % of dry matter in the process of drying to low moisture. That is, the main part of the water removing in the drying process is removed from the juice under conditions of increasing its concentration.

One of the most important factors determining the energy efficiency of drying is the specific heat consumption, the core of which is the heat of water evaporation. Today, the values of the specific heat of evaporation of water from the surface of pure volumetric water are used in the calculations of the drying process. These values are given in numerous reference books.

Evaporation is an endothermic phase change of the first kind as a result of which water from the liquid condensed phase is converted into steam. In this case, the heat is spent on overcoming the forces of molecular adhesion in the liquid phase and on the work of expansion during the transformation of liquid into vapor [3]. The specific heat of evaporation of water decreases with increasing temperature due to the small proportion of heat expended on the transition of the liquid into steam in the total heat of evaporation.

β -D-fructopyranose is the main form of existence of D-fructose. In water solution in thermodynamic equilibrium with β -D-fructopyranose, there is 23.6 % fructofuranose. And the keto form of D-fructose and α -D-fructopyranose are completely absent. The content of fructofuranose in the solution decreases to 15.2% (at 0 °C) with decreasing temperature, and increases to 44.2 % (at 50 °C) with heating. D-glucose forms several forms like D-fructose. The crystalline forms of α -D-glucose and β -D-glucose are quite stable. However, in the solution, each of them slowly turns into an equilibrium mixture of both forms, in which there is 63.8% of the β -anomer and 36.2% of the α -anomer [4].

Sugars in the free state are practically not found in nature. Nature has ensured their existence, giving them the property of hydration – easy interaction with water molecules. The mechanism of hydration is based on ideas about the hydrogen bonds formed between water and hydrophilic polar groups of sugar.

The binding energy between the elementary particles of solute and water depends on the nature of the substance, on its ability to hydration. Hydrogen bonds are formed as a result of donor–acceptor interactions between sugar and water molecules. These hydrogen bonds exceed the strength of the bonds between water molecules [5].

Modern ideas about the energy of intermolecular interactions make it possible to consider water in sugar solutions as being in two different states. In one state it has properties similar to the properties of pure water (free or freezing water). Another state occurs as a result of favorable energy interactions with sugar molecules (hydrated or non-freezing water) [6]. Water associated with dissolved sugar does not undergo a phase change of the first kind when cooled below 0 °C. The method of quantitative determination of free and hydrated water by differential scanning calorimetry (DSC) is based on these differences in the properties of free and bound water [7, 8]. The most complete data on the hydration of sucrose, glucose and fructose were obtained by this method [6, 9–12].

It was found that the amount of hydrated water in the solution depends on the sugar concentration. The proportion of free water in the solution decreases, while the proportion of hydrated water increases with an increase in the sugar content (Fig. 1).

Hydration is probabilistic in nature. Therefore, it is customary to characterize it quantitatively by the average degree of hydration, representing it by means of hydration numbers. Studies and calculations have shown the dependence of hydration numbers on concentration and temperature [10]. Usually, the degree of hydration is expressed as the molar ratio of hydrated water to solute depending on the concentration of the solution (Fig. 2). Studies of hydration of sugars by DSC have shown that the degree of hydration decreases with increasing sugar concentration despite the presence of free water in solutions [10–13].

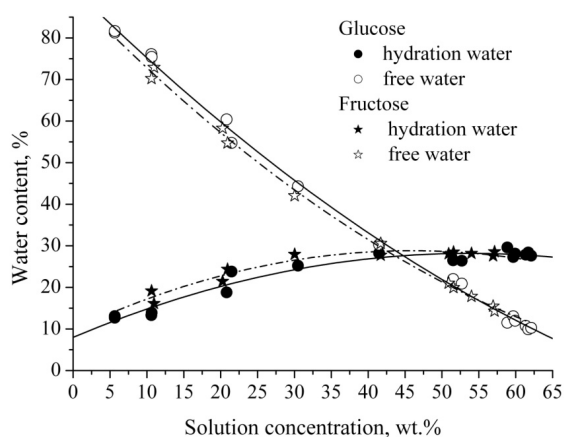


Fig. 1 – The content of hydrated and free water in solutions of D–glucose and D–fructose [12]

The observed nature of the dependence is a reflection of complex intermolecular interactions, which indicate a change in the quantity and quality of hydrogen bonds. Coordination numbers of hydration of D–fructose (5.19 ± 0.15) and D–glucose (4.95 ± 0.15) turned out to be close and coincide with the number of OH groups of these molecules, despite the difference in their isomeric forms in water solutions [12].

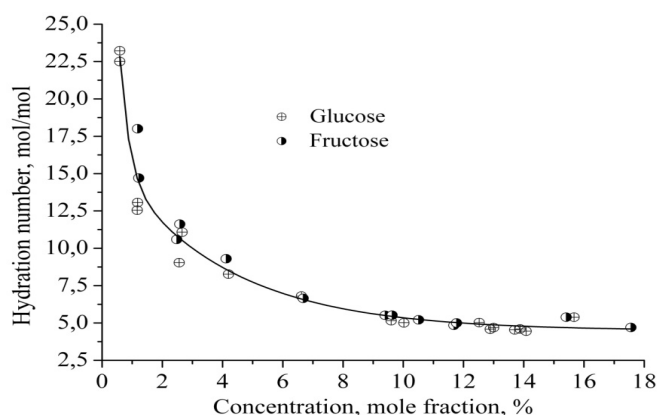


Fig. 2 – Average dependence of hydration numbers of D–glucose and D–fructose on the concentration of solutions [13]

In solutions with low concentrations, the number of water molecules bound to sugar molecules significantly exceeds the number of hydroxyl groups of this sugar. It can be imagined that each sugar molecule has a water shell, the thickness of which decreases with increasing concentration of the solution [10]. The hydration shell prevents the convergence of the solute molecules as long as the value of the degree of hydration exceeds the number of hydroxyl

groups [14]. It becomes possible the emergence of associates (elementary formations of future solid-phase structures) with increasing concentration of D-glucose solutions above 66.89 wt. % (0.49 g water/g dry matter) and D-fructose above 65.84 wt. % (0.52 g water/g dry matter), which correspond to the above coordination numbers of hydration [13]. Hydration curves confirm the existence of different structures in the sugar–water system and indicate a smooth transition from one structure to another when the concentration changes.

Taking into account the information on the hydration of D-glucose and D-fructose [12] and the results of measurements of the specific heat of evaporation of water from a sucrose solution [14], it can be expected that the specific heat of evaporation of water from solutions of monosaccharides should also exceed the specific heat of evaporation from the free surface of pure bulk water. Therefore, an experimental study of the influence of the degree of hydration of fructose on the energy of evaporation of water from its solutions is of both theoretical and practical interest, since fructose is a component of the juice of many fruits and root crops subjected to drying.

Materials and methods. Measurement of the specific heat of evaporation of water from fructose solution was carried out in the evaporation calorimeter, which was designed and manufactured in the IET of NAS of Ukraine [15]. The developed applied computer programs make it possible to collect information about the change in heat flows and the mass of the solution during the evaporation.

The study was carried out in isothermal mode at 40, 60 and 80 °C with an initial concentration of fructose in solutions of 12.5 wt. %. Chemically pure fructose and distilled water were used to prepare the solutions. The solutions were sterilized by boiling to prevent the possible development of microbiological activity. Samples weighing ~1.1 g were placed into the measuring cell of the calorimeter using a syringe–dispenser. The thickness of the layer of the solution was ~1 mm. The remainder of the solution in the calorimeter cell was carefully checked after each experiment. Needle-shaped crystals of fructose were always detected in it. The studies were carried out at least three times at the indicated temperatures.

After the thermal equilibrium was established in the calorimetric unit, synchronous registration of the heat spent on water evaporation and the mass of the sample was started. Measurement was stopped after the differential heat flow decreased to the resolution level and no change in the mass of the sample. The current values of the specific heat of evaporation r were determined in the process of dehydration of the solution from changes in the mass of the sample m and the differential heat flow q . The calculations were performed according to the algorithm:

$$r_i = \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_{i+1}} q(\tau) d(\tau) / (m(\tau_{i-1}) - m(\tau_{i+1}))$$

The calorimeter was calibrated according to the requirements set out in [16] by comparing the obtained values of the heat of evaporation of the reference substance with the recommended values [17]. Distilled water for injections produced by the pharmaceutical company “Darnitsa” was used as a reference substance.

The mathematically expected relative error in determining the specific heat of evaporation of water in the temperature range of 40 – 80 °C was 0.49 %, and the maximum possible error was 1.09 %.

Results of measurements and discussion of the obtained results. The experimental values of the specific heat of evaporation of water r are represented by the reduced specific heat of evaporation as a dependence of the dimensionless parameter $R = r/r_{tab}$ on the concentration of solution C , where r_{tab} is the specific heat of evaporation from the free surface of pure water (Fig. 3).

The thermograms presented in Fig. 3 reflect the thermal processes occurring in a fructose solution during isothermal water removal. Two periods are clearly distinguished on the curves. The first period is purely endothermic. It occupies the concentration interval from the beginning of dehydration to the maximum heat absorption. The second is a reflection of simultaneous running of processes of water evaporation and spontaneous crystallization of fructose. The heat of spontaneous crystallization is generated in a short time and has a capacity greater than the endothermic heat consumption for dehydration. Therefore, the thermogram curves have a maximum after reaching which heat of evaporation it is almost impossible to estimate.

The first period is characterized by an almost linear increase in the heat of dehydration. The specific heat of evaporation is close to the tabular values ($R \approx 1$) only at the beginning of dehydration. The degree of hydration in the initial solution is ~12.5 mol water/mol fructose. As dehydration, the specific heat of evaporation increases monotonically until the solution reaches a concentration of ~65 %. In this case, the hydration number reaches ~5, that is, it becomes equal to the coordination number of fructose hydration [12]. Further concentration of the solution leads to a steeper increase in the specific heat of dehydration, which reaches an increase of 6 – 7 % by the time crystallization begins. That is, the removal of water from the hydrated coordination sphere of fructose occurs with large increasing specific heat consumption.

Taking into account that the degree of hydration is higher in solutions of lower concentration than in concentrated ones, it was possible to expect higher values of the specific heat of evaporation at the initial stage of dehydration. The obtained experimental fact was registered and described earlier in [14] and found an explanation in the following assumption. The binding energy between water molecules and the hydroxyl groups of sugar (strongly bound hydrated water) is higher than that of the bonds formed in solution at some distance from the sugar molecule (weakly bound hydrated water). This assumption arises as an analogy with the existing idea of water weakly and strongly bounded to the hydrophilic surface. It agrees with the information about the existence of an ordered first

coordination layer in the range of 0.18 – 0.35 nm and a disordered second hydration shell at a distance exceeding 0.4 nm [6, 18].

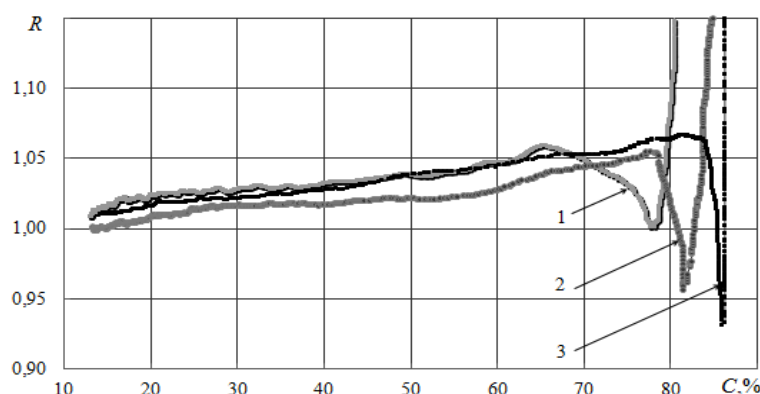


Fig. 3 – Curves of dependence of the reduced specific heat of evaporation of water from D-fructose solutions on the concentration at 40 (1), 60 (2) and 80 °C (3)

This assumption explains the steeper rise in the parameter R after the fructose solution reaches a concentration of ~65 wt. %. The degree of hydration of fructose becomes < 5 in excess of this concentration. Dehydration occurs when there is no free water in the solution. Hydrated water, which is strongly bound to fructose molecules, is removed.

Judging by the thermograms (Fig. 3), the degree of fructose hydration, which can be calculated from the data of the total concentration of solutions in the calorimeter cell (70.0 % at 40 °C, 82.4 % at 60 °C, and 87.5 % at 80 °C), is 4.3, 2.1 and 1.4 respectively at the maximum points. Comparing the obtained data with the solubility of fructose 84.34 % (40 °C), 89.16 % (60 °C) and 92.46 % (80 °C) [19] and the degree of its hydration 1.86, 1.21 and 0.81 respectively, it can be concluded that the nucleation of crystals does not occur in the entire volume of the solution. That is, the concentration of the solution does not correspond to the actual concentration in the crystallization zone at the points on the curves where the inflection is fixed (transition from heat absorption to heat release).

Evaporation of water is carried out from the surface of the solution. The diffusion of water into the surface layer is complicated by the high viscosity [20]. The gradient of fructose concentration occurs along the height of the solution. This leads to the appearance of supersaturation in a thin surface layer and involuntary spontaneous crystallization. As can be seen from the thermograms, the kinetics of crystallization depends on temperature. The crystallization rate increases slowly at 40 °C due to the higher viscosity of the solution compared to the ballistic crystallization processes at 60 and 80 °C. Reaching the maximum heat release, the curves are sharply directed upwards. Such course of thermograms in the crystallization zone is due to the closure of the evaporation surface with a layer of the solid phase of fructose. During this period, heat generation still continues, but the intensity of evaporation decreases. And when the change in the mass of the sample reaches values less than the sensitivity of the balance, the calculated value of the specific heat of evaporation increases sharply, which is represented as an ascending curve of the parameter R (Fig. 3).

Conclusions. Changes in the specific heat of evaporation of water from fructose solutions were studied in isothermal mode at 40, 60 and 80 °C during continuous dehydration by calorimetry.

The influence of the degree of hydration of fructose on the specific heat of evaporation is revealed. It is shown that the measured specific heat of evaporation of water increases and reaches the excess over the tabular values of the heat of evaporation from the free surface of pure volumetric water by 6 – 7 % despite the decrease in the degree of hydration of fructose with increasing concentration of solutions.

Water has a strong hydrogen bond with fructose in solutions in which the degree of hydration of fructose is less than ~5 mol water/mol fructose. In solutions containing free water, hydrated water outside the first coordination sphere is bound to fructose by less strong bonds, the energy of which decreases as the solution is diluted.

Taking into account the concentration dependence of the degree of hydration of glucose, which is almost the same as that of fructose, it can be assumed that glucose solutions will have the same dependence of the specific heat of evaporation of water on concentration, as in fructose solutions.

The dependence of the specific heat of evaporation of water from solutions of fructose and sucrose [14] on the concentration makes it necessary to take them into account in the existing methods of thermal calculation of drying processes of sugar-containing raw materials and corresponding equipment.

References

1. Frukty i yagodyi. Tablitsa kaloriynosti i himicheskoy sostav produktov pitaniya. (n.d.). MZR. Retrieved May 5, 2020, from https://health-diet.ru/base_of_food/food_24516/
2. Ovoschi i zelen. Tablitsa kaloriynosti i himicheskoy sostav produktov pitaniya. (n.d.). MZR. Retrieved May 5,

- 2020, from https://health-diet.ru/base_of_food/food_24512
3. Knunyants, I. L. (Ed.). (1990). *Himicheskaya entsiklopediya* : T. 2. Daffa-Medi. M.: Sovetskaya entsiklopediya.
 4. Kupchevich, Yu. E. (1996) Monosaharidy – sovremennyye dannyye o strukture i stereokhimii ih molekul. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 8, 41–50.
 5. Bobrovnik, L. D., Gulyiy, I. S., & Klimovich, V. M. (1992). Gidratatsiya i fazovyye prevrascheniya saharozyi. *Saharnaya Promyshlennost*, 6, 10–11.
 6. Franks, F. (1985). Svoystva vodnykh rastvorov pri temperaturah nizhe 0°S. In F. Franks (Ed.), *Voda i vodnyye rastvory pri temperaturah nizhe 0°S*. (pp. 176–276). K.: Naukova dumka.
 7. Simatos, D., Four, M., Bonzhur, I., & Kouch, I. (1980). Primenenie differentsialnogo termicheskogo analiza i differentsialnoy skaniruyushey kalorimetrii pri izuchenii vodyi v pischevykh produktah. In R. B. Dakuort (Ed.), *Voda v pischevykh produktah* (pp. 156–170). M.: Pischevaya promyshlennost.
 8. Deodar, S., & Luner, F. (1984). Izmerenie soderzhaniya svyazannoy (nezamerzayushey) vodyi metodom differentsialnoy skaniruyushey kalorimetrii. In S. Roulend (Ed.), *Voda v polimerah* (pp. 273–287). M.: Mir.
 9. Franks, F. (1980). Voda, led i rastvoryi prostykh molekul. In R. B. Dakuort (Ed.), *Voda v pischevykh produktah* (pp. 14–32). M.: Pischevaya promyshlennost.
 10. Mykhailik, V., Davydova, E., & Mank, V. (1989). Issledovanie gidratatsii saharozyi metodom nizkotemperaturnoy skaniruyushey kalorimetrii. *Termodinamika Organicheskikh Soedineniy*, 76–80.
 11. Mykhailik, V. (2006). Eksperimentalnoe issledovanie gidratatsii saharozyi. *Naukovi Pratsi Odeskoi Natsionalnoi Akademii Kharchovykh Tekhnologii*, 28(2), 370–373.
 12. Mykhailik, V. (2007). Primenenie termicheskikh metodov issledovaniya v reshenii nauchnykh i proizvodstvennykh zadach energoeffektivnosti. *Naukovi Pratsi Odeskoi Natsionalnoi Akademii Kharchovykh Tekhnologii*, 31(1), 170–177.
 13. Mykhailik, V. (2020). Razvitie teplofizicheskikh i fiziko-himicheskikh osnov protsessa sushki saharosoderzhashego rastitelnogo syrya. *Sovremennyye Energoberegayushchie Teplovyie Tehnologii (Sushka i Teplovyie Protsessy): Sbornik Nauchnykh Trudov Konferentsii*, 79–92.
 14. Mikhailik, V., Dmitrenko, N., & Snezhkin, Y. (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.
 15. Dubovikova, N., Snezhkin, Y., Dekusha, L., & Vorobev, L. (2013). Teplometricheskii pribor sinhronnogo termicheskogo analiza dlya opredeleniya udelnoy teploty ispareniiya. *Promyshlennaya Teplotekhnika*, 35(2), 87–95.
 16. Vaysband, M., & Pronenko, V. (1986). *Tekhnika vyipolneniya metrologicheskikh rabot*. K.: Tekhnika.
 17. Aleksandrov, A., & Grigorev, B. (1999). *Tablitsy teplofizicheskikh svoystv vodyi i vodyanogo para: Spravochnik*. M.: MEI.
 18. Nanassy, A. J., & Desai, R. L. (1978). NMR shows how ammoniacal primer–sealers alter the hygroscopicity of wood. *Wood Sci.*, 10(4), 204–207.
 19. Honig, P. (Ed.). (1961). *Printsipyi tehnologii sahara* (Trans. from Engl. ed.). M.: Pischepromizdat.
 20. Laos, K., & Harak, M. (2014). The viscosity of supersaturated aqueous glucose, fructose solutions. *J. Food Physics*, 27, 27–30.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗНЕВОДНЕННЯ РОЗЧИНУ D–ФРУКТОЗИ

Михайлик В.А.¹, к.т.н., с.н.с., Дмитренко Н. В.¹, к.т.н., Корінчевська Т.В.¹, к.т.н.,
Парняков О.С.², д-р філософії, Снежкін Ю.Ф.¹, д.т.н., професор¹
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ
²Elea Technology GmbH, Квакенбрюк, Німеччина

Анотація. Теплота випаровування води є основною складовою витрат при сушінні біосировини. Доля її в витратах залежить не тільки від вихідної вологості об'єкту сушіння. Як показали наші попередні дослідження, на загальні витрати теплоти впливає стан води в матеріалі. А стан води визначається його хімічним складом та структурою. Особливу увагу заслуговують об'єкти сушіння з багатим вмістом цукрів, які, маючи високу схильність до гідратації, зосереджені в соку і визначають як кінетику так і теплоту зневоднення. Проаналізовано та наведено найбільш надійні дані щодо гідратації глюкози та фруктози. В калориметрі випаровування здійснено вимірювання питомої теплоти випаровування води r з розчинів фруктози з початковою концентрацією 12.5 мас.%. В процесі вимірювання було забезпечено безперервну реєстрацію зміни теплових потоків та маси зразка. Отримано залежності приведеної питомої теплоти випаровування води ($R = r/r_{\text{tab}}$) від концентрації фруктози в ізотермічному режимі за 40, 60 та 80 °C. Представлені криві відображають теплові процеси, що відбуваються в розчині при видаленні води. Процеси характе-

ризуються ендотермічним періодом зневоднення та екзотермічним періодом одночасного протікання зневоднення та спонтанної гомогенної кристалізації фруктози. Встановлено, що зміна ступеня гідратації фруктози в розчині від 12.5 до 5 моль/моль відбувається зі зростаючими, практично лінійно, питомими витратами теплоти. Видалення води з першої координаційної сфери, коли ступінь гідратації зменшується до значень <5 , зростання питомої теплоти випаровування є більш крутим і досягає перевищення над табличними значеннями теплоти випаровування чистої води r_{tab} на 6 – 7 %. Теплота спонтанної кристалізації фруктози має потужність більшу за потужність ендотермічних витрат теплоти на зневоднення тому реєструється загальний екзотермічний ефект. Показано, що незважаючи на зменшення ступеня гідратації фруктози, при збільшенні концентрації розчинів, виміряна питома теплота випаровування води зростає. Встановлено, що у розчинах, в яких ступінь гідратації фруктози менша за ~ 5 , вода має сильний водневий зв'язок з цукром. Обґрунтовано припущення про сильно і слабо зв'язану гідратну воду в розчинах моноцукрів.

Ключові слова: теплота випаровування, розчин, глюкоза, фруктоза, гідратація, вільна та гідратна вода.

Список використаної літератури

1. Фрукты и ягоды. Таблица калорийности и химический состав продуктов питания // МЗР: [Веб-сайт]. URL: https://health-diet.ru/base_of_food/food_24516/ (дата звернення: 05.05.2020).
2. Овощи и зелень. Таблица калорийности и химический состав продуктов питания // МЗР: [Веб-сайт]. URL: https://health-diet.ru/base_of_food/food_24512/ (дата звернення: 05.05.2020).
3. Химическая энциклопедия: В 5 т. / под ред. Кнунянц И.Л. (гл. ред.) и др. М.: Советская энциклопедия, 1990. Т. 2: Даффа–Меди. 673 с.
4. Купчевич Ю.Е. Моносахариды – современные данные о структуре и стереохимии их молекул // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 8. С. 41–50.
5. Гидратация и фазовые превращения сахарозы / Бобровник Л. и др. // Сахарная промышленность. 1992. № 6. С. 10–11.
6. Франкс Ф. Свойства водных растворов при температурах ниже 0 °C // Вода и водные растворы при температурах ниже 0 °C / под ред. Ф. Франкса. К.: Наукова думка, 1985. С. 176–276.
7. Применение дифференциального термического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии при изучении воды в пищевых продуктах // Вода в пищевых продуктах / Симатос Д. и др. ; под ред. Р.Б. Дакуорта. Москва: Пищевая промышленность, 1980. С. 156–170.
8. Деодар С., Лунер Ф. Измерение содержания связанной (незамерзающей) воды методом дифференциальной сканирующей калориметрии // Вода в полимерах / под ред. С. Роуланда. Москва: Мир, 1984. С. 273–287.
9. Франкс Ф. Вода, лед и растворы простых молекул // Вода в пищевых продуктах / под ред. Р.Б. Дакуорта. Москва: Пищевая промышленность, 1980. С. 14–32.
10. Михайлик В.А., Давыдова Е.О., Манк В.В. Исследование гидратации сахарозы методом низкотемпературной сканирующей калориметрии // Термодинамика органических соединений. Горький, 1989. С. 76–80.
11. Михайлик В.А. Экспериментальное исследование гидратации сахарозы // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. 2006. Вип. 28, Т. 2. С. 370–373.
12. Михайлик В.А. Применение термических методов исследования в решении научных и производственных задач энергоэффективности // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. 2007. Вип. 31, Т. 1. С. 170–177.
13. Михайлик В.А. Развитие теплофизических и физико-химических основ процесса сушки сахаросодержащего растительного сырья // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы: сборник научных трудов 7 межд. научно-практ. конф., посвященной 110-летию со дня рождения академика А. В. Лыкова (13–15 октября 2020 г.). М.: ООО «Мераполис», 2020. С. 79–92.
14. Mikhailik V.A., Dmitrenko N.V., Snezhkin Y.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. P. 916–922.
15. Теплометрический прибор синхронного термического анализа для определения удельной теплоты испарения / Дубовикова Н. С. и др. // Пром. теплотехника. 2013. Вип. 2, Т. 35. С. 87–95.
16. Вайсбанд М.Д. Техника выполнения метрологических работ. К.: Техніка, 1986. 168 с.
17. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник. М.: МЭИ, 1999. 168 с.
18. Nanassy A.J., Desai R.L. NMR shows how ammoniacal primer–sealers alter the hygroscopicity of wood // Wood Sci. 1978. Vol. 10, No. 4. P. 204–207.
19. Принципы технологии сахара. Пер. с англ. / под ред. П. Хонига. М.: Пищепромиздат, 1961. 616 с.
20. Laos K., Harak M. The viscosity of supersaturated aqueous glucose, fructose solutions // J. Food Physics. 2014. № 27. С. 27–30.

Отримано в редакцію 01.06.2022
Прийнято до друку 22.09.2022

Received 01.06.2022
Approved 22.09.2022

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗІЇ ЦУКРОЗИ В ПЛОДАХ ЯБЛУКА У ВИРОБНИЦТВІ ЯБЛУЧНИХ ЦУКАТІВ

Гузьова І.О., к.т.н., доцент
НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Анотація. Стаття присвячена удосконаленню процесу виробництва цукатів. Дослідження внутрішньодифузійних процесів є першочерговим завданням з точки зору енергозбереження процесу та дотримання високої якості готових продуктів. Процес виробництва цукатів треба організувати таким чином, щоб насичення плодів цукром відбувалося швидше за оптимально підібраних температур насичення та концентрації сиропу.

В статті досліджуються процеси насичення цукром плодів яблука. Обґрунтовано необхідність визначення коефіцієнтів молекулярної дифузії та коефіцієнтів масопровідності. Доведено, що коефіцієнт масопровідності залежить від внутрішньої структури плодів. Проведено аналіз фотографій клітин сирих та бланшованих плодів яблука. Визначено пористість плодів. Виведено залежності: для розрахунку коефіцієнту молекулярної дифузії цукрози в суцільному середовищі води, для розрахунку коефіцієнту масопровідності в бланшованих плодах яблука, для розрахунку коефіцієнту масопровідності в сирих плодах яблука. Залежності дозволяють аналітично розрахувати коефіцієнт молекулярної дифузії цукрози в суцільному середовищі води та коефіцієнти масопровідності в сирих та бланшованих плодах яблука сорту «Семеренко» в межах температур 30 – 100 °С. Коефіцієнт масопровідності в бланшованих плодах яблука в 5 разів більший, ніж в сирих плодах яблука.

В статті встановлені експериментальні та теоретичні залежності для розрахунку зміни концентрації цукру в часі в плодах яблука. Обґрунтована залежність зміни концентрації цукру в яблучних цукатах в часі та вплив на неї температури сиропу. Виведені аналітичні залежності, які дають змогу розрахувати зміну концентрації цукру в часі в бланшованих плодах яблука кубічної форми розміром 15х15х15 мм в межах температур 30 – 100 °С. У виведених залежностях передекспоненційний множник є однаковий та приблизно дорівнює одиниці. Це підтверджує той факт, що цей коефіцієнт, знайдений експериментальним шляхом, залежить від форми частинок. Показник степені в залежностях суттєво залежить від температури та в'язкості цукрового сиропу та може бути визначений виключно експериментальним шляхом.

Ключові слова: яблучні цукати, дифузійні процеси, коефіцієнт масопровідності, коефіцієнт дифузії

Формулювання проблеми. Виробництво цукатів являє собою, в першу чергу, процес насичення фруктів, овочів та ягід цукровим сиропом. Цей процес є тривалим в часі та лімітується внутрішньою дифузією цукрози в плодах. Актуальним питанням є скорочення часу насичення плодів цукром з одночасним збереженням їх органолептичних властивостей. Тому, дослідження внутрішньодифузійних процесів є першочерговим завданням з точки зору енергозбереження процесу та дотримання високої якості готових продуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження внутрішньодифузійних процесів розглядається в ряді робіт на прикладі сушіння [1] адсорбції [2, 3] та екстрагування [4 – 6]. Так, на прикладі сушіння, авторами [1] обґрунтована фізична суть ефективного коефіцієнта дифузії, яка полягає в тому, що на внутрішньодифузійні процеси під час сушіння має значний вплив температура теплового агенту. На прикладі екстрагування, авторами [4] обґрунтовується фізична суть еквівалентного коефіцієнта дифузії, бародифузії [5] та коефіцієнта масопровідності [6], на які суттєво впливають геометрія та внутрішня структура пористих тіл.

Дослідженню процесів дифузії в цукрових сиропях присвячений ряд робіт [7, 8]. Так, авторами [7] доведено, що підвищення температури значно прискорює дифузію. Це пояснюється тим, що при нагріванні збільшується швидкість руху дифундуючих частинок та падає в'язкість сиропу. На швидкість дифузії також впливає концентрація сиропу із збільшенням якої, дифузія збільшується. Проте, збільшення концентрації призводить до збільшення в'язкості сиропу, що сповільнює дифузію [8]. Саме тому, процес виробництва цукатів треба організувати таким чином, щоб насичення плодів цукром відбувалося швидше за оптимально підібраних температур насичення та концентрації сиропу. Правильно підібрані параметри насичення будуть визначатися природою та внутрішньою будовою плодів.

Формулювання мети статті. Метою даної статті є дослідження масообмінних процесів під час насичення яблучних плодів сиропом, встановлення аналітичних залежностей для визначення коефіцієнтів масопровідності в плодах яблука, а також встановлення експериментальних та теоретичних залежностей для розрахунку зміни концентрації цукру в часі в плодах яблука.

Методи дослідження. Об'єктом дослідження є плоди яблука сорту «Семеренко». Для експериментального визначення коефіцієнта молекулярної дифузії плоди яблука піддавали аналізу на електронному мікроскопі. На мікроскопі розглядалися зразки сирого та бланшованого 10 хв в киплячій воді плоду яблука.

Зразки препарували, згідно методики, описаній в [9, 10]. Отримані препарати проглядали з використанням світлового мікроскопа Leica DM-2500 (Switzerland). Фотофіксацію зображення здійснювали з використанням цифрової камери Leica DFC450C та програмного забезпечення Leica Application Suite Version 4.4[Build:454] Leica Microsystems (Switzerland) Limited.

Фотографії зразків аналізували за допомогою програми Aperio Image Scope [v12.4.3.5008]. Це програма дозволяє визначити середній діаметр клітин та міжклітинного простору, а також загальну довжину каналів між клітинами на певній площі фрагменту клітини.

Для визначення зміни концентрації плодів яблука в часі під час насичення цукром з сиропу, експеримент проводили наступним чином. Готували сироп концентрацією 70 % (мас). Готували кубики плодів яблука 15x15x15 мм і завантажили в сироп. Обраний розмір плодів обумовлений споживними властивостями готових цукатів, зокрема їх приємним смаком, добрим засвоєнням, стійкістю під час зберігання, універсальністю використання як для безпосереднього споживання, так і для виготовлення більшості кондитерських виробів. Відношення маси плодів до маси сиропу становила 1:5. Таким чином концентрація сиропу змінювалася незначно. Кожні 5 хв. відбирали проби частинок плодів яблука.

Дослідження проводили за умов температур 30 °C, 50 °C, 70 °C, 100 °C. Вміст цукру в плодах визначали за допомогою рефрактометра HT118 (0 – 80 % Brix). Для цього розрізали досліджуваній плід на дві однакові частини і вичавлювали краплину соку з середньої частини плоду на поверхню призми рефрактометра.

Виклад результатів та їх аналіз. Фотографії зразків (збільшення в 200 разів, окуляр 10) сирого та бланшованого яблука наведені на рис. 1. Як видно з рис. 1а, клітини сирого яблука є різної форми та розміру, канали між клітинами чітко виражені. З рис. 1б видно, що клітини бланшованого яблука є деформовані, а каналів між клітинами є набагато більше.

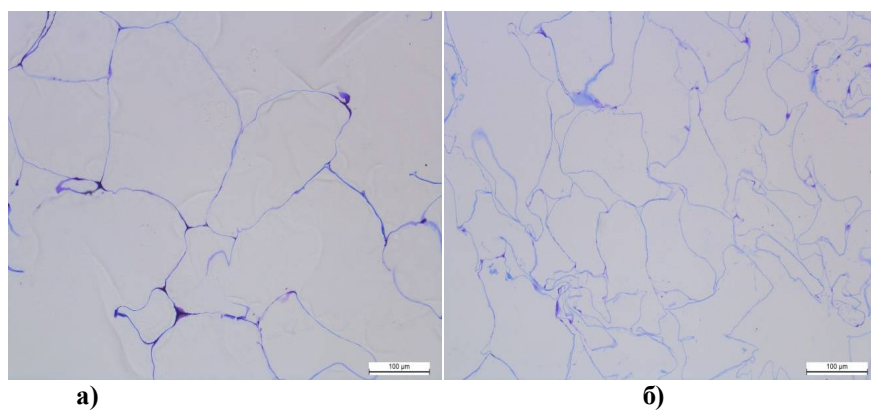


Рис. 1 – Фотографії клітини плоду яблука а) сирого; б) бланшованого

Для визначення коефіцієнта молекулярної дифузії в міжклітинному просторі плодів яблука необхідно визначити пористість поверхні масоперенесення досліджуваного зразка. Пористість поверхні масоперенесення (m , m^2/m^2) визначається, як відношення загальної площі поверхні каналів між клітинами ($S_{\text{пустот}}$, m^2) до загальної площі клітини ($S_{\text{заг}}$, m^2). Для визначення пористості проаналізуємо фотографії клітин на іншому збільшенні.

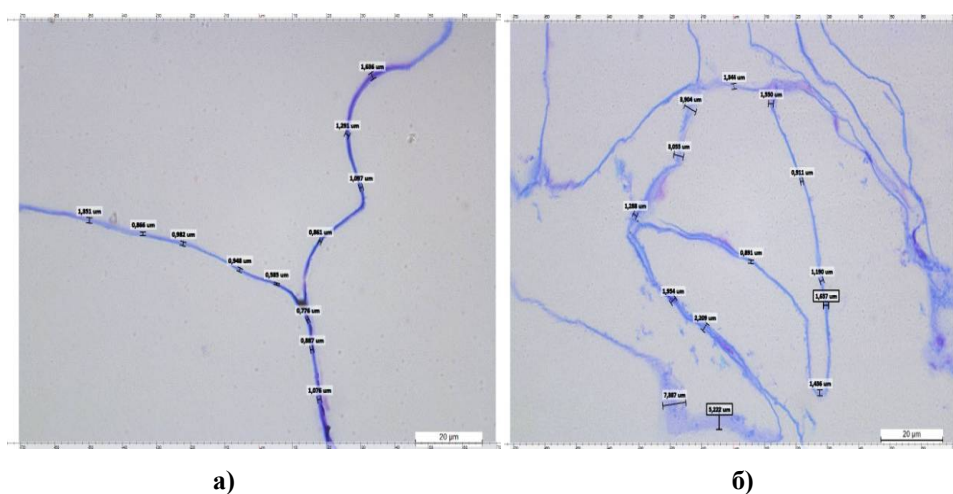


Рис. 2 – Фотографії клітини плоду яблука із визначенням середнього діаметра каналів між клітинами а) сирого; б) бланшованого

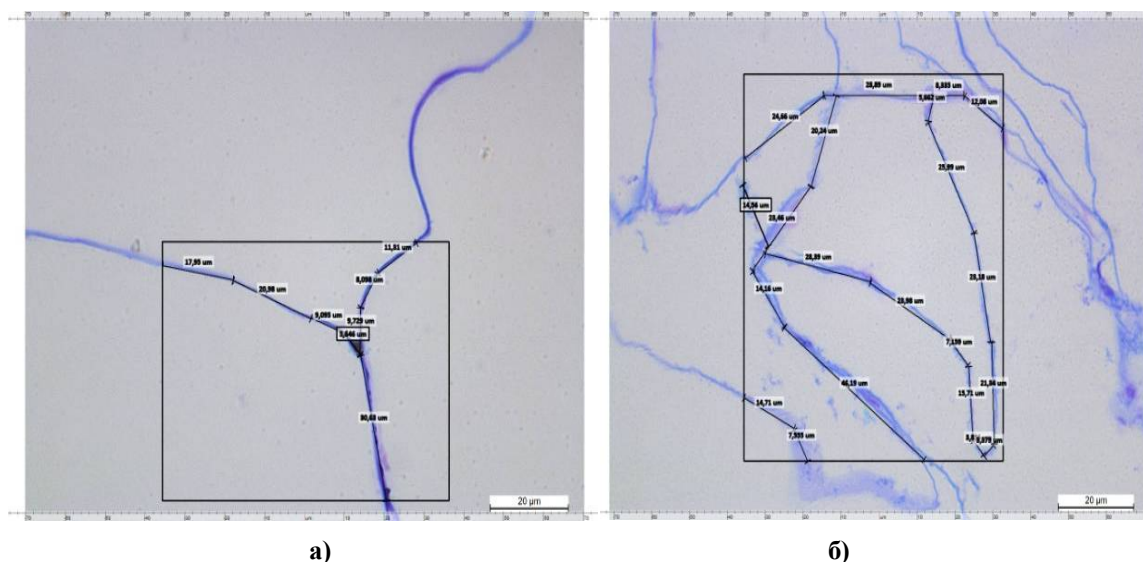


Рис. 3 – Фотографії клітини плоду яблука із визначенням довжини каналів між клітинами
а) сирого; б) бланшованого

Фотографії зразків (збільшення в 1000 разів, окуляр 10) сирого яблука наведені на рис. 2а, 3а. З рис. 2а було визначено діаметр каналів між клітинами (d_i , мкм, 12 вимірів) та середній діаметр каналів між клітинами сирого яблука (D_{cep} , мкм). З рис. 3а визначалися довжини каналів між клітинами (l_i , мкм, 8 вимірів) та загальна довжина каналів між клітинами сирого яблука (L , мкм). Результати вимірювання та розрахунки наведені в табл. 1.

Фотографії зразків (збільшення в 1000 разів, окуляр 10) бланшованого яблука наведені на рис. 2б, 3б. Аналогічно до попереднього варіанту, з рис. 2б було визначено діаметр каналів між клітинами (d_i , мкм, 14 вимірів) та середній діаметр каналів між клітинами бланшованого яблука (D_{cep} , мкм). З рис. 3б визначалися довжини каналів між клітинами (l_i , мкм, 21 вимір) та визначалася загальна довжина каналів між клітинами бланшованого яблука (L , мкм). Результати вимірювання та розрахунки наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Сире яблуко

$i =$	d_i , мкм	$i =$	l_i , мкм	S , мкм ²
1	1.64	–	250.93	$S_{заг} = 3848.92$
2	1.29	1	11.31	
3	1.1	2	8.1	
4	0.86	3	9.73	
5	0.87	4	30.63	
6	0.98	5	17.95	
7	0.95	6	20.98	
8	0.78	7	9.09	
9	0.89	8	5.65	
10	1.08		$L = \sum_{i=1}^{n=8} l_i = 113,44$	$S_{нустот} = \pi \cdot D_{cep} \cdot L = 367,48$
11	1.35			
12	0.59			
	$D_{cep} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=12} d_i = 1,032$			
	$S_{cep} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{cep}^2 = 0,835$			

Таблиця 2

Бланшоване яблуко				
i =	d _i , мкм	i =	l _i , мкм	S, мкм ²
1	1.34	–	299.96	S _{заг} = 5581.92
2	1.55	1	24.66	
3	1.95	2	28.89	
4	2.21	3	8.34	
5	1.44	4	12.08	
6	0.89	5	20.24	
7	1.19	6	23.46	
8	1.29	7	14.16	
9	3.9	8	46.19	
10	3.06	9	28.39	
11	0.91	10	23.98	
12	1.66	11	7.16	
13	7.39	12	15.71	
14	5.22	13	3.86	
	$D_{сер} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=14} d_i = 2,43$	14	3.38	
	$S_{сер} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{сер}^2 = 4,63$	15	21.34	
		16	23.18	
		17	25.99	
		18	5.66	
		19	14.71	
		20	7.55	
		21	14.56	
			$L = \sum_{i=1}^{n=21} l_i = 373,49$	$S_{пустот} = \pi \cdot D_{сер} \cdot L = 2848,13$

Отже, за результатами вимірювання та розрахунків, які наведені на рис. 2, 3 та в табл. 1, 2. було визначено пористість поверхні масоперенесення плодів сирого яблука $m = S_{пустот} / S_{заг} = 0,095 \text{ м}^2 / \text{м}^2$ та бланшованого яблука $m = S_{пустот} / S_{заг} = 0,51 \text{ м}^2 / \text{м}^2$. З результатів розрахунків видно, що пористість поверхні масоперенесення бланшованого яблука більша приблизно в 5 разів за пористість поверхні масоперенесення сирого яблука. Саме тому, для виробництва цукатів рекомендують використовувати бланшовані плоди.

Розрахуємо коефіцієнт дифузії молекул цукрози в суцільному рідкому середовищі – воді за відомим рівнянням Енштейна [9]:

$$D_c = \frac{k \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r} \quad (1)$$

де k – стала Больцмана, Дж/К

T – абсолютна температура, К

r – радіус дифундуючих частинок, м

μ – в'язкість рідкого середовища, Па·с

Як бачимо з рівняння (1) коефіцієнт молекулярної дифузії є прямопропорційний температурі середовища та зворотнопропорційний його в'язкості. Враховуючи те, що в середовищі сиропу знаходяться плоди яблука, в які дифундують молекули цукрози, необхідно розрахувати коефіцієнт масопровідності D_m , який присутній в пористому тілі яблука. Коефіцієнт масопровідності D_m є прямопропорційним коефіцієнту дифузії та залежить від структурних факторів: пористості, геометрії капілярів, співвідношенню між розмірами молекул речовини і радіуса капіляра. Тобто, коефіцієнт масопровідності D_m буде також прямопропорційний пористості плодів яблука (m), яка була розрахована вище та, відповідно, буде визначатися згідно залежності (2):

$$D_m = m \cdot D_c \quad (2)$$

На рис. 4 наведена залежність від температури коефіцієнта молекулярної дифузії цукрози у воді D_c , розрахованого за рівнянням (1) та коефіцієнта масопровідності D_m цукрози в плодах сирого та бланшованого яблука, визначеного з рівняння (2). Отримані точки апроксимували експоненціальною залежністю.

Апроксимація проводилась за допомогою графічно-програмного комплексу Grapher 10. В результаті ап-

роксимації одержані рівняння:

для розрахунку коефіцієнту молекулярної дифузії цукрози в суцільному середовищі води:

$$D_c = 4.1 \cdot 10^{-26} \cdot e^{0.0929 \cdot T} \quad (3)$$

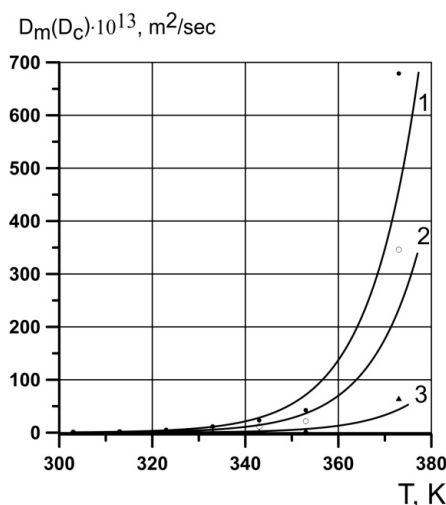
для розрахунку коефіцієнту масопровідності в бланшованих плодах яблука:

$$D_m = 2.1 \cdot 10^{-26} \cdot e^{0.0929 \cdot T} \quad (4)$$

для розрахунку коефіцієнту масопровідності в сирих плодах яблука:

$$D_m = 0.4 \cdot 10^{-26} \cdot e^{0.0929 \cdot T} \quad (5)$$

З рис. 4 видно, що найбільш суттєвий вплив на коефіцієнти дифузії та масопровідності мають внутрішня структура плодів та температура середовища. З ростом температури коефіцієнти суттєво зростають. Так, наприклад, з ростом температури від 30 до 50 °С коефіцієнт масопровідності в бланшованих плодах яблука зростає в 9 разів. Від 50 до 70 °С – зростає незначно (в 4 рази), а від 70 до 100 °С зростає майже в 30 разів. Саме тому, процес виробництва цукатів в цукровому сиропі можна рекомендувати проводити за умов температур більше 80 °С, бажано не доводячи сироп до кипіння, щоб не було суттєвого випаровування води з сиропу.



1 – в суцільному середовищі (D_c); 2 – в бланшованих плодах яблука (D_m);
3 – в сирих плодах яблука (D_m)

Рис. 4 – Залежність коефіцієнту молекулярної дифузії (D_c) та масопровідності (D_m) молекул цукрози від температури середовища

З рівнянь (4 – 5) та рис. 4 видно, що предекспоненційний множник залежить від внутрішньої структури плодів. Коефіцієнт масопровідності в бланшованих плодах яблука в 5 разів більший, ніж в сирих плодах яблука, що видно з рівнянь 4 – 5.

Залежності (3 – 5) дозволяють аналітично розрахувати коефіцієнт молекулярної дифузії цукрози в суцільному середовищі води та коефіцієнти масопровідності в сирих та бланшованих плодах яблука сорту «Семеренко» в межах температур 30 – 100 °С. Отримані залежності (3 – 5) добре узгоджуються з експериментально визначеними коефіцієнтами, а максимальна відносна похибка в результаті апроксимації експоненціальною залежністю не перевищує 3 %.

На час насичення плодів яблука цукром буде впливати як коефіцієнт масопровідності так і форма та розміри частинок пористого тіла.

Кінетику дифузійних процесів описує закон Фіка [9, 10]:

$$\frac{\partial c_2}{\partial \tau} = D_m \cdot \left(\frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Приєднаємо до диференційного рівняння (6) крайові умови:

$$\tau=0; c_2=c_0 = \text{const}$$

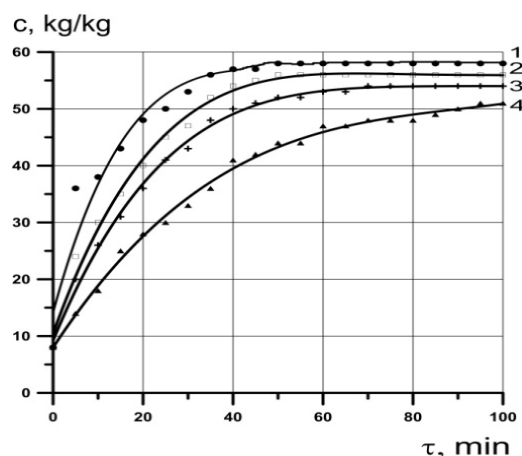
$$c_{2П}=0.$$

Тоді результатом розв'язку рівняння (6) в загальному вигляді буде рівняння (7):

$$1 - \frac{c}{c_p} = A \cdot e^{-s \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (7)$$

де R – характерний розмір;
 c_2 – біжуча концентрація
 A, s – коефіцієнти, знайдені експериментальним шляхом [11].

Залежність зміни концентрації цукрози в цукатах в часі за температур 30 °C; 50 °C; 70 °C; 100°C наведено на рис. 5.

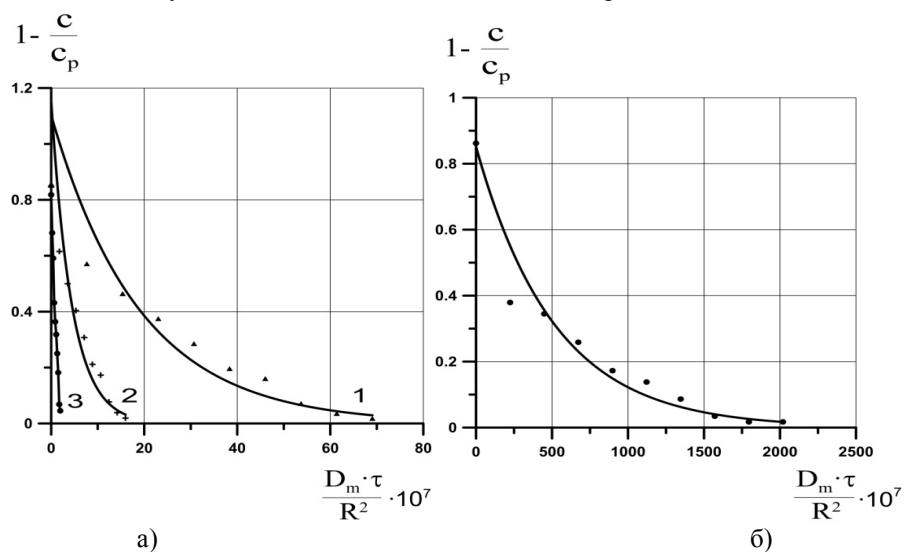


1 – кінетична крива насичення цукатів температурою 100 °C; 2 – кінетична крива насичення цукатів температурою 70 °C; 3 – кінетична крива насичення цукатів температурою 50 °C; 4 – кінетична крива насичення цукатів температурою 30 °C

Рис. 5 – Залежність зміни концентрації цукрози в цукатах яблук в часі

З рис. 5, видно, що під час витримування яблучних цукатів у сиропі концентрація цукрози в цукатах зростає з ростом температури.

Використовуючи рівняння (7) проведемо узагальнення результатів досліджень насичення частинок яблука цукром. Побудувавши графіки залежності зміни концентрацій від безрозмірного часу (рис. 6), бачимо, що всі експериментальні точки узагальнюються експоненціальними кривими.



1 – узагальнююча крива насичення цукатів температурою 70 °C; 2 – узагальнююча крива насичення цукатів температурою 50 °C; 3 – узагальнююча крива насичення цукатів температурою 30 °C; узагальнююча крива насичення цукатів температурою 100 °C

Рис. 6 – Криві узагальнення експериментальних даних зміни концентрації цукрози в яблучних цукатах в часі за температур

В результаті апроксимації, що проводилась за допомогою графічно-програмного комплексу Grapher 10, отримані аналітичні експоненціальні залежності, які мають вигляд:

залежність зміни концентрації яблучних цукатів в часі за температури 30 °C:

$$1 - \frac{c}{c_p} = e^{-1.4 \cdot 10^7 \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (8)$$

залежність зміни концентрації яблучних цукатів в часі за температури 50 °С:

$$1 - \frac{c}{c_p} = e^{-2.2 \cdot 10^6 \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (9)$$

залежність зміни концентрації яблучних цукатів в часі за температури 70 °С

$$1 - \frac{c}{c_p} = e^{-5.25 \cdot 10^5 \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (10)$$

залежність зміни концентрації яблучних цукатів в часі за температури 100 °С

$$1 - \frac{c}{c_p} = e^{-1.94 \cdot 10^4 \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (11)$$

Як видно з аналітичних залежностей (8 – 11), предекспоненційний множник є однаковий та приблизно дорівнює одиниці. Це підтверджує той факт, що цей коефіцієнт, знайдений експериментальним шляхом, залежить від форми частинок. Як стверджують автори [9] для кубічної та прямокутної форми цей коефіцієнт приблизно дорівнює 0,69 – 1. Показник степені в залежностях (8 – 11) суттєво залежить від температури та в'язкості цукрового сиропу. Так, наприклад, швидкість насичення яблучних цукатів цукром за умов 70 °С в 30 разів менша, ніж швидкість насичення за умов 100 °С. Таким чином, показник степені в залежностях (8 – 11) може бути визначений виключно експериментальним шляхом.

Залежності (8 – 11) дозволяють аналітично розрахувати зміну концентрації цукру в часі в бланшованих плодах яблука сорту «Семеренко» кубічної форми розміром 15х15х15 мм в межах температур 30 – 100 °С. Отримані залежності (8 – 11) добре узгоджуються з експериментально визначеними коефіцієнтами, а максимальна відносна похибка в результаті апроксимації експоненціальною залежністю не перевищує 3 %.

Висновки. На основі аналізу будови клітин сирих та бланшованих плодів яблука сорту «Семеренко» визначено коефіцієнт масопровідності молекул цукрози в середині плодів. Виведені аналітичні залежності, які дають змогу розрахувати коефіцієнт молекулярної дифузії цукрози в суцільному середовищі води та коефіцієнти масопровідності в сирих та бланшованих плодах яблука в межах температур 30 – 100 °С.

На основі експериментальних досліджень обґрунтована залежність зміни концентрації цукру в яблучних цукатах в часі та вплив на неї температури сиропу. Виведені аналітичні залежності, які дають змогу розрахувати зміну концентрації цукру в часі в бланшованих плодах яблука кубічної форми розміром 15х15х15 мм в межах температур 30 – 100 °С. Обґрунтовані раціональні температурні режими насичення цукатів цукром.

References

1. Hosovsky, R., Kindzera, D., Atamanyuk, V. (2016). Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks. *Chemistry & Chemical Technology*, 4(10(4)), 459 – 463. doi.org/10.23939/chcht10.04.459
2. Gumnitskii Ya., Lyuta O. (2014). Molecular Diffusion Mass Transfer of Substance in Soil Medium. *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii*, 48(4), 444–450. doi.org/10.1134/S0040579514040174
3. Petrushka I. M., Gumnitskii Ya. M., Malovanyi M. S. (2013). External Diffusion Kinetics of the Adsorption of Anionic Red 8C Dye on Glaucanite. *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii*, 47(2), 191–195. DOI: 10.1134/S004057951206019X
4. Burdo, O., Bezbah, I., Kepin, N., Bandura, V., Mazurenko, I. (2019). Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11-101), 24–32. doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937
5. Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Y.O. (2018). Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(2), 210–218. DOI: 10.3103/S1068375518020047
6. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., 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. doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843
7. Burdo, O., Bezbakh, I., Zykov, A., ...Zhengzheng, S., Phylipova, L. (2021). Development of the Design and Determination of Mode Characteristics of Block Cryoconcentrators for Pomegranate Juice. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 6–14. doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230182
8. Mikhailik, V.A., Dmitrenko, N.V., Snezhkin, Y.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. DOI: 10.1007/s10891-019-02003-8
9. Atamanyuk V., Huzova I., Gnativ Z. (2017). Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production. *Food Science and Technology*, 11(4), 21–28. doi.org/10.15673/fst.v11i4.72
10. Huzova I. et al. (2021). Study of diffusion processes in carrot particles. *Chemical technology and engineering proceedings of the 3rd International scientific conference. Lviv*, 70–71. doi.org/10.23939/cte

STUDY OF SUCROSE DIFFUSION IN APPLE FRUITS IN THE PRODUCTION OF CANDIED APPLES

Huzova I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Lviv Polytechnic National University

Abstract. The article is devoted to the improvement of the candied fruit production process. The study of intradiffusion processes is a priority task, it is necessary to save energy in the process and maintain the high quality of finished products. The process of production of candied fruit should be organized in such a way that the saturation of fruits with sugar occurs faster at optimally selected saturation temperatures and syrup concentration.

The article examines the processes of sugar saturation of apple fruits. The necessity of determining molecular diffusion coefficients and mass conductivity coefficients is substantiated. It has been proven that the coefficient of mass conductivity depends on the internal structure of the fruit. An analysis of photographs of raw and blanched apple fruit cells was carried out. The porosity of the fruits was determined. Dependencies are derived: for calculating the molecular diffusion coefficient of sucrose in a continuous medium of water, for calculating the coefficient of mass conductivity in blanched apple fruits, for calculating the coefficient of mass conductivity in raw apple fruits. Dependencies allow to analytically calculate the molecular diffusion coefficient of sucrose in a continuous medium of water and mass conductivity coefficients in raw and blanched apples «Semerenko» variety within the temperature range of 30-100 °C. The coefficient of mass conductivity in blanched apple fruits is 5 times higher than in raw apple fruits.

The article establishes experimental and theoretical dependencies for calculating changes in sugar concentration over time in apple fruits. Reasoned dependence of the change in sugar concentration in candied apples over time and the influence of syrup temperature on it. Analytical dependences have been derived that make it possible to calculate the change in sugar concentration over time in blanched cubic apple fruits with a size of 15x15x15 mm in the range of temperatures from 30 to 100 °C. In the derived dependencies, the pre-exponential factor is the same and approximately equal to unity. This confirms the fact that this coefficient, found experimentally, depends on the shape of the particles. The degree of dependence depends significantly on the temperature and viscosity of the sugar syrup and can be determined exclusively experimentally.

Keywords: candied apples, diffusion processes, mass conductivity coefficient, diffusion coefficient

Список використаної літератури

1. Hosovsky, R., Kindzera, D., Atamanyuk, V. Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks // Chemistry & Chemical Technology. 2016. Vol. 4, No. 10(4). P. 459 – 463.
2. Gumnitskii Ya., Lyuta O. Molecular Diffusion Mass Transfer of Substance in Soil Medium // Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii. 2014. 48(4). P. 444–450.
3. Petrushka I. M., Gumnitskii Ya. M., Malovanyi M. S. External Diffusion Kinetics of the Adsorption of Anionic Red 8C Dye on Glauconite // Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii. 2013. 47(2). P. 191–195.
4. Burdo, O., Bezbah, I., Kepin, N., Bandura, V., Mazurenko, I. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. 5(11-101). P. 24–32.
5. Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Y.O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2018. 54(2). P. 210–218.
6. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Levtrinskaya, J., Marenchenko, E. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. 4(11-88). P. 34–42.
7. Burdo, O., Bezbakh, I., Zykov, A., ...Zhengzheng, S., Philipova, L. Development of the Design and Determination of Mode Characteristics of Block Cryoconcentrators for Pomegranate Juice // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 2. P. 6–14.
8. Mikhaïlik, V.A., Dmitrenko, N.V., Snezhkin, Y.F. Investigation of the Influence of Hydration on the Heat of Evaporation of Water From Sucrose Solutions // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. 92(4). P. 916–922.
9. Atamanyuk V., Huzova I., Gnativ Z. Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production // Food Science and Technology. 2017. 11(4). P. 21–28.
10. [Study of diffusion processes in carrot particles](#). Huzova I. et al. // Chemical technology and engineering proceedings of the 3rd International scientific conference. Lviv, 2021. P. 70–71.

Отримано в редакцію 22.05.2022

Прийнято до друку 23.09.2022

Received 22.05.2022

Approved 23.09.2022

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ НОВИХ БЕЗВІДХОДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ЯГІДНОЇ СИРОВИНИ

Сильнягіна Н.Б., Степанова О.Є., к.т.н., Переяславцева О.О., к.т.н., с.н.с.

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Анотація. Важливими джерелами натуральних, корисних та оздоровчих речовин для людини є ягоди, фрукти та овочі. В даний час у багатьох країнах проводяться роботи з одержання цих продуктів у формі, що передбачає тривале зберігання без суттєвих втрат біологічно активних речовин. Це не тільки висушені ягоди різноманітної форми, шматочки різних розмірів, а й продукти в гранульованій формі, які можуть використовуватися в комплексі з іншими речовинами як лікувально-профілактичні препарати та біологічно активні добавки до різних харчових продуктів.

Вирішення таких завдань визначає необхідність створення нових ефективних теплотехнологій, що передбачають мінімізацію насамперед термічного впливу на термолабільні компоненти в рослинних продуктах і, по-друге, використання всіх його складових: розчинні і нерозчинні, включаючи, наприклад, для ягідної сировини невелике насіння, що міститься в них. Переробка повноцінної нефракціонованої сировини на гранульовані продукти, які здатні зберігатися практично без погіршення початкових хімічних характеристик та смакових властивостей тривалий час, є найшвидшим, економічно прийнятним та науково обґрунтованим шляхом вирішення цього завдання, так як робить можливим споживання біологічно активних речовин протягом міжсезоння.

Проведено дослідження ефективності процесу зневоднення у гранульованій формі структурованих рослинних продуктів (на прикладі ягід чорниці) з оцінкою адгезійних властивостей на етапах випарювання та сушіння залежно від різноманітних структуруючих добавок.

За результатами проведених наукових і експериментальних досліджень запропоновані принципові схеми виробництва сухої форми чорниці як основи для продуктів лікувально-профілактичного і широкого використання. Створені технології є безвідходними. Для цього проводилася попередня підготовка цілісних ягід чорниці в активному гідродинамічному режимі на роторно-імпульсному апараті з додаванням структуруючих домішок для отримання рідкого гомогенного продукту. Таким чином, підготовлена багатокомпонентна рідка система подається, в залежності від форми в якій повинен бути готовий продукт, на розпилювальну сушильну установку або на випарювання і гранулювання.

Ключові слова: дискретно-імпульсне введення енергії, диспергація, гомогенізація, ягідна сировина, енергоресурсозбереження.

Keywords: discrete-pulse energy input, dispersion, homogenization, berry raw materials, energy saving.

В Україні спостерігається нестача функціональних оздоровчих продуктів, але слід зазначити, що при цьому Україна має досить значну сировинну базу для створення таких продуктів. Традиційні технології переробки ягід та отримання продукції у вигляді паст та концентратів визначають досить жорсткі температурні режими переробки та значну загальну тривалість. Це призводить до значних втрат біологічно активних речовин. Крім того, для традиційних технологій характерною є наявність суттєвих відходів при переробці, які найчастіше ніяк не використовуються.

В даний час є актуальним створення нових ефективних технологій в Україні, які передбачають мінімізацію насамперед термічного впливу на термолабільні компоненти під час переробки сировини. Крім того, актуальним є вирішення проблеми використання всіх складових рослинної фруктово-ягідної сировини: розчинних і нерозчинних, що містять в собі невелике насіння. Вирішення проблеми створення енергоефективної безвідходної переробки повноцінної нефракціонованої сировини у формі, які здатні зберігатись тривалий час практично без погіршення своїх початкових біохімічних характеристик, надасть можливість отримати нові види продуктів.

Одним із цінних рослинних продуктів є плоди чорниці, які містять за масою до 18 % дубильних речовин та до 7 % органічних кислот (яблучної, бурштинової, хінінової, бензойної, молочної). Крім цього, плоди чорниці містять цукор (фруктоза, лактоза), вітамін С, вітаміни групи В, пектинові речовини, макро- і мікроелементи, Р-активні речовини (катехіни та антоціани), а також флаваноїди. У насінні ягід чорниці виявлено до 31 % жирної олії та до 18 % білка по масі [1].

Встановлено, що за рахунок комплексу біологічно активних речовин така ягода як чорниця має різноманітні лікувальні та профілактичні властивості. Чорниця – сильний антиоксидант. Як випливає з [2], по антиоксидантній активності чорниця займає шосте місце після таких ягід як чорна смородина, чорна вишня, глід, чорноплідна горобина та калина. За рахунок активності вітаміну А чорниця ефективно нейтралізує дію вільних радикалів. Основним активним компонентом ягід чорниці є антоціани (речовини, що надають пло-

дам фіолетового кольору), які проникають і накопичуються в тканинах очей і сприяють регенерації світлочутливості пігменту сітківки (радопсину). Вітаміни групи В необхідні для підтримки нормального внутрішньоклітинного метаболізму тканини ока і зменшення втоми очей. Активні речовини чорниці покращують пружність клітинних мембран та допомагають збільшити приплив крові до сітківки ока.

В Інституті технічної теплофізики НАН України протягом останніх років розробляються нові інтенсивні технології на основі методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) в гетерогенні системи. Теоретичні основи цього методу представлені в низці публікацій [3-6]. Лабораторні дослідження та дослідно-промислові результати освоєння нових технологій висвітлені у роботах [7-8].

Метод ДІВЕ реалізує принципово інший підхід до інтенсифікації тепломасообмінних та гідромеханічних процесів у дисперсних середовищах.

Використання роторно-імпульсних апаратів є одним із способів запуску широкого спектру механізмів ДІВЕ [5, 6]. Різкі перепади тиску в робочому обсязі рідини та створення умов кавітації забезпечується у цих апаратах, в яких застосовується принцип раптового гальмування чи прискорення потоку рідини. В апаратах, розроблених в Інституті технічної теплофізики, використовуються різні конструктивні рішення. Основними елементами роторно-імпульсних пристроїв можуть бути нерухомий статор і ротор, що обертається щодо нього, з аналогічними отворами. Ротор і статор можуть застосовуватись різної форми у вигляді плоских дисків або циліндричних поверхонь і т.п.: квадратні, круглі, щілинні. Суміщення отворів статора і ротора призводить до того, що потік рідини з великою швидкістю проходить через канал і раптово гальмується при перекритті отворів. Таким чином, виникають пульсації швидкостей потоку та турбулізація рідини. Швидкість обертання ротора регулює частоту та амплітуду імпульсів тиску, що дозволяє керувати інтенсифікацією процесу. Проте принцип ініціювання механізмів ДІВЕ у цих пристроях та методика розрахунку таких апаратів є ідентичними. Саме для отримання багатокомпонентних тонкодисперсних емульсій використовують ці пристрої. Їх застосування також необхідне для отримання гомогенних сумішей.

Крім того, в ІТТФ НАН України розробляються принципово нові апарати з активним гідродинамічним режимом – це апарати з об'ємом, що періодично швидко змінюється (пульсаційні апарати ДІВЕ). Такі апарати є ще одним способом ініціювання широкого спектра механізмів ДІВЕ [4]. Підвищення інтенсивності тепломасообміну в такого роду апаратах обумовлено виникненням в них при різких змінах об'єму робочого органу нестационарної гідродинамічної обстановки, при цьому в системі виникають високочастотні коливання, відмінні від коливань викликаних зміною об'єму рідини, причому ці коливання не поглинаються суцільною поверхнею, а дисипують у міжфазній поверхні, викликаючи тривалу інтенсифікацію тепломасообміну. Ще одним фактором, що викликає інтенсифікацію міжфазного переносу, є виникнення великих відносних швидкостей між дисперсною і суцільною фазами. При дискретно-імпульсному введенні енергії структура потоку, на відміну від традиційних способів її введення, призводить до виникнення концентрованих зон дисипації біля поверхні розділу фаз, що дозволяє на кілька порядків збільшити дисипацію енергії. Внаслідок цього у прикордонному шарі розвиваються такі потужні фактори, що інтенсифікують перенесення тепла та маси, як ударні хвилі та кавітаційні явища. Все це призводить до підвищення інтенсифікації тепломасообміну на 1-3 порядки. Апарати зі швидкозмінним об'ємом можуть відрізнятися конструкцією та цільовим призначенням. Разом з тим характеризуються загальною перевагою – високою питомою продуктивністю на одиницю енерговитрат, низькою металоємністю та порівняно простою конструкцією.

Використовуючи переваги вищеописаних апаратів ДІВЕ у порівнянні з існуючими, була розроблена технологічна схема переробки ягідної сировини, яка включає наступні основні етапи:



Рис. 1 – Блок-схема ДІВЕ-технології отримання паст з ягідної сировини

Використовуючи переваги вищеописаних апаратів ДІВЕ порівняно з існуючими, було розроблено технологічну схему переробки ягідної сировини, яка включає наступні основні етапи:

- Перший етап – активна гідродинамічна обробка.
- Другий етап – отримання пастоподібного препарату.

Перший етап передбачає безвідходну технологію переробки таких ягід, як чорниця, чорна смородина, малина, полуниця та ін., кісточку яких можуть бути подрібнені до заданого ступеня дисперсності, що забез-

печує отримання гомогенізованої суспензії. На цьому етапі в залежності від функціонального призначення продукту може бути використано:

- одноступенева обробка на циліндричному роторному апараті;
- двостадійна обробка на циліндричному та дисковому роторних апаратах з метою підвищення ступеня дисперсності нерозчинних фракцій;
- двостадійна обробка на роторних апаратах та пульсаційному апараті ДІВЕ з метою змішування та гомогенізації з іншими харчовими натуральними продуктами для отримання більш збагачених харчових композиційних продуктів.

Нами проведено комплекс експериментальних досліджень із переробки чорниці. На 1-му етапі гідродинамічної обробки використовувалося таке обладнання:

1. Циліндричний роторний апарат з робочим зазором між ротором та статором 0,3 мм, частотою обертання ротора 3000 об/хв., встановленою потужністю двигуна 3 кВт.

2. Дисковий роторний апарат із робочим зазором між ротором та статором 0,15 мм, частотою обертання ротора 12000 об/хв., встановленою потужністю двигуна 3 кВт.

На циліндричному роторному апараті продукт обробляли протягом шести циклів, кожен цикл складав 10 с. На роторному дисковому апараті продукт обробляли протягом трьох циклів, кожен цикл становив 30 с. Для кожного апарату після кожного циклу відбиралася проба, для якої визначалася динамічна в'язкість, температура, рН, розмір часток нерозчинних фракцій.

Слід зазначити, що для усіх проб рН залишався незмінним і становить 3,1. Початкова температура цільної чорниці перед обробкою становила 20 °С.

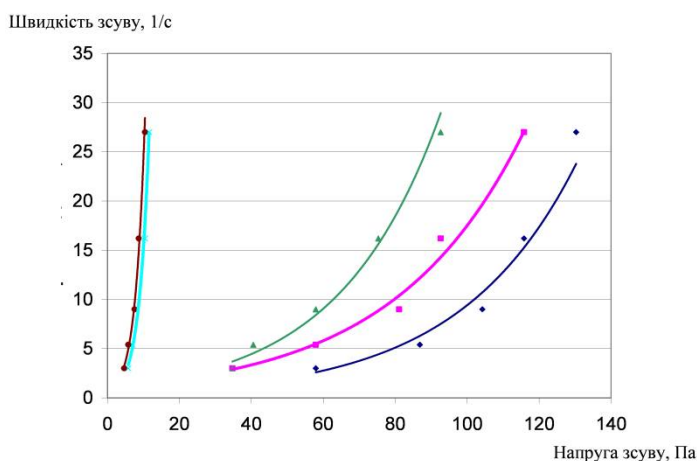
Відповідно до представленої схеми були проведені дослідження обробки ягід чорниці за першим етапом на роторно-пульсаційних апаратах циліндричного та плоского типів. Результати експериментів зведено до таблиці 1.

Таблиця 1

Тип роторного апарата	Час обробки, хв.	Питомі енерговитрати, кВт·год./м ³	Температура продукту на виході, °С	Середній розмір частинок продукту, мкм	Динамічна в'язкість продукту, Па·с
Циліндричний	1	12,5	25	не більше 300	7,5
Дисковий	1,5	18,75	30	не більше 150	1,5

Як видно з таблиці, дисперсії, отримані після роторних апаратів при однакових початкових характеристиках сировини, що подається (цілісна ягода кулястої форми діаметром 3-5 мм з температурою 20 °С) відрізняються як температурою на виході, так і середнім розміром частинок і динамічною в'язкістю.

За результатами експериментів побудовані криві залежності швидкості зсуву чорничної суспензії від напруги зсуву. Криві представлені на рис. 2.



Обробка на циліндричному роторному апараті: ♦ - 10 с обробки, ■ - 30 с, ▲ - 60 с.

Обробка на дисковому роторному апараті: x - 30 с обробки, ● - 90 с обробки.

Рис. 2 – Залежність швидкості зсуву потоку чорничної суспензії від напруги зсуву

Як видно з рисунку, усі криві при екстраполяції виходять з початку координат, а тому всі чорничні суспензії не є неньютонівськими рідинами. Криві, що отримані після обробки на дисковому роторному апараті, являють собою практично прямі лінії, а тому такі чорничні суспензії можна рахувати неньютонівськими рідинами, а суспензії, отримані після циліндричного роторного апарата – рідкоподібними.

Об'єктами досліджень були рідкі системи з ягід чорниці та її композицій:

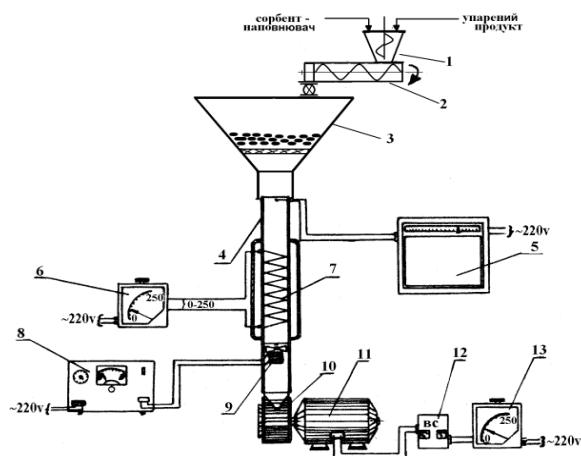
- рідка система з ягід чорниці + банан (композиція 1);
- рідка система з ягід чорниці + мальтодекстрин (композиція 2).

Початкова обробка продукту і його композиції проходила обробку на апаратах ДІВЕ.

Обробка на роторно-пульсаційному апараті дозволила провести процес: гомогенізації, диспергації, змішування з структуруючою добавкою, що важливо для подальших технологічних процесів. Була отримана гомогенна, текуча суспензія, при чому початкова концентрація сухих речовин (с.р.) для рідкої системи з ягід чорниці склала $C_0 = 10 \dots 12 \%$, при створенні композиції 1 початкова концентрація с.р. – $C_0 = 16 \%$, при створенні композиції 2 початкова концентрація с.р. – $C_0 = 12 \dots 14 \%$.

Далі постала необхідність у випаровуванні отриманих композицій до втрати плинності, при цьому концентрація сухих речовин склала $C_0 = 42 \%$.

Наступним етапом було формування гранул, для чого додавались різноманітні сорбенти-наповнювачі. Підготовлені гранули різноманітного композиційного складу проходили процес сушки на експериментальному стенді (рис. 3).



1 – змішувач; 2 – гранулятор; 3 – корпус сушильної камери; 4 – калорифер; 5 – потенціометр; 6, 13 – вольтметри; 7 – електронагрівач; 8 – мілівольтметр; 9 – анемометр; 10 – вентилятор; 11 – двигун; 12 – перетворювач струму

Рис. 3 – Схема експериментального стенду з збезводнення гранульованого продукту в продувасомому шарі

Робочий корпус (3) являє собою зрізану камеру з вмонтованою металічною сіткою. Камера встановлена на верхньому торці трубчатого калорифера (4), який обладнано електронагрівачем (7). Подача повітря в калорифер здійснюється з атмосфери вентилятором (10), що працює від двигуна постійного струму (11). Контроль швидкості повітря, що подається, здійснюється анемометром (9), а температури потоку – термопарою та потенціометром (5).

Методика проведення досліджень полягає в наступному. Після виходу експериментальної установки на заданий режим (відповідні значення температури та швидкості потоку повітря), в сушильну камеру подається задана за масою кількість продукту. Під дією нагрітого повітря продукт зневоднюється. В ході проведення дослідів:

- контролюється час сушіння;
- здійснюється перемішування продукту;
- контролюється процес руйнації гранул;
- визначається кінцева волога продукту;
- аналізуються адгезійні прояви гранул по відношенню до сітчастої підкладки.

Як показують результати проведених досліджень при сушінні гранул композицій з ягід чорниці, банану та подрібненої крупи вівсянки, яка додавалась у співвідношенні 1:1 та 1:1,5 (за сухими речовинами), продукт проявляв адгезійні властивості, що в подальшому, при отриманні продукту в промислових умовах, може сприяти погіршенню роботи устаткування та якісних характеристик кінцевого продукту.

Адгезійні прояви продукту відсутні при додаванні сорбенту-наповнювача (крупи вівсянки) у кількості 1:2,5 до системи з ягід чорниці та банану, а також для композиції «чорниця – мальтодекстрин» з додаванням, в якості сорбенту-наповнювача, жмиху червоної смородини.

Температурний режим сушіння був однаковий для всіх продуктів, що досліджувались. Але, в залежності від вмісту композицій, тривалість процесу сушіння відрізняється. Найбільша за часом вона для композиції з додаванням крупи вівсянки (1:1 та 1:1,5). Також гранульовані продукти цих композицій мають і більш високе значення кінцевої вологи, що може погіршувати якісні характеристики при подальшому зберіганні.

За органо-лептичними показниками, найбільш смакують композиції:

1. Ягоди чорниці, банан + вівсяна крупа (1:1,5 за с.р.);
2. Ягоди чорниці, мальтодекстрин + жмих червоної смородини (1:0,5 за с.р.).

Розмір гранул складає 4...10 мм, а насипна густина – 0,438...0,565 г/см³.

Проведені дослідження дозволяють вибрати склад та необхідну кількість компонентів при створенні технологічної схеми виробництва нових біологічно активних продуктів.

Висновки. Продукт, отриманий після обробки на циліндричному роторному апараті, відрізняється більш низькою температурою, більшим розміром частинок і більшою динамічною в'язкістю, що обумовлює його низьку плинність. Тому далі він може бути змішаний з консервуючими добавками і гомогенізований на пульсаційному апараті ДІВЕ без підвищення температури, після чого на другому етапі обробки поданий на подальше зневоднення (концентрування), а потім на пастоутворення.

Продукт, отриманий після дискового роторного апарату, може бути поданий:

- 1) на зневоднення з подальшим отриманням із нього пюре;
- 2) на освітлення з подальшим одержанням соку;
- 3) на змішування з консервантом з подальшим одержанням сиропу;
- 4) на розпилювальне сушіння з подальшим отриманням порошкової форми.

При цьому на другому етапі, залежно від функціональності застосування готового продукту, процес зневоднення може здійснюватися різними методами:

1) методом розпилювального сушіння як найперспективнішим для отримання найвищої біологічної активності в порошковій формі (час термічного впливу – не більше 5-10 хвилин);

2) методом вакуумного концентрування до такого вмісту сухих речовин, що дозволить забезпечити збереження фізико-хімічних характеристик у пастоподібній формі терміном не менше 0,5 року;

3) методом отримання гранульованої форми продукту, що передбачає додаткове змішування зі структуруючими компонентами отриманої рідкої системи з подальшим процесом гранулювання та сушіння при найбільш щадних температурних режимах.

References

1. Dudchenko, L.H., Kryvenko, V.V. (1988). *Pishchevyye rasteniya – tseliteli [Edible plants are healers]*: 2nd ed., add. and reworked. Kyiv: Nauk. Dumka. (in Russian).
2. Yashin, A.YA., Chernousov, N.I. (2007). *Opredeleniye soderzhaniya antioksidantov v pishchevykh produktakh i BADakh [Determination of the content of antioxidants in food products and dietary supplements]*. *Food industry*, 5, 28-30. (in Russian).
3. Dolinskiy, A.A., Basok, B.I. (1998). *Rotorno-impul'snyy apparat [Rotor-impulse apparatus]*. *Soobshcheniya 1, 2, 3 Prom. Teplotekhnika*, 6, 7-10. (in Russian).
4. Ivanitskiy, G.K., Korchinskiy, A.A., Matyushkin, M.V. (2003). *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov v pul'satsionnom dispergatore udarnogo tipa [Mathematical Modeling of Processes in a Pulsating Impact Disperser]*. *Problems of industrial heat engineering*, 1, 29-34. (in Russian).
5. Dolinskiy, A.A., Ivanitskiy, G.K., Obodovich, A.N. (2008). *Ispol'zovaniye mekhanizmov DIVE pri rotorno-pul'satsionnoy obrabotke geterogennykh sred [The use of DIVE mechanisms in the rotary-pulsation processing of heterogeneous media]*. *Prom. Teplotekhnika*, 30(4), 38-46. (in Russian).
6. Basok, B.I., Pirozhenko, I.A., Obodovich, A.N., Koba, A.R. (2003). *Energosberegayushchaya bezotkhodnaya tekhnologiya gomogenizatsii plodovoovoshchnogo i tsitrusovogo syr'ya [Energy-saving waste-free technology for homogenization of fruit and vegetable and citrus raw materials]*. *Prom. Teplotekhnika*, 25(4), 90-93.
7. Maletskaya, K.D., Turchina, T.YA., Zaritovskaya, A.G., Pereyaslavtseva, Ye.A. (2005). *Novyye teplotekhnologicheskiye aspekty polucheniya metodom raspylitel'noy sushki poroshkov iz rastitel'nogo syr'ya [New heat-technological aspects of obtaining powders from vegetable raw materials by spray drying]*. *Second Int. scientific-practical. conf. "Modern energy-saving thermal technologies (drying and thermal processes) METT-2005"*. *Proceedings of Conf. T.2. Moscow: VIM Publishing House*, 51-54. (in Russian).
8. Dolinskiy, A.A., Maletskaya, K.D., Basok, B.I., Obodovich, A.N., Koba, A.R., Zaritovskaya, A.G., Turchina, T.YA. (2016). *Sposob polucheniya natural'nykh fruktovykh i/ili ovoshchnykh poroshkov [Method for obtaining natural fruit and/or vegetable powders]*. Patent of Ukraine No 3180.

MAIN PRINCIPLES OF NEW WASTE-FREE TECHNOLOGIES FOR PROCESSING BERRY RAW

Silnyagina N.B., Stepanova O.E., PhD, Pereiaslavtseva O.O., PhD, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, Kyiv

Abstract. Berries, fruits and vegetables are important sources of natural, useful and healthy substances for humans. Currently, many countries are working on obtaining these products in a form that allows for long-term stor-

age without significant loss of biologically active substances. These are not only dried berries of various shapes, pieces of various sizes, but also products in granular form that can be used in combination with other substances as therapeutic and preventive drugs and biologically active additives to various food products.

Solving such tasks determines the need to create new effective thermal technologies, which involve, first of all, the minimization of thermal effects on thermolabile components in plant products, and secondly, the use of all its components: soluble and insoluble, including, for example, for berry raw materials, the small seeds contained in them. The processing of full-fledged unfractionated raw materials into granular products, which can be stored practically without deterioration of the initial chemical characteristics and taste properties for a long time, is the fastest, economically acceptable and scientifically justified way of solving this problem, since it is possible to consume biologically active substances during the off-season.

A study of the effectiveness of the process of dehydration in the granular form of structured plant products (on the example of blueberries) was carried out with an assessment of adhesive properties at the stages of evaporation and drying depending on various structuring additives.

Based on the results of scientific and experimental research, the principle schemes for the production of the dry form of blueberries are proposed as the basis for products of therapeutic and preventive and wide use. The technologies created are waste-free. For this, preliminary preparation of whole blueberries was carried out in an active hydrodynamic mode on a rotary-impulse apparatus with the addition of structuring impurities to obtain a rare homogeneous product. Thus, the prepared multicomponent liquid system is fed, depending on the form in which the finished product should be, to a spray drying unit or to evaporation and granulation.

Список використаної літератури

1. Дудченко Л.Г., Кривенко В.В. Пищевые растения – целители. – 2-е изд., доп. и перераб. – Киев: Наук. думка, 1988. – 272 с.
2. Яшин А.Я., Черноусов Н.И. Определение содержания антиоксидантов в пищевых продуктах и БАДах / Пищевая промышленность. 2007, № 5, С. 28-30.
3. Долинский А.А., Басок Б.И. Роторно-импульсный аппарат. Сообщения 1, 2, 3 // Пром. теплотехника. – 1998. – № 6. – С. 7-10; 1999. – № 1. – С. 35; 1999. – № 2, 3. – С. 3-5.
4. Иваницкий Г.К., Корчинский А.А., Матюшкин М.В. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа // Проблемы промышленной теплотехники, Киев, 2003, № 1, С. 29-34.
5. Долинский А.А. Использование механизмов ДИВЭ при роторно-пульсационной обработке гетерогенных сред / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий, А.Н. Ободович // Пром. теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 4. – С. 38-46.
6. Басок Б.И. Энергосберегающая безотходная технология гомогенизации плодовоовощного и цитрусового сырья / Б.И. Басок, И.А. Пироженов, А.Н. Ободович, А.Р. Коба // Пром.теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 4. – С. 90-93.
7. Малецкая К.Д., Турчина Т.Я., Заритовская А.Г., Переяславцева Е.А. Новые теплотехнологические аспекты получения методом распылительной сушки порошков из растительного сырья // Вторая Межд. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005». Труды конф. Т.2. – Москва: Издательство ВИМ, 2005. – С.51-54.
8. Патент Украины № 3180 / Способ получения натуральных фруктовых и/или овощных порошков / Долинский А.А., Малецкая К.Д., Басок Б.И., Ободович А.Н., Коба А.Р., Заритовская А.Г., Турчина Т.Я.

Отримано в редакцію 03.05.2022

Received 03.05.2022

Прийнято до друку 22.09.2022

Approved 22.09.2022

ДО ПРОБЛЕМИ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ ІЗ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Дячок В.В. д. т. н. професор, Венгер Л.О. к. т. н. доцент
Національний університет «Львівська Політехніка»

Анотація. Відмінною рисою твердих тіл клітинної будови (органічного походження), а такою є рослинна сировина, на противагу твердим тілам мінерального походження, є те, що внутрішня анатомічна будова передбачає наявність двох середовищ – клітинного та міжклітинного. Такі об'єкти дослідження при контакті з екстрагентом – найчастіше водою або водно-спиртовими розчинами володіють властивістю набухати, що в кінцевому підсумку спричиняється до зростання їх геометричних розмірів. Окрім цього, процес набухання завжди супроводжується розчинення компонентів, які містяться у внутрішньому об'ємі твердого тіла з подальшою їх дифузій за межі границі розподілу фаз. Це явище також спричиняється до збільшення об'ємів міжклітинного та клітинного середовищ в порівнянні з вихідною сухою сировиною. Наявність суттєвих значень на величину об'ємів клітинного та міжклітинного середовищ має анатомічна будова різних морфологічних органів рослинної сировини, тобто листя, стебло, корені з кореневищами, плоди, тощо.

У роботі теоретично обґрунтована та практично показана можливість експериментально визначення об'ємів міжклітинного та клітинного середовищ об'єктів екстрагування, які мають клітинну будову. В основу способу закладені теоретичні положення масообмінних процесів в системі тверде тіло – рідина. Запропонований спосіб визначення об'ємів міжклітинного та клітинного середовищ твердих тіл рослинного походження поглиблює знання в галузі розроблення методології прогнозування процесу екстрагування. Абсолютні значення визначених об'ємів дають можливість розраховувати значення коефіцієнтів дифузії біологічно активних сполук в об'ємі міжклітинному середовищі та через клітинну мембрану тим самим встановлювати режими процесу екстрагування, прогнозувати кінетику вилучення цільових речовин при проведенні процесу екстрагування на виробництві, а також розробляти методології розрахунку процесів екстрагування із твердих тіл рослинної сировини, що сприятиме проведенню виробничих процесів екстрагування в цифровому режимі. Узагальненні закономірності екстрагування із рослинної сировини розширюють уявлення про масообмін в системі тверде тіло – рідина та мають перспективу застосування для розроблення теорії моделювання процесів екстрагування.

Ключові слова: набухання, об'єм клітинного та міжклітинного середовищ, екстракція, біологічно активні сполуки.

Постановка проблеми. Одержання біологічно активних сполук (БАС) методом екстрагування із рослинної сировини не втрачає актуальності з плином часу. Такі сполуки і надалі знаходять застосування у харчовій, фармацевтичній, хімічній та інших галузях промисловості, як в Україні так і за її межами. Це стоїть в першу чергу таких країн, як Китай, Індія, де традиційно рослинна сировина використовується, як джерело біологічно активних сполук, а також і країни з добре розвинутою хімією органічного синтезу, зокрема США, Японія, Німеччина і т. д. Зростаючі вимоги до якості сполук отриманих методом екстрагування обумовлюють потреби в розробленні більш сучасних технологій їх одержання та способів аналітичного розрахунку основних кінетичних констант із застосуванням цифрових технологій [1].

Важливим аргументом на користь одержання (БАС) методом екстрагування є і те, що в ролі екстрагентів найчастіше застосовують воду знесолену або водно-спиртові розчини, які вважаються екологічно безпечними, що робить такі виробництва в цілому не шкідливими для навколишнього середовища, а має не аби яке значення в сучасному цивілізованому світі виробництва та експлуатації хімічних речовин [2,3].

Процеси екстрагування із рослинної сировини традиційно є тривалими в часі. Причиною цього є анатомічна будова рослинної сировини, оскільки основною складовою таких твердих тіл є клітина, внутрішній об'єм якої обмежений клітинною мембраною. Наявність клітинної мембрани, фізичні характеристики якої обумовлюються багатьма чинниками, із-за чого вона чинить основний опір дифузії БАС в міжклітинний простір. Сьогодні відома велика кількість факторів, які можуть інтенсифікувати процес дифузії через клітинну мембрану, проте більшість із них призводить до втрати оптичної активності складної молекули органічного походження, а відтак до втрати біологічної активності цільової сполуки. Це є неприйнятним фактором в хіміко-фармацевтичній галузі індустрії, бо терапевтична доза не забезпечує терапевтичного ефекту. В харчових технологіях порушуються всі принципи нутриціології. В хімічних технологіях не витримує критики якість продуктів одержаних із такої сировини [4].

Математичні описи екстрагування із твердих тіл клітинної будови, а до таких відносять і рослинну сировину, містяться в літературі [6-10]. Проте для їх ефективного використання слід знати об'єми клітинного

та міжклітинного середовищ. Власне в цій роботі зроблена вдала спроба експериментального визначення цих величин.

Мета роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні та практичному розробленні передумов встановлення абсолютних значень об'ємів клітинного та міжклітинного середовищ методом набухання.

Теоретична частина. Найбільш поширеною теорією масообмінних процесів екстрагування в системі тверде тіло – рідина передбачається, що цільова речовина в межах об'єму твердого тіла може знаходитися у твердому або рідкому агрегатному стані. Екстрагент проникає в пори об'єкту екстрагування, розчиняє цільову речовину і створює умови для дифузії останньої до зовнішньої поверхні. Незалежно від агрегатного стану цільової речовини скелет твердого тіла при екстрагуванні залишається незмінним і виконує роль інертного носія. Для описання процесів екстрагування із таких тіл, а вони протікають у нестационарному (невстановленому) режимі дифузії, тобто коли концентрація цільової речовини в кожній точці змінюється, застосовують закон Фіка, яким є диференціальне рівняння молекулярної дифузії. В одновимірній лінійній системі координат (концентрація є функцією лише однієї лінійної координати, та часу - x, t), а в декартовій системі координат (концентрація є функцією трьох координат та часу - x, y, z, t). В такому випадку - це рівняння за умови постійного значення коефіцієнту дифузії має вигляд [4]. При екстрагуванні кінетика процесу характеризується коефіцієнтами масопереносу, абсолютні величини яких в кінцевому результаті визначають коефіцієнт масопереносу в цілому. Визначення їх значень та встановлення умов для досягнення максимальних їх величин відіграє принципову роль в усіх масообмінних процесах в тому числі і при екстрагуванні. Традиційно рушійною силою екстракційних процесів вважається різниця концентрацій цільових речовин у фазах в яких реалізовується масообмін. Тому в умовах рівноваги певному значенню концентрації цільової речовини в рідкій фазі - відповідає визначена концентрація речовин у твердій фазі і аналітично розраховується в обох фазах за допомогою рівняння матеріального балансу масопередачі. Все це стосується, як правило, твердих тіл мінерального чи неорганічного походження.

Характерною ознакою для твердих тіл органічного походження є клітинна будова. До таких тіл відносяться і рослинна сировина. Внутрішню анатомічну будову можна охарактеризувати наявністю двох середовищ, клітинного та міжклітинного, які розділені клітинною мембраною. Структура клітинних мембран досить складна і як засвідчують дані експериментальних досліджень власне вони спричиняють головний опір дифузії внутрішньоклітинній цільовій речовині в міжклітинний простір. Тому в найбільш узагальненому вигляді клітина розглядається, як джерело цільової речовини, а міжклітинний простір транспортним коридором.

Екстракції може піддаватись, як свіжа так і суха рослинна сировина. У випадку, коли маємо справу із сухою рослинною сировиною, процес екстрагування починається з того, що весь простір, як міжклітинного так і клітинного середовища заповнюється екстрагентом і створюються можливості для внутрішньоклітинної речовини дифундувати через клітинну мембрану у міжклітинний простір, а тоді до межі розподілу фаз. Весь цей складний механізм масоперенесення визначається коефіцієнтами масопередачі. Встановлення та дослідження комплексу чинників, які потенційно можуть інтенсифікувати масообмін при екстрагуванні із твердих тіл клітинного походження має важливе значення для проведення процесу екстрагування із рослинної сировини.

Описаний комплекс дифузійних явищ, що протікають всередині частинок подрібненої рослинної сировини, на сьогоднішній час є врахований та описаний аналітичними залежностями у літературі [5-17]. Разом з цим, важливо є вміло застосувати розроблену теоретичну базу, та отримавши дані експериментальних досліджень кінетики екстрагування розраховувати основні кінетичні коефіцієнти, тобто визначити окремо значення коефіцієнтів масопереносу через клітинну мембрану - k_c та в міжклітинному просторі - k_m . Як засвідчує досвід, значення коефіцієнтів дифузії цільових речовин, а від так і їх порядки, через клітинну мембрану - D_c є набагато меншим за значення коефіцієнту дифузії в міжклітинному середовищі - D_m , а останній в свою чергу значно менший коефіцієнту молекулярної дифузії в середовищі екстрагенту - D [5,7,8].

В теоретично виведеній формулі (1) [6]:

$$C_1 = C_{1p} \left(1 - \frac{1}{r+1} e^{-Kt}\right) \quad (1)$$

в якій

$$K = k_m - k_c \quad (2)$$

Слід зазначити, що коефіцієнт масопереносу - K , є величиною, що включає дві константи, зокрема, коефіцієнт масопереносу через клітинну мембрану - k_c , та коефіцієнту масопереносу в міжклітинному середовищі - k_m . (див. рівняння (2)). Математичний вигляд рівнянь (1) та (2) за умови старанного вивчення кінетики екстрагування, дозволяє визначати значення коефіцієнтів масопереносу через клітинну мембрану - k_c та в міжклітинному просторі - k_m . Встановлення значень відповідних коефіцієнтів в подальшому за формулами (3) та (4) дозволяють розраховувати порядок коефіцієнтів дифузії через клітинну мембрану та в міжклітинному середовищі - D_m . Аналітичний вираз для розрахунку коефіцієнту масопереносу через клітинну мембрану може бути представлений у вигляді залежності;

$$k_c = \frac{D_c}{\delta_c R_{екв}}; \quad (3)$$

де: $R_{екв} = \frac{V_c}{F_c}$ - еквівалентний радіус клітини.

тут; k_c – коефіцієнт масопереносу через клітинну мембрану; D_c – коефіцієнт дифузії через клітинну мембрану; F_c - площа поверхні клітин; δ – товщина клітинної мембрани; V_c – *об'єм клітинного середовища*.

Коефіцієнт масовіддачі в міжклітинному середовищі часто називають коефіцієнтом внутрішньої масопровідності представлений у вигляді наступної залежності;

:

$$k_m = \frac{D_m}{d R_{м.эф.}}; \quad (4)$$

де: $R_{м.эф} = \frac{V_m}{F_m}$ - ефективний радіус екстрагованої частинки, D_m – коефіцієнт дифузії в міжклітинному

середовищі; F_m - площа поверхні екстрагованих частинок; d – діаметр екстрагованих частинок; V_m – *об'єм міжклітинного середовища*.

В переважачій кількості випадків для рослинної клітини величина - k_c , є незмінною, оскільки її розмір клітини та товщина її мембрани є величини відносно стабільні. На кінетику екстрагування твердих тіл клітинної будови, або точніше на сумарний коефіцієнт масопереносу - K , буде впливати в основному значення - k_m , абсолютне величина якого залежатиме від геометричного розміру подрібнення частинки - d , яка підлягає екстрагуванню. Отож, вивчивши кінетику екстрагування твердих тіл клітинної будови, а до таких відноситься, як було зазначено раніше, рослинна сировина різних розмірів до прикладу від 1 до 5 мм, обробляючи одержані результати згідно рівняння (1) в логарифмічних координатах :

$$\ln\left(1 - \frac{C_1}{C_{1p}}\right) = \ln A - Kt; \quad (5)$$

Знаходимо коефіцієнт масопереносу - K , для певних розмірів частинок рослинної сировини, тоді будемо графічну залежність $k = f(d)$, на основі якої отримуємо аналітичну залежність, за якою визначаємо коефіцієнт масопереносу через клітинну оболонку - k_c , тоді в міжклітинному середовищі - k_m .

Таким чином, на основі розробленої математичної теорії і за відомими значеннями - k_c , та - k_m , стає можливим визначити порядок коефіцієнтів дифузії через клітинну мембрану - D_c , тоді в міжклітинному середовищі - D_m .

Зроблені теоретичні припущення та отриманий на їх основі математичний опис відрізняється від традиційного вигляду рішення диференційного рівняння нестраціонарної дифузії в одомірній системі координат [4].

$$t \sim R^2 \quad (6)$$

Результати кінетики екстрагування подрібненої рослинної сировини не підтверджують положення згідно якого час досягнення однакового значення концентрації цільової речовини в екстрагенті при екстрагуванні із частинок різних розмірів пропорційний їх радіусу у квадраті (див. (6)). Положення (6) працює у випадку екстрагування із твердих мінерального чи неорганічного походження.

Враховуючи зазначене вище, приходимо до заключення, що процес екстрагування із твердих тіл клітинної будови є складним за механізмом, та супроводжується механічними, фізико-хімічними явищами і не врахувати цього є неприпустимо. Розроблена теорія екстрагування із твердих тіл клітинної будови матиме успішне застосування за умови відомих значень V_c – *внутрішнього об'єму клітин, що формують тверде тіло та V_m – об'єму міжклітинного середовища твердого тіла клітинної будови.* [6-15].

Експериментальна частина. Для проведення експериментальних досліджень обрали корені алтеї лікарської та листя подорожника. Два види морфологічних органів рослинної сировини, які найчастіше підлягають екстрагуванню для одержання БАС. Їх попередньо подрібнювали, зважували і завантажували в колби з однакоим об'ємом екстрагенту (в ролі екстрагенту виступала вода знесолена). Колби піддавали механічному перемішуванню. Протягом встановлених проміжків часу рослинну сировину послідовно вивантажували із колбів на фільтр заправлений фільтрувальним папером, старанно відділяли екстракт і зважували. Оскільки екстрагентом слугувала вода знесолена, густина якої умовно приймалась за 1 г/мл, то відповідно значення поглинутого об'єму екстрагенту відповідає значенню збільшення маси наважки. Таким чином визначали об'єм поглинутого екстрагенту за приростом маси наважки. Отримані дані про кінетику поглинання розчинника рослинною сировиною приведені на рисунку 1.

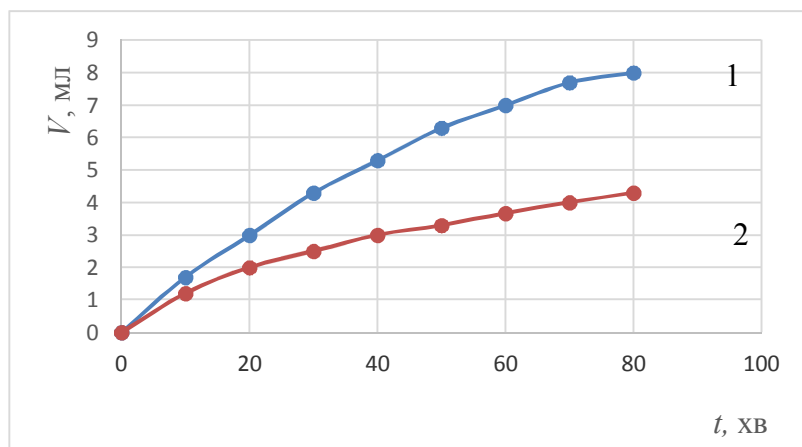


Рис. 1 – Кінетика набухання кореня алтеї лікарської - 1, листя подорожнику - 2

Результати досліджень та їх обговорення. Важливо є зазначити, що процеси набухання рослинної сировини є схожими з механізмом проникнення розчинника при екстрагуванні. Отож в даному випадку вода знесолена, даліше розчинник, спочатку потрапляє в міжклітинний простір, а потім, через клітинну мембрану – у внутрішній об'єм клітини. Очевидним є і те, що ці процеси супроводжуватимуться різною швидкістю проникнення розчинника, а від так різною швидкістю набухання. Логічно очікувати, що швидкість проникнення розчинника у міжклітинне середовище буде набагато вищою порівняно зі швидкістю просочення його через клітинні мембрани у внутрішній об'єм клітини. Відповідно, побудувавши залежність швидкості набухання від об'єму поглинутого розчинника стає можливим графоаналітичним методом визначити окремо ці швидкості, а від так і об'єми міжклітинного та клітинного середовищ.

На рисунку 2 зображено залежності швидкості набухання рослинної сировини від об'єму поглинутого розчинника. Отриманий результат експериментальних досліджень (рис.2) свідчать про те, що на кінетику поглинання розчинника, як коренів алтеї лікарської так і листя подорожнику суттєво впливає внутрішня анатомічна будова морфологічних органів рослинної сировини. Інтерпретуючи дані рисунку 2, необхідно зазначити, що розчинник досить швидко проникає в міжклітинне середовище і цей період характеризується відносно високою швидкістю набухання, як видно на рисунку 2 криві стрімко прямують вгору. Тоді досягнувши певного значення починають рухатись вниз. Отриманий перший максимум на кривих (рис. 2) свідчить про те, що міжклітинне середовище є досить розвинутим, тому легко заповнюється розчинником, швидкість набухання досягає певного максимуму, який визначає фактичний об'єм міжклітинного середовища.

Площа під першим максимумом характеризує об'єми міжклітинного середовищ коренів і листя відповідно. Вони за абсолютною величиною є різними, що пояснюється їх анатомічною будовою. Для коренів об'єм міжклітинного середовища є більшим тому і час заповнення є більшим в порівнянні з листям.

В подальшому зменшення швидкості набухання пояснюється тим, що досліджувана рослинна сировина була взята сухою. При контакт з розчинним відбувається «відновлення» клітинних мембран, тоді часткове розчинення деяких її цільових компонентів і нарешті розкриття пор. Ці явища супроводжувались зменшенням швидкості поглинання розчинника, а відтак швидкістю набухання і відповідно рухом кривих а рисунку 2 вниз.

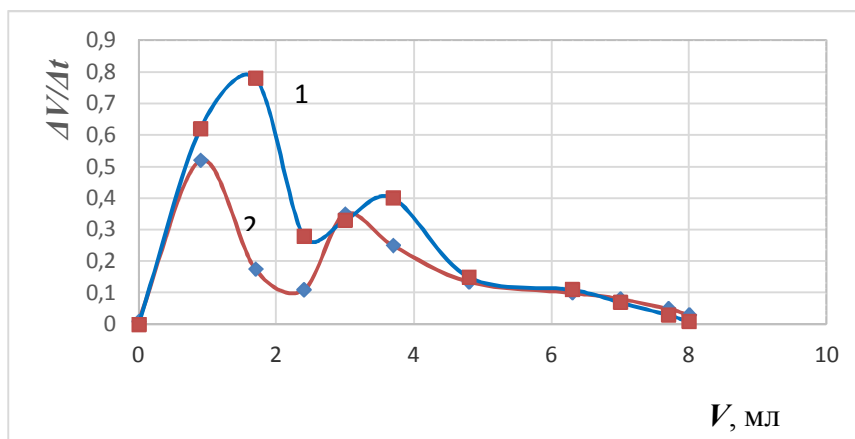


Рис. 2 – Закономірності швидкості набухання від об'єму поглинутого розчинника коренів алтеї лікарської – 1 та листя подорожнику – 2

Після завершення цих явищ відбувається швидке проникнення розчинника через пори мембран, водночас проходить процес розчинення цільових компонентів у внутрішньому об'ємі клітин, як коренів алтеї так і листя подорожнику. Тому спостерігається рух кривих верх, зростанням швидкості набухання, що супроводжується заповнення об'єму внутрішньоклітинного середовища. Площа під кривою другого максимуму характеризує кількість вилучених цільових речовин із внутрішнього об'єму клітин і чим вона більша тим більший об'єм клітинного середовища.

Таким чином досягається другий максимум, який характеризує заповнення розчинником об'єму клітинного середовища. В подальшому дифузія цільових речовин через клітинні мембрани і за межі частинок твердої фази супроводжується зменшенням швидкості набухання і зображується рухом кривої вниз.

Другий максимум на кривій (рис. 2) відповідає об'єму клітинного середовища досліджуваної рослинної сировини. Якщо відняти об'єм розчинника, що відповідає другому максимуму від об'єму розчинника який відповідає першому максимуму то отримуємо об'ємом клітинного середовища. Отже, як видно з рисунку 2, можна визначати експериментально об'єми клітинного та міжклітинного середовищ, а також розробляти теорії оптимізації процесів екстрагування із твердих тіл клітинної будови [6-10, 14-19].

Напрацьовані закономірності набухання коренів алтеї лікарської та листя подорожнику є типовими для інших видів рослинної сировини. Одержаний результат доповнює знання теорії масообмінних процесів в системі тверде тіло клітинної будови - рідина, та мають перспективу для розроблення теорій оптимізації екстракційних процесів.

Висновки.

1. Запропоновано метод визначення абсолютних значень об'ємів міжклітинного та клітинного середовищ твердих тіл клітинної будови.

2. за відомими значення об'ємів міжклітинного та клітинного середовищ стає можливим розраховувати значення коефіцієнтів дифузії біологічно активних сполук в міжклітинному середовищі та через клітинну мембрану, а також встановити режим процесу екстрагування і передбачити динаміку вилучення цільових речовин при проведенні процесів екстрагування у виробничих умовах.

References

1. Lebeda A.F., Dzhurenko N.Y., Ysaikyna A.P., Sobko V.H. (2010). *Lekarstvennye rasteniyia. Samaia polnaia entsyklopediya*. Moscow: AST-PRESS KNYHA
2. Savelieva O. V., Vladymyrov I.M. (2015). Analiz nomenklatury sedatyvnykh ta snodiinykh preparativ v Ukraini. *Farmatsevtichnyi chasopys*, 3, 40-43.
3. Hubsyky Yu. I. (2007). *Biologichna khimiia*. K. Nova knyha
4. Ponomarev V.D. (1976). *Ekstrahirovaniya lekarstvennoho rastytelnogo syria*. M.: Medytyna.
5. Yuecheng Lv., Liang Yi. (2014). Application of FMEA based on fuzzy multi-criteria decision making for HVAC in a pharmaceutical plant. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6 (6), 1116– 1123.
6. Pavliuk I., Dyachok V., Novikov V., Ilkiv N. (2017). Kinetics of biologically active compound extraction from hops strobiles extraction cake. *Chemistry & chemical technology*, 11(4), 487– 491.
7. Dyachok V., Huhlych S., Yatchyshyn Y., Zaporochets Y., Katysheva V. (2017). About the problem of biological processes complicated by mass transfer *Chemistry & Chemical Technology*, 11(1), 111- 116.
8. Diachok V.V., Diachok I.L., Ivankiv O.L. (2021). Oderzhannia izovalerianovoi kysloty metodom ekstrahuvannia iz roslynnoi syrovyny. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika", Seriya Chemistry, Technology and Application of Substances*, 4(1), 152-158.
9. Dyachok, V., Marakhovska, A., Marakhovska S. (2018). Application of liquid extraction for treatment of wastewater from edible oils production. *Chemistry and Chemical Technology*, 12 (1), 114-119.
10. Inessa Pavliuk, Vasyl Dyachok, Volodymyr Novikov, Nataliya Ilkiv. (2017). Kinetics of biologically active compound extraction from hops strobiles extraction cake *Chemistry & chemical technology*, 11(4), 487–491.
11. Diachok V.V., Zaporozhets Yu.V. (2017). Pro mekhanizm masoobminu z tilamy klitynnoi budovy. *Kharchova promyslovist*, 22, 85-92 .
12. Dyachok Vasyl, Serhiy Huhlych, Yuri Yatchyshyn, Yulia Zaporochets and Viktoriia Katysheva (2017) . About the problem of biological processes complicated by mass transfer *Chemistry & chemical technology*, 11(1), 111-116.
13. Dyachok V.V., Zaporozhets Yu.V., Huhlych S.I. (2016). Rozroblennia ekolohichno bezpechnoi tekhnolohii oderzhannia fiziologichno aktyvnykh spolk metodom ekstrahuvannia roslynnoi syrovyny *Scientific Works*, 47(1), 98-103.
14. V. Diachok, R. Diachok, O.Gaiduchok and N.Ilkiv (2015). Mathematical model of mass return from lamina of the leaf into extractant. *Chemistry & chemical technology*, 9(1), 107-110 .
15. Diachok V., Huhlych S. (2015) Mathematical design of biological processes of complicated mass transfer *Sciens and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, III(5), 41, 91-94.
16. Diachok V.V., Zaporozhets Yu.V., Levko O.B. (2015). Masoobmin pry kultyvuvannia mikrovodorostei. *Scientific Works*, 47(1), 73-79.

17. V. Dyachok, I. Ilkiv. (2013). On the mechanism of extraction from solid bodies cellular structure. *Chemistry & chemical technology*, 7(1), 27-30.20.
18. Diachok V.V., Malovanyi M.S.(2012). Ekstrahuvannia likarskoi roslynnoi syrovyny. *Scientific Works*, 41(1), 22-26.

TO THE PROBLEM OF CALCULATING THE EXTRACTION PROCESS FROM VEGETABLE RAW MATERIALS

**Dyachok V., Doctor of Engineering Science, Professor, Venher L., Ph.D. in Engineering Science,
Associate Professor**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Abstract. A distinctive feature of solid bodies of cellular structure (of organic origin), such as vegetable raw materials, in contrast to solid bodies of mineral origin, is that the internal anatomical structure provides for the presence of two environments - cellular and intercellular. Such objects of research when in contact with an extractant - most often water or water-alcohol solutions have the property of swelling, which ultimately leads to an increase in their geometric dimensions. In addition, the swelling process is always accompanied by the dissolution of the components contained in the internal volume of the solid body, followed by their diffusion beyond the boundary of the phase distribution. This phenomenon also causes an increase in the volume of the intercellular and cellular medium compared to the initial dry raw material. Finally, the anatomical structure of various morphological organs of plant material, i.e. leaves, stem, roots with rhizomes, fruits, etc., has a significant impact on the volume of the cellular and intercellular medium.

The paper theoretically substantiates and practically shows the possibility of experimentally determining the volumes of intercellular and cellular environments of extraction objects that have a cellular structure. The method is based on the theoretical principles of mass transfer processes in the solid-liquid system. The proposed method of determining the volumes of intercellular and cellular environments of solid bodies of plant origin deepens knowledge in the field of developing a methodology for forecasting the extraction process. The absolute values of the determined volumes make it possible to calculate the values of the diffusion coefficients of biologically active compounds in the volume of the intercellular medium and through the cell membrane, thereby establishing the modes of the extraction process, predicting the kinetics of extraction of target substances during the extraction process at the production site, as well as developing methodologies for calculating processes extraction from solid bodies of plant raw materials, which will facilitate the implementation of production processes of extraction in digital mode. Generalized regularities of extraction from plant raw materials expand the concept of mass exchange in the solid-liquid system and have the prospect of application for the development of the theory of modeling of extraction processes.

Key words: swelling, volume of cellular and intercellular media, extraction, biologically active compounds.

Список використаної літератури

1. Лебеда А.Ф., Джуренко Н.И., Исайкина А.П., Собко В.Г. (2010). Лекарственные растения. Самая полная энциклопедия. М.: АСТ-ПРЕСС КНИГА, 496 с.
2. Савельева О. В., Владимирова І.М. (2015). Аналіз номенклатури седативних та снодійних препаратів в Україні. *Фармацевтичний часопис*. 3. – С.40-43.
3. Hubskey Yu. I. (2007) «Biologichna khimiia.» К. – V.: Nova knyha, 137 s.
4. Пономарев В.Д. (1976). Экстрагирования лекарственного растительного сырья. М.: Медицина, 204 с.
5. Yuecheng Lv., Liang Yi. (2014). Application of FMEA based on fuzzy multi-criteria decision making for HVAC in a pharmaceutical plant. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 6 (6). pp. 1116– 1123.
6. Pavliuk I., Dyachok V., Novikov V., Ilkiv N. (2017). Kinetics of biologically active compound extraction from hops strobiles extraction cake. *Chemistry & chemical technology*. 11, №4. pp. 487–491.
7. Dyachok V., Huhlych S., Yatchyshyn Y., Zaporochets Y., Katysheva V. (2017). About the problem of biological processes complicated by mass transfer» *Chemistry & Chemical Technology*. T.11, № 1. – С. 111-116.
8. Дячок В.В., Дячок І.Л., Іванків О.Л. (2021). Одержання ізовалеріанової кислоти методом екстрагування із рослинної сировини // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, Серія Chemistry, Technology and Application of Substances; – Vol. 4, № 1. – С. 152-158.
9. Dyachok, V., Marakhovska, A., Marakhovska S. (2018) Application of liquid extraction for treatment of wastewater from edible oils production // *Chemistry and Chemical Technology*.- Vol. 12, №1, pp. 114-119.
10. Inessa Pavliuk, Vasyl Dyachok, Volodymyr Novikov, Nataliya Ilkiv (2017) Kinetics of biologically active compound extraction from hops strobiles extraction cake // *Chemistry & chemical technology*. - Vol. 11, №4. pp. 487–491.

11. Дячок В.В., Запорожець Ю.В. (2017). Про механізм масообміну з тілами клітинної будови // Харчова промисловість. - № 22. - С. 85-92 .
12. Dyachok V., Serhiy Huhlych, Yuri Yatchyshyn, Yulia Zaporochets and Viktoriia Katysheva (2017) . About the problem of biological processes complicated by mass transfer // Chemistry & chemical technology. Vol. 11, №1. pp. 111-116.
13. Дячок В.В., Запорожець Ю.В., Гуглич С.І. (2016). Розроблення екологічно безпечної технології одержання фізіологічно активних сполук методом екстрагування рослинної сировини // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса. – Вип. 47.- Т.1. - С. 98-103.
14. V.Dyachok, R. Dyachok, O.Gaiduchok and N.Ilkiv. (2015). Mathematical model of mass return from lamina of the leaf into extractant. // Chemistry & chemical technology. - Vol. 9, №1. pp. 107-110 .
15. Dyachok V., Huhlych S. (2015) Mathematical design of biological processes of complicated mass transfer Sciens and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, III(5), ISSUE 41, pp. 91-94.
16. Дячок В.В., Запорожець Ю.В., Левко О.Б. (2015). Масообмін при культивуванні мікроводоростей. Наукові праці ОНАХТ. - Вип. 47.- Т.1. - С. 73-79.
17. V. Dyachok, I. Ilkiv. (2013). On the mechanism of extraction from solid bodies cellular structure. // Chemistry & chemical technology. - Vol. 7, №1. pp. 27-30.20.
18. Дячок В.В., Мальований М.С.(2012). Екстрагування лікарської рослинної сировини.// Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. - Випуск 41. Том -1. - С. 22-26.

Отримано в редакцію 03.06.2022
Прийнято до друку 26.09.2022

Received 03.06.2022
Approved 26.09.2022

ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТІВ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

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

Анотація Застосування сучасних наукоємних інноваційних енергозберігаючих технологій і обладнання є необхідною умовою успішного існування промислових підприємств. Актуальність використання кавітаційних технологій пов'язана з ефективним використанням енергії в процесах, пов'язаних з обробкою рідких гетерогенних дисперсних систем для інтенсифікації механічних і фізико-хімічних впливів на стадіях розчинення, перемішування, диспергування, гомогенізації, екстрагування, емульгування, стерилізації та інших. Розвиток і застосування кавітаційних технологій і конструкцій гідродинамічних кавітаційних апаратів можливий в різних галузях промисловості.

Метою статті був аналіз і узагальнення існуючого досвіду використання кавітаційних технологій і обладнання в харчовій промисловості.

Доведено, що значними перспективами характеризуються апарати, в яких використано явище гідродинамічної кавітації. Їх використання дозволяє посилити інтенсивність впливу при обробці складних дисперсних систем і покращити фізичні, хімічні та біологічні характеристики харчових продуктів, таких як, збільшення загальної кількості розчинних сухих речовин, стабільності суспензій і емульсій; збереження значної кількості біологічно активних речовин і вітамінів; посилення антиоксидантної активності, збільшення ступіню гідролізу білка, інактивації небажаних мікроорганізмів і ферментів та ін. Кавітаційні технології і обладнання з успіхом використовуються для виробництва молока, йогуртів, фруктових та овочевих соків, пектину, каротину, таніну. Перспективним напрямком є використання гідродинамічної кавітації в технологіях валоризації лігноцелюлозної біомаси.

Кавітаційний вплив при дезінфекції, стерилізації та аерації води та водних систем дозволяє провести якісне знезараження природних і стічних вод без використання хімічних реагентів і широко застосовується на харчових підприємствах.

Ключові слова: гідродинамічна кавітація, емульгування, гомогенізація, енергоефективність, харчова промисловість, інтенсифікація процесів.

Постановка проблеми. В структурі промислових галузей України харчова промисловість відноситься до числа провідних. В той же час, в більшості, матеріально-технічна база галузі, її технічне і технологічне забезпечення характеризуються високим моральним та фізичним зносом. Внаслідок об'єктивних факторів рівень інноваційної активності підприємств харчової промисловості України не відповідає світовим вимогам, а процеси у вітчизняному машинобудуванні не створюють належних умов для інновацій. Необхідною умовою успішного існування підприємств галузі, прискорення її розвитку, збільшення обсягів виробництва і підвищення конкурентоздатності продукції є застосування сучасних інноваційних енергозберігаючих технологій і обладнання, зменшення втрат сировини, а також в умовах постійного збільшення вартості енергоносіїв - економія енергоресурсів. Все більшого значення набувають питання вибору екологічних технологій, високоефективного обладнання, комплексна переробка і зменшення втрат сировини [1, 2].

В таких складних економічних умовах, одним з високоефективних методів інтенсифікації багатьох технологічних процесів є застосування технологій і обладнання на основі використання позитивних проявів кавітаційних ефектів. Кавітація - явище, яке виникає при створенні розрідження в обмеженій області в результаті місцевих розривів суцільності рідини і формування парових або парогазових бульбашок. Актуальність використання кавітаційних технологій пов'язана з ефективним перетворенням введеної в систему потенційної енергії в кінетичну енергію рідини, дискретно розподілену у просторі і часі. Трансформація механічної енергії в кінетичну, а також її подальший перерозподіл в системі які відбуваються при утворенні і еволюції парогазових бульбашок відносяться до найбільш активних факторів спрямованого впливу на перебіг нано- і мікропроцесів. Цим пояснюється значне підвищення ефективності динамічних впливів на складні гетерогенні системи на міжмолекулярному і молекулярному рівні [3, 4].

Позитивні ефекти кавітаційних явищ широко використовуються в енерговитратних процесах, пов'язаних з обробкою рідких гетерогенних дисперсних систем для інтенсифікації механічних і фізико-хімічних впливів на стадіях розчинення, перемішування, диспергування, гомогенізації, екстрагування, емульгування, стерилізації та інших. Загалом кавітаційні технології знаходять своє застосування в широкій категорії більш екологічних методів обробки при доведеному ефективному використанню енергії та ресурсів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками до корисних проявів використання явища кавітації привернута увага все більшої кількості дослідників для виробництва харчових продуктів з високи-

ми органолептичними властивостями, великим вмістом природних біологічно активних речовин, а також тривалого терміну зберігання. В харчовій промисловості кавітаційний вплив на рідину дозволяє отримати високоякісні біологічно активні розчини, напої, екстракти, емульсії, суспензії, наприклад при виробництві десертів, морозива, молочних і кисломолочних продуктів, майонезів і соусів, фруктових і овочевих пюре, паст і соків [3, 5-7].

Виникнення явища кавітації може відбуватися шляхом гідродинамічного зниження тиску в потоці до критичних значень (гідродинамічна кавітація), ультразвукового випромінювання (акустична), іскрового розряду, імпульсного пропускання струму високої напруги (електрогідрравлічний удар). В харчовій промисловості використовують всі типи кавітації, але найчастіше це акустична та гідродинамічна кавітація. Дослідження стосовно застосування акустичної кавітації в харчовій промисловості проводяться вже багато років. Акустичні кавітаційні апарати дозволяють провести ефективну мікробіологічну обробку, а також змінити в бажаному напрямку деякі фізико-хімічні властивості рідких харчових продуктів. Однак, масштабування і енергоефективність є головними проблемами для широкого промислового застосування таких апаратів [8, 9].

Значними перспективами характеризуються апарати, в яких використано явище гідродинамічної кавітації. Існує велика кількість модифікацій проточних статичних або динамічних кавітаційних змішувачів. Кавітаційні апарати статичного типу мають спеціальні нерухомі елементи у вигляді сопел, діафрагм, перегородок, дисків з одним або декількома каналами, що перешкоджають руху потоку. Їх конструкція і кількість розрізняються. Дуже часто статичні кавітаційні апарати виготовляють на основі трубки Вентурі. Для створення тиску рідини перед соплом і виникнення кавітації використовуються насоси різних типів [3, 10-12]. Пристрої динамічного типу [3, 11] представляють собою гідродинамічні установки, конструкція яких передбачає багаторазову перебудову поля швидкостей і зміну напрямку руху потоку рідини і змішуваних компонентів за рахунок використання динамічних елементів (роторів, крильчаток, лопатей) різних конфігурацій. Такі установки виконують функції і насоса і кавітатора одночасно. Застосування того чи іншого типу кавітації, а також вибір конструкції і продуктивності кавітаційного апарата залежить від конкретної технологічної задачі. Перевагами застосування кавітаційних апаратів статичного типу є низька металоємність обладнання, простота і надійність конструкції, невисокі витрати на ремонт і обслуговування [3].

Високошвидкісні ротаційні гідродинамічні кавітаційні апарати в багатьох випадках показали більш високу продуктивність у порівнянні зі звичайними пристроями, а також більший комплекс механічних, хімічних і теплових впливів. Проте дослідження застосування цього типу пристроїв в харчовій промисловості відносно обмежені [13-15].

В технологічних процесах харчових виробництв гідродинамічна кавітація використовується порівняно недавно, але наявний досвід дозволяє стверджувати про те, що кавітаційний є найбільш ефективним з усіх відомих впливів. Останні дослідження показали, що гідродинамічна кавітація має великий потенціал для промислового застосування для обробки різних рідких харчових продуктів, таких як молоко, йогурт, фруктові та овочеві соки. За допомогою використання гідродинамічної кавітації можуть бути значно покращені різні фізичні, хімічні та біологічні характеристики харчових продуктів, такі як, загальна кількість розчинних сухих речовин; індекс седиментації; титруєма кислотність; загальний вміст фенолів; вітамін С; антиоксидантна активність; ступінь гідролізу білка та ін. [13].

Зменшення розміру частинок, що здійснюється в результаті впливу гідродинамічної кавітації, покращує гомогенізацію фруктових і овочевих соків за рахунок модифікації фізичної структури, що призводить до зниження швидкості седиментації і відділення осаду [6, 16].

Важливою властивістю харчових продуктів є в'язкість. Вона забезпечує наявність необхідної консистенції і стійкість до завислих частинок у харчових продуктах. Кавітаційна обробка може викликати помітне зниження в'язкості харчових продуктів. Наприклад, доведено зниження в'язкості концентрату молочного білка з 211,76 мПа·с до 93,35 мПа·с шляхом обробки в динамічному кавітаційному апараті. Автори припустили, що це може бути пов'язане зі зменшенням розміру частинок, а також з тим, що кавітаційна обробка руйнує структуру білкового гелю, що призводить до зниження пружності модуля білків [17].

Ефект підвищення температури, що виникає під впливом гідродинамічної кавітації особливо корисний для обробки харчових продуктів, оскільки в результаті їх синергетичного впливу досягається вищий ефект інактивації мікроорганізмів, а також видалення небажаних термостабільних ферментів, які переважно пов'язані з погіршенням якості соку без використання нагрівальних пристроїв [18, 19].

В той же час, порівняно до традиційної пастеризації негативний вплив гідродинамічної кавітації на рідкі продукти значно менший, що дозволяє зберегти більшу кількість поживних біологічно активних речовин [6].

Доведено, що кавітація є ефективним засобом для обробки молока в безперервному потоці. При виробництві молока кавітаційний вплив підвищує ефективність його гомогенізації і пастеризації, зменшує кількість мікроорганізмів, подовжує термін зберігання. Така обробка молока при кінцевій температурі 70°C впродовж 1–2 с дозволяє знизити загальну кількість мікроорганізмів в 10^3 – 10^5 разів. Крім того, шкідливий вплив кавітації на поживний склад молока, в тому числі вміст мінеральних речовин, жиру, білка та вітамінів, був подібним до короткочасної високотемпературної обробки. При цьому відбувається повне знищення

вегетативних форм дріжджів і плісняви, а також патогенних мікроорганізмів групи кишкової палички і нейтралізація фосфатази. Молоко, оброблене в гідродинамічних кавітаційних апаратах і витримане при 5 °С протягом 14 днів відповідало зміні загальної кількості бактерій *кишкової палички*, а також значенням рН і кислотності, виявилось близьким до показників довго пастеризованого при низькій температурі молока. Також кавітація використовується для підготовки води, яка використовується при відновленні молока з сухого знежиреного залишку [5, 17].

Кавітаційні апарати можуть бути використані для виробництва високоякісних йогуртових продуктів із низьким вмістом жиру та високим вмістом сироваткових білків. Кавітація забезпечує ефективне змішування компонентів і отримання стабільної дрібнодисперсної емульсії без розшаровування впродовж тривалого терміну зберігання. Отримані йогуртові продукти характеризуються відмінними смаковими властивостями і консистенцією [5].

Кавітаційний вплив ефективно використовувати для інтенсифікації процесів розчинення і екстрагування біологічно активних речовин, наприклад, пектину, каротину, таніну і інших цінних речовин. Кавітація змінює властивості водних розчинів і гідрогелів полісахаридів: крохмалю, амілопектину, альгінату натрію, хітозану і ін. Внаслідок її використання досягається висока однорідність фракційного молекулярного складу отримуваних розчинів і екстрактів [20, 21].

Багато біологічно активних речовин отримують кавітаційними методами екстрагування сировини рослинного і тваринного походження. Застосування кавітаційних технологій дозволяє підвищити якість рідких та сухих екстрактів, а також отримати стійкі емульсії [22, 23].

Позитивні результати показало використання гідродинамічної кавітаційної обробки в цукровій промисловості при попередній дефекації дифузійного соку. Промислові дослідження використання гідродинамічної кавітації для інтенсифікації процесу переддефекації показали, що ці умови також значно скорочують тривалість процесу та покращують умови для подальших процесів очищення дифузійного соку [24].

Актуальним напрямком досліджень є використання гідродинамічної кавітації у безперервному процесі для попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси для сприяння руйнуванню лігнін-вуглеводної матриці. У даний час лігноцелюлозна біомаса, що у великій кількості утворюються наприклад при виробництві бурякового цукру або переробці цукрової тростини, в сільському та лісовому секторах вважається відходами і не використовується повторно, а йде на виробництво кормів для сільськогосподарських тварин. В той же час після відповідної подальшої обробки її можна використовувати в якості паливних добавок, для виробництва біоенергії, біопалива та біопродуктів. Запропонована попередня обробка лужним перекисом водню жома цукрової тростини за допомогою гідродинамічної кавітації в проточних діафрагмових реакторах.

Запропонована попередня обробка призвела до змін складу матеріалу, головним чином щодо вмісту целюлози та лігніну і на стадії ферментативного гідролізу збільшена частка відновлюючих цукрів. Таким чином, доведено перспективність технології попередньої обробки за допомогою гідродинамічної кавітації для валоризації лігноцелюлозної біомаси. Такий метод попередньої обробки характеризується високою ефективністю, низьким споживанням енергії та легким налаштуванням для великомасштабних виробництв порівняно зі звичайними методами попередньої обробки [25-27].

На даний час кавітаційні ефекти широко використовується як спосіб для дезінфекції, стерилізації та аерації води та водних систем. Кавітаційний вплив дозволяє провести якісне знезараження природних і стічних вод без використання хімічних реагентів і широко застосовується в системах для знезараження каналізаційних стоків переробних підприємств [3, 28-30].

Висновки. Гідродинамічна кавітація є ефективним методом обробки для виробництва безпечних рідких харчових продуктів з високою харчовою і біологічною цінністю, фізичною стабільністю, а також характерними органолептичними показниками. Кавітаційні технології і обладнання є актуальними і перспективними для застосування в різних видах виробництв. Однак, кавітаційна дія на фізичні, хімічні та біологічні характеристики харчових продуктів в деяких випадках є суперечливою. Це викликає доцільність проведення комплексних експериментальних і аналітичних наукових досліджень для оптимізації і вибору конфігурації і геометричних параметрів реактора, а також впливу всіх параметрів процесу, таких як інтенсивність кавітації, тривалість та температура. Це дозволить створити сучасні інноваційні енергоефективні технології для виробництва високоякісних харчових продуктів із застосуванням гідродинамічної кавітації.

References

1. Novikova N. V. (2020) Implementation of innovation in the food industry. Actual problems of improving the quality and safety of production and processing of livestock products: materials of the international scientific and practical conference February 14, 2020. Dnipro. 202-204.
2. Garbar V. A. (2019) Analysis of innovative activity of enterprises of the food industry of Ukraine. Agrosvit. 20, 38-44. <https://www.doi.org/10.32702/2306-6792.2019.20.38>
3. Dolinskii A.A., Avdeeva L.Yu., Makarenko A.A. (2020) Cavitation technologies for the production of nanopreparations. Kyiv: Nauk. Dumka.

4. Dolinskii A.A. Ivanytskii G.K. (2008) Heat and mass transfer and hydrodynamics in vapor-liquid pressure environments. Kyiv: Naukova Dumka.
5. Xun Sun, Xiaoxu Xuan, Li Ji, Songying Chen, Jingting Liu, Shan Zhao, Seulgi Park, Joon Yong Yoon, Ae Son Om, (2021) A novel continuous hydrodynamic cavitation technology for the inactivation of pathogens in milk. *Ultrasonics Sonochemistry*. 71, 105382 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105382>.
6. Ruly Terán Hilares, Joana Gonçalves dos Santos, Nicole Basic Shiguematsu, Muhammad Ajaz Ahmed, Silvio Silvério da Silva, Júlio César Santos (2019) Low-pressure homogenization of tomato juice using hydrodynamic cavitation technology: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds. *Ultrasonics Sonochemistry*. 54, 192-197 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.039>.
7. Rajeshree A. Khaire, Parag R. Gogate (2021) 12 - Application of hydrodynamic cavitation in food processing. *Design and Optimization of Innovative Food Processing Techniques Assisted by Ultrasound*. /Editor(s): Francisco J. Barba, Giancarlo Cravotto, Farid Chemat, José Manuel Lorenzo Rodriguez, Paulo Eduardo Sichert Munekata. Academic Press. 317-342 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818275-8.00003-9>.
8. Zenker M., Heinz V., Knorr D. (2003) Application of ultrasound-assisted thermal processing for preservation and quality retention of liquid foods. *J. Food Prot.* 66(9), 1642-1649, <https://doi.org/10.4315/0362-028X-66.9.1642>
9. Demirdöven A., Baysal T. (2008) The use of ultrasound and combined technologies in food preservation. *Food Rev. Int.*, 25(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/87559120802306157>.
10. Kutukov S.E., Promptov M., Koliukh A.N., Stepanov A.Yu., Zverev F.S., Suhovey M.V. (2022) Improving crude oil rheology by hydro-pulse cavitation treatment. *Oil Industry*. 3(1181), 94-98.
11. Gogate P. A, Pandit A.B. (2005) A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future *Ultrasonics Sonochemistry*, 12, 21–27.
12. . Ivanytskii G.K., Stepaniuk A.R. (2021) Processes and equipment of deep processing of organic raw materials: lecture notes [Electronic resource]: study guide for students.
13. Sun Xun, You Weibin, Wu Yue, Tao Yang, Yoon Joon Yong, Zhang Xinyan, Xuan Xiaoxu (2022) Hydrodynamic Cavitation: A Novel Non-Thermal Liquid Food Processing Technology. *Frontiers in Nutrition*. 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.843808>.
14. Arya SS, Sawant O, Sonawane SK, Show PL, Waghmare A, Hilares R, et al. (2020) Novel, nonthermal, energy efficient, industrially scalable hydrodynamic cavitation - applications in food processing. *Food Rev Int*. 36, 668–691. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1669163>
15. Asaithambi N, Singha P, Dwivedi M, Singh SK. (2019) Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: a review. *Ultrason Sonochem*. 42(5), e13144. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13144>
16. Prateek Katariya, S.S. Arya, A.B. Pandit (2020) Novel, non-thermal hydrodynamic cavitation of orange juice: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 62, 102364. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102364>.
17. Li K, Woo MW, Patel H, Metzger L, Selomulya C. (2018) Improvement of rheological and functional properties of milk protein concentrate by hydrodynamic cavitation. *J Food Eng.* 221, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.005>
18. Sun X, Kang CH, Park JJ, Kim HS, Om AS, Yoon JY. (2018) An experimental study on the thermal performance of a novel hydrodynamic cavitation reactor. *Exp Therm Fluid Sci.* 99, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.02.034>
19. Milly P.J., Toledo R.T., Harrison M.A., Armstead D. (2007) Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods. *J Food Sci.* 72(9), 414-422. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00543.x>
20. Alba K., Kontogiorgos V. (2017) Pectin at the oil-water interface: relationship of molecular composition and structure to functionality. *Food Hydrocolloids*. 68, 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.07.026>
21. Gogate P.R. (2011) Hydrodynamic cavitation for food and water processing. *Food Bioprocess Technol.* 4, 996-1011. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>
22. Filiaty F. (2020) Application of negative pressure cavitation extraction (NPCE) on total phenolic compound extraction from *Milletia sericea* root. *International Conference on Food and Bio-Industry 2019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 443, 012104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/443/1/012104>
23. Yu Kong, Zuo-Fu Wei, Yu-Jie Fu, Cheng-Bo Gu, Chun-Jian Zhao, Xiao-Hui Yao, Thomas (2011) Efferth, Negative-pressure cavitation extraction of cajanin stilbene acid and pinostrobin from pigeon pea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] leaves and evaluation of antioxidant activity, *Food Chemistry*, 128(3), 596-605 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.079>.
24. Zheplinska, M., Mushtruk, M., Vasylyv, V., Sarana, V., Gudzenko, M., Slobodyanyuk, N., Kuts, A., Tkachenko, S., Mukoid, R. (2021) The influence of cavitation effects on the purification processes of beet sugar production juices. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 15, 18-25. <https://doi.org/10.5219/1494>

25. Bimestre, T.A., Júnior, J.A.M., Canettieri, E.V. et al. (2022) Hydrodynamic cavitation for lignocellulosic biomass pretreatment: a review of recent developments and future perspectives. *Bioresour. Bioprocess.* 9, 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>
26. Ruly Terán Hilaes, Rafaela Medeiros Dionizio, Salvador Sánchez Muñoz, Carina Aline Prado, Ruy de Sousa Júnior, Silvio Silvério da Silva, Júlio César Santos. (2020) Hydrodynamic cavitation-assisted continuous pretreatment of sugarcane bagasse for ethanol production: Effects of geometric parameters of the cavitation device. *Ultrasonics Sonochemistry.* 63, 104931. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104931>.
27. Hilaes R. Terán, Dionizio R.M., Prado C.A., Ahmed M.A., S da Silva S., Santos J.C. (2019) Pretreatment of sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation technology: Semi-continuous and continuous process, *Bioresource Technology.* 290, 121777. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121777>.
28. Parag R Gogate. (2022) Intensified sulfate radical oxidation using cavitation applied for wastewater treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering.* 37, 100850. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100850>.
29. Pravin B. Patil, Vinay M. Bhandari, Vivek V. Ranade (2021) Wastewater treatment and process intensification for degradation of solvents using hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification.* 166, 108485. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108485>.
30. Baowei Wang, Huijuan Su, Bo Zhang. (2021) Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal.* 412, 128685. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128685>

USING OF HYDRODYNAMIC CAVITATION EFFECTS IN THE FOOD INDUSTRY

**Avdieieva L. Yu. Dr.Tech.Sc., Senior Research Officer, Makarenko A. A. Ph. D, Shchenskyi D.D.
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv**

Abstract. *The use of modern science-intensive innovative energy-saving technologies and equipment is a necessary condition for the successful existence of industrial enterprises. The relevance of the use of cavitation technologies is determined by the effective use of energy in processes related to the processing of liquid heterogeneous dispersed systems for the intensification of mechanical and physico-chemical effects at the stages of dissolution, mixing, dispersion, homogenization, extraction, emulsification, sterilization, and others. The development and application of cavitation technologies and designs of hydrodynamic cavitation devices is possible in various industries.*

The purpose of the article was to analyze and generalize the existing experience of using cavitation technologies and equipment in the food industry.

It has been proven that devices using the phenomenon of hydrodynamic cavitation are characterized by significant prospects. Their use makes it possible to increase the intensity of influence during the processing of complex dispersed systems and improve the physical, chemical and biological characteristics of food products, such as: increasing the total amount of soluble solids, the stability of suspensions and emulsions; preservation of a significant amount of biologically active substances and vitamins; increasing antioxidant activity, increasing the degree of protein hydrolysis, inactivation of unwanted microorganisms and enzymes, etc. Cavitation technologies and equipment are successfully used for the production of milk, yogurt, fruit and vegetable juices, pectin, carotene, and tannin. A very promising direction is the use of hydrodynamic cavitation in technologies for the valorization of lignocellulosic biomass.

Cavitation effects allow conducting high-quality disinfection of natural and wastewater without chemical reagents therefore, they are widely used in the food industry for disinfection, sterilization and aeration.

Key words: hydrodynamic cavitation, emulsification, homogenization, energy efficiency, food industry, process intensification.

Список використаної літератури

1. Новікова Н. В. Впровадження інновації у харчовій промисловості Актуальні проблеми підвищення якості та безпека виробництва й переробки продукції тваринництва: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. 14 лютого 2020. Дніпро. 2020. С. 202-204.
2. Гарбар В. А. Аналіз інноваційної активності підприємств харчової промисловості України. *Агросвіт.* 2019. № 20. С. 38-44. <https://www.doi.org/10.32702/2306-6792.2019.20.38>
3. Долінський А.А., Авдеева Л.Ю., Макаренко А.А. Кавітаційні технології для виробництва нанопрепаратів. Київ: Наук. Думка. 2020. 112 с.
4. Долинский А.А. Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. К.: Наукова думка, 2008. 382 с.

5. Xun Sun, Xiaoxu Xuan, Li Ji, Songying Chen, Jingting Liu, Shan Zhao, Seulgi Park, Joon Yong Yoon, Ae Son Om, A novel continuous hydrodynamic cavitation technology for the inactivation of pathogens in milk. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. V. 71. 105382, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105382>.
6. Ruly Terán Hilaes, Joana Gonçalves dos Santos, Nicole Bacic Shiguematsu, Muhammad Ajaz Ahmed, Silvio Silvério da Silva, Júlio César Santos, Low-pressure homogenization of tomato juice using hydrodynamic cavitation technology: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. V. 54. P. 192-197 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.039>.
7. Rajeshree A. Khaire, Parag R. Gogate, 12 - Application of hydrodynamic cavitation in food processing. Design and Optimization of Innovative Food Processing Techniques Assisted by Ultrasound. /Editor(s): Francisco J. Barba, Giancarlo Cravotto, Farid Chemat, José Manuel Lorenzo Rodriguez, Paulo Eduardo Sichert Munekata. Academic Press. 2021. P. 317-342 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818275-8.00003-9>.
8. Zenker M., Heinz V., Knorr D. Application of ultrasound-assisted thermal processing for preservation and quality retention of liquid foods. *J. Food Prot.*, 2003. V.66, Is.9. P.1642-1649, <https://doi.org/10.4315/0362-028X-66.9.1642>
9. Demirdöven A., Baysal T. The use of ultrasound and combined technologies in food preservation. *Food Rev. Int.*, 2008. V. 25 Is.1. P.1-11. <https://doi.org/10.1080/87559120802306157>.
10. Kutukov S.E., Promptov M., Koliukh A.N., Stepanov A.Yu, Zverev F.S., Suhovey M.V.. Improving crude oil rheology by hydro-pulse cavitation treatment. *Oil Industry*. 2022. V. 3, Is. 1181. P 94-98.
11. Gogate P. A., Pandit A.B. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future *Ultrasonics Sonochemistry* 2005. №12. P. 21–27.
12. Іваницький Г.К., Степанюк А.Р. Процеси та обладнання глибокої переробки органічної сировини: концепт лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 292 с.
13. Sun Xun, You Weibin, Wu Yue, Tao Yang, Yoon Joon Yong, Zhang Xinyan, Xuan Xiaoxu. Hydrodynamic Cavitation: A Novel Non-Thermal Liquid Food Processing Technology. *Frontiers in Nutrition*. 2022. V.9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.843808>.
14. Arya SS, Sawant O, Sonawane SK, Show PL, Waghmare A, Hilaes R, et al. Novel, nonthermal, energy efficient, industrially scalable hydrodynamic cavitation - applications in food processing. *Food Rev Int*. 2020. V.36. P.668–691. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1669163>
15. Asaithambi N, Singha P, Dwivedi M, Singh SK. Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: a review. *Ultrason Sonochem*. 2019. V.42, Is.5. e13144. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13144>
16. Prateek Katariya, S.S. Arya, A.B. Pandit, Novel, non-thermal hydrodynamic cavitation of orange juice: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. V. 62. 102364. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102364>.
17. Li K, Woo MW, Patel H, Metzger L, Selomulya C. Improvement of rheological and functional properties of milk protein concentrate by hydrodynamic cavitation. *J Food Eng*. 2018. V.221. P.106–113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.005>
18. Sun X, Kang CH, Park JJ, Kim HS, Om AS, Yoon JY. An experimental study on the thermal performance of a novel hydrodynamic cavitation reactor. *Exp Therm Fluid Sci*. 2018. V.99. P.200–210. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.02.034>
19. Milly P.J., Toledo R.T., Harrison M.A., Armstead D. Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods. *J Food Sci*. 2007. V.72, Is.9. P.414-422. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00543.x>
20. Alba K., Kontogiorgos V. Pectin at the oil-water interface: relationship of molecular composition and structure to functionality. *Food Hydrocolloids*. 2017. V.68. P.211-218. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.07.026>
21. Gogate P.R. Hydrodynamic cavitation for food and water processing. *Food Bioprocess Technol*. 2011. V.4. P.996-1011. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>
22. Filiaty F. Application of negative pressure cavitation extraction (NPCE) on total phenolic compound extraction from *Milletia sericea* root. *International Conference on Food and Bio-Industry 2019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 443. 012104. doi:10.1088/1755-1315/443/1/012104
23. Yu Kong, Zuo-Fu Wei, Yu-Jie Fu, Cheng-Bo Gu, Chun-Jian Zhao, Xiao-Hui Yao, Thomas Efferth, Negative-pressure cavitation extraction of cajanin stilbene acid and pinostrobin from pigeon pea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] leaves and evaluation of antioxidant activity, *Food Chemistry*, 2011 V.128, Is. 3. P. 596-605 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.079>.
24. Zheplinska, M., Mushtruk, M., Vasylyv, V., Sarana, V., Gudzenko, M., Slobodyanyuk, N., Kuts, A., Tkachenko, S., Mukoid, R. The influence of cavitation effects on the purification processes of beet sugar production juices. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2021 V.15. P.18-25. <https://doi.org/10.5219/1494>
25. Bimestre, T.A., Júnior, J.A.M., Canettieri, E.V. et al. Hydrodynamic cavitation for lignocellulosic biomass pretreatment: a review of recent developments and future perspectives. *Bioresour. Bioprocess*. 2022. V.9. 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>

26. Ruly Terán Hilaes, Rafaela Medeiros Dionízio, Salvador Sánchez Muñoz, Carina Aline Prado, Ruy de Sousa Júnior, Silvio Silvério da Silva, Júlio César Santos. Hydrodynamic cavitation-assisted continuous pre-treatment of sugarcane bagasse for ethanol production: Effects of geometric parameters of the cavitation device. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. V. 63. 104931. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104931>.
27. Hilaes R. Terán, Dionízio R.M., Prado C.A., Ahmed M.A., S da Silva S., Santos J.C. Pretreatment of sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation technology: Semi-continuous and continuous process, *Bioresource Technology*. 2019. V. 290. 121777. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121777>.
28. Parag R Gogate. Intensified sulfate radical oxidation using cavitation applied for wastewater treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2022. V. 37. 100850. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100850>.
29. Pravin B. Patil, Vinay M. Bhandari, Vivek V. Ranade. Wastewater treatment and process intensification for degradation of solvents using hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2021. V. 166. 108485. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108485>.
30. Baowei Wang, Huijuan Su, Bo Zhang. Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment - A review. *Chemical Engineering Journal*. 2021. V. 412. 128685. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128685>

Отримано в редакцію 02.06.2022
Прийнято до друку 24.09.2022

Received 02.06.2022
Approved 24.09.2022

EXERGY ANALYSIS OF AN OPEN-MODE ADSORPTIVE HEAT STORAGE UNIT BASED ON COMPOSITE ADSORBENT ‘SILICA GEL – CRYSTALLINE HYDRATE’

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

Abstract. Exergy analysis of an open-mode adsorptive heat storage unit has been performed when a composite ‘silica gel – crystalline hydrate’ used as an adsorbent. The crucial factors affecting the exergy efficiency factor are stated to be temperature and initial humidity of airflow supplied to the inlet of adsorbent layer, temperature of external air and methods of air flow humidification. Procedure of calculation of the operating characteristics of an open-mode adsorptive heat storage device was further developed. The suggested procedure involves determination of adsorption, specific adsorption heat and final airflow temperature, useful heat, heat inputs for operating heat storage device and its efficiency factor, then exergy recovered, exergy supplied and exergy efficiency are calculated. Exergy efficiency depends on characteristics of flow of humid air fanned into the adsorbent layer such as temperature and initial absolute humidity which strongly affect the adsorption and final airflow temperatures. Increase of initial temperature of the humid air leads to decreasing of the exergy efficiency. Maximal values of exergy efficiency are determined at the absolute humidity and temperatures of initial airflow within the ranges of 0.03 – 0.04 kg/m³ and 20 – 30°C, respectively. These characteristics are corresponded to the maximal airflow temperatures after passing through the adsorbent layer which meet to the Sanitary Regulations. Dependence of exergy efficiency vs. external air temperature and initial airflow temperature is shown. The exergy efficiencies of the open-mode adsorptive heat storage unit with steam and ultrasonic humidification were compared. Ultrasonic humidification is shown to allow increasing the exergy efficiency by 7 % against steam humidification. The obtained results can be used when energy-efficient heat and ventilation systems for residential premises developed.

Key words: adsorptive heat energy transformation, open-mode adsorptive heat storage unit, exergy efficiency, composite adsorbent, adsorption.

Introduction. In a period of increasing scarcity of primary fuel and rising energy prices, climate warming and air pollution, it becomes crucial to use all available energy resources. For example, application low-potential heat energy sources still remain promising but highly difficult for commercialization option [1 – 3]. In these conditions adsorptive heat energy conversion becomes a promising process [3]. Operation cycle of such devices involves two modes: discharge (adsorption) and charge (regeneration of an adsorbent or desorption) [4].

Despite the fact that adsorptive heat conversion is promising technology, there is still gap between laboratory prototypes and semi-commercial devices. It results from not only because of poor adsorptive properties of convenient adsorbents or complicated technology of obtaining composites ‘salt inside porous matrix’ but also from absence of procedure for calculation of operating parameters of adsorptive heat storage unit. For example, the mathematical model developed by Nagel et al. [5], which was modified by Lehmann et al. [6] is based on the provisions of the Dubinin-Polyany theory. They provide for the determination of the adsorption potential and the specific adsorbed volume as its function, which allows determining the adsorption, i.e. water uptake.

Mathematical models focused on predicting the adsorption kinetics of silica gels, zeolites and/or salts that form crystal hydrates should allow to establish the optimal operating parameters of the adsorption unit should. All such models describe the kinetics of adsorption, based on the model of linear driving force (LDF). Michel et al. [7] developed a general two-dimensional model (2D) of the adsorber, which considers heat and mass transfer in the adsorbent layer and the flow of moist air. Due to additional assumptions, this model is modified to represent the same porous layer that interacts with pure steam. The model include heat and mass balances, as well as the kinetic equation. To study the thermal dynamics of a 13X zeolite-based adsorption heat storage device, a non-isothermal and non-adiabatic adsorption model including a mass and energy transfer equation was developed by Gaieni et al. [8]. First, the heat and mass balances used in the model are established. Then the kinetic model of LDF and the value of its coefficient are explained.

However, there is still no one opinion about criteria of estimation of efficiency of adsorptive heat conversion unit. Most of mathematical models are focused on a single stage of operation of adsorptive heat storage device. Basically, it is adsorption, estimation of efficiency of the device being based on only this stage [8]. However, operating cycle of adsorptive heat storage device involves the next stages: discharge of the device (adsorption of work fluid with heat storage media, i.e. adsorbent), heating the adsorbent up to regeneration temperature, charge, i.e. de-

sorption, cooling the adsorbent down to the temperatures to begin an adsorption. Discharge is accompanied with evaporation of the work fluid.

Most of proposed mathematic models are concerned with estimation of the efficiency of adsorptive heat conversion unit by the first law of thermodynamic. And a very little number of works are focused on exergy efficiency of adsorptive heat energy conversion [9, 10]. They are mostly focused on methodology of calculation of exergy efficiency [9, 10] or exergy efficiency vs. operating parameters such as heat transfer fluid flow [11]. However, operating parameters of adsorption – desorption processes are crucial for estimation the efficiency of adsorptive heat conversion unit.

The aim of present work is to estimate the performance of open-mode heat energy storage unit by the exergy analysis. To achieve this aim, the next tasks are set:

- to state basic factors affecting the exergy efficiency factor;
- to reveal correlation exergy efficiency factor vs. operating mode of adsorptive heat storage device;
- to determine the basic requirements to performance of open-mode adsorptive heat storage units.

Experimental. The present work is focused on correlation exergy efficiency factor and performance of the open-mode adsorptive heat storage unit. Design of its laboratory prototype is given in [12], its length being 0.6 m. Operational mode of heat storage unit involves two alternating phases (Fig. 1). The first phase corresponds with discharge (Fig. 1a). i.e. adsorption, when external air pumped into humidifier and then directed to resistance element and the layer of adsorbent where water being adsorbed from flow humid air.

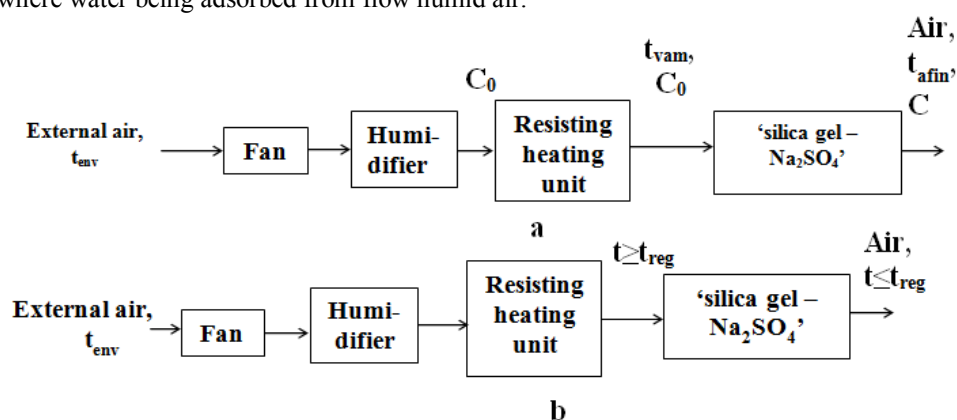


Fig. 1 – Processes of discharge (a) and charge (b) of open-mode adsorptive heat storage unit.

Temperatures of both adsorbent and air are increased. The second phase, i.e. charge (Fig. 1b) or regeneration of adsorbent, proceeds when layer adsorbent layer is heated by flow of hot air up to temperatures above t_{reg} which leads to desorption of water.

Operating cycle of adsorptive heat energy storage device is given in Fig. 2. Its stages are the next. Process 1 – 2 refers to the discharge of adsorptive heat energy storage device. Process 2 – 3 corresponds with heating the adsorbent up to regeneration temperature. Charge of the device is given by the line 3 – 4, and cooling the adsorbent up to temperatures of beginning the adsorption being presented by line 4 – 1.

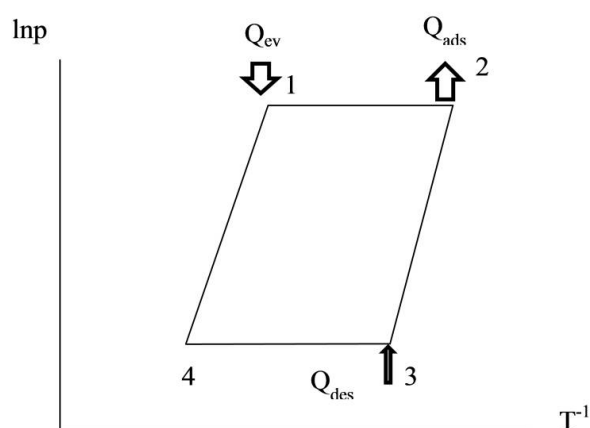
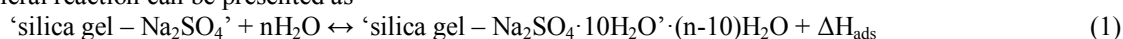


Fig. 2 – Operation cycle of adsorptive heat energy storage device

The general reaction can be presented as



The suggested model is based on the second law of thermodynamics. The next hypotheses are pre-supposed:

1. The system is operated at a stable state.

2. The heat losses are negligible.

Exergy recovered can be given as recommended in [10]

$$E_{rec} = Q_{ads} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) \quad (2)$$

where Q_{ads} is considered as heat of adsorption, kJ, T_2 refers to the final temperature of inflowing air, K; T_0 is considered as temperature of external air, K.

Exergy supplied for heating, evaporation and desorption were calculated according to [11].

Exergy supplied can be calculated as the sum of exergy of desorption, evaporation and heating the airflow and adsorbent

$$E_{sup} = Q_{des} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_3}\right) + Q_{ev} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) + V_{air} \cdot C' \cdot (T_3 - T_1 - T_0 \cdot \ln \frac{T_3}{T_1}) + (M_{ads} \cdot C_{ads} + M_{ads} \cdot A \cdot C_w) \cdot (T_3 - T_{airfin} - T_0 \cdot \ln \frac{T_3}{T_{airfin}}) \quad (3)$$

where Q_{des} and Q_{ev} refers to the heat of desorption and evaporation, respectively, kJ, V_{air} is the volume of air which passed through the layer of adsorbent, m^3 , C' is special heat of air, $kJ/m^3 \cdot K$, C_{ads} and C_w is special heat of adsorbent and adsorbate, $kJ/kg \cdot K$, A is adsorption, kg/kg ; T_1 and T_3 are temperatures of airflow which supplied to the adsorbent layer and temperatures of regeneration of the adsorbent, K, T_{airfin} is a final temperature of inflowing air when discharged, K.

Heat of adsorption, desorption, adsorption or water uptake and final temperature of inflowing air are calculated by technique which was proposed earlier [13].

So exergy efficiency factor can be calculated as [10]

$$\eta_{ex} = \frac{E_{rec}}{E_{sup}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Results and discussion

Correlation between performance and exergy efficiency of operating of open-mode heat storage unit is considered under conditions of convenient ventilation system of residual premise (a total area of $103 m^2$, a height of 2.5 meters), the load for heating the inflowing air being about 327.9 MJ per a day. The mass of the composite '20 % silica gel – 80 % Na_2SO_4 ' corresponding to this thermal load is estimated to be 96 kg. Exergy efficiency was calculated when temperatures of composites achieved regeneration temperatures or adsorption reached up maximal value.

As expected, exergy efficiency is affected by absolute humidity of airflow supplied into the adsorbent layer (Fig. 3) which resulted from increasing the water uptake, heat of adsorption and exergy recovered. However, speed-dependence is rather complicated, i.e. increase of the airflow speed leads to rise of adsorption and temperature of adsorbent layer.

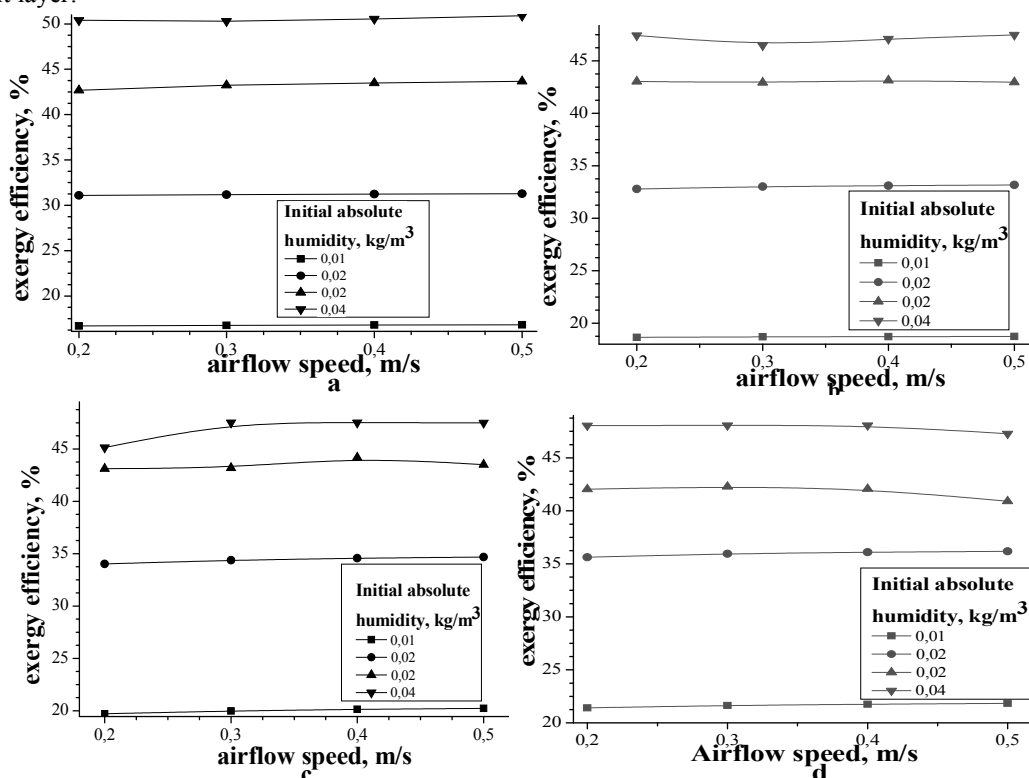


Fig. 3 – Exergy efficiency of open-mode heat storage unit vs. airflow speed. Temperature of flow of humid air, °C: 20(a), 30 (b), 40 (c), 50 (d)

As a result, time of achieving of regeneration temperatures, water uptake during discharge and as a consequence exergy recovered decrease. This is the most visually striking at temperatures of humid airflow of 40 – 50°C when

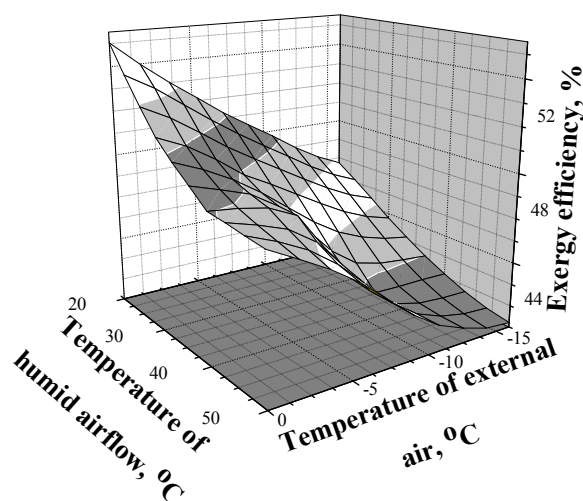


Fig. 4 – Exergy efficiency factor vs. temperatures of humid airflow and external air

airflow heated upto 80°C in 1 – 3 hours. The

adsorption doesn't surpass 20 % of its limit value under these conditions. Alongside with increasing exergy supplied, it also leads to decreasing the exergy efficiency.

Exergy efficiency strongly depends on tem-

peratures of external air and inflowing humid air

(Fig. 4). Maximal values are stated at temperatures

of external air of -5 - 0°C and humid air pumped to

the adsorbent layer of 20 – 30°C which results

from minimal values of exergy supplied.

It was stated previously [4] that maximal val-

ues of efficiency factor of open-mode heat storage

device of nearly 50 – 60 % can be observed at **the**

airflow speed of 0.3 – 0.5 m/s with an absolute

humidity of 50 – 60%. Moreover, initial temper-

atures and absolute humidity of initial airflow have

to sustain at 20 – 30°C and 0.03 – 0.04 kg/m³ to

achieve maximal temperatures of airflow of 65 –

80°C corresponded with Sanitary Regulation [13].

These conditions are corresponded to the maximal values of exergy efficiency.

Then, ways to improve efficiency of heat storage device were considered. It should be noted that the maximal heat inputs for operating the heat storage units results from desorption and evaporation.

Dependences of exergy efficiency vs. airflow speed for the open-mode adsorptive heat storage device when steam or ultrasound air humidification used are compared in Fig. 5.

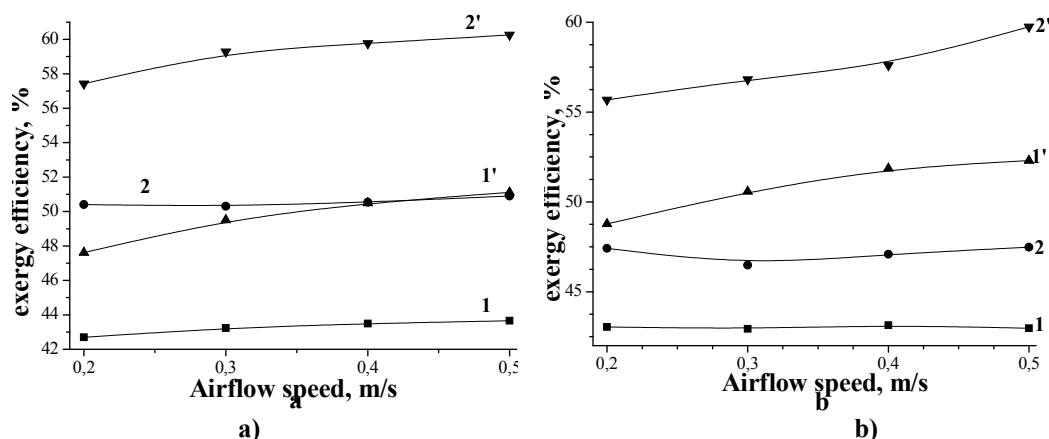


Fig. 5 – Exergy efficiency of open-mode heat storage unit vs. airflow speed. Air humidification: steam (a) and ultrasonic (b). Absolute humidity of air flow 0.03 (1, 1') and 0.04 (2, 2'). Temperature of flow of humid air, °C: 20(a) and 30 (b)

It should be noted that using ultrasonic humidification results allow to increase exergy efficiency by 7 – 10 % against steam humidification (Fig. 5, curves 1' and 2'). Maximal values of exergy efficiency are stated at airflow speed 0.4 – 0.5 m/s which are corresponded to maximal values of adsorption.

Conclusions. Exergy analysis of the open-mode adsorptive heat storage unit based on composite 'silica gel – sodium sulphate' is performed. The procedure of calculation of exergy efficiency of adsorptive heat has been obtained a further development. The correlation of exergy efficiency and operating mode of adsorptive heat storage unit is shown. The basic factors affecting the exergy efficiency are stated to be initial humidity and temperature of airflow supplied into the adsorbent layer, temperature of external air and methods of air flow humidification. It was stated that exergy efficiency factor strongly depends on initial absolute humidity and temperature of air which supplied to the adsorbent layer. The initial temperatures and absolute humidity of this airflow of 20 – 30°C and 0.03 – 0.04 kg/m³ and airflow speed 0.3 – 0.5 m/s are confirmed to be an operational mode which allows to achieve not only maximal efficiency factors but also maximal exergy efficiency.

The exergy efficiencies of adsorptive heat storage unit were compared when steam and ultrasonic humidification were used. Ultrasonic humidification allows to increase exergy efficiency at least by 7 % as compared with

steam humidification, maximal exergy efficiency being stated at the absolute humidity and initial temperatures of this airflow of 0.03 – 0.04 kg/m³ and 20 – 30°C and airflow speed 0.3 – 0.5 m/s.

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

References

1. Karabarin, I., Mihailenko, A. (2018). The Use of Low-Potential Energy Sources Based on Organic Rankine Cycle. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 11, 867-876. 10.17516/1999-494X-0101.
2. Shkrabets, F.P., Berdnyk, V.V. Secondary Power Resources of the Fuel and Energy Complex in Ukraine. *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal*, Magnolithe, ff10.13140/RG.2.1.2970.7921ff. ffhal-01301530f
3. Dai, B., Zhao, P., Liu, S., Su, M., Zhong, D., Qian, J., Hu, X., Hao, Y. Assessment of heat pump with carbon dioxide/low-global warming potential working fluid mixture for drying process: *Energy and emissions saving potential. Energy Conversion and Management*, 222, 113225. doi:10.1016/j.enconman.2020.1132
4. 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 pp. DOI: 10.4018/978-1-7998-4432-7
5. Nagel, T., Beckert, S., Böttcher, N., Gläser, R., Kolditz O. (2015). The impact of adsorbate density models on the simulation of water sorption on nanoporous materials for heat storage. (*Energy Procedia*, 75, 2106 – 2112
6. Lehmann, C., Beckert, S., Nonnen, T., Möllmer, J., Gläser, R., Kolditz, O., Nagel, T. (2015). A comparison of heat storage densities of zeolite granulates predicted by the Dubinin-Polanyi theory to experimental measurements, *Energy Procedia*, 105. 4334 – 4339
7. Michel, B., Neveu, P., Mazet, N. (2014). Comparison of closed and open thermochemical processes, for long-term thermal energy storage applications. *Energy*, 72, 702 – 716. 10.1016/j.energy.2014.05.097.
8. Gaeini, M., Zondag, H.A., Rindt, C.C.M. (2016). Effect of kinetics on the thermal performance of a sorption heat storage reactor. *Appl. Therm. Eng.*, 102, 520 – 531
9. Abedin, A., Rosen, M. (2012). Energy and Exergy Analyses of an Open Thermochemical Energy Storage System: Methodology and Illustrative Application. *The Open Renewable Energy Journal*, 5, 41-48. 10.2174/1876387101205010041.
10. Alami, A., Makhlof, M., Lousdad, A., Khalfi, A., Benzaama, M.-H. (2016). Energetic and exergetic analyses of adsorption heat transformer ameliorated by ejector. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38. 10.1007/s40430-016-0593-8.
11. Li, G., Qian, S., Lee, H., Hwang, Y., Radermacher, R. (2014). Experimental investigation of energy and exergy performance of short term adsorption heat storage for residential application. *Energy*, 65, 675-691
12. Serhiyenko Ya.O.; Byelyanovs'ka O.A.; Sukhyy K.M.; Kolomiyets' O.V.; Sukha I.V.; Sukhyy M.K. (2020). *Adsorbtsiynyy akumulyator teplovoyi enerhiyi [Adsorption accumulator of thermal energy]* (UA patent № 141142) DVNZ «Ukrayins'kyi derzhavnyy khimiko-tekhnolohichnyy universytet». [in Ukrainian].
13. Belyanovskaya, E., Lytovchenko, R., Sukhyy, K., Serhiienko, Y., Sukhyy, M., Sukha, I. (2021). Thermal conditions of adsorptive heat storage device operating in open-mode for heating inflowing air. *Scientific Works*, 85(1), 15 – 19.

ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ АДСОРБЦІЙНОГО ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОГО МОДУЛЯ ВІДКРИТОГО ТИПУ НА ОСНОВІ КОМПОЗИТНОГО АДСОРБЕНТУ «СИЛКАГЕЛЬ – КРИСТАЛОГІДРАТ»

Беляновська О.А., канд. техн. наук, доцент, Сухий К.М., д-р техн. наук, професор,
Сергієнко Я.О., аспірант, Сухий М.П., канд. техн. наук, професор,
Пустовой Г.М., аспірант, Суха І.В., канд. техн. наук, доцент
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро

Анотація. Проведено ексергетичний аналіз адсорбційного теплоакумуючого модуля відкритого типу, коли в якості адсорбенту використовується композит «силкагель – кристалогідрат». Вирішальними факторами, які впливають на ексергетичний коефіцієнт корисної дії, є температура та початкова вологість потоку повітря, що подається до шару адсорбенту, температура зовнішнього повітря та способи зволоження повітряного потоку. Отримала подальший розвиток процедура розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного тепло акумулятора відкритого типу. Запропонована процедура включає визначення адсорбції, питомої теплоти адсорбції та кінцевої температури повітряного потоку, корисної

теплоти, теплових витрат для роботи теплоаккумулятора та його коефіцієнт корисної дії, потім розраховують використану ексергію, витрати ексергії та ексергетичний коефіцієнт корисної дії. Показано, що ексергетичний коефіцієнт корисної дії залежить від характеристик потоку вологого повітря, що подається до шару адсорбенту, таких як температура та початкова абсолютна вологість, які впливають на адсорбцію, теплоту адсорбції та кінцеву температуру потоку повітря. Підвищення початкової температури вологого повітря призводить до зниження ексергетичної ефективності. Максимальні значення ексергетичного коефіцієнта корисної дії визначаються при абсолютній вологості та температурах початкового повітряного потоку в межах $0,03 - 0,04 \text{ кг/м}^3$ та $20 - 30^\circ\text{C}$ відповідно. Ці характеристики відповідають максимальним температурам повітряного потоку після проходження шару адсорбенту, що відповідають санітарним нормам. Показана залежність ексергетичного коефіцієнту корисної дії від температури зовнішнього повітря та початкової температури повітряного потоку. Порівняно ексергетичні коефіцієнти корисної дії відкритого адсорбційного теплоакуючого модуля з паровим та ультразвуковим зволоженням. Показано, що ультразвукове зволоження сприяє підвищенню ексергетичного коефіцієнта корисної дії на 7 % проти парового зволоження. Отримані результати можуть бути використані при розробці енергоефективних систем опалення та вентиляції житлових приміщень.

Ключові слова: адсорбційна трансформація теплової енергії, адсорбційний теплоакуючий модуль відкритого типу, ексергетичний коефіцієнт корисної дії, композитний адсорбент, адсорбція.

Список використаної літератури

1. Karabarin, I., Mihailenko, A. The Use of Low-Potential Energy Sources Based on Organic Rankine Cycle. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. Vol. 11. P. 867-876. 10.17516/1999-494X-0101.
2. Shkrabets, F.P., Berdnyk, V.V.. Secondary Power Resources of the Fuel and Energy Complex in Ukraine. Mechanics, Materials Science & Engineering Journal, Magnolithe, 2016. ff10.13140/RG.2.1.2970.7921ff. fffhal-01301530f
3. Dai, B., Zhao, P., Liu, S., Su, M., Zhong, D., Qian, J., Hu, X., Hao, Y. Assessment of heat pump with carbon dioxide/low-global warming potential working fluid mixture for drying process: Energy and emissions saving potential. Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 222, P. 113225. doi:10.1016/j.enconman.2020.1132
4. 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 pp. DOI: 10.4018/978-1-7998-4432-7
5. Nagel, T., Beckert, S., Böttcher, N., Gläser, R., Kolditz O. (2015). The impact of adsorbate density models on the simulation of water sorption on nanoporous materials for heat storage, Energy Procedia, 2015. Vol. 75. P. 2106 – 2112
6. Lehmann, C., Beckert, S., Nonnen, T., Möllmer, J., Gläser, R., Kolditz, O., Nagel, T. A comparison of heat storage densities of zeolite granulates predicted by the Dubinin-Polanyi theory to experimental measurements, Energy Procedia, 2015. Vol. 105. P. 4334 – 4339
7. Michel, B., Neveu, P., Mazet, N. Comparison of closed and open thermochemical processes, for long-term thermal energy storage applications. Energy. 2014. Vol. 72. P. 702 – 716. 10.1016/j.energy.2014.05.097.
8. Gaëini, M., Zondag, H.A., Rindt, C.C.M. Effect of kinetics on the thermal performance of a sorption heat storage reactor. Appl. Therm. Eng. 2016. Vol. 102. P. 520 – 531
9. Abedin, A., Rosen, M. Energy and Exergy Analyses of an Open Thermochemical Energy Storage System: Methodology and Illustrative Application. The Open Renewable Energy Journal. 2012. Vol. 5. P. 41-48. 10.2174/1876387101205010041.
10. Alami, A., Makhlouf, M., Lousdad, A., Khalfi, A., Benzaama, M.-H. Energetic and exergetic analyses of adsorption heat transformer ameliorated by ejector. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2016. Vol. 38. 10.1007/s40430-016-0593-8.
11. Li, G., Qian, S., Lee, H., Hwang, Y., Radermacher, R. Experimental investigation of energy and exergy performance of short term adsorption heat storage for residential application. Energy. 2014. Vol. 65. P. 675-691
12. 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.
13. Belyanovskaya, E., Lytovchenko, R., Sukhyy, K., Serhiienko, Y., Sukhyy, M., Sukha, I. Thermal conditions of adsorptive heat storage device operating in open-mode for heating inflowing air. Scientific Works. 2021. Vol 85, № 1. P. 15 – 19.

Отримано в редакцію 03.06.2022
Прийнято до друку 20.09.2022

Received 03.06.2022
Approved 20.09.2022

ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВ НА КІНЕТИКУ АДСОРБЦІЇ АЛЬБУМІНУ

Сабадаш В.В., д-р. техн. наук., проф., Гумницький Я.М., д-р. техн. наук., проф.
Національний університет “Львівська політехніка”, Львів

Анотація. У роботі приведено проблеми очищення стічних вод молокопереробних підприємств та м'ясокомбінатів, забруднених органічними речовинами.

Розглянуто теоретичні засади адсорбційних процесів у апараті з мішалкою для структурованих і неструктурованих рідин. Приведено математичний апарат для опису кривих течії структурованих рідин та суспензій. Встановлено вплив гідродинаміки на масообмінний процес у двофазній системі. Досліджено вплив фізичних властивостей фаз на процес адсорбції. Для опису гідродинамічних умов процесу застосовано теорію локальної ізотропної турбулентності. Розраховано затрати енергії на перемішування, питому енергію дисипації та значення критеріїв Рейнольдса та Ейлера для кожного розглянутого випадку. Приведено результати експериментальних досліджень процесу зовнішньої дифузійної адсорбції для суспензій цеоліт-розчин альбуміну для різних частот перемішування: 200, 300 та 500 об/хв. Розраховано коефіцієнти масовіддачі та значення ефективного коефіцієнта дифузії для досліджуваної адсорбційної системи. Одержано критеріальне рівняння для розрахунку коефіцієнта масовіддачі. Коефіцієнти внутрішньої дифузії альбуміну у цеоліті за різних чисел обертів становили від: становили $7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ до $2,62 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ для 500 об/хв. Встановлено, що зі збільшенням числа обертів відбувалося збільшення коефіцієнта масовіддачі та ефективного коефіцієнта дифузії. Згідно представлених результатів випливає, що турбулізація потоку дозволяє рівномірно розподілити частинки сорбенту в реакторі та знизити дифузійний опір. Представлено кінетичні криві адсорбції природним цеолітом для зовнішньодифузійного та внутрішньодифузійного процесу. Проведено статистичну оцінку одержаних результатів. Для отриманих результатів критерій Пірсона χ^2 становив 0.94, критерій Стюдента $t = 0.002$ середньоквадратичне відхилення $SSD = 0.2$.

Ключові слова: стічні води, адсорбція, цеоліт, альбумін, кінетика, масообмін.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Для інтенсифікації процесів адсорбції та ряду технологічних процесів застосовують реактори з мішалкою. Такі апарати застосовують для культивування поживних середовищ, ферментації, проведення хімічних реакцій, кристалізації, розчинення, реалізації адсорбційних, екстракційних та інших процесів. Проте для оптимізації енергетичних затрат на реалізацію цих процесів часто стикаються з проблемою зміни реологічних властивостей рідин та суспензій, що приймають участь у цих процесах.

Аналіз останніх досліджень. Під час очищення стічних вод в реальних умовах у багатьох випадках мають справу з неньютонівськими рідинами. Це пов'язано з неоднорідністю дисперсного складу стоків, наявністю в них колоїдних частинок та високомолекулярних сполук [1]. Проблема опису гідродинаміки таких систем є актуальною з точки зору забезпечення оптимального вилучення небезпечних речовин зі стоків, в'язкість яких нелінійно змінюється стосовно прикладеного навантаження (перемішування). Тому на початковій стадії процесу необхідна додаткова енергія активації для руйнування структури рідини. Також наявність у стоках високомолекулярних сполук може призводити до стабілізації суспензій та перешкоджає процесу адсорбції. Утворені агрегати мають лінійні розміри, що перевищують діаметр пор сорбента [2, 3]. Важливе значення в процесі адсорбції має також інтенсивність перемішування адсорбенту з адсорбатом. У попередніх публікаціях було представлено результати експериментальних досліджень адсорбції альбуміну в статичних та динамічних умовах. У працях [4, 5] було представлено результати експериментальних досліджень адсорбції альбуміну в умовах механічного перемішування для 300-800 об/хв. Дослідження кінетики адсорбції високомолекулярних сполук показує можливість інтенсифікації процесу при інтенсивному перемішуванні. Дані дослідження кінетики адсорбції природним цеолітом Сокиринського родовища відповідали теоретичним моделям. Було встановлено, що на адсорбцію впливає концентрація адсорбату. Кінетичні параметри показали, що швидкість адсорбції значно збільшується зі швидкістю перемішування. Надана модель найкраще відповідає експериментальним даним і передбачає зміну пористості частинок на ефективність видалення [7]. Даний адсорбент не дорогий, широкодоступний і вирішує екологічну проблему.

Авторами [8, 9] досліджувалася кінетика адсорбції барвника з водних розчинів. Правильний вибір швидкості змішування дає можливість збільшити кількість адсорбованого барвника на поверхні активованого вугілля. Автори роботи [11] досліджували вплив швидкості перемішування на адсорбцію метилового оранжевого на вуглецевих нанотрубках. При значному збільшенні швидкості перемішування з 300 об/хв до 700 об/хв адсорбція барвника зросла майже вдвічі з 25 мг/г до 45 мг/г. Збільшення адсорбції барвника при такій високій швидкості змішування автори пояснили певним підвищенням доступності забарвленої органічної сполуки до внутрішньої поверхні адсорбенту.

Формулювання цілей статті. Мета роботи – дослідження закономірностей адсорбції високомолекулярних сполук у зовнішньо- та внутрішньодифузійних областях.

Експериментальні дослідження кінетики зовнішньодифузійної стадії сорбції альбуміну. Під впливом фізичних, хімічних та біологічних факторів білки зазнають глибоких змін, пов'язаних із порушенням четвертинної, третинної та вторинної структур, що призводить до зміни фізико-хімічних та біологічних властивостей білка [1]. Білки зазнають змін, небажаних або передбачуваних, під час зберігання, оброблення, в результаті хімічних та біохімічних реакцій. Цілеспрямовано, ферментативно та хімічно змінюючи структуру білків, можна впливати на їхні функціональні властивості. Під час денатурації білків відбувається розрив міжмолекулярних зв'язків, зміна конфігурації молекули білка, зниження його молекулярної маси і зниження його гідрофільних властивостей. Механічні процеси перемішування також супроводжуються зниженням в'язкості досліджуваного розчину. Отже, збільшення швидкості обертання ротора мішалки інтенсифікує процес адсорбції [7].

Адсорбція високомолекулярних сполук переважно відбувається на поверхні розділу фаз, оскільки їх розмір більший за діаметр пор сорбенту. Тому процес здійснюється у зовнішньодифузійній області. Кінетику адсорбції альбуміну із водних розчинів природним цеолітом досліджували відповідно до методики, наведеної у [4], за початкової концентрації альбуміну $19,8 \text{ г/дм}^3$. Результати експериментальних досліджень наведено на рис. 1.

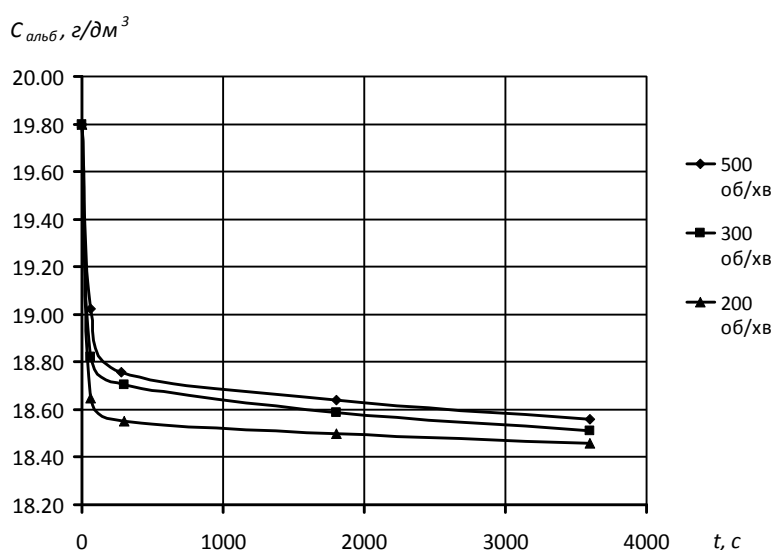


Рис. 1 – Кінетика сорбції альбуміну природним цеолітом

У перші 5 хвилин адсорбції в умовах механічного перемішування (рис. 1) зміна концентрації альбуміну під час адсорбції є лінійною і процес відбувається в зоні зовнішньої дифузії, а це означає, що не спостерігається внутрішньодифузійного транспортування речовин, що спостерігається через 100 с від початку процесу. Розрахунок параметрів процесу адсорбції альбуміну здійснено згідно із [3].

В умовах експерименту критерій Пірсона χ^2 становив 0.94, критерій Стюдента $t = 0.002$ середньоквадратичне відхилення $SSD = 0.2$.

Метою дослідження було визначення рушійної сили адсорбції. Оскільки упродовж процесу адсорбції відбувається зниження концентрації білка у рідині, а на зовнішній поверхні адсорбенту концентрація білка зростає, рушійна сила є змінною величиною і з часом зменшується. Середня концентрація альбуміну $\bar{C}$ у період часу від τ_0 до τ_1 можна описати наступним виразом [4]:

$$\bar{C} = \frac{\int_0^{\tau_1} C \cdot d\tau}{\tau_1}. \quad (1)$$

Якщо прийняти зміну концентрації у рідині на початковій ділянці часу прямолінійною, то середня концентрація дорівнюватиме

$$\bar{C} = C_0 - \frac{b}{2} \tau. \quad (2)$$

Згідно з рис. 1 прямолінійна ділянка кінетичних кривих становить приблизно 30с. Масу поглинутого альбуміну ΔM для перших 30 с дослідження розраховували згідно із рівнянням матеріального балансу [6]

$$\Delta M = V(c_n - c_{30}), \quad (3)$$

де V – об'єм адсорбата, в умовах експерименту $V = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; C_n – концентрація альбуміну в момент часу τ_0 , кг/м^3 ; C_{30} – концентрація адсорбату в реактору за проміжок часу 30 с, кг/м^3 .

На початковій стадії адсорбції значення коефіцієнтів масовіддачі β було у межах $0,42 \dots 2,51) \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$.

Для експериментальних досліджень використовували фракцію цеоліту з еквівалентним діаметром зерен $\bar{d} = 1,88 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, проте для спрощення обчислень поверхні масообміну приймали форму частинок сорбента кулястою. Площа зовнішньої поверхні частинок, що беруть участь у масообміні, дорівнюватиме:

$$F = \frac{6M}{\rho_{ad}\bar{d}} = 0,0416 \text{ м}^2. \quad (4)$$

Отже, вирівнюючи концентрацію на поверхні розділу фаз, можна інтенсифікувати процеси у яких лімітуючою стадією є дифузія адсорбтиву до поверхні сорбенту. Процес зовнішньої дифузії відбувається на початковій стадії адсорбції низькомолекулярних сполук, коли концентрація адсорбату на поверхні адсорбенту прямує до нуля, при адсорбції ВМС та при адсорбції сильно розбавлених розчинів.

Гідродинаміка потоку також визначає тип дифузійного процесу. Число Рейнольдса розраховували за формулою, приведеною у [4, 5, 6]:

Значення коефіцієнта β обчислювали теоретичним методом, що ґрунтується на теорії локально-ізотропної турбулентності. Метод успішно використовують у процесах розчинення твердих тіл [6].

Між зовнішньодифузійною стадією адсорбції та розчиненням існує певна аналогія, оскільки обидва процеси належать до масообмінних процесів у гетерогенних системах. В умовах експерименту розглядали область турбулентного потоку, яка менша основної зони турбулентності, але більша області, у якій відбувається дисипація енергії. Таким чином, приймали, що всі властивості системи, які обумовлені її статичними властивостями є однакові у всіх напрямках. Параметри лабораторної установки і турбулентний режим проведення процесу адсорбції дає змогу прийняти ізотропний стан системи, для якого гідродинамічні параметри можна вважати однаковими [7].

Предметом моделювання турбулентності є нескінченна кількість зв'язків між окремими масштабами явища, наслідком яких є процеси турбулентного транспортування маси, імпульсу або скалярних величин (енергії, теплоти). Ці взаємодії зазвичай прирівнюють до вихрової структури турбулентності, яку подають як нескінченний каскад вихорів, що здійснюють транспортні процеси, характерні для турбулентного потоку. Тому інтенсивність перенесення маси, імпульсу та енергії на кілька порядків вища, ніж у ламінарному потоці. В умовах механічного перемішування коефіцієнт масовіддачі β_p [8, 9]:

$$\beta_p = 0,267^4 \sqrt{\frac{\varepsilon_0 V}{Sc^3}} \quad (5)$$

де

v – кінематична в'язкість розчину альбуміну, $\text{м}^2/\text{с}$;

Sc – число Шмідта;

ε_0 – питома енергія розсіювання, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с})$;

$$\varepsilon_0 = \frac{N}{\rho \cdot V}, \quad (6)$$

Енергія, що передається від мішалки до рідини за рахунок тертя рідини до стінки апарата та дисипації енергії у рідині. Питома енергія дисипації пропорційна затратам енергії на перемішування та обернено пропорційна масі реакційної суміші [10].

Потужність на перемішування механічною мішалкою визначимо згідно із [9]:

$$N = Eu d_M^5 n^3 \rho, \quad (7)$$

де Eu – Критерій Ейлера;

d_M – діаметр лопатей мішалки, м ;

n – швидкість обертання перемішувального пристрою, $1/\text{с}$.

де V – об'єм адсорбату (дисперсійного середовища), м^3 ;

N – витрата енергії на перемішування в одиницю часу, Вт

Експериментальні дослідження кінетики адсорбції проводили в діапазоні 200 – 500 об/хв, тому розглядали моделі зовнішньої та внутрішньої дифузії. Для зовнішньодифузійної стадії було визначено відповідність значень критерію Шервуда до критерію Рейнольдса. Зовнішньодифузійну стадію розглядали для першого періоду адсорбції, коли відбувається заповнення зовнішньої поверхні адсорбенту. Між концентрацією компонента на поверхні (адсорбату) та його концентрацією у мономолекулярному поверхневому шарі ріди-

ни (адсорбтиву) C встановлюється рівновага. Наприклад, для адсорбції альбуміну природним цеолітом рівновага має вигляд виразу Ленгмюра [11, 12]

$$a^* = 14.1 \cdot \frac{0.2 \cdot C}{1 + 0.2 \cdot C}, \quad (8)$$

де a^* – адсорбційна здатність цеоліту, г/г адс.

На рис. 2 наведено розрахункові дані згідно із залежностями (9.15) і (9.16), за якими число Шервуда зростає залежно від числа Рейнольдса.

Цю залежність подаємо таким виразом:

$$Sh = 2 \cdot 10^{-5} Re + 8.97. \quad (9)$$

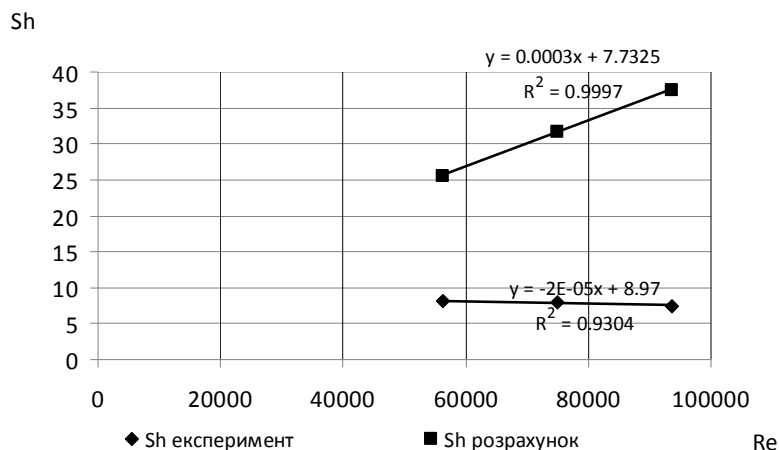


Рис. 2 – Вплив гідродинамічних умов на процес адсорбції альбуміну в умовах механічного перемішування

З рис. 2. випливає, що реалізація процесу адсорбції альбуміну в умовах перемішування призводить до зниження коефіцієнта масовіддачі. Це обумовлюється рядом причин, зокрема й тим, що в умовах перемішування змінюється в'язкість неньютонівських рідин. Також відомо, що процеси перемішування супроводжуються незначним нагріванням рідини, що негативно впливає на адсорбцію та знижує в'язкість. В умовах експерименту ця різниця становила до 2°C.

Також енергія зв'язку білка з поверхнею сорбента слабка, а турбулізація потоку сприяє їх десорбції [4].

Внутрішньодифузійна кінетика сорбції білка (альбуміну) природним цеолітом

Закономірності внутрішньодифузійної кінетики сорбції білка (альбуміну) природним цеолітом наведено на рис. 3. Встановлення рівноважної концентрації в апараті за тривалості сорбції $\tau > 200$ с вказує на внутрішньодифузійну область процесу [2].

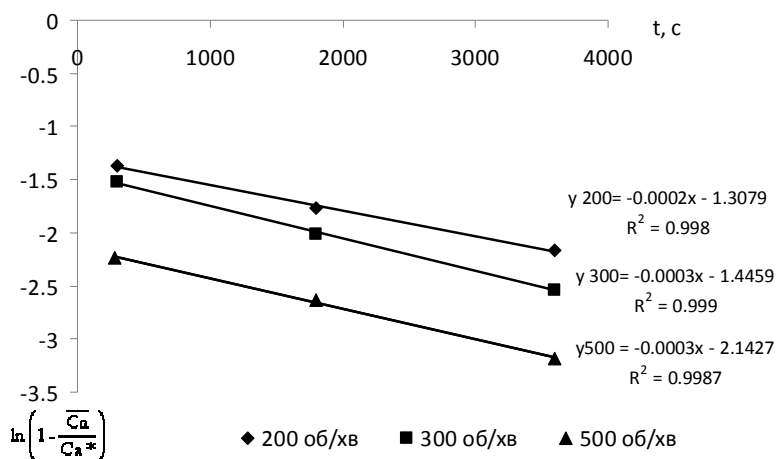


Рис. 3 – Кінетика сорбції білка цеолітом в апараті з мішалкою

Коефіцієнт внутрішньої дифузії молекул альбуміну в зернах цеоліту розраховано за значеннями танген-са кута нахилу кривих α (рис. 3). Дослідження здійснено в апараті із пропелерною мішалкою за 200, 300 та 500 обертів за хвилину. Одержано такі значення коефіцієнтів внутрішньої дифузії альбуміну на цеоліті за відповідних кількостей обертів мішалки:

Значення коефіцієнтів дифузії альбуміну на цеоліті для різних чисел обертів мішалки

n, 1/с	200	300	500
D^* , м ² /с	$7 \cdot 10^{-11}$	$2,14 \cdot 10^{-10}$	$2,62 \cdot 10^{-10}$

Адсорбція в умовах механічного перемішування супроводжується збільшенням значення коефіцієнта внутрішньої дифузії пропорційно до кількості обертів мішалки. Для альбуміну порядок значень коефіцієнта масовіддачі для розглянутих гідродинамічних умов відповідав механізму внутрішньої дифузії [12].

Висновки. Приведено експериментальні дослідження кінетики адсорбції альбуміну природним цеолітом з метою очищення стічних вод молокопереробних підприємств та м'ясокомбінатів. Представлено ізотерму адсорбції та визначено кінетичні параметри процесу адсорбції в умовах механічного перемішування за чисел обертів 200-500 об/хв. Представлено математичну залежність відповідності інтенсивності масообмінного процесу до гідродинамічних умов як функцію $Sh=f(Re)$. Встановлено параметри зовнішньодифузійного та внутрішньодифузійного процесів. В умовах експерименту коефіцієнти внутрішньої дифузії альбуміну становили для 200 об/хв: $D^*_{200} = 7 \cdot 10^{-11}$ м²/с; для 300 об/хв: $D^*_{300} = 2,14 \cdot 10^{-10}$ м²/с; для 500 об/хв: $D^*_{500} = 2,62 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Статистична оцінка експериментальних та теоретичних даних показала задовільну збіжність одержаних результатів, зокрема критерій Пірсона χ^2 становив 0.94, критерій Стюдента $t = 0.002$ середньоквадратичне відхилення $SSD = 0.2$.

References

- Bordun, I. M., Ptashnyk, V. V., Chumakevych, V. O., & Mashkov, O. A. (2018). Doslidzhennya adsorbtsiyi orhanichnykh barvnykiv aktyvovanyam vuhillyam. Ekoolohichni nauki [Ecology sciences], 3(22), 77-83 [in Ukrainian].
- Kocaaga, B., Kurcuoglu, O., Tatlier, M., Dinler-Doganay, G., Batirel, S., & Güner, F. S. (2022). Pectin-Zeolite-Based Wound Dressings with Controlled Albumin Release. Polymers, 14(3), 460-480.
- Matsuska, O. V., Paranyak, R. P., Gumnytsky, YA. M. (2011). "Purification of effluents from natural proteins by natural sorbents", Naukovyy visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoyi medytsyny ta biotekhnolohiy im. Gzhytskoho, vol. 13, № 2 (2), 255-261 [in Ukrainian].
- Hyvlud, A., Sabadash, V., Gumnitsky, J., & Ripak, N. (2019). Statics and kinetics of albumin adsorption by natural zeolite. Chemistry & Chemical Technology, 1(13), 95-100.
- Gumnytsky, YA. M., Hyvlyud, A. M., Sabadash, V. V. (2015). "Kinetics of albumin adsorption by natural sorbent", Naukovi pratsi Odes'koyi natsional'noyi akademiyi kharchovykh tekhnolohiy, vol. 47 (1), 133-137 [in Ukrainian].
- Sabadash, V., Mylanyk, O., Matsuska, O., & Gumnitsky, J. (2017). Kinetic regularities of copper ions adsorption by natural zeolite. Chemistry & Chemical Technology, 11(4), 459-462.
- Beszédes, S., Szabó, G., Géczi, G. (2012). Application of thermal and microwave pre-treatments for dairy wastewater sludge, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 10(3), 231-235.
- Sokolov, S. V., Sokolov, S. V., Pysarenko, L. D., Pysarenko, L. D., Zhurba, V. O. (2011). Teoriya elektromahnitnoho polya i osnovy tekhniki NVCH [Theory of electromagnetic field and the basis of microwave engineering], Sumy State University, Sumy, Ukraine, 393 [in Ukrainian].
- Kalynyn, L. H. (2010). "The application of the regular-mode method for determining the electro- and thermophysical characteristics of disperse systems", Naukovi pratsi Odes'koyi natsional'noyi akademiyi kharchovykh tekhnolohiy, 37, 170-173 [in Russian].
- Potapov, V. O., Kachalov, V. V., Mykhaylova, S. V. (2013). "To the question of calculation of internal sources of heat during microwave processing of food products", Prohresyvnii tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli, 1 (2), 73-81.
- Prates, L. L., Lei, Y., Refat, B., Zhang, W., Yu, P. (2018). Effects of heat processing methods on protein subfractions and protein degradation kinetics in dairy cattle in relation to protein molecular structure of barley grain using advanced molecular spectroscopy. Journal of Cereal Science, 80, 212-220.
- Wibowo, E., Rokhmat, M., & Abdullah, M. (2017). Reduction of seawater salinity by natural zeolite (Clinoptilolite): Adsorption isotherms, thermodynamics and kinetics. Desalination, 409, 146-156.

THE EFFECT OF HYDRODYNAMIC CONDITIONS ON THE KINETICS OF ALBUMIN ADSORPTION

Sabadash V.V. doctor of techn. sciences, Professor, Gumnitsky J.M. doctor of techn. sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University, Lviv

Abstract. The work presents the problems of wastewater treatment of milk processing enterprises and meat plants contaminated with organic compounds and proteins. A theoretical analysis of industrial wastewater treat-

ment methods using zeolites of the Sokyrnytsia deposit was conducted. It was established that the most economically beneficial and safe is the adsorption method using a natural sorbent - zeolite, which ensures the lowest concentration of pollutants in the purified wastewater of food industry enterprises. The sorption properties of natural zeolite (clinoptilolite of the Sokyrnytsia deposit) to albumin protein were tested. A mathematical model for the flow curves of structured liquids and suspensions is given. The influence of hydrodynamics on the mass transfer process in a two-phase system has been established. The effect of the physical properties of the phases on the adsorption process was investigated. The theory of local isotropic turbulence to describe the hydrodynamic conditions of the process was used. Energy consumption for mixing, specific energy of dissipation and value of Reynolds and Euler criteria for each considered case were calculated. Experimental studies of the external diffusion adsorption process for zeolite-albumin solution suspensions for different stirring frequencies: 200, 300, and 500 rpm were presented. The mass transfer coefficients and values of the effective diffusion coefficient for the investigated adsorption system were calculated. The criterion equation for calculating the mass transfer coefficient was obtained. The coefficients of internal diffusion of albumin in zeolite at different speeds ranged from $7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ to $2.62 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ for 500 rpm. It was established that with an increase in the number of revolutions, there was an increase in the mass return coefficient and the effective diffusion coefficient. According to the presented results, the turbulation of the flow allows the evenly distributing of the sorbent particles in the reactor and reduces the diffusion resistance. Experimental studies of the external diffusion adsorption process for zeolite-albumin solution suspensions for different stirring frequencies: 200, 300, and 500 rpm are given. The kinetic curves of adsorption by natural zeolite for the external diffusion and internal diffusion processes were presented. The rheological and mechanical properties of the studied systems are considered. Regularities between deformations and stresses at a certain point of the system at the time τ have been established. A statistical evaluation of the obtained results was carried out. For the obtained results, Pearson's test χ^2 was 0.94, Student's test $t = 0.002$, mean square deviation; mean = 0.2.

Keywords: wastewater, adsorption, zeolite, albumin, kinetics, mass transfer.

Список використаної літератури

1. Дослідження адсорбції органічних барвників активованим вугіллям / Бордун І. М. та ін. // Екологічні науки. 2018., вип. 22 Т. 3. С. 77-83.
2. Pectin-Zeolite-Based Wound Dressings with Controlled Albumin Release / Kocaaga B. et al. // Polymers. – 2022., Т. 14. №. 3. Р. 460-480.
3. Мацуська О. В. Очищення стоків від білків природними сорбентами/ О. В. Мацуська, Р. П. Параняк, Я. М. Гумницький //Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. Гжицького. 2011., № 2(2). Т. 13.. С. 255-261
4. Statics and kinetics of albumin adsorption by natural zeolite / Hyvlud A. et al. //Chemistry & Chemical Technology. 2019., №. 13, Vol. 1. Р. 95-100.
5. Гумницький Я.М. Кінетика адсорбції альбуміну природним сорбентом/ Я.М. Гумницький, (А.М. Гивлюд), В.В.Сабадаш //Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2015. Вип. 47. Т.1, С. 133-139.
6. Beszedes S. Application of thermal and microwave pre-treatments for dairy wastewater sludge / S. Beszedes, G. Szabo, G. Geczi. // International Journal Of Engineering. 2012., №10. Р. 231–235.
7. Kinetic regularities of copper ions adsorption by natural zeolite / Sabadash V. V. et al. // Chemistry & Chemical Technology. 2017., No. 4 Vol. 11. Р. 459-462.
8. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ: навч. Т 59 посіб. / С.В. Соколов, Л.Д. Писаренко, В.О. Журба; за заг. ред. Г.С. Воробйова. – Суми : Сумський державний університет, 2011., 393 с.
9. Калинин Л. Г. Применение метода регулярного режима для определения электро- и теплофизических характеристик дисперсных систем / Л. Г. Калинин // Наук. праці. ОНХАТ. Одеса, 2010., Вип. 37. С. 170–173.
10. Потапов В. О. До питання розрахунку внутрішніх джерел теплоти під час мікрохвильової обробки харчових продуктів/ В. О. Потапов, В. В. Качалов, С. В. Михайлова // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. 2013., Вип. 1(2), С. 73-81.
11. Effects of heat processing methods on protein subfractions and protein degradation kinetics in dairy cattle in relation to protein molecular structure of barley grain using advanced molecular spectroscopy/ Prates L. L. et al //Journal of Cereal Science. – 2018., Vol. 80. Р. 212-220.
12. Wibowo E. et al. Reduction of seawater salinity by natural zeolite (Clinoptilolite): Adsorption isotherms, thermodynamics and kinetics/ Wibowo E. et al. //Desalination. 2017., Vol. 409. Р. 146-156.

Отримано в редакцію 02.06.2022
Прийнято до друку 16.09.2022

Received 02.06.2022
Approved 16.09.2022

ВПЛИВ ВИТРАТИ ХОЛОДНОГО ТЕПЛОНОСІЯ НА ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ ДЛЯ ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТА

Алексей С.С., к.т.н. Кравець В.Ю., д.т.н., проф.

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

Анотація. Пульсаційні теплові труби (ПТТ) є високоефективними теплопередавальними пристроями та одним із найновіших видів теплових труб. Одним із перспективних напрямків їх застосування є використання у якості основних теплопередавальних елементів рекуперативних теплообмінних апаратів, що знайшли широке застосування в енергетиці, енергозбереженні, хімічній та харчовій промисловості. Серед актуальних напрямків досліджень в області таких теплообмінників важливим є вивчення впливу витрат теплоносія на характеристики цих апаратів. Для кращого розуміння цих впливів доцільно проводити подібні дослідження не тільки на теплообмінних апаратах в цілому, але і на їх основних елементах, тобто пульсаційних теплових трубах.

В роботі приведено результати експериментальних досліджень впливу витрати охолоджуючого середовища на теплопередавальні характеристики мідної одновиткової замкненої ПТТ з теплоносієм водою та коефіцієнтом заповнення 45%. Внутрішній діаметр ПТТ складав 3,1 мм, загальна довжина – 212 мм, довжина зони нагріву – 70 мм, довжина зони конденсації – 142 мм. ПТТ було досліджено у вертикальному положенні з нагрівом знизу в діапазоні підведених теплових потужностей 10-140 Вт. Витрата охолоджувальної води складала 2,9-7 г/с, а її температура 10-15°C. В результаті проведених досліджень було з'ясовано, що при витраті 2,9 г/с перепад температур та термічний опір ПТТ на 20-22% нижчий, а переданий тепловий потік на 35% більший, ніж при вищих значеннях витрати. При цьому зміна витрати в діапазоні 4,5-7 г/с не здійснює помітного впливу на перепад температур та термічний опір ПТТ. Виходячи з цього, для збільшення коефіцієнту теплопередачі в теплообмінних апаратах на ПТТ можна рекомендувати зменшення витрати холодного теплоносія.

Ключові слова: теплообмінний апарат, пульсаційна теплова труба, витрата охолоджуючого середовища, перепад температур, термічний опір.

Вступ. Рекуперативні теплообмінні апарати (ТОА) широко використовуються в енергетиці, енергозбереженні та промисловості, зокрема, в таких галузях як хімічна та харчова. Одним з основних завдань створення нових ТОА є підвищення коефіцієнту теплопередачі між гарячим та холодним теплоносіями. Для цього дослідники та конструктори використовують в якості основних теплопередавальних елементів високотеплопровідні пристрої – теплові труби (ТТ) і, зокрема, пульсаційні теплові труби (ПТТ) – один з найновіших видів ТТ.

Вперше ПТТ було запатентовано японським винахідником Акаші [1]. Вона представляє собою змійовик, виконаний із металевого капіляра. Кінці капіляра можуть бути загерметизовані (ПТТ розімкнутого типу) або з'єднані перемичкою, утворюючи замкнений контур (ПТТ замкненого типу). Змійовик вакуумують та частково заповнюють рідким теплоносієм. Під дією капілярних сил всередині ПТТ з рідини формуються снаряди, простір між якими заповнено паром теплоносія (парові снаряди). При підведенні теплоти до одного з кінців змійовика, який називається зоною нагріву (ЗН), та відведенні від протилежного кінця – зони конденсації (ЗК), починається рух ланцюга, що складається з рідинних та парових снарядів, від ЗН до ЗК. Рушійними силами є різниця тисків, що виникає між ЗН та ЗК, а також сили, що виникають при зростанні та відриві парових бульбашок в ЗН внаслідок кипіння. При цьому відбувається передача теплоти від ЗН до ЗК як у замкнутому випарно-конденсаційному циклі (випаровування та кипіння теплоносія в ЗН та його конденсація в ЗК), так і за рахунок перенесення теплоти рідинними та паровими снарядами без зміни фазового стану. Між ЗН та ЗК може також існувати зона транспорту (ЗТ) – частина ПТТ, в якій відбувається лише транспорт теплоносія, а теплообмін із зовнішнім середовищем відсутній. Основними перевагами, завдяки яким ПТТ привернули увагу дослідників, є: простота та дешевизна конструкції, можливість передачі значних теплових потоків при малому перепаді температур та низькому термічному опорі, можливість роботи при будь-якій орієнтації в полі дії масових сил. Детальнішу інформацію щодо конструкцій та принципу роботи ПТТ можна знайти в [2-4].

Прикладами застосування ПТТ в рекуперативних ТОА можуть бути конструкції, описані в [5-8], де також приведено результати їх досліджень. В більшості випадків такий ТОА складається з однієї або декількох багатовиткових ПТТ, виготовлених з міді. Їх ЗН омиваються гарячим теплоносієм і відбирають від нього теплову енергію. ПТТ передає її до ЗК, які омиваються холодним теплоносієм, і віддають йому цю тепло-

ту. На параметри та ефективність роботи таких ТОА впливає значна кількість факторів, одним з яких є витрата холодного теплоносія. Наприклад, автори [8] експериментальним шляхом з'ясували, що збільшення швидкості холодного теплоносія (що при постійній площі прохідного перетину еквівалентно зміні його витрати) з 1,3 до 3,3 м/с призводило до збільшення потужності, що передавав ТОА, з 440 Вт до 821 Вт, проте ефективність зменшувалась з 49% до 36%. Однак для кращого розуміння природи такого впливу, його дослідження варто проводити не лише на ТОА в цілому, як це було зроблено у [8], але і на окремих елементах ТОА, тобто одиничних ПТТ. Проте дослідники не приділяють уваги вивченню впливу витрати холодного теплоносія (або охолоджуючого середовища) на теплопередавальні характеристики ПТТ. В літературі описані лише поодинокі випадки подібних досліджень. Наприклад, в [9] було досліджено систему охолодження електронних компонентів на основі ПТТ при різних швидкостях охолоджуючого повітря, а автори [10] вивчали вплив температури ЗК на роботу ПТТ. Таким чином, дослідження впливу витрати охолоджуючого середовища на теплопередавальні характеристики ПТТ є актуальною задачею.

Мета роботи. Дослідити вплив витрати охолоджуючого середовища на теплопередавальні характеристики пульсаційної теплової труби.

Експериментальна установка. Вирішення поставленої задачі здійснювалось експериментальним шляхом. Для цього було виготовлено замкнену 1-виткову ПТТ (рис. 1). Вибір саме 1-виткової ПТТ обумовлено тим, що дослідження на одному витку як на «елементарній чарунці» багатовиткової ПТТ дозволяють краще зрозуміти досліджувані процеси, нівелювавши при цьому вплив багатовитковості. Такий підхід досить широко застосовується дослідниками, наприклад, його було використано в [11-13].

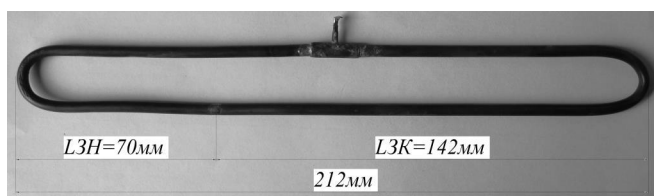
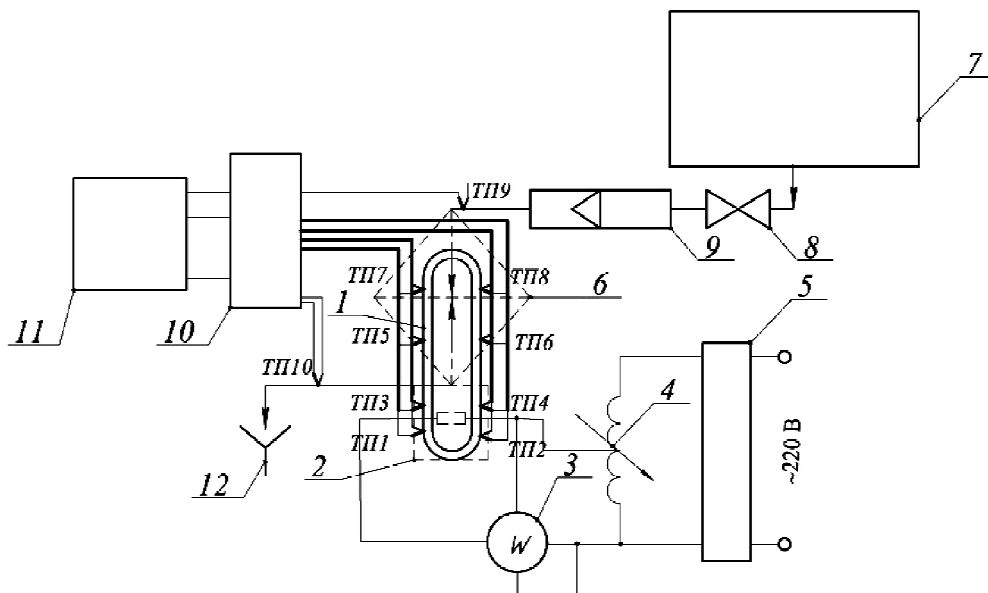


Рис. 1 – Дослідний зразок пульсаційної теплової труби

Дослідний зразок (рис. 1) було виготовлено із мідного капіляра з внутрішнім діаметром 3,1 мм. Загальна довжина ПТТ складала 212 мм, довжина ЗН (L3H) – 70 мм, довжина ЗК (L3K) – 142 мм, ЗТ була відсутня. В якості теплоносія була використана дистильована вода. Коефіцієнт заповнення (відношення об'єму заправленої рідини до загального внутрішнього об'єму ПТТ) склав 45%.

Одновиткову ПТТ було досліджено на експериментальній установці, яку схематично зображено на рис. 2.



1 – пульсаційна тепла труба; 2 – нагрівач; 3 – ватметр; 4 – лабораторний автотрансформатор; 5 – стабілізатор напруги; 6 – теплообмінник-охолодильник; 7 – напірний бак; 8 – вентиль; 9 – ротаметр; 10 – модуль збирання даних; 11 – персональний комп'ютер; 12 – зливний отвір

Рис. 2 – Схема експериментальної установки

Дослідна ПТТ 1 (рис. 2) встановлювалась вертикально з нагрівом знизу. Підведення теплоти до ПТТ забезпечувалось електричним нагрівачем 2, який через ватметр 3, призначений для контролю електричної

потужності нагрівача, приєднувався до лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) 4. ЛАТР підключався до мережі змінного струму 220 В через стабілізатор напруги 5.

Нагрівач 2 було виготовлено із двох мідних пластин. На поверхні однієї з них було припаяно мідні капіляри, які формували канавку, в яку вкладався ПТТ. Інша пластина була притискною. На зовнішніх поверхнях обох пластин було припаяно мідні трубки, всередині яких знаходились електричні нагрівачі, виконані у вигляді спіралей із ніхромового дроту, намотаних на керамічні осердя. Для зменшення контактного термічного опору між ПТТ та нагрівачем використовувалась теплопровідна паста КПТ-8.

Відведення теплоти від ПТТ забезпечувалось теплообмінником-холодильником 6. Охолоджувальна вода до нього подавалась із напірного бака 7 через клапан 8, який використовувався для регулювання витрати, та ротаметр 9, призначений для її вимірювання. Конструкція холодильника 6 аналогічна конструкції нагрівача, проте через зовнішні трубки пропусkalась охолоджуюча вода, яка після проходження через холодильник зливалась у зливний отвір 12. Діапазон витрат охолоджуючої води склав 2,9-7 г/с., а її температура 10-15°C.

Система вимірювання температури складалась із десяти мідь-константанових термопар ТП1-ТП10, модуля збирання даних (МЗД) 10 та персонального комп'ютера (ПК) 11. Вісім термопар ТП1-ТП8 встановлювались на зовнішній поверхні ПТТ за допомогою пайки. При цьому ТП1-ТП4 були встановлені в ЗН, а ТП5-ТП8 – в ЗК. Термопар ТП9 та ТП10 використовувались для вимірювання температури охолоджуючої води на вході та виході з холодильника 6 відповідно. За показами цих термопар калориметричним методом визначалась теплова потужність, яку передавала ПТТ. Всі термопары приєднувались до МЗД 10, який мав вбудований компенсатор холодного спаю, оцифровував покази термопар та передавав їх на ПК 11. Спеціальне програмне забезпечення, встановлене на ПК дозволяло відстежувати зміни показів термопар в реальному часі та виконувати їх запис.

При проведенні дослідів спочатку встановлювався певний рівень витрати охолоджувальної води. Після стабілізації показів всіх термопар на нагрівач подавалась початкова потужність, що складала 10 Вт. Стационарний режим, настання якого фіксувалось за відсутністю зростання температури на будь-якій з термопар, витримувався не менше двох хвилин. Після цього потужність збільшувалась до 20 Вт. Подальший крок збільшення потужності складав 20 Вт. На кожній потужності стационарний режим витримувався не менше двох хвилин. Дослід припинявся, коли температура в ЗН перевищувала 180°C, оскільки це могло призвести до плавлення припою, що використовувався як для кріплення термопар на поверхню ПТТ, так і в конструкції нагрівача. Покази термопар записувались неперервно під час кожного досліду.

За отриманими під час проведення дослідів даними визначались: перепад температур між ЗН та ЗК та термічний опір ПТТ.

Результати дослідження. Графік залежності перепаду температур ΔT між ЗН та ЗК від переданого теплового потоку Q_p для різних витрат охолоджуючої води приведено на рис. 3.

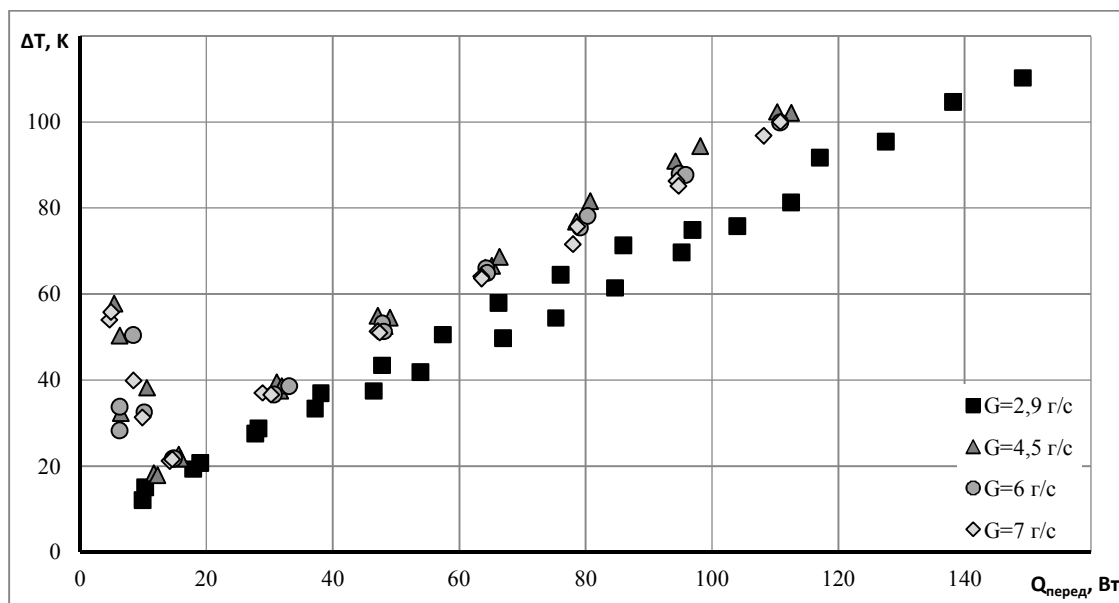


Рис. 3 – Залежність перепаду температур по пульсаційній тепловій трубі від переданого теплового потоку

Як видно з рис. 3, найнижчий перепад температур спостерігається при найнижчому значенні витрати охолоджуючої води 2,9 г/с. В середньому він на 20-22% нижче, ніж при інших, вищих, значеннях витрати. При цьому зміна витрати від 4,5 до 7 г/с не здійснює помітного впливу на перепад температур. Високі значення перепаду температур в діапазоні витрат від 4,5 до 7 г/с при переданих потужностях нижче 20 Вт пояс-

нюються переходом ПТТ від термосифонного режиму роботи до пульсаційного (більш детальну інформацію щодо основних режимів роботи ПТТ можна знайти в [4]).

Вплив витрати на термічний опір ПТТ у вигляді графіка залежності опору від переданого теплового потоку представлено на рис. 4.

В загальному, тенденція впливу витрати на термічний опір аналогічна впливу на перепад температур. При цьому слід зазначити, що чим менший опір має ПТТ, тим більшим буде коефіцієнт теплопередачі між гарячим та холодним теплоносіями в ТОА на ПТТ. Тобто, виходячи з даних, представлених на рис. 4, ТОА на ПТТ працюватиме ефективніше при менших витратах холодного теплоносія. Крім того варто відзначити, що при найменшій витраті 2,9 г/с ПТТ передавала на 35% більші теплові потоки, ніж при вищих значеннях витрати.

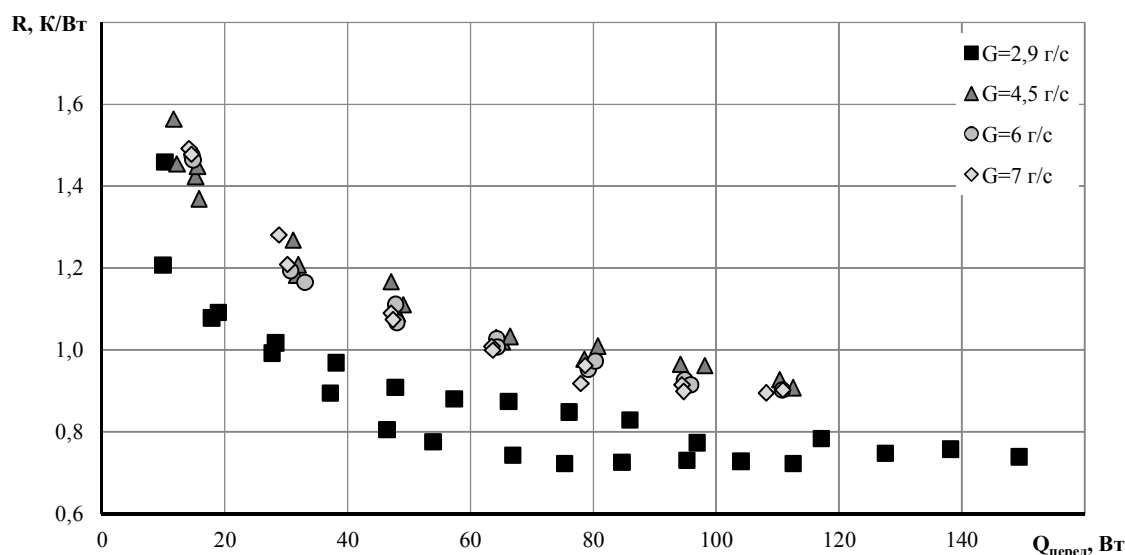


Рис. 4 – Залежність термічного опору пульсаційної теплової труби від переданого теплового потоку

Отримані результати можна пояснити тим, що зі збільшенням витрати охолоджуючого середовища зростає інтенсивність тепловідведення від зовнішньої поверхні стінок ПТТ в ЗК. Це призводить до зниження температури цих стінок і, як наслідок, зростання інтенсивності конденсації пари на внутрішній поверхні стінок. Через це кількість пари всередині ПТТ зменшується і, відповідно, зменшується і внутрішній тиск в ПТТ. При цьому в ЗН відбувається кипіння рідини, і зменшення тиску призводить до збільшення відривного діаметру парових бульбашок. Внаслідок цього бульбашки займають більшу площу поверхні стінки в ЗН, що призводить до зниження інтенсивності теплообміну в ЗН і, як наслідок, до зростання температури стінки в цій зоні. Таким чином, збільшення витрати охолоджуючого середовища призводить до зростання як перепаду температур, так і термічного опору ПТТ.

Висновки. В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. При витраті охолоджуючої води 2,9 г/с досліджена ПТТ має на 20-22% нижчий перепад температур та термічний опір, і на 35% вищу передану теплову потужність, ніж при вищих значеннях витрати.
2. Зміна витрати в діапазоні від 4,5 до 7 г/с не здійснює помітного впливу на перепад температур та термічний опір ПТТ.
3. Для підвищення коефіцієнту теплопередачі в ТОА на ПТТ можна рекомендувати знижувати витрату холодного теплоносія.

References

1. Akachi, H. (1990). U.S. Patent No. 4,921,041. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
2. Hongbin Ma (2015). Oscillating Heat Pipes. New York, NY: Springer.
3. Kravets, V.Yu. (2018). Heat transfer processes in miniature evaporation-condensation cooling systems. Kharkiv: FOP Brovin O.V.
4. Alekseik, E.S., Kravets, V.Yu. (2012). Flow Patterns Of Basic Operating Modes Of Oscillating Heat Pipes. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 4/8(58), 36-42.
5. Mahajan, G., Thompson, S.M., Cho, H. (2018). Experimental characterization of an n-pentane oscillating heat pipe for waste heat recovery in ventilation systems. Heliyon, vol. 4, iss. 11, Art. no. e00922, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00922.
6. Mahajan, G., Thompson, S.M., Cho, H. (2017). Energy and cost savings potential of oscillating heat pipes for waste heat recovery ventilation. Energy Reports, vol. 3, 46-53 doi: 10.1016/j.egyr.2016.12.002.

7. Mahajan, G., Cho, H., Smith, A., Thompson, S.M. (2020). Experimental Analysis of Atypically Long Finned Oscillating Heat Pipe for Ventilation Waste Heat Recovery Application. *Journal of Thermal Science*, 29, 667-675, doi: 10.1007/s11630-019-1178-5.
8. Honghai Yang, Jun Wang, Ning Wang, Fengchang Yang, (2019). Experimental study on a pulsating heat pipe heat exchanger for energy saving in air-conditioning system in summer. *Energy & Buildings*, vol. 197, 1-6, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.05.032.
9. Alekseik, E.S., Kravets, V.Yu. (2013). Oscillating heat pipe cooler for heat-generating elements of electronics. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 1, 19-24.
10. Betancur, L.A., Mangini, D., Mameli, M., Filippeschi, S., Slongo, L.K., Paiva, K... Marengo M. (2016). Condenser Temperature Effect on the Transient Behavior of a Pulsating Heat Pipe, In Proc. Joint 18th International Heat Pipes Conference and 12th International Heat Pumps Symposium, Jeju, Korea, June 12-16, 2016.
11. Alekseik, E.S., Kravets, V.Yu. (2014). Dependence of heat transfer characteristics of the single loop pulsating heat pipe on evaporator length and space orientation, In Proc. XV International Scientific-Practical Conference «Modern information and electronic technologies». Odessa, Ukraine: Politekhperiodika.
12. Zhanxiao Kang, Dahua Shou, Jintu Fan (2021). Numerical study of a novel Single-loop pulsating heat pipe with separating walls within the flow channel. *Applied Thermal Engineering*, vol. 196, Art. no. 117246, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2021.117246](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117246).
13. Zhanxiao Kang, Dahua Shou, Jintu Fan (2022). Numerical study of single-loop pulsating heat pipe with porous wicking layer. *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 179, Art. no. 107614, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107614.

FLOW RATE OF COLD HEAT CARRIER INFLUENCE ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF PULSATING HEAT PIPE FOR HEAT EXCHANGER

Alekseik Ye.S., Ph.D., Prof. Kravets V.Yu., Doctor of Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Abstract. Pulsating heat pipes (PHP) are high efficient heat transfer devices and one of the novel types of heat pipes. Applying of such heat pipes as main heat transfer elements of recuperative heat exchangers, which are widely used in power engineering, energy saving, chemical and food industry, is one of perspective ways. Heat transfer characteristics of such apparatus depend on many factors. Flow rate of heat carriers can be named as one of the most important among them. That's why investigation of its influence on characteristics of these heat exchangers is necessary. Providing of such investigation not only on whole heat exchanger, but also on its main elements, i.e. PHP, is expedient for better understanding of these influences. And studying on single loop PHP allow to eliminate effect of other turns.

Results of experimental investigation of cooling medium influence on heat transfer characteristics of copper single loop PHP with water as heat carrier and filling ratio of 45 % are presented in this work. Inner diameter of PHP was 3,1 mm, overall length – 212 mm, length of heating zone – 70 mm, length of condensation zone – 142 mm. PHP was investigated in vertical bottom heating position in the range of input heat power 10-140 W. Flow rate of cooling water was 2,9-7 g/s and its temperature 10-15°C. As a result of provided investigation it was found out that temperature difference and thermal resistance of PHP is 20-22 % lower and transferred heat power 35 % higher at flow rate of 2,9 g/s than these ones at the higher values of flow rate. Flow rate changing in the range 4,5-7 g/s has no significant influence on temperature difference and thermal resistance of PHP. Based on this, decreasing of cold heat carrier flow rate can be recommended for increasing of heat transfer coefficient in heat exchangers based on PHP.

Keywords: heat exchanger, pulsating heat pipe, flow rate of cooling medium, temperature difference, thermal resistance.

Список використаної літератури

1. Akachi, H., Structure of a heat pipe, 1990., US Patent 4921041.
2. Hongbin Ma, Oscillating Heat Pipes, New York, NY, USA: Springer, 2015, 427 p.
3. Кравець В.Ю., Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2018 – 288 с.
4. Алексеев Е.С., Кравец В.Ю., Картины движения теплоносителя в основных режимах работы пульсационных тепловых труб. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №4/8 (58). – с. 36-42. doi: [10.15587/1729-4061.2012.5729](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.5729).

5. G. Mahajan, Scott M. Thompson, Heejin Cho, Experimental characterization of an n-pentane oscillating heat pipe for waste heat recovery in ventilation systems. *Heliyon*, vol. 4, iss. 11, 2018, Art. no. e00922, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00922.
6. G. Mahajan, S.M. Thompson, H. Cho, Energy and cost savings potential of oscillating heat pipes for waste heat recovery ventilation. *Energy Reports*, vol. 3, pp. 46-53, 2017, doi: 10.1016/j.egyr.2016.12.002.
7. G. Mahajan, H. Cho, A. Smith, S.M Thompson, Experimental Analysis of Atypically Long Finned Oscillating Heat Pipe for Ventilation Waste Heat Recovery Application. *Journal of Thermal Science*, iss. 29, pp. 667-675, 2020, doi: 10.1007/s11630-019-1178-5.
8. Honghai Yang, Jun Wang, Ning Wang, Fengchang Yang, Experimental study on a pulsating heat pipe heat exchanger for energy saving in air-conditioning system in summer. *Energy & Buildings*, vol. 197, pp. 1-6, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.05.032.
9. Алексеик Е.С., Кравец В.Ю., Система отвода теплоты от теплонагруженных элементов РЭА на основе пульсационной тепловой трубы. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2013. – №1. – с. 19-24.
10. L.A. Betancur, D. Mangini, M. Mameli [et al.], Condenser Temperature Effect on the Transient Behavior of a Pulsating Heat Pipe. In *Proc. Joint 18th IHPC and 12th IHPS*, Jeju, Korea, June 12-16, 2016.
11. Алексеик Е.С., Кравец В.Ю., Зависимость теплопередающих характеристик одновитковой пульсационной тепловой трубы от длины зоны нагрева и ориентации в пространстве. *Труды XV Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии»* – Одесса, 2014 – т.2. – с. 16-17.
12. Zhanxiao Kang, Dahua Shou, Jintu Fan, Numerical study of a novel Single-loop pulsating heat pipe with separating walls within the flow channel. *Applied Thermal Engineering*, vol. 196, 2021, Art. no. 117246, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2021.117246](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117246).
13. Zhanxiao Kang, Dahua Shou, Jintu Fan, Numerical study of single-loop pulsating heat pipe with porous wicking layer. *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 179, 2022, Art. no. 107614, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107614.

Отримано в редакцію 23.05.2022
Прийнято до друку 26.09.2022

Received 23.05.2022
Approved 26.09.2022

RESEARCH OF THE KINETICS OF THE DRYING PROCESS OF COMBINED PLANT MATERIALS

Petrova Z.O., Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher,
Slobodianiuk K.S., Ph.D., Senior Researcher, Samoilenko K.M., Ph.D., Senior Researcher,
Vishnevsky V.M., graduate student, Grakov O.P., graduate student
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. *The general trend of energy consumption, which leads to an increase in the amount of energy consumed in the world, has shown that its cost is constantly increasing, and the shortage of energy carriers is increasing. So, the problem of creating and large-scale implementation of modern energy-efficient heat-technologies, which ensure the reduction of energy consumption and the maximum preservation of the high quality of the dehydrated product, is relevant today.*

In order to solve the above-mentioned problem, this work has developed an innovative pre-treatment of combined plant materials. A study of pH results for different ratios of red beetroot with rhubarb/tomato is presented. We managed to obtain the most optimal content of components in the red beetroot:rhubarb mixture as 2:1, with a pH value of 3.75, and betanin in the studied material after drying remains at the level of 96.5% for red beetroot:tomato - 3:1, in which pH is 3.9, and betanin is 94.7%. Also, with the preservation of earnings and increasing the functionality of the phytoestrogen properties of plant raw materials, the conditions for the stabilization of plant ingredients have been developed. Mixtures of plant materials with different ratios of initial components of plant origin were created and optimal drying modes were developed.

The kinetics of the drying process of combined plant materials with their preliminary preparation was experimentally investigated.

On the basis of the obtained data on the change in the nature of the Rebinder number depending on the humidity, the combined plant material and the temperature of the heat carrier, staged drying regimes were developed.

The theoretical processing of the obtained experimental data on the red beetroot:tomato mixture was performed according to the method of V.A. Danilov. The generalized drying kinetics curves of the red beetroot:tomato mixture coincide with the fast drying regimes.

The duration of the drying process of the soybean:spinach mixture on the experimental convective stand was calculated according to the method of V.V. Krasnikov. The generalized curve of the drying kinetics of the soybean:spinach mixture made it possible to apply the relative drying coefficients. And it became possible to calculate the total drying time of the soybean:spinach mixture. The deviation of the calculated value from the experimental duration of drying does not exceed 5%.

Keywords: heat and mass transfer, drying kinetics, drying rate, Rebinder, combined functional materials.

Statement of the problem. An analysis of modern scientific sources confirmed the need to create and develop highly efficient heat-technologies that ensure minimal energy consumption and high quality of the material [1-3]. Drying processes in the world consume from 10 to 12% of all energy [4]. They are determined by the processes of heat and mass transfer. The efficiency of drying and the economy of the use of material and energy resources depend on their intensity [5].

The main problems when using the convective drying method are: significant heat loss with the spent drying agent; insufficient intensity of the dehumidification process when using low drying temperatures; Dependence of the efficiency of the dryer on the humidity of the atmospheric air [6]. The solution to these problems is offered through: utilization of the heat that comes with the spent drying agent; forced drying of the drying agent in order to intensify mass transfer; controlled conditions of the dewatering process [7].

Increasing the energy efficiency of heat and mass transfer for drying combined functional materials (functional materials of plant origin are thermolabile colloidal capillary-porous materials) in combination can positively affect the economy [7].

Research objects and preparation of combined functional materials for drying. Drying is one of the main methods of processing functional plant raw materials [8]. The quality and biological value of dried products depends on the preparation of raw materials for drying, the temperature regime of drying, the duration of thermal exposure to the product. Some dried products are classified as functional foods (according to the classification of the main plant functional ingredients by Doctor of Technical Sciences Petrova Zh.A.), such as antioxidant based on red beetroot and phytoestrogenic based on soy [4].

The main raw material, with a high content of betanine and antioxidant properties, is red beetroot. Natural pigments refer to natural food ingredients and dyes, which have attracted considerable attention as antioxidants, have a beneficial effect on human health and disease prevention [5].

Beetroot betanin is one of the strongest antioxidants and, when dried, is destroyed not only by the temperature of the coolant, but also by the pH of the medium. For complete drying of betanin, an acidic environment is needed. The pH value of red beetroots approaches neutral, so vegetable raw materials with a high content of organic acids were added to it to obtain the optimal pH. The pH was studied for various ratios of red beetroot and rhubarb or tomato. We managed to obtain the most optimal ratio of red beetroot-rhubarb (2:1), while the pH value is at which pH is 3.75, and betanin in the test material after drying remains at the level of 96.5 % for red beetroot-tomato - 3:1, at which pH is 3.9 and betanin is 94.7 %.

Soy is considered the main supplier of phytoestrogens and contains a large amount of protein and fat. Soybeans and other legumes containing proteins are considered an environmentally friendly source of protein [9].

In order to preserve and increase the functionality of the phytoestrogenic properties of plant raw materials, the conditions for stabilizing herbal ingredients were developed. Which provide for the preliminary hydrothermal treatment of soybeans and its blending to prevent enzymatic and non-enzymatic browning during the temperature exposure during the drying period.

We have improved the preliminary hydrothermal preparation of soybeans for drying [10], which was developed by us earlier [11]. This made it possible to inactivate anti-food components in soy and make the process of heat and moisture transfer more intense.

Soy contains a high amount of fats, which, after grinding the pre-treated hydrothermally, are oxidized [12]. Sweet potato and spinach carotenoids are natural fat stabilizers [12]. Based on these properties of the material after hydrothermal treatment, soybeans were blended with carotene-containing vegetables such as spinach and sweet potato [12].

After the research on the preliminary preparation of raw materials, combined functional materials were developed: soy-spinach and soy-sweet potato mixtures, the soy-vegetable ratio was 1:1.

Preliminary preparation of combined functional materials (antioxidant and phytoestrogenic) further reduced the overall duration of the process.

Research of the kinetics of convective drying of combined functional materials. At the Institute of Technical Thermal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, studies were carried out on the processes of convective drying of combined functional materials (antioxidant and phytoestrogenic) on an experimental convective stand [9]. The stand is technically provided with automatic collection and processing of information by the application program «Sooshka», developed by the staff of the Institute.

Research results in the form of drying curves $W = f(\tau)$ and drying speed $\frac{dW}{d\tau} = f(W)$ shown in the figs. 1, 2, 3, 4 and 6.

Our previous studies [5] of the kinetics of drying the antioxidant red beetroot-tomato mixture, where the red beetroot is cut into a plate and chips, confirmed the assumption that when cutting the red beetroot with chips, the drying process is intensified by 1.4 times compared to the plate [5]. This was also confirmed by the drying rate curves [5]. Therefore, further studies were carried out with cutting red beetroots into shavings.

The effect of the coolant temperature on the drying kinetics of the red beetroot-tomato mixture (component ratio 3:1) was studied in a wide temperature range (Fig. 1, a). With an increase in the temperature of the coolant, the intensity of the drying process of the composition increases. From fig. 1, a, it can be seen that at the coolant temperature 60 °C the duration of the process is 100 min, which is 1.8 times longer than at a temperature 100 °C [13].

Accordingly, from fig. 1, b, the maximum drying rate is traced at the temperature of the coolant 100 °C – 3,8 %/min (curve 4), and the minimum - 2,2 %/min at heat carrier temperature 60 °C (curve 1). The shape of the drying rate curves is typical for colloidal capillary-porous materials and the main dehydration process takes place completely in the second period.

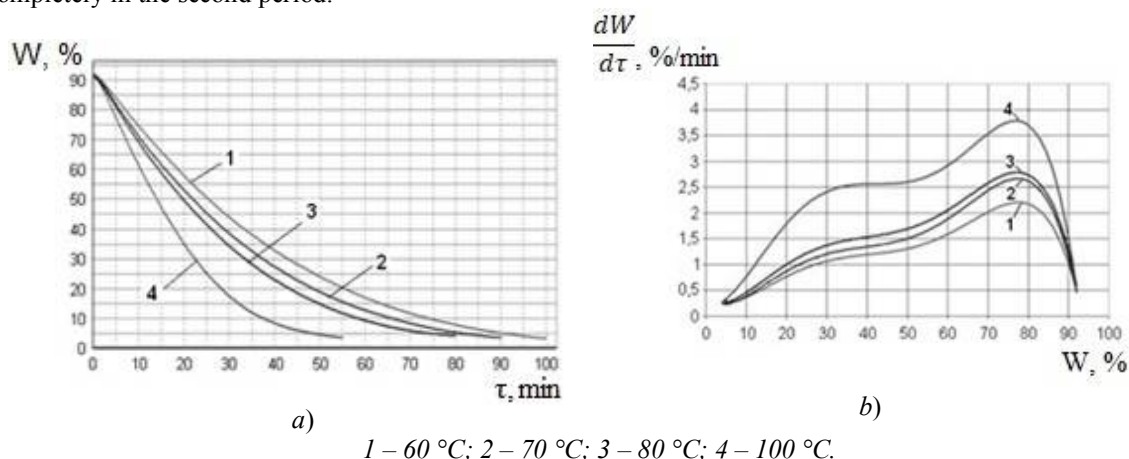


Fig. 1 – Kinetics (a) and velocity (b) of drying the red beetroot-tomato mixture depending on the temperature of the coolant (regime parameters: $v = 3,5$ m/sec, $\delta = 10$ mm, $d = 10$ g/kg dry air)

The influence of the mixture components on the kinetics of the drying process was studied (fig. 2). The mixture (fig. 2, a curve 1) reaches the final moisture content 1.5 times faster than red beetroot (fig. 2, a curve 3).

On the curves of the drying rate of the components and the mixture itself (fig. 2, b) it can be seen that the maximum drying rate in the beetroot-tomato mixture is 3.0% / min, the drying rate of red beetroot is 2.1%, the lowest drying rate in tomato – 1.6%/min. This is due to the influence of tomato organic acids on the cell membrane of red beetroot and, possibly, a change in the ratio of free and bound moisture.

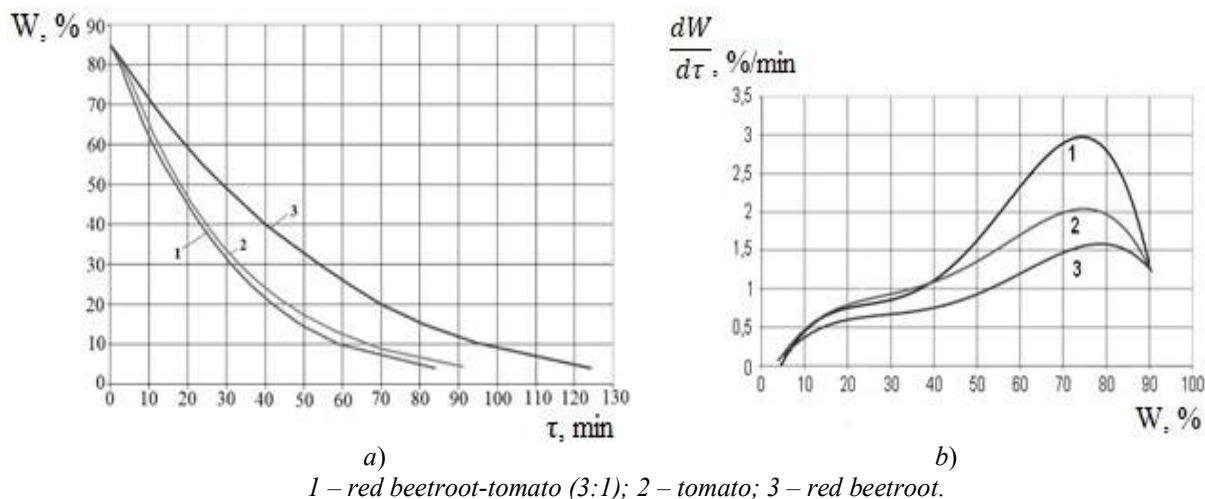


Fig. 2 – Kinetics (a) and velocity (b) of drying red beetroot, tomato, and their mixture (mode parameters: $t = 60^\circ\text{C}$ $v = 3.5 \text{ m/s}$, $\delta = 10 \text{ mm}$, $d = 10 \text{ g/kg dry air}$)

The influence of the composition components on the kinetics of the drying process was also studied on phytoestrogen raw materials - soy-vegetable compositions, where the vegetable component was spinach and sweet potato.

On fig. 3, a presents the drying kinetics (curves 1-3) and temperature curves (curves 1'-3') soy, spinach and their mixtures (ratio of components 1:1) [9].

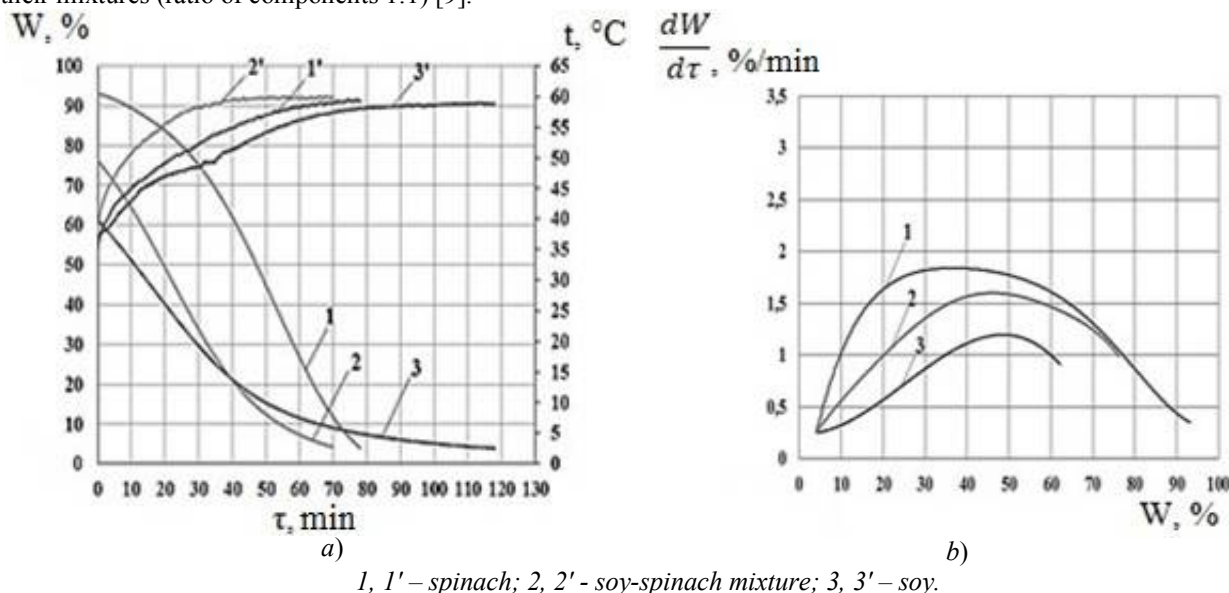


Fig. 3 – Kinetics (a, 1-3), temperature curves (a, 1'-3') and velocity (b) of drying soybean, spinach and their mixture (mode parameters: $t = 60^\circ\text{C}$ $v = 2.5 \text{ m/s}$, $\delta = 15 \text{ mm}$, $d = 10 \text{ g/kg dry air}$)

Data on the change in temperature inside the layer of the soybean-spinach mixture depending on the duration of the process (fig. 3, a, curves 1', 2', 3') confirm the reduction in the time to reach the set temperature regime of 60°C (40 min), which is 2x faster than soy.

The drying velocity curves (fig. 3, b) have a characteristic form of colloidal capillary-porous materials and show that the main drying process, the removal of free and bound moisture, occurs in period II, during the period of decreasing speed.

Data on the change in the drying rate depending on the moisture content of the material indicate that the mixture of soybean-spinach components (fig. 3, b curve 2) has a maximum drying rate ($N_{\max}$) – 1.6%/min, 1.34 times higher

N_{max} hydrothermic pre-treated soybeans – 1,19 %/min (fig. 3, *b* curve 3). By adding spinach, which has a maximum drying rate of 1.8%/min.

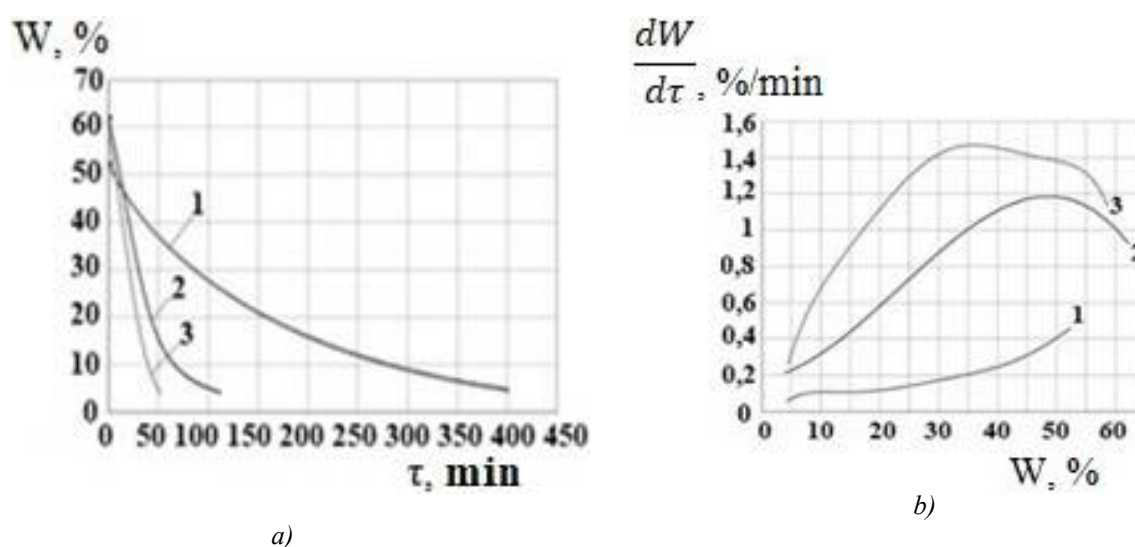
Due to the creation of a soy-spinach mixture, the drying process of spinach is intensified by 10 % and soybeans by 41 %.

The study of the influence of components on the kinetics of the drying process was also carried out on samples of a soybean-sweet potato mixture, with a vegetable component - Vietnamese sweet potato, which was grown on the soils of the Socialist Republic of Vietnam.

Drying curve shapes, fig. 4 also have the characteristic appearance of colloidal capillary-porous materials. The use of a high-temperature drying mode above 65-70 °C leads to the destruction of carotene, which is contained in sweet potato, therefore it is advisable to use the drying mode at a coolant temperature of 60 °C (fig. 4).

Vietnamese sweet potato ($W_{st} = 52$ %) – hard-drying drying object. It takes 6 hours 40 min to dry it to a final moisture content of 4-6%. On fig. 4, *a* it can be seen that with the combination of soybeans ($W_{st} = 62$ %) with sweet potatoes in a mixture with a ratio of components 1: 1 ($W_{st} = 58$ %), there is a significant reduction in the duration of drying, relative to sweet potato, - 8 times and the total drying time is 50 minutes.

Curves of changes in the drying rate depending on the moisture content W of the material (fig. 4, *b*) confirm the feasibility of developing a soybean-sweet potato mixture (fig. 4, *b*, cr. 3). It is characterized by higher drying velocity, the maximum drying velocity $N_{max} = 1,45$ %/min, in comparison with the drying rate of soybean (fig. 4, *b*, curve 2) and sweet potato (fig. 4, *b*, curve 1).



1 – sweet potato; 2 – soy; 3 – soy-sweet potato mixture.
Fig.4 – Kinetics (a) and velocity (b) of drying soybean, sweet potato and their mixture.
 (mode parameters: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 2.5$ m/s; $d = 10$ g/kg d.m., $\delta = 15$ mm)

One of the characteristics of the kinetics of the drying process is the Rebinder number (Rb), which determines the ratio of the amount of heat spent on heating the material and on the evaporation of moisture in an infinitely small period of time [9]:

$$Rb = b \frac{\bar{c}}{r} = \frac{\bar{c}}{r} \left(\frac{d\bar{t}}{d\bar{W}} \right) \quad (1)$$

Based on the studies: antioxidant (red beetroot-tomato) and phytoestrogenic (soy-spinach) mixtures, the dependence of the change in the Rebinder number on moisture content (in %) of the material was calculated and graphically depicted.

Fig. 5, *a* shows that the number Rb depends on the temperature of the heat carrier and the moisture content of the material on the example of a red beetroot-tomato mixture. At the beginning of the drying process, the material warms up with a decrease in its moisture content, while the Rb number decreases. In the humidity range of 85 - 20%, the value of the Rb number is minimal. At this moment, in the vast majority the heat is spent on removing moisture from the material. From a material moisture content of 15%, the Rb number increases sharply, so, the most of the heat is spent on heating the material. The nature of the change in the Rb number proves the effectiveness of the introduction of phased drying modes [5].

On fig. 5, *b* shows that at both 60 °C and 100 °C heat carrier temperatures Rb has two maxima and two minima in the humidity range of 70-30 %, but the difference between Rb_{max} and Rb_{min} much more for 100 °C, which confirms the "softness" of the temperature effect of the coolant on the thermolabile material at 60 °C [12].

Based on the data obtained, phased drying modes were developed for red beetroot-tomato (Fig. 6, a) and soy-spinach (fig. 6, b) mixtures.

Developed step-by-step dehydration modes $t = 100/60$ °C, $v = 3.5$ m/sec, $\delta = 10$ mm (red beetroot-tomato mixture) and $t = 100/60$ °C, $v = 2.5$ m/sec, $\delta = 15$ mm (soy-spinach mixture) intensify the process, reduce the drying time of the red beetroot-tomato mixture by 50% and the soy-spinach mixture by 21%. The use of which made it possible to preserve the nutrients, color and taste of the original components.

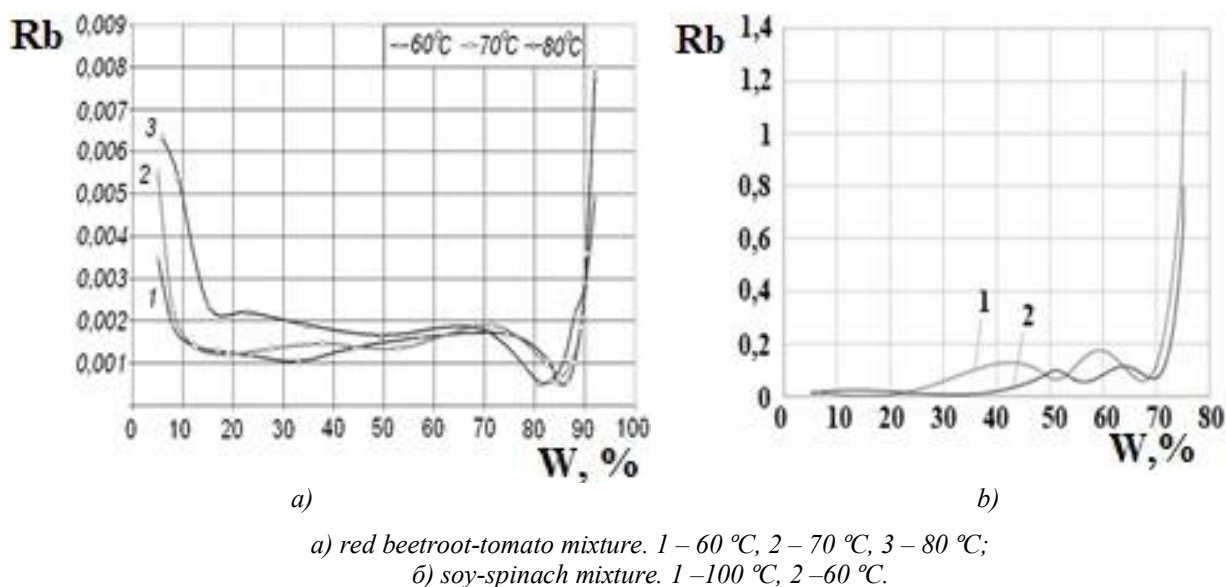
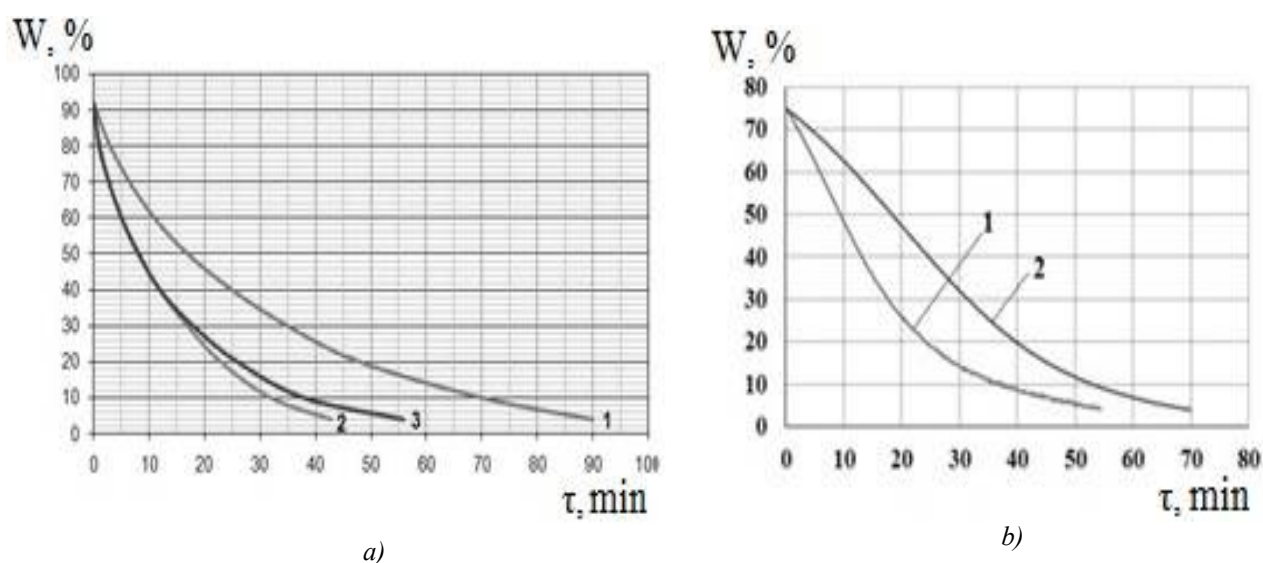


Fig. 5 – Dependence of the Rebinder number on the humidity of the combined functional material and the temperature regime of the heat carrier



a) red beetroot-tomato mixture ($v = 3.5$ m/sec, $\delta = 10$ mm, $d = 10$ g/kg dry air): 1 – 60 °C; 2 – 100 °C; 3 – 100/60 °C,

b) soy-spinach mixture ($v = 2.5$ m/sec; $\delta = 15$ mm, $d = 10$ g/kg dry air): 1 – 100/60 °C, 2 – 60 °C.

Fig. 6 – Kinetics of drying combined functional materials depending on the temperature of the heat carrier

Theoretical processing of the obtained experimental data of the antioxidant composition was carried out using the method of V.A. Danilov [14]. On fig. 7, a shows the drying curve of the red beetroot-tomato mixture, which is transferred to the coordinate system $W - (\tau/\tau_r)$ and transformed into a single generalized drying curve.

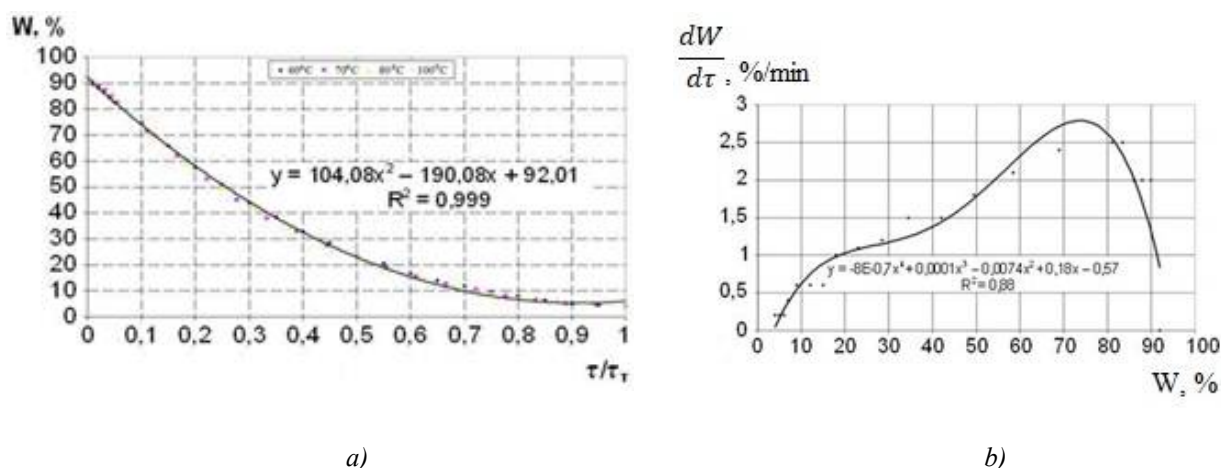


Fig. 7 – Generalized drying kinetics curve in coordinates $W - (\tau/\tau_r)$ (a) and a generalized drying velocity curve (b) of the red beetroot-tomato mixture

Generalized curves of the kinetics of drying the red beetroot-tomato mixture by the Danilov V.A. coincide with different drying regimes (fig. 7, b). A generalized drying curve can be built from one research curve for drying a red beetroot-tomato mixture obtained in any drying mode, which greatly simplifies the study of drying kinetics.

By graphical differentiation of the generalized drying kinetics curve, as shown in fig. 7, a, we obtained a generalized drying velocity curve for the red beetroot-tomato mixture, which is represented by a smooth curved line (fig. 7, b).

The duration of the drying process of the phytoestrogenic mixture based on soy and spinach on an experimental convective stand was calculated according to the method of Krasnikov V.V. [15]. Generalized drying curves in coordinates $W - (N\tau)$ are shown in Figure 8. Combining the drying curves obtained under different modes into one curve confirms that the generalized drying curve adequately describes the process and does not depend on the drying mode.

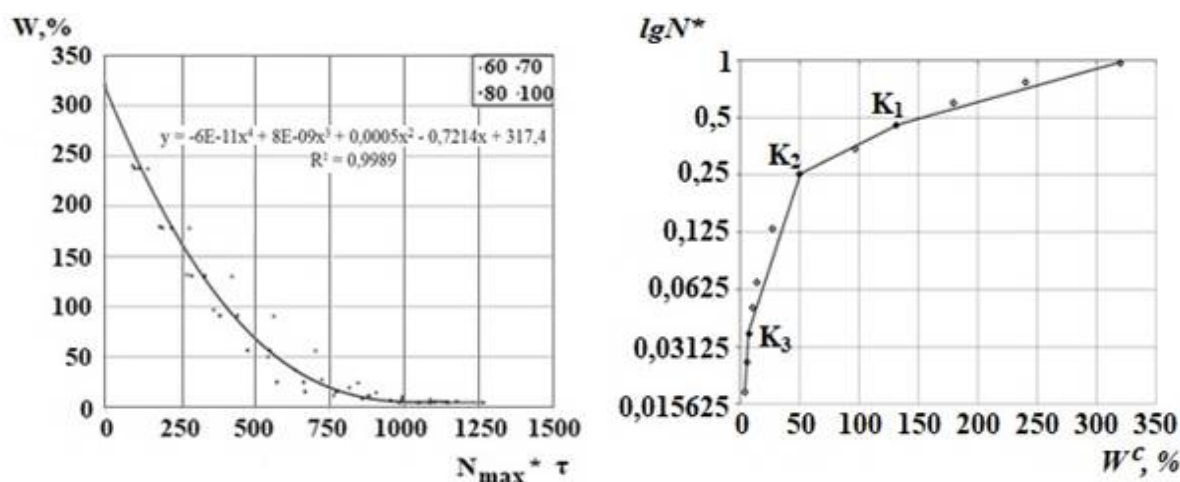


Fig. 8 – Generalized curve of the kinetics of drying the soybean-spinach mixture depending on the influence of the heat carrier temperature: 60 °C; 70 °C; 80 °C; 100 °C

Fig. 9 – Generalized curve of the drying rate of the soybean-spinach mixture depending on the influence of the heat carrier temperature: 60 °C; 70 °C; 80 °C; 100 °C

After graphical differentiation of the generalized drying kinetics curve shown in fig. 8, a generalized drying velocity curve was obtained, which is determined through the equation $N^* = \left| \frac{dW}{d\tau} \right| \div N = \frac{dW}{Nd\tau} = tg(W, N\tau) = f(W)$.

Value N^* does not depend on the drying mode and is a function of humidity.

Fig. 9 shows that the generalized drying velocity curve is shown in semi-logarithmic coordinates, in the form of a broken line, which consists of four straight lines. What indicates the difference in the kinetics and dynamics of drying in different periods of the process.

The generalized curve of the drying kinetics of the soybean-spinach mixture made it possible to determine the relative drying coefficients. And it became possible to calculate the total duration of drying the soy-spinach mixture.

The total drying time is determined through the equation $\tau = \frac{1320}{N}$. The deviation of the values of the calculated from the experimental duration of drying of the soybean-spinach mixture does not exceed 5 %.

Studies of the qualitative characteristics of combined functional materials additionally confirmed the feasibility of using a phased drying regime $t=100/60$ °C, $v = 3,5$ m/sec, $\delta = 10$ mm, $d = 10$ g/kg dry air for red beetroot-tomato and $t=100/60$ °C, $v = 2,5$ m/sec, $\delta = 15$ mm, $d = 10$ g/kg dry air for soy-spinach mixtures. The results of studies [5, 12] showed that the maximum value of betanin retention in a mixture based on red beetroot 96-97% corresponds to the temperature regime of drying $100/60$ °C. For a mixture based on soybean, an important indicator is the acid number, which characterizes the degree of lipid oxidation in the biochemical composition of soybeans during drying and further storage. Drying temperature $100/60$ °C for soy-based mixtures, it helps to avoid critical values of the acid number.

Lykov A.V. in [16] pointed out that drying is not only a heat engineering, but also a technological process that affects the biochemical properties of the studied materials. Thus, we have achieved not only the intensification of the drying process, but also the preservation of high quality biochemical characteristics of the dehydrated material.

Conclusions. Preliminary preparation of combined functional materials (antioxidant and phytoestrogenic) further reduced the overall duration of the process.

Studies of the kinetics of convective drying of antioxidant raw materials confirmed that it is possible to reduce the duration of the process: 1) by 1.4 times - by changing the shape of a red beetroot sample from plates to chips; 2) an increase in the temperature of the coolant from 60 °C to 100 °C will speed up the drying process by 1.8 times, but this will destroy the red beetroot betanin and it will lose its functional properties; 3) blending red beetroot with tomato in a ratio of 3:1 will allow reaching the final moisture value 1.5 times faster compared to red beetroot and will keep betanin at the maximum level - 96.5%.

It is also possible to intensify the process of convective drying of phytoestrogenic raw materials through the combination of pre-hydrothermally treated soybeans with spinach / sweet potato. Due to the creation of a phytoestrogenic soy-spinach mixture with a ratio of components 1:1, a reduction in the total duration of the spinach dehydration process by 10% and soybean by 41% was achieved, which can also affect the reduction of energy costs.

It was found that when soybeans are combined with Vietnamese sweet potato in a mixture with a ratio of components 1: 1, the drying time is reduced, relative to sweet potato, - 8 times.

Based on the data obtained on the nature of the change in the Rebinder number depending on humidity, the combined functional material and the temperature of the coolant, phased drying modes for functional materials were developed.

The developed step-by-step dehydration regimes intensify the process, reducing the drying time of the antioxidant red beetroot-tomato mixture by 50% and the phytoestrogenic soy-spinach mixture by 21%. The use of which made it possible to preserve the nutrients, color and taste of the original components.

References

1. Duenha, J.L., Cássia, R., & Scaramal, G. (2018). 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.
2. Kowalski, S. J., & Łechtańska, J. M. (2015). Drying of red beetroot after osmotic pretreatment: Kinetics and quality considerations. *Chemical and Process Engineering*, 36(3), 345-354.
3. Chua, K. J., Mujumdar, A. S., Hawlader, M. N. A., Chou, S. K., & Ho J. C. (2001). Convective drying of agricultural products. Effect of continuous and stepwise change in drying air temperature. *Drying Technology*, 19, 1949-1960. doi: 10.1081/DRT- 100107282.
4. Petrova, Zh. O., Slobodianiuk, K. S., Samoilenko, K. M., Vishnevsky, V. M. (2020). Universal'ni rezhymy tekhnologichnoyi pererobky koloidnykh kapilyarno-porystykh materialiv metodom konvektivnoho sushynnya (Universal modes of technological processing of colloidal capillary-porous materials by convective drying.). *Enerhetyka ta avtomatyka*, 6. doi: <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.06.015>. (in Ukrainian).
5. Petrova, Zh., Sniezkin, Yu., & Samoilenko, K. (2021). Blending and drying of antioxidant raw materials. Vinnitsa: LLC "Tvory".
6. Sniezkin, Yu.F. (2005) Sostoyanie i perspektivy razvitiya sushilnoy tekhniki v Ukraine. Trudy 2-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennyye energosberegayushchie teplovyie tekhnologii", Moskva. (in russian)
7. Sniezkin Yu.F. (2009). Puti intensivifikatsii protsessov sushki. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 31(7), 89-90. (in russian)
8. Petrova Zh.O. (2013). Stvorennaya energoefektivnih teplotekhnologiy virobnitstva funktsionalnih harchovih poroshkiv. Avtoreferat doktorskoyi disertatsiyi ITTF NAN Ukrayini. (Indeks rubrikatora NBUV: L812.9 L910.26). (in Ukrainian)
9. Petrova, Zh. O., & Slobodianiuk, K. S. (2019). Energy-efficient modes of drying of colloidal capillary-porous materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 5(92), 1231-1238. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02038-x>.

10. Sposib oderzhannya soevo-batatnogo funktsionalnogo poroshku: pat. 120145 Ukrayina: MPK A23L 11/00, A23B 7/02, A23P 10/40. # a 201804144; zayavl. 16.04.18; opubl. 10.10.19, byul. # 19. (in Ukrainian)
11. Snezhkin, Yu.F., & Petrova, Zh.O. (2007). Teplomasoobminni protsesi pid chas oderzhannya karotinovmisnih poroshkiv. Kiyiv: VD «Akadempriodika». (in Ukrainian)
12. Petrova, Zh.O., Sniezkin, Yu.F., & Slobodianiuk, K.S. (2021). Energy-saving heat technologies for obtaining soy based plant powders. Kyiv: PH “Akadempriodyka”.
13. Petrova, Zh., Pazyuk, V., Samoilenko, K., & Chepeliuk, O. (2018). Effect of treatment modes on quality and antioxidant properties of tomato and beet processing products. Ukrainian food journal, 7(2), 291-302.
14. Danilov, V.A., & Krasnikov, V. V. (1970). Vysokointensivnaya konveksionnaya sushka bumagi i kartona. Moskva: Kolos. (in russian)
15. Krasnikov, V.V. (1973). Konduktivnaya sushka. Moskva: Energiya. (in russian)
16. Lyikov, A.V. (1968). Teoriya sushki. Moskva: Energiya. (in russian)

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КОМБІНОВАНИХ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ

**Петрова Ж.О., д.т.н., гол. наук. співр., Сlobодянюк К.С., к.т.н., ст. наук. співр.,
Самойленко К.М., к.т.н., ст. наук. співр., Вишнівський В.М., аспірант, Граков О.П., аспірант
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ**

Анотація. Загальна тенденція енергоспоживання, що призводить до збільшення кількості спожитої енергії у світі, показала, що її вартість постійно підвищується, дефіцит енергоносіїв зростає. Отже, на сьогодні актуальною є проблема створення та широкомасштабного впровадження сучасних енергоефективних теплотехнологій, що забезпечують скорочення витрат енергоносіїв та максимальне збереження високої якості зневодненого продукту.

З метою вирішення вищезазначеної проблеми, у даній роботі розроблено інноваційну підготовку комбінованих рослинних матеріалів. Представлено результати дослідження рН для різних співвідношень столового буряку з ревенем/томатом. Нам вдалося отримати найбільш оптимальне співвідношення компонентів у суміші столовий буряк:рєвєнь як 2:1, при цьому значення рН становить 3,75, а бетанін в досліджуваному матеріалі після сушіння зберігається на рівні 96,5% для буряк:томат – 3:1, у якому рН становить 3,9, а бетанін – 94,7 %. А також, з метою збереження та підвищення функціональності фітоестрогенних властивостей рослинної сировини, розроблено умови стабілізації рослинних інгредієнтів. Створено суміші з рослинних матеріалів при різному співвідношенні вихідних компонентів рослинного походження та розроблено оптимальні режими сушіння.

Експериментально досліджено кінетику процесу сушіння комбінованих рослинних матеріалів із попередньою їхньою підготовкою.

На основі отриманих даних про характер зміни числа Ребіндера в залежності від вологості, комбінованого рослинного матеріалу та температури теплоносія, були розроблені поетапні режими сушіння.

Теоретичну обробку отриманих експериментальних даних на суміші буряк:томат було виконано за методом В.А. Данилова. Узагальнені криві кінетики сушіння суміші буряк:томат співпадають з різними режимами сушіння.

Тривалість процесу сушіння суміші соя:шпинат на експериментальному конвективному стенді розраховувалася за методом Краснікова В.В. Узагальнена крива кінетики сушіння суміші соя:шпинат дозволила визначити відносні коефіцієнти сушіння. І стало можливим розрахувати загальну тривалість сушіння суміші соя:шпинат. Відхилення значень розрахункової від експериментальної тривалість сушіння не перевищує 5 %.

Ключові слова: тепломасообмін, кінетика сушіння, швидкість сушіння, Ребіндер, комбіновані функціональні матеріали.

Список використаної літератури

1. Jéssica Loraine Duenha, Rita de Cássia, 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, Campinas. 2018. 38(1). P. 72-77.
2. Kowalski Stefan J., Łechtańska Joanna M. Drying of red beetroot after osmotic pretreatment: Kinetics and quality considerations. Chemical and Process Engineering. 2015. 36 (3). P. 345-354.
3. Chua K. J., Mujumdar A. S., Hawlader M. N. A., Chou S. K., and Ho J. C. Convective drying of agricultural products. Effect of continuous and stepwise change in drying air temperature. Drying Technology. 2001. № 19. PP. 1949–1960. DOI: 10.1081/DRT- 100107282.

4. Petrova Zh. O., Slobodianiuk K. S., Samoilenko K. M., Vishnevsky V. M. Універсальні режими технологічної переробки колоїдних капілярно-пористих матеріалів методом конвективного сушіння. Електронний журнал «Енергетика та автоматика». 2020. № 6. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.06.015>
5. Petrova Zh., Sniezhkin Yu., Samoilenko K. Blending and drying of antioxidant raw materials: monograph. Vinnitsa: LLC "Tvory", 2021. – 107 p.
6. Снежкин Ю.Ф. Состояние и перспективы развития сушильной техники в Украине/ 2-я межд. научн.-практ. конф. "Современные энергосберегающие тепловые технологии". Труды конф., т. 3, М.: – 2005. – С. 225-229.
7. Снежкин Ю.Ф. Пути интенсификации процессов сушки. Пром. теплотехника. 2009. т. 31, №7. С. 89-90.
8. Петрова Ж.О. [Створення енергоефективних теплотехнологій виробництва функціональних харчових порошків](#); автореф. дис. ... докт. техн.наук: 15.14.06. Київ, –013–40 с, 2013.
9. Petrova, Zh. O., Slobodianiuk, K. S. Energy-efficient modes of drying of colloidal capillary-porous materials. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Vol.92. №5. PP. 1231-1238. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02038-x>
10. Спосіб одержання соєво-бататного функціонального порошку: пат. 120145 Україна: МПК A23L 11/00, A23B 7/02, A23P 10/40. № а 201804144; заявл. 16.04.18; опубл. 10.10.19, бюл. № 19.
11. Ю.Ф. Снежкін, Ж.О. Петрова. Тепломасообмінні процеси під час одержання каротиновмісних порошків. Київ: ВД «Академперіодика», 2007.
12. Petrova Zh.O., Sniezhkin Yu.F., Slobodianiuk K.S. Energy-saving heat technologies for obtaining soy based plant powders: monograph. Kyiv: PH "Akademperiodyka", 2021. – 96 p.
13. Zhanna Petrova, Vadim Pazyuk, Kateryna Samoilenko, Olena Chepeliuk. Effect of treatment modes on quality and antioxidant properties of tomato and beet processing products. Ukrainian food journal. 2018. Volume 7. Issue 2. С. 291-302.
14. Данилов В.А., Красников В. В. Высокоинтенсивная конвекционная сушка бумаги и картона. М.: Колос, 1970. – 432 с.
15. Красников В.В. Кондуктивная сушка. Москва: Энергия, 1973.
16. Лыков А.В. Теория сушки. Москва: Энергия, 1968.

Отримано в редакцію 03.06.2022
Прийнято до друку 18.09.2022

Received 03.06.2022
Approved 18.09.2022

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ ЯК ІНТЕНСИФІКАТОР ПРИ ВТОРИННІЙ ОЧИСЦІ РІПАКОВОЇ ОЛІЇ

Осадчук П. І., д.т.н., доцент

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Наукові дослідження багатьох лабораторій показали, що для здоров'я людини представляють небезпеку не які окремі компоненти олій і жирів, а також продукти їхнього окислювання і розпаду. Не сам холестерин викликає утворення атеросклеротичних бляшок, а продукти його окислювання, які утворюють складноєфірні з'єднання з насиченими жирними кислотами. Похідні окислених холестеринових та інших ліпідних компонентів, що входять до складу нерафінованих олій, також можуть визивати виникнення важких захворювань, наприклад, ішемія та навіть рак. Однак, не завжди самі гідроперекиси небезпечні для здоров'я, а від продуктів їхнього розпаду з утворенням вільних радикалів є реальна загроза здоров'ю людини. Усі види рослинної олії, що використовуються для виробництва продуктів харчування людей повинні пройти глибоке очищення на спеціальному устаткуванні. Це необхідно для видалення з олії низькомолекулярних жирних кислот, альдегідів, кетонів і інших летючих продуктів, що визначають запах і смак продукту, а також виділення з нього небажаних чужорідних з'єднань. Високоякісні рослинні олії можуть бути отримані тільки після ретельного проведення їхнього очищення, яке можна умовно розділити на первинне і наступне, більш глибоке, назване - рафінацією. Системний аналіз енерготехнологій є ефективним інструментом зниження витрат енергії у виробництві та показав, що сучасні технології очищення рослинних олій – це складні системи, які включають ряд операцій. При глибокому очищенні рослинних олій, використання хімічних реагентів та каталізаторів поліпшує якість олій та інтенсифікує процес. Однак при їх використанні виникає потреба у додаткових матеріальних витратах, оскільки ці компоненти мають постійно оновлюватись. У зв'язку з цим проведено дослідження процесу гідратації ріпакової олії застосовуючи електромагнітну обробку, з метою інтенсифікації видалення супутніх речовин, зниження енерговитрат та поліпшення якості продукції.

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

Вступ. Найважливішою задачею при виробництві харчових, зокрема жирових, продуктів є отримання їх біологічної повноцінності та екологічної безпеки. При виробництві рідинних рослинних олій за рахунок технологічних обробок досягається екологічна чистота, це відбувається шляхом видалення небажаних з'єднань та домішок (ядохімікатів, токсичних елементів, канцерогенів і ін.). Одночасно з цим частково виділяються і деякі корисні біологічно активні компоненти: фосфоліпіди, фітостероли, токоферолі, що приводить до зниження їхнього вмісту і зміни необхідних для організму співвідношень [1]. Так, комбінація високого вмісту в кукурудзяній олії поліненасичених жирних кислот і рівня β -ситостеролу до 700 мг на 1 кг, обумовлюють його лікувальні властивості при захворюваннях серцево-судинної системи та атеросклерозі.

Актуальність. Відомо, що фізіологічні властивості рослинних олій залежать від складу і співвідношення в них жирних кислот і їхнього положення в тригліцеридах олії, наявності біологічно активних з'єднань (фосфоліпідів, стеролів, токоферолів, каротиноїдів і ін.) [2]. Однак природні жири та олії по своєму складу не є ідеально фізіологічно повноцінним продуктом, тому що практично в кожному з них має дефіцит або надлишок одного або декількох компонентів. У той же час вони являють собою коштовне джерело антисклеротичних і біологічно активних речовин - незамінних поліненасичених жирних кислот (ПНЖК) - лінолевої (сімейство ω -6) і ліноленової (сімейство ω -3), фосфатидів, стеролів, жиророзчинних вітамінів.

Аналіз літературних джерел. Наукові дослідження багатьох лабораторій показали, що для здоров'я людини представляють небезпеку не які окремі компоненти олій і жирів, а також продукти їхнього окислювання і розпаду. Не сам холестерин викликає утворення атеросклеротичних бляшок, а продукти його окислювання, які створюють з насиченими жирними кислотами складноєфірні з'єднання. Окислені похідні холестеринових та інших ліпідних компонентів, що входять до складу нерафінованих олій, також можуть бути як причина виникнення важких захворювань, наприклад, ішемія та навіть рак. Однак не завжди самі гідроперекиси небезпечні для здоров'я, а від продуктів їхнього розпаду з утворенням вільних радикалів є реальна загроза здоров'ю людини [3, 12, 13]. Всі рослинні олії завдяки відсутності холестерину, своєму складу жирних кислот можуть зменшувати ризик виникнення серцево-судинних захворювань. Значення їхнього впливу на організм залежить від співвідношення жирних кислот у різних видах олій. Велику роль мають також токоферолі, фітостерини, каротиноїди, які присутні у оліях.

Необхідно акцентувати увагу на тому, що усі різновиди рослинних олій незважаючи на місце їхнього виробництва підлягають контролю на харчову цінність та відповідність гігієнічним вимогам безпеки. Під контролем вміст важких металів (свинець, миш'як, кадмій, ртуть), афлатоксинів B₁, пестицидів, радіонуклідів.

дів [4]. Кожна з рослинних олій вносить свою оригінальну частку в загальну енергетичну складову. Асортимент рослинних олій завдяки розвитку олійно-жирового виробництва і можливостям імпортування олій постійно зростає, і на даний час можна дозволити різноманітність їх вживання, а ні обмежувати себе вживанням однакових видів. Одним з дарунків природи є - рослинні олії, і ними потрібно користуватись.

З метою створення повноцінних жирових продуктів використовують як змішання різних по властивостях олій, так і вироблення продуктів із заданими властивостями, що здійснюється шляхом удосконалювання процесу очищення. Необхідно відзначити, що саме, супутні речовини і домішки, а не тригліцериди визначають колір, смак і запах жирів. При цьому деякі супутні речовини (наприклад, фосфоліпіди, вітаміни) підвищують харчову цінність жирів. Наявність же інших речовин (восків, госсиполу і ін.), навпаки, погіршує якість жирів і ускладнює їх технологічну переробку.

Усі види рослинної олії, що використовуються для виробництва продуктів харчування людей, а також комбікормів для молодняку сільськогосподарських тварин повинні пройти глибоке очищення на спеціальному устаткуванні [5]. Це необхідно для видалення з олії низькомолекулярних жирних кислот, альдегідів, кетонів і інших летючих продуктів, що визначають запах і смак продукту, а також виділення з нього небажаних чужорідних з'єднань — поліциклічних ароматичних вуглеводів, ядохімікатів, токсичних продуктів. Даний процес відбувається при низькому тиску — у вакуумі (0,3—0,7 кПа) і високій температурі (220—230 °C) при введенні в нагріту олію водяної пари.

Високоякісні рослинні олії можуть бути отримані тільки після ретельного проведення їхнього очищення, яке можна умовно розділити на первинне і наступне, більш глибоке, назване - рафінацією.

Системний аналіз енерготехнологій є ефективним інструментом зниження витрат енергії у виробництві показав, що сучасні технології очищення рослинних олій — це складні системи, які включають ряд операцій: відстоювання, фільтрацію, центрифугування, гідратацію, нейтралізацію, відбілювання та дезодорацію [6]. При глибокому очищенні рослинних олій, використання хімічних реагентів та каталізаторів поліпшує якість олій та інтенсифікує процес. Однак при їх використанні виникає потреба у додаткових матеріальних витратах, оскільки ці компоненти мають постійно оновлюватись.

Постає питання додаткового очищення рослинних олій від самих хімічних реагентів та каталізаторів, що приводить до додаткових енергетичних витрат. У разі неякісного очищення від хімічних сполук може навпаки знизитись якість олії. Така олія несе загрозу для здоров'я людини.

Мета досліджень. Провести дослідження процесу гідратації ріпакової олії застосовуючи електромагнітну обробку, з метою інтенсифікації видалення супутніх речовин, зниження енерговитрат та поліпшення якості продукції.

Результати досліджень. Як показали дослідження, у ріпаковій пресовій нерафінованій олії кількість гідрофільних фосфорутримуючих речовин досягає в середньому 0,4-0,8 %. Дві частини молекул цих речовин представляють собою: по перше утворені залишками фосфорної кислоти і спирту - гідрофільні групи, по друге ті що включають довгі ланцюги залишків жирних кислот — гідрофобні групи [2].

Гідратація це найбільш розповсюджений метод витягу фосфатидів з олій. Сам процес гідратації поєднує декілька засобів обробки олій: сильно розведеними водними розчинами солей, лугів та кислот або водою. У виробництві застосовуються різноманітні режими, які можуть відрізнятися друг від друга по кількості агента за допомогою якого проводиться гідратація, його складу і т.д. Вода використовується для гідратації найчастіше [6].

Фосфати мають спорідненість до води та властивості гідрофільних колоїдів завдяки наявності полярних угруповань, таким чином, це дає можливість припустити, що вплив електромагнітного поля при проведенні процесу гідратації буде мати позитивний ефект [11].

У цьому випадку з метою зменшення часу гідратації і збільшення виділення осаду, який являє собою фосфорутримуючі речовини, нами були проведені експериментальні дослідження впливу електромагнітного поля на даний процес.

Спираючись на досліди процесу електричного намагнічування соняшникової олії при гідратації [9], провели експериментальні дослідження для ріпакової олії з метою підготовки до процесу отримання якісного продукту. Проведення експерименту полягало у наступному. Для процесу гідратації використовувалось стандартне обладнання УГРМ – 20.2, яке виробляється Харківським виробничим об'єднанням «РОСС» із застосуванням розробленою

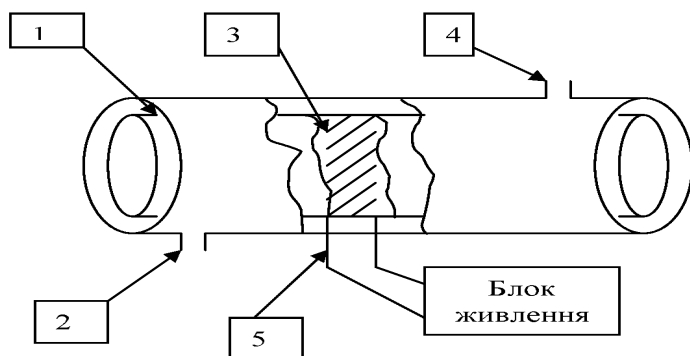


Рис. 1 – Схема установки електромагнітної обробки рослинних олій : 1 – олієпровід; 2 – патрубок подачі олії; 3 – електромагнітна котушка; 4 – патрубок виходу олії; 5 – живлення електромагнітної котушки

нами електромагнітною установкою, схема якої наведена на рисунку 1.

Електромагнітна установка складається з двох концентричних труб різного діаметра, розташовані одна в іншій. Внутрішня труба латунна або нержавіюча, зовнішня труба олієпровідна нержавіюча.

Котушки утворюють імпульсне магнітне поле з полярністю, яка чергується, між їх полюсами та зовнішньою трубою, розташовані у внутрішній трубі. Центрування внутрішньої труби здійснюється трьома ребрами, розташованими під кутом 120° . Подача ріпакової олії відбувається з нижнього патрубку, а вихід з верхнього. Омагнічування ріпакової олії здійснюється в концентричному зазорі кільцевої форми між внутрішньою і зовнішньою трубою.

Технічні параметри установки.

Допускається робота електромагнітної установки в сирих опалювальних і не опалювальних приміщеннях при вологості повітря до 90 %. Номінальна швидкість олії – 0,3 м/с. Номінальна продуктивність – 1,5 м³/год. Максимальний струм апарата – 1,2 А. Максимальна напруженість магнітного поля – 200 кА/м. Максимальна потужність споживання – 25 Вт. Діаметр труби – 48 мм. Габарити: довжина – 750 мм. Діаметр патрубків – 1/2". Довжина патрубків 60 мм. Маса не більш – 15 кг.

Імпульсний блок живлення, який призначений для роботи в опалювальних сухих приміщеннях при вологості повітря не більш 80 % та температурі повітря 15-35 °С. Діапазон регулювання пульсації струму – 2-10 Гц. Максимальний струм навантаження – 1,2 А. Напряга мережі живлення – 220 В.

Габарити: Довжина – 180 мм. Ширина – 150 мм. Висота – 150 мм. Маса не більш – 2 кг. Діапазон регулювання амплітуди пульсації струму – 0,5-1 А.

Методика експериментального визначення параметрів електромагнітного поля.

Проводили зміну напруженості електромагнітного поля при протіканні суміші олії з водою через електромагнітний апарат, а також змінювали температуру місцели. Одночасно фіксувалось час видалення осаду і його маса у відсотковому відношенні, щодо загальної кількості фосфороутримуючих речовин у ріпаковій олії. У ріпаковій олії вміст фосфоліпідів становить приблизно 0,09 %, але значну частку фосфатидів складають важко-гідратуємі та негідратуємі фосфатидилсерин, поліфосфогліцериди і фосфатидні кислоти. Електромагнітна активація системи масло - фосфоліпід дозволяє збільшити поверхневу активність фосфоліпідів, в тому числі і їх негідратуєміх форм, на границі розділу фаз з водою, а також збільшити максимальну адсорбцію фосфоліпідів в міжфазному шарі. Все це в цілому приводить до підвищення ступеня гідратуємі фосфоліпідів.

Зміна напруженості електромагнітного поля проводилась при проходженні суміші олії з водою через електромагнітну установку, крім того змінювалась температура місцели. Проводили заміри часу видалення осаду і його маси у відсотковому відношенні, щодо загальної кількості фосфороутримуючих речовин у ріпаковій олії. Результати проведених досліджень приведені на рисунку 2-4.

На рисунку 2 наведено визначення кількості видалених фосфатидів при зміні напруженості магнітного поля.

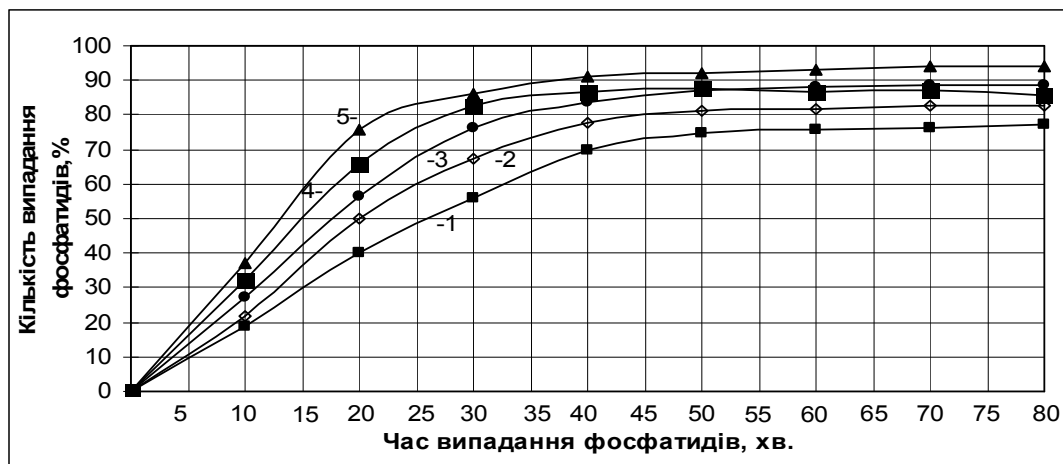


Рис. 2 – Визначення кількості видалених фосфатидів при зміні напруженості магнітного поля:

1 – без електромагнітного поля, 2 – 115 кА/м; 3 – 135 кА/м; 4 – 155 кА/м; 5 – 175 кА/м.

Аналізуючи графік наведений на рисунку 2 відносно впливу електромагнітного поля на процес виділення фосфатидів спостерігаємо позитивний ефект. З наведених п'яти графіків можна бачити, що при класичному режимі гідратації (крива 1) кількість та час видалення фосфатидів менша на 15 відсотків. При використанні електромагнітного поля та змінюючи його напруженість від 115 кА/м до 175 кА/м (криві 2-5) можна констатувати збільшення маси видалення осаду. Також різниця у кількості видаленого осаду при напруженості поля в діапазоні 155 – 175 кА/м незначна. Тому можна визначити раціональну напруженість електромагнітного поля, таку як 155 кА/м.

На рисунку 3 наведено визначення кількості осаду при напруженості магнітного поля 155 кА/м., та різної температури місцели.

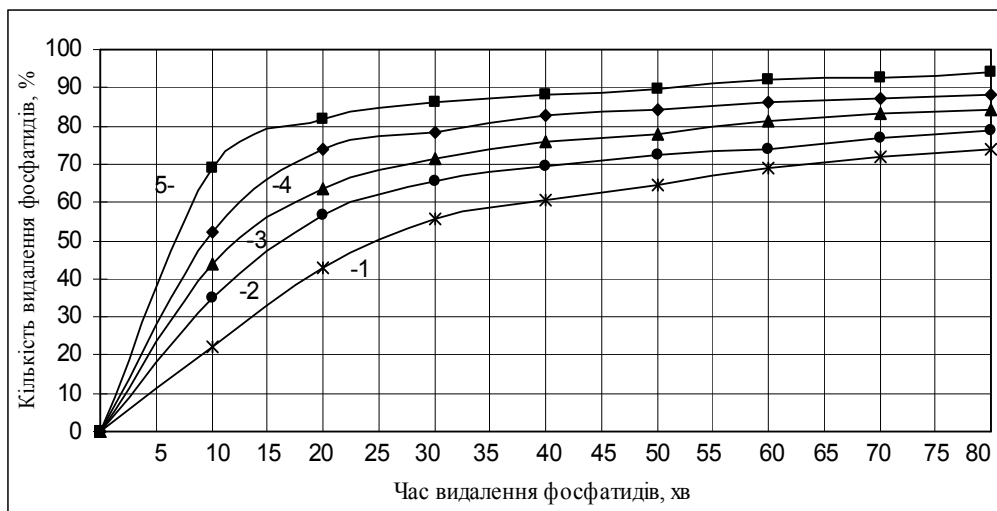


Рис. 3 – Визначення кількості осаду при напруженості магнітного поля 155 кА/м., та різної температури місцели: 1 – 20 °C, 2 – 30 °C, 3 – 40 °C, 4 – 50 °C, 5 – 60 °C.

З сімейства кривих рисунку 3 видно, що кількість та час видалення фосфатидів при зміні температури місцели збільшується прямо пропорційно збільшенню температури. Різниця маси осаду при зміні температури процесу гідратації від 20 °C до 60 °C (графіки 1-5), складає приблизно 15 відсотків. Як що порівнювати проведення процесу гідратації з температурою місцели від 20 °C до 60 °C при напруженості магнітного поля 155 кА/м бачимо збільшення швидкості утворювання осаду. Однак різниця в діапазоні від 50 °C до 60 °C незначна. Тому визначаємо раціональну температуру місцели 55 °C. Також опираючись на отримані експериментальні залежності можна визначити раціональний час обробки електромагнітним полем який складає одну годину.

На рисунку 4 представлено визначення часу видалення фосфатидів з олії при використанні та без використання електромагнітного поля.

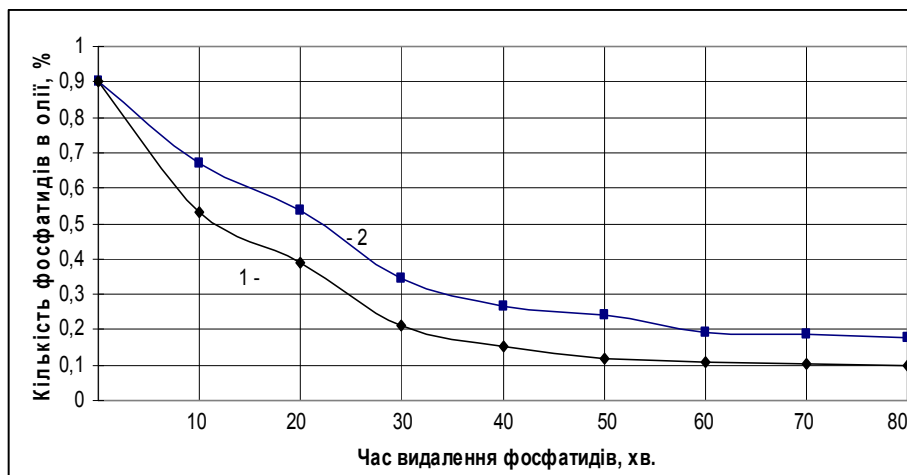


Рис.4 – Час видалення фосфатидів з олії: 1 – з використанням електромагнітного поля, напруженість електромагнітного поля 155 кА/м, температурі 55 °C; 2 – без використання електромагнітного поля. (Ріпакова олія)

З кривих рисунку 4 бачимо інтенсифікацію процесу гідратації та збільшення кількості отриманого осаду, що позитивно впливає збоку збереження енергії, поліпшення якості продукції та збільшення продуктивності обладнання.

Висновки. Створено конструкцію експериментальної установки для обробки олії електромагнітним полем. За допомогою запропонованої методики визначення параметрів електромагнітного поля, а саме ефектної полоси напруженості, температури місцели та часу гідратації рослинних олій, отримані рекомендовані

технологічні параметри при яких спостерігається інтенсифікація процесу гідратації ріпакової олії за допомогою використання електромагнітного інтенсифікатора.

References

1. Fedak N.V., Dyhtyar A.M. (2009). Dynamics of tocopherol content in sunflower oils with different fatty acid composition during heating. *Proceedings of TDATU*, 4(12), 139-145.
2. Harutyunyan N.S., Kornena E.P., Nesterova E.A. (2004). *Refinement of oils and fats. Theoretical foundations, practice, technology, equipment* St. Petersburg: GIOR
3. Simakhina G.O. (2008). Bioantioxidants – necessary components of healthy nutrition. Scientific works of the National Technical University of Ukraine, 25, 104-106.
4. Rudyk F.Ya., Morgunova N.Ya., Tulyeva M.S. (2015). Factors determining the process of spoilage of oil during storage. *Agrarian Scientific Journal*, 4, 66 - 69.
5. Lovkis Z. V. et al. (2010). *Quality and safety of food products*. Minsk: IVC of the Ministry of Finance
6. R. O'Bryan (2007). *Fats and oils. Production, composition and properties, application*. St. Petersburg: Profession.
7. Vytenko T.N., Humnytsky Y.M. (2007). Mechanism of activating action of hydrodynamic cavitation on water. *Chemistry and technology of water*, 29(5), 422-432.
8. Osadchuk P. I., Bezbakh I. V. (2021). Engineering methods for calculating the hydration process during oil treatment with electromagnetic waves. *Scientific Works*, 85(1), 49-55.
9. Osadchuk P. I. (2019). The use of an electromagnetic field in the hydration of vegetable oils. *Scientific Works*, 83(1), 98-103.
10. P. I. Osadchuk, D. P. Domuschi, Y. I. Enakiev, S. N. Peretiaka, A. P. Lipin. (2020) Study of the effect of ultrasonic field in purifying sunflower oil. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 26 (No 2), 486–491.
11. Bologa M. K., Berill I. I. (2004). *Refining sunflower oil in an electric field*. Moldova: Stinta.
12. Enakiev Y., Asenov L., Kostadinov G. (2014). Main aspects of pelleting sunflower waste biomass. *Agricultural Engineering (Bulgaria)*, 51(1), 40-46.
13. Georgiev V., Kapashikov G., Ivanov L., Morteve I., Enakiev Y. (2013) Investigation of sunflower stems and heads combustion in chipped biomass combustion equipment. *International Scientific Conference EE&AE, Ruse, Bulgaria*, 443-447.

ELECTROMAGNETIC FIELD AS AN INTENSIFIER IN THE SECONDARY PURIFICATION OF RAPESEED OIL

Osadchuk P. I., doctor of technical sciences, associate professor
Odessa National University of Technology, Odessa, Ukraine

Abstract. Scientific studies of many laboratories have shown that certain components of oils and fats, as well as their oxidation and decomposition products, pose a danger to human health. It is not cholesterol itself that causes the formation of atherosclerotic plaques, but its oxidation products, which create ester compounds with saturated fatty acids. Oxidized derivatives of cholesterol and other lipid components, which are part of unrefined oils, can also be the cause of serious diseases, such as ischemia and even cancer. At the same time, hydroperoxides themselves are not always dangerous for health, but the products of their decay with the formation of free radicals pose a real threat to human health. All types of vegetable oil used for the production of human food must undergo deep purification on special equipment. This is necessary to remove from the oil low-molecular fatty acids, aldehydes, ketones and other volatile products that determine the smell and taste of the product, as well as to remove unwanted foreign compounds from it. High-quality vegetable oils can be obtained only after their thorough purification, which can be conditionally divided into the primary and the following, deeper, called - refining. System analysis of energy technologies is an effective tool for reducing energy costs in production and has shown that modern vegetable oil purification technologies are complex systems that include a number of operations. In deep purification of vegetable oils, the use of chemical reagents and catalysts improves the quality of oils and intensifies the process. However, when using them, there is a need for additional material costs, since these components must be constantly updated. In this regard, a study of the hydration process of rapeseed oil using electromagnetic treatment was carried out, with the aim of intensifying the removal of accompanying substances, reducing energy consumption and improving the quality of products.

Keywords: hydration, electromagnetic field, temperature, oil.

Список використаної літератури

1. Федак Н. В. Динаміка вмісту токоферолів в оліях соняшнику з різним жирнокислотним складом в процесі нагрівання / Н.В Федак, А.М. Дихтярь // Праці ТДАТУ. – 2009. – Т.4 – №12. – С.139-145.

2. Арутюнян Н.С., Корнена Е.П., Нестерова Е.А. Рафинация масел и жиров. Теоретические основы, практика, технология, оборудование [Текст] / Н.С. Арутюнян, – СПб.: ГИОРД, 2004. – 288 с.
3. Сімахіна Г. О. Біоантиоксиданти – необхідні компоненти оздоровчого харчування / Г. О. Сімахіна // Наукові праці НУХТ. – 2008. – № 25. – С. 104-106.
4. Рудик Ф. Я., Моргунова Н. Я., Тулиева М. С. Факторы, обуславливающие процесс порчи масла при хранении. // Аграрный научный журнал – 2015. - №4. – с.66 – 69.
5. Качество и безопасность пищевых продуктов : учеб. пособие / З. В. Ловкис [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2010. – 398 с.
6. Жири и масла. Производство, состав и свойства, применение. / Р. О'Брайен: пер. с англ. 2-го изд. В. Д. Широкова, Д. А. Бабейкеной, Н. С. Селивановой, Н. В. Маглы – СПб: Профессия, 2007. – 752 с.
7. Витенько Т. Н. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т.Н. Витенько, Я.М. Гумницкий // Химия и технология воды. - 2007. - Т. 29 - № 5. - С. 422-432
8. Осадчук П. І., Безбах І. В. Інженерні методи розрахунку процесу гідратації при обробці олії електромагнітними хвилями. Збірник наукових праць, ОНАХТ. Випуск 1 том 85 – Одеса, 2021. – с. 49-55
9. Осадчук П. І. Використання електромагнітного поля при гідратації рослинних олій. Збірник наукових праць, ОНАХТ. Випуск 1 том 83 – Одеса, 2019. – с. 98-103
10. P. I. Osadchuk, D. P. Domuschi, Y. I. Enakiev, S. N. Peretiaka, A. P. Lipin. (2020) Study of the effect of ultrasonic field in purifying sunflower oil. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 26 (No 2) 2020, 486–491.
11. Болога М. К. Рафинация подсолнечного масла в электрическом поле: монография / М. К. Болога, И. И. Берилл; АН Республики Молдова, Институт прикладной физики. - Молдова: Stinta, 2004.-214 с.
12. Y. Enakiev, L. Asenov, G. Kostadinov. Main aspects of pelleting sunflower waste biomass. Agricultural Engineering (Bulgaria). Volume 51. Issue 1, ISSN: 0037-1718. 2014, 40-46.
13. V. Georgiev, G. Kapashikov, L. Ivanov, I. Morteve, Y. Enakiev. Investigation of sunflower stems and heads combustion in chipped biomass combustion equipment. International Scientific Conference EE&AE, Ruse, Bulgaria. 2013, 443-447.

Отримано в редакцію 20.05.2022
Прийнято до друку 20.09.2022

Received 20.05.2022
Approved 20.09.2022

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ВОЛОГИ В МІКРОХВИЛЬОВИХ СТРІЧКОВИХ СУШИЛЬНИХ АПАРАТАХ

Яровий І.І., к.т.н., доцент, Алі В.П. аспірант,
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Стаття відображає завершений етап наукового дослідження. Загальним напрямом наукової роботи є впровадження технологій адресної доставки енергії у процеси сушіння, стерилізації та теплової обробки харчових продуктів і сировини.

В роботі приведено короткий аналіз актуальності наукової тематики за темою «мікрохвильове сушіння». Описано типову конструкцію сушильних установок стрічкового типу. Для більшості мікрохвильових апаратів відсутня систематизована інформація про доцільні режими обробки вологих матеріалів та типові параметри процесів вологовидалення, що ускладнює можливість їх інтеграції в існуючі технологічні процеси. Одним з факторів прискорення розвитку технологій мікрохвильового сушіння може стати накопичення та систематизація інформації про доцільні режими та обмеження процесів МХ сушіння для типової рослинної сировини.

Експериментальне моделювання процесу видалення вологи в МХ установках розглядається як доцільний шлях дослідження даного типу процесів. Пропонується дослідити типові режими для обробки рослинної сировини з наступною систематизацією отриманих залежностей.

Типові умови взаємодії мікрохвильового електромагнітного поля та рухомого шару вологого матеріалу в таких установках доцільно змодельовувати за допомогою спеціального стенду та відповідної методики. Основним завданням стенду є створення умов для точного і зручного моделювання впливу МХ випромінювання сушильної камери на зразок вологого матеріалу з заданими характеристиками шару. Режим обробки матеріалу в багатозонній сушиарці моделюється шляхом повторів проходження зразка через сушильну камеру.

Приведено опис конструкції розробленого дослідного стенду. Описано методику проведення експерименту. Описано сировину, що використовувалась для проведення дослідження. Приведено результуючі залежності отримані в ході експериментів. Приведено порівняльну оцінку отриманих результатів з попередніми дослідженнями. Визначено напрям та задачі наступного етапу дослідження.

Ключові слова: мікрохвильове сушіння, рослинні матеріали, комбіновані способи сушіння.

Вступ. Серед актуальних на сьогодні способів сушіння та типових конструкцій сушильних апаратів преvalюють такі, що побудовані на принципах конвективної передачі тепла. Потік тепла, що генерується джерелом енергії у вигляді агента сушіння, транспортується сушаркою до поверхні вологого матеріалу і передається волозі матеріалу а через його поверхню. Такий «транспортний коридор» для енергетичного потоку, що включає декілька перетворень, має поточні, непродуктивні втрати енергії, уникнути яких неможливо внаслідок фізичних обмежень в процесах теплопередачі.

Тож актуальною науковою проблемою залишається пошук способів та методів удосконалення процесів сушіння з використанням інших, відмінних від конвективних, способів передачі тепла від джерела енергії до вологи у внутрішніх шарах матеріалу, що обробляється. В якості однієї з альтернатив конвективному способу сушіння, все більше застосування знаходять сушильні апарати, що використовують нагрівання вологої сировини мікрохвильовим електромагнітним полем.

Спосіб сушіння, що використовує в якості джерела теплової енергії взаємодію надвисокочастотного електромагнітного поля та вологи, що міститься в структурі матеріалу, має багато реалізацій і їх кількість швидко зростає з появою нових технічних рішень. До типових способів сушіння дану технологію віднести важко, проте відомий пошуковий сервіс видає понад 10 мільйонів результатів за ключовими словами «microwave drying», що свідчить про актуальність тематики. Ресурс www.sciencedirect.com, на вересень 2022 р. індексує 14,9 тис. джерел в наукових виданнях з тими ж ключовими словами. Цей же ресурс відображає динаміку інтересів наукової спільноти до даного напрямку досліджень. Так у 2000 році кількість подібних публікацій складала менше 1,5 тис., в подальшому нелінійно зростаючи з логарифмічною залежністю і у 2021 році склала вже 15,1 тис. посилань. Тож мікрохвильовий спосіб сушіння вже набув досить широкого застосування і користується все зростаючою увагою у науковців, що дозволяє віднести його до найбільш перспективних та вартих уваги інноваційних технологій видалення вологи [1,2].

Метою роботи став пошук доцільного варіанту експериментального моделювання процесу видалення вологи з сипучих рослинних матеріалів в мікрохвильових сушильних установках стрічкового типу.

Об'єкт дослідження: процес видалення вологи з сипучих вологих матеріалів рослинного походження при комбінованому енергетичному впливі: мікрохвильовому нагріванні внутрішньої вологи матеріалу та фільтраційному видаленні поверхневої вологи.

Предмет дослідження: кінетика процесу видалення вологи з рухомого шару сипучої рослинної сировини при комбінованому способі сушіння.

Серед промислових зразків мікрохвильового (МХ) обладнання, що забезпечує безперервний процес обробки сировини лідерами є стрічкові апарати з лінійним, послідовним розміщенням сушильних камер обладнаних мікрохвильовими випромінювачами та аспіраційною системою. Зразки такого обладнання можна знайти у багатьох виробників мікрохвильових апаратів для сушіння та стерилізації сипучих матеріалів, в т.ч. штучних та упакованих продуктів. В якості прикладу можна привести декілька зразків стрічкових мікрохвильових сушарок компанії «Kerone» рис. 1.

Варіативність базової конструкції стрічкових мікрохвильових сушильних установок досить висока. Основним параметром, що визначає їх габаритні характеристики та номінальну продуктивність є цільова сировина (вологий матеріал) для обробки якої розроблялась конкретна установка. Найбільш численна категорія таких установок призначена для обробки рослинної (трав'яної, зернової та бобової) сировини, вони мають невелику висоту вхідного та вихідного шлюзів, в межах 20-50 мм, значну ширину стрічки (400-800 мм) та забезпечують продуктивність в межах від декількох до десятків кілограмів висушеного продукту на годину. Кількість послідовно розташованих зон сушіння (нагрівання МХ випромінюванням) може варіюватись від 3-4 до десятка і більше. Саме від цього параметра залежить загальна продуктивність сушильної установки, максимальна кількість видаленої вологи та електрична потужність, що споживається установкою.



Рис. 1 – Мікрохвильові сушильні апарати стрічкового типу

Зазначені вище параметри мікрохвильових сушильних установок, визначають максимально можливі режими обробки сировини. Найбільш важливий показник процесу - продуктивність по обробленій сировині, великою мірою залежить від характеристик самого матеріалу, що обробляється та технологічних обмежень на ведення процесу видалення вологи.

Особливістю мікрохвильового нагрівання як процесу, що лежить в основі роботи сушильного МХ обладнання є висока швидкість нагрівання вологих матеріалів, чим і обумовлена висока продуктивність мікрохвильового сушіння. Мікрохвильове поле дозволяє розігрівати і почати випаровувати вологу в рослинних матеріалах менше ніж за хвилину (при достатній потужності поля). Така швидкість процесу досягається при високих показниках енергопідведення для рослинних матеріалів на зразок зерна та бобових, та при відсутності технологічних обмежень на температурні режими обробки.

Нерівномірності напруженості електромагнітного поля в межах сушильної камери, і як наслідок нерівномірність нагріву вологи в матеріалі в межах шару сировини, дуже ускладнюють реалізацію технологічних режимів з високою інтенсивністю обробки сировини.

Іншою проблемою в контролі процесу інтенсивного мікрохвильового сушіння є неможливість прямого вимірювання температури внутрішніх шарів частинок матеріалу. Для сировини з частинками, що мають розміри понад 5-7 мм, в інтенсивних режимах обробки будуть виникати локальні перегріви у внутрішніх шарах частинок, особливо на завершальному етапі сушіння, коли вологи в частинках залишається небагато. Поверхневий контроль можливо реалізувати безконтактним способом, проте він залишатиметься недостатньо інформативним, оскільки температурне поле шару частинок матеріалу на виході зони обробки (сушильної камери) як правило досить нерівномірне і різниця температур поверхні окремих зон шару частинок може складати 10°C і більше в залежності від інтенсивності та етапу сушіння.

Аналіз останніх досліджень. Процеси мікрохвильового сушіння матеріалів рослинного походження все ще є недостатньо вивченими, що обумовлено новизною технології та великою різноманітністю в будові та

структурі рослинної сировини як об'єкту сушіння. Аналітичне моделювання процесів мікрохвильового сушіння є складним завданням з тих же причин. Роботи науковців даного напрямку [3-4], пропонують розглядати процес сушіння під впливом мікрохвильового підведення енергії як комплекс декількох взаємодіючих та взаємопов'язаних процесів, ініційованих відразу декількома основними рушійними силами:

- градієнт вологовмісту, який забезпечує і визначає кінетику процесу перенесення вологи між більш вологим центром частинок та їх поверхнею;
- градієнт температури між внутрішніми шарами вологої частинки і зовнішніми, який залежить від інтенсивності впливу мікрохвильового поля на вологу, що значно інтенсифікує процеси масопереносу вологи в напрямі від центру частинки до поверхні;
- градієнт тиску у внутрішніх шарах частинки матеріалу, який також може досягати великих значень і в інтенсивних режимах обробки матеріалу може перетягувати на себе ключову роль, в разі ініціації та сталого розвитку режиму механо дифузійного видалення вологи [5].

Зазначені градієнти мають однаковий напрям і впливають на інтенсивність процесу видалення вологи з капілярно – пористих систем (якими і є більшість рослинних матеріалів) різною мірою. Міра впливу для кожної з цих рушійних сил визначається як обраним режимом обробки вологого матеріалу так і поточними властивостями сировини (матеріалу, що обробляється). Відповідно до загальноприйнятої теорії конвективного сушіння, матеріал втрачаючи вологу значно змінює свої характеристики в процесі видалення вологи, чим обумовлено поділ процесу висушування на періоди саме сушіння та досушування. Таке твердження справедливе і для мікрохвильового сушіння з тією різницею, що на відміну від конвективного, при мікрохвильовому нагріванні температурний градієнт є співнаправленим з іншими, що робить практично невимірним та умовним перехід від етапу сушіння до досушування, тобто видалення вологи продовжується із падаючою швидкістю, але без різких її змін, до самого завершення процесу.

Зважаючи на складність процесу видалення вологи при МХ способі сушіння, науковою групою кафедри ПОтаЕМ ОНТУ обрано пріоритетним вектор експериментальних досліджень процесів МХ сушіння з наступною розробкою аналітичних моделей для досліджених реалізацій процесу.

В проведених науковцями кафедри ПОтаЕМ ОНТУ дослідженнях [6] встановлено, що залежність між інтенсивністю процесу МХ нагрівання та підведеною потужністю мікрохвильового електромагнітного поля, для вологих матеріалів рослинного походження, в технологічно допустимому діапазоні температур, близька до лінійної. Така ж залежність зберігається при масштабуванні процесу шляхом зміни навантаження сушильної камери.

Як висновок можна прийняти твердження про те, що при інженерному розрахунку МХ сушильних апаратів, їх конструктивні параметри слід обирати та нормувати виходячи з електричної потужності мікрохвильових генераторів (кВт), навантаження транспортної стрічки ($\text{кг}/\text{м}^2$) та бажаного максимального режиму енергопідведення ($\text{кВт}/\text{кг}$). Останній визначається експозицією сушіння (часом перебування матеріалу в сушильній камері) при мінімальній швидкості стрічки при її мінімально-доцільному навантаженні та при постійно ввімкнених МХ генераторах.

При умові використання обраного типу сировини такий набір параметрів визначає режим максимального енергетичного впливу на матеріал та відповідно максимальний для конкретної установки режим вилучення вологи. Для більшості МХ установок такий режим допустимий лише на першому етапі сушіння, коли вологи в матеріалі ще достатньо і ця волога лише починає розігріватись. На подальших етапах сушіння (в наступних після першої сушильних камерах) інтенсивність нагрівання доцільно зменшувати пропорційно кількості вологи, що залишається в матеріалі, незмінний енергетичний вплив, в другій половині процесу, приводить до подальшої надмірної інтенсифікації процесу видалення вологи, що супроводжується локальними перегрівками частини матеріалу, аж до обуглювання внутрішніх шарів частинок.

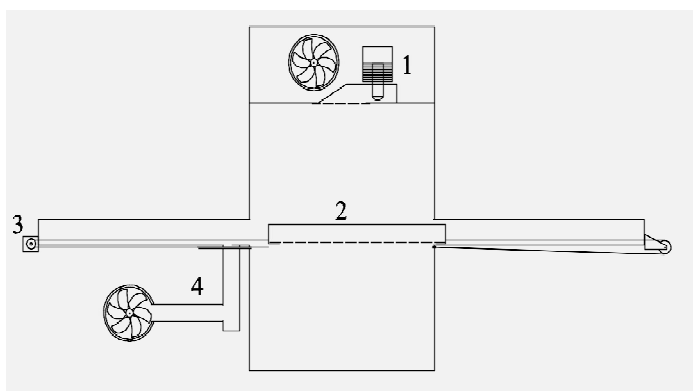
Для швидкого і бережливого до корисних властивостей матеріалу режиму видалення вологи доцільним виглядає сушильний регламент із зменшенням енергетичного впливу на рухомий шар сировини по мірі її висушування. Такий режим відносно легко реалізувати для модульної конструкції сушильної МХ установки, важливим параметром якої є кількість зон МХ нагрівання (сушильних камер). Встановлюючи для кожної з таких камер відповідний регламенту режим енергетичного впливу можна отримати процес сушіння адаптований під властивості конкретної сировини.

Колектив науковців кафедри ПОтаЕМ ОНТУ достатньо довго вивчає проблеми використання електромагнітного МХ поля в типових процесах переробки харчової сировини. Комплекс технічних рішень, розроблених на основі виконаних досліджень даного напрямку отримав власну назву – технології адресної доставки енергії. На базі таких конструкцій розробляються та пропонуються для впровадження інноваційні рішення для процесів сушіння, екстрагування, випарювання, стерилізації та інших.

Проведення експериментальних досліджень. Черговим етапом дослідження процесів видалення вологи з використанням мікрохвильового підведення енергії є розробка науково – дослідного стенду для дослідження кінетики процесу видалення вологи з шару сипучої рослинної сировини. Задача яку вирішує стенд полягає в фізичному моделюванні процесу висушування матеріалу при проходженні через сушильну МХ камеру. Схема та фото установки приведено на рис. 2.

Для забезпечення високої точності вимірювань та високої повторюваності умов експерименту, спроектовано та виготовлено одиночну сушильну камеру з фрагментами вхідного та вихідного каналів, через які механічний привід переміщає каретку з встановленою в ній касетою. Плоска касета має розміри близькі до перетину камери і заповнюється в один – два шари зразком сипучого (або кускового) матеріалу, кінетику сушіння якого слід визначити. Привід каретки з касетою може рухатись з заданою оператором швидкістю в діапазоні від 1,5 до 11,5 мм/с. (діапазон може бути змінений за потреби).

Джерелом МХ випромінювання в сушильній камері є магнетрон модифікації 2М217J від компанії Witol, електрична потужність якого складає 0,58 кВт. Касета прямокутної форми має розміри 19 x 18 см, що складає площу 0,0342 м². Розрахунковий енергопідвід, який створює установка до площі касети еквівалентний ~10 кВт/м² шару сировини (при 60% ефективності магнетрона). При типовому завантаженні касети в межах 200 гр. підведена еквівалентна потужність МХ випромінювання досягатиме 1,7 кВт/кг.



а)



б)

Рис. 2 – Дослідна установка: а) Схема: 1- магнетрон; 2-касета зі зразком матеріалу; 3-привід касети; 4-вентилятор та система продування шару продукту. б) фото установки (сушильна камера відкрита).

Керування стендом програмне, для зручності оператора передбачено безперервний та «однопрохідний» режими обробки. В останньому установка після кожного проходу вимикає магнетрон та встановлює каретку з касетою в позицію «паркування», для подальшого виймання касети оператором і її зважування на аналітичних вагах. Температурний контроль процесу здійснюється також оператором перед вийманням касети із зразком.

Методика дослідження полягає у встановленні заданої швидкості руху шару матеріалу (зразка в касеті) через сушильну камеру. Зразок сипучої сировини оператор розміщає в касеті, встановлює її в привід установки, закриває сушильну камеру і запускає процес. Відповідно до обраного режиму установка здійснює один цикл сушіння або продовжує послідовність циклів до зупинки процесу оператором. Після кожного циклу, або після групи циклів оператор здійснює контроль температури та маси зразка. Таким чином моделюється проходження зразка через задану кількість сушильних камер, для кожного з таких проходів можливо встановити власне значення експозиції сушіння змінюючи швидкість руху касети через сушильну камеру.

З метою розширення функціональності установки її обладнано ділянкою для моделювання процесу фільтраційного сушіння. Цей елемент стенду представляє собою щілинний, екранований від витоку МХ випромінювання проріз в нижній поверхні лівого транспортного каналу установки. Ширина поперечного прорізу складає близько 10 мм, що дозволяє ініціювати в ньому швидкість потоку повітря в межах 6-7 м/с. Більш детально результати дослідження комбінованого способу вологовидалення при сушінні рослинної сировини розглянуто в роботі [7].

Аналіз результатів. За даною методикою, проведено серію експериментів, метою яких була оцінка кінетики вологовидалення для двох різних видів рослинної сировини, в якості яких обрано різані «соломкою» яблука та боби гороху (з початковою вологістю понад 35%). Отримані в експериментах залежності відображено на рис 3 та 4.

Для дослідження кінетики видалення вологи з бобів гороху, зразок було попередньо зволожено і витримано в закритій тарі протягом декількох діб для отримання рівно зволжених по перетину горошин. Отримані показники в цілому відповідають очікуваним результатам, відображають високу ефективність способу МХ сушіння та доцільність продовження досліджень в даному напрямку.

Отримані залежності в цілому відповідають очікуваним результатам, відображають високу ефективність способу МХ сушіння та можливість використання розробленого науково-дослідного стенду і методики проведення експерименту для проведення досліджень кінетики видалення вологи із різноманітних зразків сипучої рослинної сировини з наступним формуванням довідкової бази показників масопередачі і типових «сценаріїв» процесу МХ сушіння.

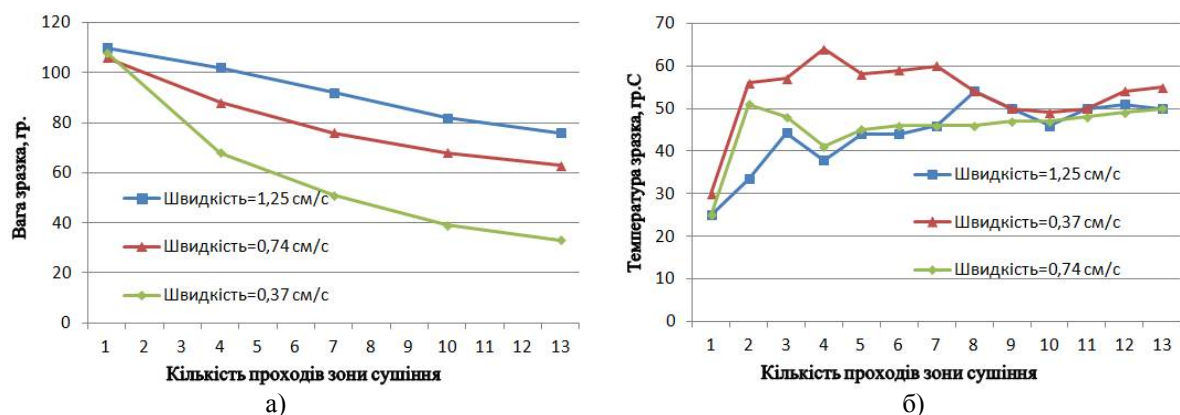


Рис. 3 – Процес видалення вологи з різних яблук

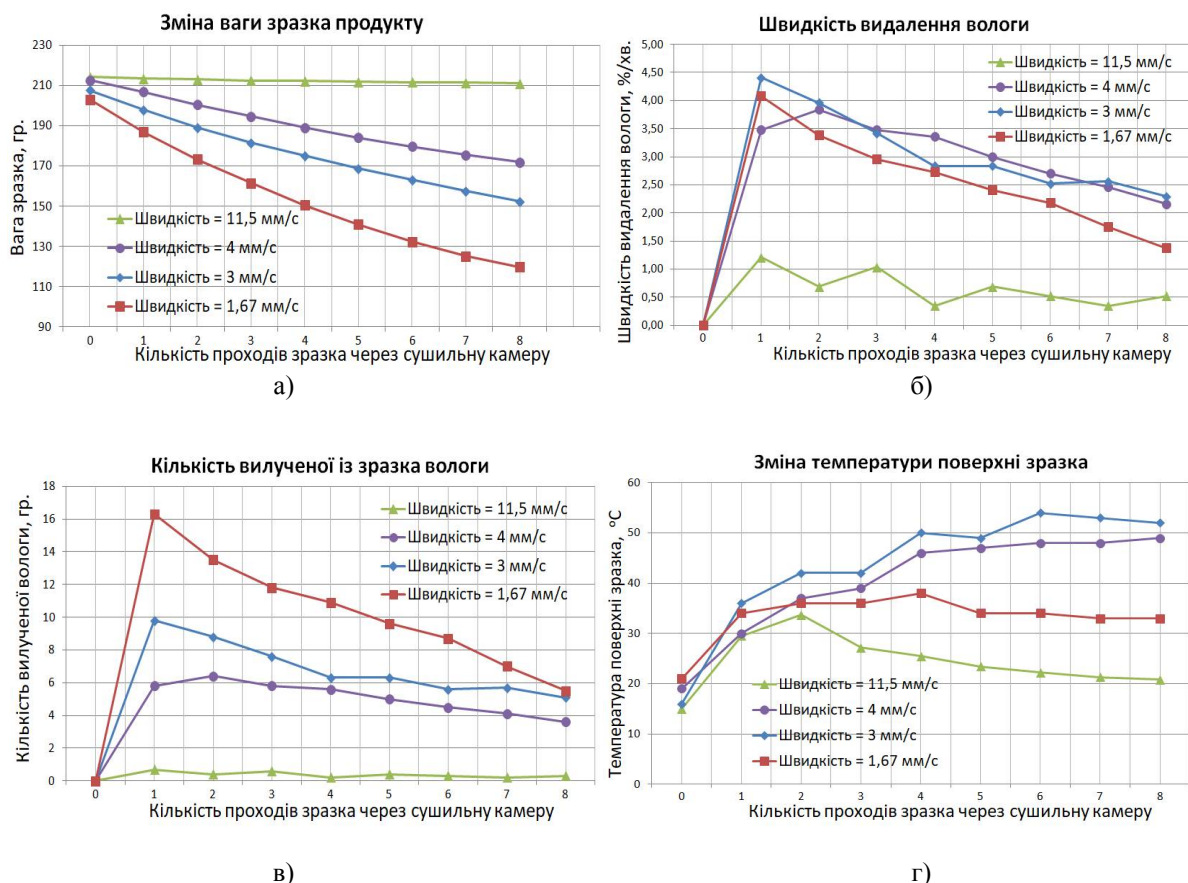


Рис. 4 – Кінетика процесу видалення вологи з бобів гороху

Висновки. Завершено розробку експериментального методу моделювання процесів видалення вологи в стрічкових мікрохвильових сушильних установках. Створений в ході роботи дослідний стенд забезпечує можливість моделювання адресного енергетичного впливу електромагнітного поля магнетрона на зразок сировини в формі плоского рухомого шару, аналогічний до впливу на шар сировини розміщений на стрічці транспортного конвеєра МХ сушарки стрічкового типу. Розрахункові показники енергопідведення, обмежені параметрами сушильної камери «донора» конструкції стенду, складають в еквіваленті до споживаної магнетроном електричної потужності $\sim 10 \text{ кВт/м}^2$ стрічки конвеєра та $1,7 \text{ кВт/кг}$ матеріалу, що обробляється. При максимальних параметрах енергопідведення, в дослідженні процесу вологовидалення з бобів гороху

отримано швидкість вологовидалення на рівні 4,5 %/хв., що цілком співвідноситься з попередніми дослідженнями. При менш інтенсивних режимах енергопідведення максимальні показники швидкості видалення вологи складають в середньому 2,5-3,0 %/хв.

References

1. Zhou, X. and Wang, S. (2018). Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review, *Drying Technol.*, 37, (3), 271. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1452255>
2. Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., and Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables, *Trends Food Sci. Technol.*, 17(10), 524. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.011>
3. Burdo, O.G., Terziev, S.G., Gavrilov, A.V., Sirotyuk, I.V., et al. (2020). System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials, *Problemy Region. Energ.*, 46, (1), 92. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
4. Burdo, O.G., Trishin, F.A., Gavrilov, A.V., and Sirotyuk, I.V. (2021). Electrodynamics processes as an effective solution of food industry problems, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 57(3), 330. <https://doi.org/10.3103/s1068375521030030>
5. Yarovy, I., & Ali, V. (2020). Initsiyuvannya mekhanodyfuziynoho rezhymu volohovidvedennya v protsesakh znevodnennya rosllynnoyi syrovyny. *Scientific Works*, 84(1), 61-66. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1871>
6. Yarovy I. I. et al (2019). Innovatsiyni sposoby enerhopidvodu u protsesakh sushynnya termolabil'noyi syrovyny. *Innovatsiyni enerhotekhnolohiyi*, 17–23 <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/10062>
7. Bezbakh, I., Yarovy, I., & Voytenko, O. (2019). Kombinovani sposoby enerhopidvedennya v protsesakh sushynnya rosllynnoyi syrovyny. *Scientific Works*, 83(2), 71-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1532>

PHYSICAL MODELING OF THE PROCESS OF DEHYDRATION OF PLANT RAW MATERIALS IN BELT MICROWAVE DRYERS

Yarovy I.I., PhD, Associate Professor, Ali V.P., graduate student
Odessa National University of Technology, Odessa, Ukraine

Abstract. The article reflects the completed stage of scientific research. The general direction of scientific work is the implementation of targeted energy delivery technologies in the processes of drying, sterilization and heat treatment of nutrition products and raw materials.

The paper provides a brief analysis of the relevance of the scientific topic tagged with "microwave drying". A typical design of belt-type drying units is described. For most microwave devices, there is no systematized information about appropriate modes of wet materials processing as well as typical parameters of moisture removal processes, which complicates the possibility of their integration into existing technological processes. One of the factors of accelerating the development of microwave drying technologies can be the accumulation and systematization of information on appropriate regimes and limitations of MW drying processes for typical vegetable raw materials.

Experimental modeling of the moisture removal process in MW installations is considered as a reasonable way to research the processes of this type. It is proposed to investigate typical regimes for the processing of plant raw materials with the following systematization of the obtained dependencies.

Typical conditions of interaction of the microwave electromagnetic field and the moving layer of wet material in such installations should be simulated using a special stand and the appropriate methodology. The main task of the stand is to create conditions for accurate and convenient modeling of the effect of the MW radiation of the drying chamber on a sample of wet material with specified layer characteristics. The mode of material processing in a multi-zone dryer is simulated by repeating the passage of the sample through the drying chamber.

The design description of developed experimental stand is provided. The method of experiment realization is described. The raw materials used for the research are described. The resulting dependences obtained during the experiments are specified. A comparative assessment of the obtained results with previous studies is presented. The direction and tasks of the next stage of research are defined.

Key words: microwave drying, growing materials, combined drying methods.

Список використаної літератури

1. Zhou, X. and Wang, S., Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review. *Drying Technol.*, 2018, vol. 37, no. 3, p. 271. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1452255>
2. Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., and Wang, S., Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables, *Trends Food Sci. Technol.*, 2006, vol. 17, no. 10, p. 524. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.011>

3. Burdo, O.G., Terziev, S.G., Gavrilov, A.V., Sirotyuk, I.V., et al., System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials, *Problemy Region. Energ.*, 2020, vol. 46, no. 1, p. 92. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
4. Burdo, O.G., Trishin, F.A., Gavrilov, A.V., and Sirotyuk, I.V., Electrodynamic processes as an effective solution of food industry problems, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2021, vol. 57, no. 3, p. 330. <https://doi.org/10.3103/s1068375521030030>
5. Яровий, І., & Алі, В. (2020). Ініціювання механодифузійного режиму вологовідведення в процесах зневоднення рослинної сировини. *Scientific Works*, 84(1), 61-66. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1871>
6. Інноваційні способи енергопідводу у процесах сушіння термолабільної сировини / І. І. Яровий, М. А. Кашкано, О. І. Маренченко, Є. О. Пилипенко // Інноваційні енерготехнології – 2019: зб. пр. VII Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 9–13 верес. 2019 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. – Одеса, 2019. – С. 17–23 : рис. – Бібліогр.: 9 назв. <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/10062>
7. Безбах, І., Яровий, І., & Войтенко, О. (2019). Комбіновані способи енергопідведення в процесах сушіння рослинної сировини. *Scientific Works*, 83(2), 71-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1532>

Отримано в редакцію 20.05.2022

Прийнято до друку 22.09.2022

Received 20.05.2022

Approved 22.09.2022

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРЧОВИХ СИСТЕМ В ІЧ-ПОЛІ

Кравченко О.Ю.¹, аспірант, Молчанов М.Ю.¹, аспірант, Мілінчук К.С.², студентка,
Терзієв С.Г.¹, д.т.н., доцент, Петровський В.В.¹, інженер II категорії.
¹Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна
²Одеський національний університет ім.І.І. Мечникова, м. Одеса, Україна

Анотація. Розглянуто проблеми екоіндустрії та інноваційні шляхи розвитку агропромислової сфери. Показано перспективи технологій глибокої переробки сировинних відходів при виробництві соків та екстрактів. Визначено недоліки традиційного обладнання для зневоднення сировини реологічної структури. Наведено приклади широкого використання в різноманітних задачах зневоднення установок із інфрачервоними джерелами енергії. Сформульовано гіпотезу про перспективи використання електромагнітних джерел енергії в технологіях зневоднення відходів при переробці рослинної сировини. На базі параметричної моделі процесу зневоднення у інфрачервоному полі методами теорії подібності отримано структури критеріальних моделей для рухомого та нерухомого шару сировини. Об'єктами експериментальних досліджень були макуха буряка, цибулі, яблука, дині, абрикосу, полуниці, винограду, банану, сливи та томатна паста. Експериментальний стенд включав холодильну машину, вакуумну систему, джерела електромагнітної енергії, комп'ютеризовану систему збору та обробки інформації. Новими науковими результатами є функціональні залежності по кінетиці зневоднення об'єктів досліджень, термограм процесів та лінії швидкості сушіння. Комплекс проведених експериментальних досліджень визначив перспективність технологій інфрачервоного зневоднення сировини. Запропоновано методологію порівняння енергетичної ефективності технологій із різними по природі джерелами енергії. Порівняння проводиться по ефективності використання 1 кг первинного палива. Всі енергетичні потоки нормуються до палива. Наведено енерготехнологічні схеми традиційної конвективної сушарки та інноваційної із інфрачервоними джерелами енергії. Показано, що відсутність в інноваційній сушарці втрат енергії із викидами сушильного агента підвищує ефективність використання енергії палива на 30 %.

Ключові слова: сушіння харчових реологічних систем, сушильні установки з ІЧ – генераторами, кінетика та енергетика сушіння.

Вступ. Сучасна епоха розвитку людства – це епоха екоіндустрії. Інноваційні технології мають вирішувати проблеми ефективного використання енергетичних та сировинних ресурсів при суттєвому зниженні навантаження на довкілля. В першу чергу революційні перетворення в такому напрямку очікуються від харчових технологій, де споживається значна доля енергетичних ресурсів, де до двох третин сировини попадає у відходи. При цьому, часто це дорога сировина, а комерційна вартість вилучення залишкових компонентів у відходах іноді перевищує й сам готовий продукт. Але традиційне обладнання не в змозі вирішити такі проблеми.

В одеському національному технологічному університеті, в лабораторії «Харчові нанотехнології» проводяться комплексні дослідження впровадження принципів нанотехнологій для вирішення задач екоіндустрії, створення безвідходних технологій переробки рослинної сировини [1, 2].

На першому етапі поставлено завдання експериментально визначити ефективність сушіння макухи після отримання овочевих та фруктових соків. Інноваційним кроком в дослідженнях стало використання електромагнітних джерел енергії ІЧ-діапазону. Дослідження проведено на експериментальному стенді, основними вузлами якого були: камера з ІЧ-генератором, касета з сировиною, яка підвішувалась до ваг.

Аналіз літературних джерел та формулювання науково-технічної гіпотези. Наразі, удосконалення технологій сушіння часто базується на використанні ІЧ джерел енергії, як самостійного, чи в комбінації із конвективними, вакуумними, мікрохвильовими та механічними (вібраційними) процесами [3 - 11]. Показано, що сушіння харчових матеріалів в ІЧ-полі потребує менших витрат енергії та часу обробки сировини, забезпечує кращий контроль температури, зменшує вплив на довкілля, просто комбінується із іншими способами сушіння, дозволяє отримати готовий продукт високої якості. Таким чином, ІЧ метод сушіння є перспективний, потенційний метод для зневоднення харчових систем.

Створення конструкцій ІЧ сушарок потребує визначення кінетичних закономірностей, які суттєво залежать від виду сировини. Так, вплив товщини шару апельсину та режимних параметрів процесу встановлено в [3]. Комплексний аналіз впливу швидкості сушіння, питомі витрати енергії, ефективні процеси дифузії та енергія активації для різних харчових систем проведено в [4]. Для сушіння грецького горіху розроблено сушарку дегоріху оброблялись в апараті з тепловим насосом та рекуперацією теплоти (HP) й сушарки з тепловим насосом, ІЧ випромінювані та рекуперацією тепла (IRAHP). Визначено, що IRAHP забезпечує еконо-

мію енергії 10 % таскорочує час на 20 % в порівнянні з НР [5]. Для зневоднення креветок запропонована та досліджена роторна ІЧ сушарка (RID) [6]. Використання ІЧ сушіння дозволило підвищити енергетичну ефективність на 15 %. Сушарка з використанням ІЧ джерел енергії та вентиляторів досліджена для зневоднення чіпсів куркуми. [7]. Максимальна ефективність сушіння куркуми 25,22 % й мінімальні питомі витрати енергії $1,24 \text{ кВтч/кг}$ отримано при 70°C при швидкості повітря 2 м/с і товщині шару 25 мм . В [8] досліджено ефективний коефіцієнт дифузії при зневодненні груші, який зростає лінійно із підвищенням температури від $1,15 \times 10^{-9}$ до $5,08 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Із співвідношень Арреніуса енергія активації процесу сушіння груші дорівнювала $29,87 \text{ кДж/моль}$. Менші питомі витрати енергії ($10,28 \text{ кВтч/кг}$) відповідали більш високим температурам сушіння [8]. Значення ефективних коефіцієнтів дифузії при зневодненні тонких зразків листя кропу [9] складало $6,97 \times 10^{-9}$, $6,84 \times 10^{-9}$ і $8,96 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ для потужностей ІЧ джерел 1790, 1970 і 2070 Вт/м^2 відповідно. Дифузійний підхід вважався кращою моделлю, що визначає процес зневоднення листів кропу. В [10] визначено вплив конвективного та ІЧ способів на вміст поліфенолів та антоціанів в плодах: аронії, бузини, вишні, смородині червоної та чорній та інш. Сушіння проводили гарячим воздухом в установці Concept S1060 та ІЧ сушарці Yden CI IR D5. Визначено, що ІЧ сушіння не тільки більш ефективно витрачає енергію, ще й дозволяє в готовому продукті зберегти більше цільових компонентів сировини. В [11] аналізувалась ефективність різних стратегій комбінованих ІЧ та конвективних процесів зневоднення солодкої картоплі. Температура повітря змінювалась від 50 до 70°C , інтенсивність ІЧ джерел - 1100 Вт/м^2 , швидкість повітря $1,5 \text{ м/с}$, а коефіцієнт пульсації від 1 до 3. Визначено вплив стратегії на швидкість сушіння, час сушіння, ефективну дифузійну вологу, питомі енерговитрати, усадку, кольорові характеристики та фітохімічні сполуки солодкої картоплі.

Аналіз літературних джерел свідчить, що ІЧ метод сушіння є сучасним та прогресивним засобом зневоднення сировини. Але більшість технологій із використанням ІЧ зневоднення в секторі харчових продуктів все ще знаходяться тільки на лабораторній чи експериментальній стадії. Окремі специфічні проблеми зневоднення реологічних харчових систем практично не обговорюються.

Мета наступної роботи – створити енергоефективне обладнання харчових виробництв для сушіння відходів із їх складними реологічними особливостями. Отримати підстави для об'єктивного масштабування подальших можливостей запропонованої технології у потужних комплексах безвідходних харчових виробництв.

В основі запропонованої технології є гіпотеза – «організація процесу зневоднення харчових реологічних систем за умовами об'ємного підведення енергії при граничних умовах 2 роду при узгоджені фізичних характеристик сировини, конструктивних параметрів апарату із параметрами електродинамічної дії дозволить інтенсифікувати процес зневоднення при зменшенні енергетичних витрат».

Подальші дослідження базуються на сучасному уявленню теоретичних засад процесів сушіння [12 - 16], принципах удосконалення енергетики сушіння [17] та досвіді робіт лабораторії «Харчові нанотехнології» ОНТУ [18 - 20].

Основні результати досліджень. Аналітичне розв'язання математичної моделі сушіння наразі не реально [18]. Тому, подальші дослідження направлено на спрощення моделі, приведенню краєвої задачі сушіння до моделі в узагальнених змінних. За основу аналізу прийнято параметричну модель процесу сушіння сировини в ІЧ- полі (рис.1).

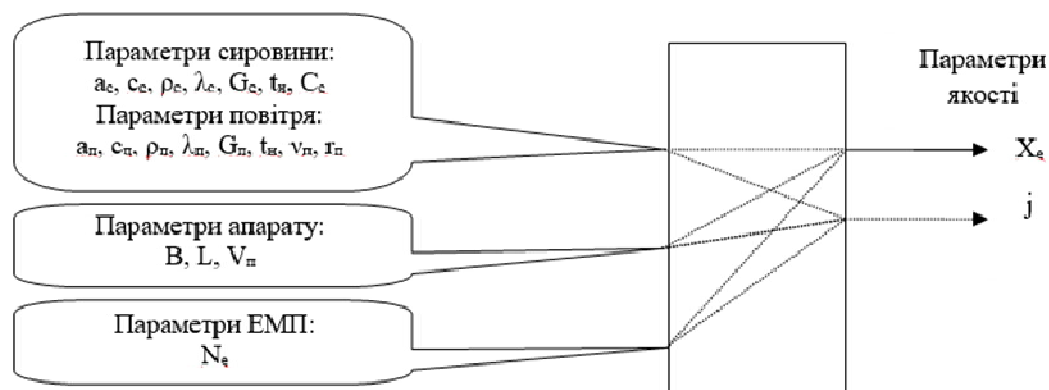


Рис.1 – Параметрична модель

В основі досліджень використано другу теорему подоби Федермана – Бекінгема, яка дає методику коректної постановки експериментів та обробки їх результатів [21]. Прийнято кінетичним коефіцієнтом, який визначає інтенсивність процесу сушіння, вважати коефіцієнт масовіддачі. У задачі, що вирішується, сушіння здійснюється двома потоками: дифузійним і гідродинамічним. Тому, результатом перетворень має стати модель в узагальнених змінних, яка б враховувала специфіку завдання. По-перше, введемо параметр, який

враховує результуючий потік вологи (β_e) ефективний коефіцієнт масовіддачі. Дифузійний потік визначається швидкістю потоку повітря (v), його щільністю (ρ) і в'язкістю (μ); швидкістю руху стрічки транспортера (w) і товщиною шару продукту на стрічці (δ); рушійною силою процесу, тобто. різницею концентрацій (ΔX) та гравітаційною константою (g). Інтенсивність другого потоку залежить від потужності випромінювання (N), питомої теплоти фазового переходу (r), щільності рідини ($\rho_{ж}$) і ширини шару (B). У такій постановці (β_e) враховує і дифузійні, і термічні, і гідродинамічні опори. Зведення основних факторів, які визначають (β_e), наведено у табл.1.

Таблиця 1

Основні параметри процесу сушіння в інфрачервоному полі

Параметр	Символ	Розмірність
Ефективний коефіцієнт масовіддачі	β_e	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Товщина шару	δ	м
Щільність повітря	ρ	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
В'язкість повітря	μ	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
Швидкість повітря	v	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Коефіцієнт дифузії	D	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
Питома теплота пароутворення	r	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
Потужність мікрохвильового поля	N	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$
Щільність вологи	$\rho_{ж}$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Різниця концентрацій	ΔX	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Гравітаційна постійна	g	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Ширина шару	B	м

Всі ці параметри, представлені в таблиці 1, містять лише три основні розмірності: довжину (L), масу (M) та час (τ).

На основі методу аналізу розмірностей, потрібну функцію β_e представимо залежністю між числами подібності. У даному випадку число змінних $n = 12$, число одиниць виміру $m = 3$. Тоді, згідно з π -теоремою, число безрозмірних комплексів, що описують процес, має дорівнювати $(n - m) = 9$.

Параметри δ, ρ, μ приймаємо загальними для всіх безрозмірних груп. Тоді для першої групи запишемо:

$$\pi_1 = \delta^a \rho^b \mu^c \beta_e^g \quad (1)$$

Для рівняння (1) розмірна матриця має вигляд:

Таблиця 2

Розмірна матриця

	a	b	c	g	Рівняння
M		1	1		$b + c = 0$ (2)
L	1	-3	-1	1	$a - 3b - c + g = 0$ (3)
τ			-1	-1	$-c - g = 0$ (4)

Рішенням системи рівнянь (табл. 2) є: $a = b = -c = g$. Тому:

$$\pi_1 = \frac{\delta \cdot \rho \cdot \beta_e}{\mu} \quad (5)$$

Наступні комплекси визначимо аналогічно шляхом об'єднання δ, ρ, μ з параметрами, що залишилися (табл. 1):

$$\left. \begin{aligned} \pi_2 &= \frac{\Delta X}{\rho}; & \pi_3 &= \frac{\delta^3 \rho^2 g}{\mu^2}; & \pi_4 &= \frac{\delta \rho v}{\mu}; \\ \pi_5 &= \frac{\rho D}{\mu}; & \pi_6 &= \frac{\delta^2 \rho_{ж}^2 r}{\mu^2}; & \pi_7 &= \frac{\delta \rho_{ж}^2 N}{\mu^3}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Геометрію розміщення продукту враховує фактор форми – безрозмірний параметричний комплекс (π_8). Відношення зовнішньодифузійного потоку до внутрішньодифузійного враховується числом Пекле (π_9). Ці

рівняння разом з (5) і системою (6) використовується для пошуку комбінацій, які дадуть структуру рівняння в узагальнених змінних (табл.3).

Таблиця 3

Комбінації параметрів та числа подібності

	параметр	модель	узагальнені числа подоби
1	π_1	$\beta\rho\delta/\mu = \beta\delta/\nu$	безрозмірний коефіцієнт масовіддачі
2	π_4	$Re = \delta\rho\nu/\mu = \delta\nu/\nu$	число Рейнольдса
3	$(\pi_5)^{-1}$	$Sc = \rho D/\mu$	число Шмідта
4	π_5/π_1	$Sh = \beta_2\delta/D$	число Шервуда
5	$\pi_2\pi_3(\pi_8)^3$	$Gr_\delta = g\delta^3\rho\Delta X\mu^{-2}$	дифузійне число Грасгофа
6	π_9	$Pe_\delta = \nu\delta/D$	дифузійне число Пекле
7	$\pi_7(\pi_4\pi_6)^{-1}$	$Bu = N(r\nu\delta^2\rho_{ж})^{-1}$	число енергетичної дії
8	π_8	$F_F = \delta/B$	фактор форми

Число енергетичної дії вперше було запропоновано у роботі [2]. Фізичний зміст числа **Bu** полягає в тому, що встановлюється співвідношення величини витраченої електромагнітної енергії та енергії базового процесу. Такою базовою енергією може вважатися енергія, яка характерна для традиційної технології. Зі зростанням N зростає значення числа **Bu**, зростає різниця тисків, інтенсифікуються викиди з капілярної структури. Це призведе до зростання коефіцієнта βe . Понад те, ці викиди турбулізують і приграничний шар. Отже, число **Bu** може характеризувати як ступінь енергетичного впливу, а й відповідну гідравлічну ситуацію над шаром продукту.

Таким чином, отримуємо:

$$Sh = A (Re)^q (Gr_\delta)^g (Sc)^n (Bu)^p (F_F)^k. \quad (7)$$

У рамках досліджуваного завдання можна знехтувати числом Грасгофа через незначний вплив природної конвекції. При електромагнітному підведенні енергії (при ГУ II роду) повітря виконує завдання виключно дифузійного середовища. У таких умовах великі швидкості повітря стають не тільки не потрібні, а навіть шкідливі, через втрати енергії з сушильним агентом, що відпрацював. Тому процеси сушіння протікають за низьких швидкостей потоку повітря. У умовах показники ступеня n , g і q наближаються до 0. І структура критеріального рівняння спрощується:

$$Sh = A (Pe_\delta)^m (Bu)^p (F_F)^k \quad (8)$$

Розглянемо, як модернізувати рівняння (8) для завдань сушіння в нерухомому шарі при електромагнітних джерелах підведення енергії. З (8) виключається число Пекле. Визначальну роль сушінні грає число енергетичного впливу. На першому етапі досліджень обробку бази експериментальних даних доцільно проводити при окремому обліку впливу товщини оброблюваного шару, безрозмірна форма якого (**H**) може виглядати відношенням поточної товщини **h** до базового значення (наприклад, 1 м). Тоді:

$$Sh = A * Bu^n * H^m * F_F^k \quad (9)$$

Константи в (8) і (9) визначаються при обробці масиву даних, отриманих при комплексних експериментальних дослідженнях. Досліди проведено на універсальному експериментальному стенді (рис.2).

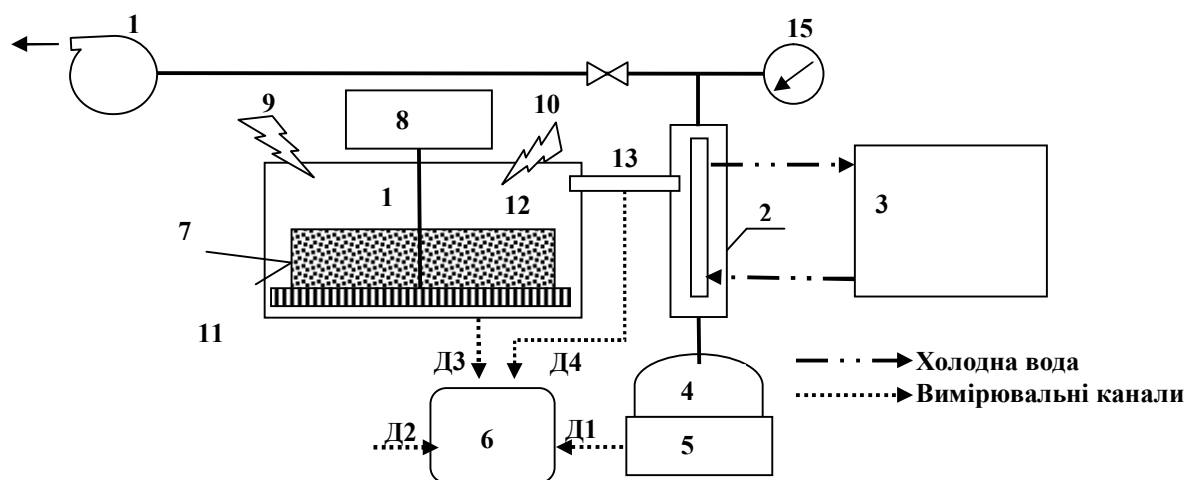


Рис. 2 – Схема універсального стенду для дослідження процесів зневоднення в електромагнітних полях

Основними елементами дослідного стеду (рис.2) є сушильна камера 1, конденсатор 2, холодильна машина 3, ємність для збору конденсату 4, що встановлена на електронних вагах 5. Система комп'ютерного збору інформації 6 реєструє показання термодатчиків, електронних ваг 5 та 8, які фіксують поточну масу сировини 7. Необхідна маса сировини рівномірним шаром розміщується на касеті 11, яку закріплено до вагів 8. В стенді використано ІЧ джерела енергії 9 та 10. Паровий простір сушильної камери 12 каналом 13 з'єднано із конденсатором 2. Стенд передбачає можливість роботи в умовах атмосферного тиску, так і в умовах вакууму, що забезпечується насосом 14 й контролюється вакууметром 15. Сигнал з ваг через інтерфейс поступає до комп'ютера. Усереднені результати вимірів фіксувались у координатах «вага - час», «температура - час». Обробка вимірів визначала вологість сировини та швидкість сушіння (рис.3...5). Згідно параметричної моделі (рис.1) послідовно вивчався вплив потужності поля, товщина шару, тип сировини на кінетику зневоднення макухи.

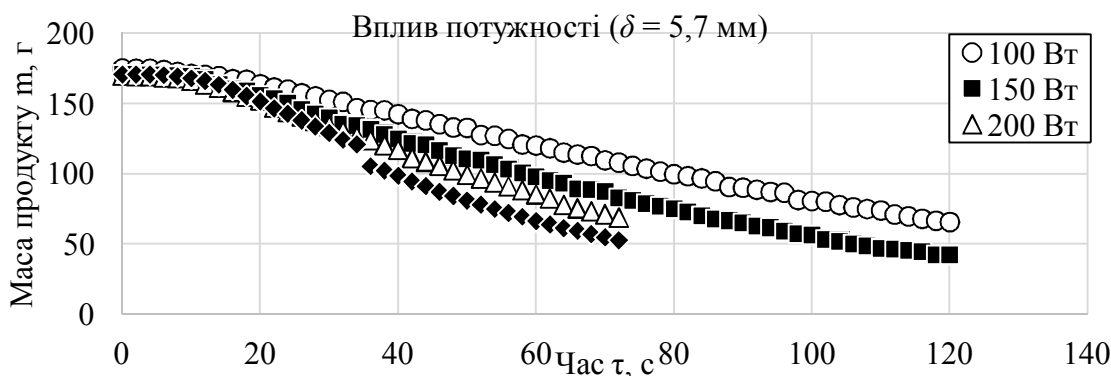


Рис.3 – Кінетика зневоднення макухи яблук в ІЧ- полі

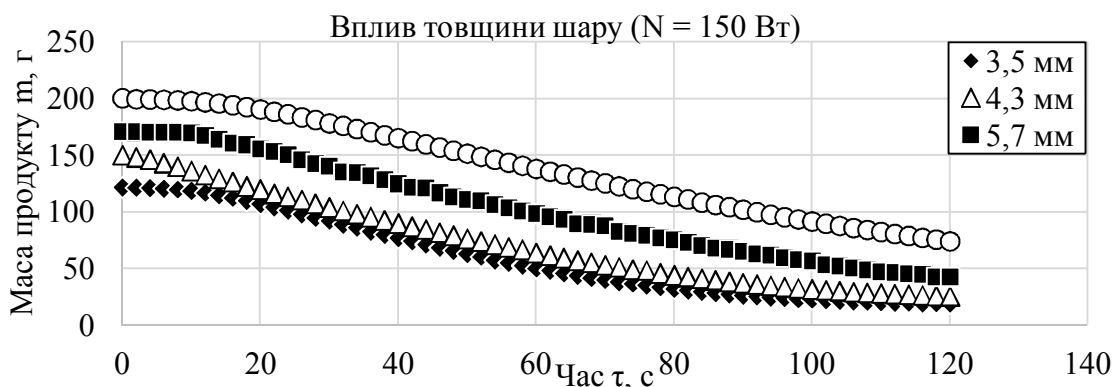


Рис.4 – Кінетика зневоднення макухи яблук в ІЧ- полі

Ефект впливу виду сировини ілюструється кінетичними залежностями (рис.5).

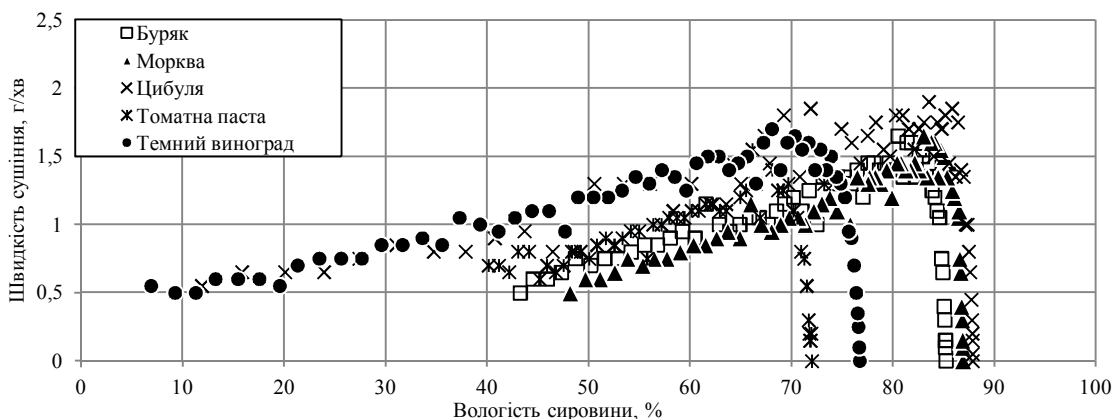


Рис.5 – Кінетика сушіння макухи в нерухомому шарі в умовах ІЧ – поля

Аналіз результатів експериментів наведено в табл.4.

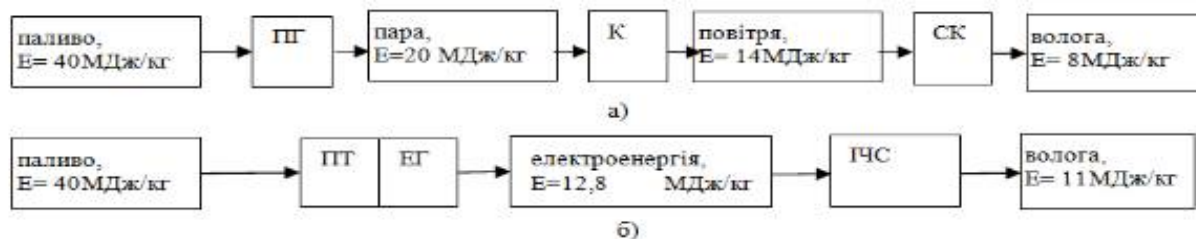
Діапазони зміни параметрів

продукт	Швидкість сушіння, г/хв		Вологість, %	
	Min.	Max.	Max	Min.
Буряк	0,5	1,75	86,9	43,2
Морква	0,5	1,6	87,9	49,6
Цибуля	0,6	1,85	87,9	13,2
Томатна паста	0,65	1,3	72	42,1
Темний виноград	0,55	1,65	76,7	6,9

Аналогічні залежності отримано на пюре яблук, полуниці, банану, сливи, персика, абрикосу, дині.

Наразі, важливим параметром, що характеризує процес зневоднення, вважається енергетика, питомі витрати енергії. Застосування інноваційних джерел ІЧ - енергії потребує й нових підходів до порівняння традиційних та інноваційних технологій зневоднення. В роботі пропонується системний підхід аналізу ефективності використання енергії для технологій із різними джерелами енергії, наприклад, конвективної та електромагнітної.

Об'єктивні результати можна отримати на основі системних досліджень всіх етапів конверсії енергії «первинне паливо – його трансформації у відповідні види енергії – мережа - сировина». За такою схемою проведено аналіз (рис.6).



а) – традиційні конвективні технології сушіння; б) – інноваційна технологія сушіння в ІЧ- полі

Рис. 6 – Конверсія енергії в технологіях зневоднення (всі параметри приведені до 1кг палива)

В традиційних конвективних сушарках енергія палива в парогенераторі (ПГ) перетворюється в енергію пари, а в калорифері (К) – в енергію повітря. В сушильній камері (СК) із кожного кг палива до вологи сировини підводиться 8 МДж.

В схемі інноваційній інфрачервоній сушарці (ІЧС) ефективність використання енергії палива зростає з 8 до 11 МДж, а це на 30 ...35% більше.

Висновки. Досліди показали, що використання ІЧ технологій сушіння – це перспективні шляхи вирішення екологічних проблем та можливість отримання додаткових резервів повноцінної їжі при переробці сировинних відходів консервних виробництв. Важливим доказом перспектив впровадження ІЧ технологій сушіння є практична відсутність втрат енергії із відпрацьованим теплоносієм, що дає змогу суттєво підвищити енергетичну ефективність інноваційної технології.

References

- Burdo, O.G. (2013). Pischevyie nanoenergotehnologii [Food Nanoenergy Technologies]. Kherson (in Russian).
- Burdo O.G. (2005). Nanoscale effects in food-production technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1(78), 90-96
- Rezvani, Z. et al. (2022) Energy and exergy analysis of a water bed-infrared dryer coupled with a photovoltaic-thermal collector. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8). DOI 10.1111/jfpe.14058. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000783002600001>
- Delfiya, D. et al. (2022). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*. 45. DOI 10.1111/jfpe.13810. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000674841000001>
- Karaca Dolgun, Gülşah & Aktaş, Mustafa & Dolgun, Ekin. (2021). Infrared convective drying of walnut with energy-exergy perspective. *Journal of Food Engineering*, 306. DOI 110638. 10.1016/j.jfoodeng.2021.110638. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>
- Al-Hilphy, Asaad & Al-Mtury, Atheer & Al-Iessa, Sajedah & Gavahian, Mohsen & Alshatty, Sabah & Jassim, Muhammad & Mohusen, Zainab. (2022). The pilot-scale rotary infrared dryer of shrimp (*Metapenaeus affinis*): mathematical modeling and effect on the chemical, color components, and sensory attributes. *Journal of Food Process Engineering*. DOI 10.1111/jfpe.13945. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000733187500001>

7. Ganesan, Jeevarathinam & Pandiselvam, Ravi & Pandiarajan, T. & Palaniswamy, Preetha & Krishnakumar, T. & Balakrishnan, Murugesan & Venkatachalam, Thirupathi & Ganapathy, Shunmugam & Damodarasamy, Amirtham. (2022). Design, development, and drying kinetics of infrared-assisted hot air dryer for turmeric slices. *Journal of Food Process Engineering*. 45. DOI 10.1111/jfpe.13876. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000705099200001>
8. Araujo, Marcos & Barbosa, Eloiny & Lopes, Roberto & Corrêa, Paulo & Barbosa, Elisa. (2021). Infrared drying of pear slices: Drying kinetics, energy, and exergy analysis. *Journal of Food Process Engineering*. 44. DOI 10.1111/jfpe.13915. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000707933700001>
9. Tezcan, Derya & Sabanci, Serdal & Çevik, Mutlu & Çokgezme, Ömer & İcier, Filiz. (2020). Infrared drying of dill leaves: Drying characteristics, temperature distributions, performance analyses and colour changes. *Food Science and Technology International*. 27. DOI 108201322092914. 10.1177/1082013220929142. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000538276500001>
10. Mendelova, Andrea & Mendel, Ľubomír & Solgajová, Miriam & Kolesárová, Anna & Mareček, Ján & Zelenáková, Lucia. (2022). COMPARISON OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT FRUIT DRYING METHODS ON THE CONTENT OF SELECTED BIOACTIVE SUBSTANCES. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*. e9223. DOI 10.55251/jmbfs.9223. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000869066200001>
11. Indiarto, Rossi & Inayah, Devia & Wulansari, Wulansari & Ramadhani, Abbya & Yarlina, Vira & Pangawikan, Aldila. (2021). Chocolate's Blooming Phenomenon: A Brief Review of The Formation Process and Its Influencing Factors. 9. 1156-1161. DOI 10.30534/ijeter/2021/21982021. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000447581200010>
12. Lyikov A.V. (1971). *Teplomassobmen (spravochnik)*. [Heat and Mass Transfer (Handbook)] M.: Energiya (in Russian).
13. Snezhkin Yu.F., Shapar R.O. (2021). *Energoefektivnist protsesiv sushynnya. Tematichnyy zbirnik statey u dvoh tomah*. [Energy efficiency of drying processes. Thematic collection of articles in two volumes] Vol. 1. Kyiv. (in Ukrainian).
14. Potapov V.O., Pogozhih M.I. (2003). *Molekulyarno kinetichnyy metod analizu kinetiki sushynnya koloYidnih kapillyarno poruvatih materialiv*. [Molecular kinetic method of analysis of drying kinetics of colloidal capillary porous materials] Scientific Works, 26. 270-274. (in Ukrainian).
15. Grishin M.A., Atanazevich V.I., Semenov Yu.G. *Ustanovki dlya sushki pischevykh produktov: spravochnik // Agropromizdat* [Food Dryers: Handbook] - M., 1989. (in Russian).
16. Planovskiy A.N., Mushtaev V.I., Ulyanov V.M. (1979). *Sushka dispersnykh materialov v himicheskoy promyshlennosti*. [Drying of particulate materials in the chemical industry] – Moscow (in Russian).
17. Snezhkin Yu.F., Boryak L.A., Havin A.A. (2004). *Energosberegayushchie teplotnologii proizvodstva pischevykh poroshkov iz vtorichnykh syrevykh resursov*. [Energy-saving heat technologies for the production of food powders from secondary raw materials] Kyiv: Naukova dumka. (in Russian).
18. Burdo O. G. (2010). *Evolutsiya sushilnykh ustanovok* [The evolution of dryers]. Odessa: Poligraf (in Russian).
19. Burdo O.G., Sirotyuk I.V., Scherbich M.V., Akimov A.V., Poyan A.S. *Innovatika energeticheskikh tehnologiy degidratatsii i ekstragirovaniya pischevogo syrya*. [Innovation of energy technologies for dehydration and extraction of food raw materials] Problemele Energeticii regionale. (in Russian).
20. Burdo O.G., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V., Scherbich M.V. *Sistema innovatsionnykh energotekhnologiy obezvozhhvaniya pischevogo syrya*. [System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials.] Problemele energeticii regionale. (in Russian).
21. Guhman A.A. (1974). *Primenenie teorii podobiya k issledovaniyu protsessov teplo- i massoobmena*. [Application of the theory of similarity to the study of heat and mass transfer processes] M.: Vysshaya shkola. (in Russian).

RESEARCH OF RHEOLOGICAL DRYING PROCESSES OF FOOD SYSTEMS IN THE FIELD OF IC

Kravchenko O.Yu.¹, graduate student, Molchanov M.Yu.¹, graduate student, Milinchuk K.S.², student, Terziev S.G.¹, d.t.s., associate professor, Petrovsky V.V.¹, engineer of the II category.

¹Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

²Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

Abstract. The problems of eco-industry and innovative ways of development of the agro-industrial sphere are considered. The perspective of technologies of deep processing of raw materials in the production of juices and extracts is shown. Disadvantages of traditional equipment for dehydration of rheological structured raw materials were revealed. Examples of the wide use of drying units with infrared energy sources in various tasks are given. A hypothesis is formulated about the prospects of using sources of electromagnetic energy in waste dehydration tech-

nologies during the processing of vegetable raw materials. On the basis of the parametric model of the dehydration process in the infrared field, the structures of criterion models for the moving and stationary layers of raw materials were obtained using the methods of similarity theory. The objects of experimental research were beets, onion, apples, melon, apricots, strawberries, grapes, bananas, plums and tomato paste. The experimental stand included a refrigerating machine, a vacuum system, sources of electromagnetic energy, and a computerized system for collecting and processing information. The new scientific results are the functional dependences of the dehydration kinetics of the studied objects, the thermogram of the processes and the drying speed line. The set of conducted experimental studies determined the prospects of the technology of infrared dehydration of raw materials. A methodology for comparing the energy efficiency of technologies with different energy sources is proposed. The comparison is based on the efficiency of using 1 kg of the main fuel. All energy flows are allocated to fuel. The energy technological schemes of the traditional convective dryer and the innovative one with infrared energy sources are presented. It is shown that the absence of energy losses with drying agent emissions in the innovative dryer increases the efficiency of fuel energy use by 30%.

Key words: drying of food rheological systems, drying plants with IR generators, drying kinetics and energetics.

Список використаної літератури

1. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
2. Burdo O.G. (2005). Nanoscale effects in food-production technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1(78), 90-96
3. Energy and exergy analysis of a water bed-infrared dryer coupled with a photovoltaic-thermal collector. Rezvani, Z, Morteza pour, H, Ameri, M, Akhavan, HR, Arslan, S. of *Engineering Physics and Thermophysics*, 1(78) DOI 10.1111/jfpe.14058. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000783002600001>
4. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. Автор: Delfiya, D. S. A., Prashob, K, Murali, S, Alfiya, P.V., Samuel, M.P., Pandiselvam, R. *Journal of Food Process Engineering*. 45. DOI 10.1111/jfpe.13810. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000674841000001>
5. Karaca Dolgun, Gülşah & Aktaş, Mustafa & Dolgun, Ekin. (2021). Infrared convective drying of walnut with energy-exergy perspective. *Journal of Food Engineering*, 306. DOI 110638. 10.1016/j.jfoodeng.2021.110638. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>
6. Al-Hilphy, Asaad & Al-Mtury, Atheer & Al-Iessa, Sajedah & Gavahian, Mohsen & Alshatty, Sabah & Jassim, Muhammad & Mohusen, Zainab. (2022). The pilot-scale rotary infrared dryer of shrimp (*Metapenaeus affinis*): mathematical modeling and effect on the chemical, color components, and sensory attributes. *Journal of Food Process Engineering*. DOI 10.1111/jfpe.13945. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000733187500001>
7. Ganesan, Jeevarathinam & Pandiselvam, Ravi & Pandiarajan, T. & Palaniswamy, Preetha & Krishnakumar, T. & Balakrishnan, Murugesan & Venkatachalam, Thirupathi & Ganapathy, Shunmugam & Damodarasamy, Amirtham. (2022). Design, development, and drying kinetics of infrared-assisted hot air dryer for turmeric slices. *Journal of Food Process Engineering*. 45. DOI 10.1111/jfpe.13876. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000705099200001>
8. Araujo, Marcos & Barbosa, Eloiny & Lopes, Roberto & Corrêa, Paulo & Barbosa, Elisa. (2021). Infrared drying of pear slices: Drying kinetics, energy, and exergy analysis. *Journal of Food Process Engineering*. 44. DOI 10.1111/jfpe.13915. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000707933700001>
9. Tezcan, Derya & Sabanci, Serdal & Çevik, Mutlu & Çokgezme, Ömer & Icier, Filiz. (2020). Infrared drying of dill leaves: Drying characteristics, temperature distributions, performance analyses and colour changes. *Food Science and Technology International*. 27. DOI 108201322092914. 10.1177/1082013220929142. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000538276500001>
10. Mendelova, Andrea & Mendel, Eubomír & Solgajová, Miriam & Kolesárová, Anna & Mareček, Ján & Zelenáková, Lucia. (2022). COMPARISON OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT FRUIT DRYING METHODS ON THE CONTENT OF SELECTED BIOACTIVE SUBSTANCES. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*. e9223. DOI 10.55251/jmbfs.9223. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000869066200001>
11. Indiarto, Rossi & Inayah, Devia & Wulansari, Wulansari & Ramadhani, Abbya & Yarlina, Vira & Pangawikan, Aldila. (2021). Chocolate's Blooming Phenomenon: A Brief Review of The Formation Process and Its Influencing Factors. 9. 1156-1161. DOI 10.30534/ijeter/2021/21982021. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000447581200010>
12. Лыков А.В. Тепломассообмен (справочник). М.: Энергия, 1971. – 560с.
13. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Енергоефективність процесів сушіння. Тематичний збірник статей у двох томах. Том 1. Київ: 2021. – 343с.
14. Потапов В.О., Погужих М.І. Молекулярно кінетичний метод аналізу кінетики сушіння колоїдних капілярно поруватих матеріалів. // Наук.праціОНАХТ.-Одеса: 2003.-Вип.26.-С.270-274.

15. Гришин М.А., Атаназевич В.И., Семенов Ю.Г. Установки для сушки пищевых продуктов: справочник // Агропромиздат- М., 1989.-
16. Плановский А.Н., Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. – М., 1979. – 287 с.
17. Снежкин Ю.Ф., Борjak Л.А., Хавин А.А. Энергосберегающие теплотехнологии производства пищевых- порошков из вторичных сырьевых ресурсов. Київ: Наукова думка, 2004. 228 с.
18. Бурдо О. Г. Эволюция сушильных установок. – Одесса: Полиграф, 2010. – 368с.
19. Бурдо О.Г., Сиротюк И.В., Щербич М.В., Акимов А.В., Поян А.С. Инноватика энергетических технологий дегидратации и экстрагирования пищевого сырья. *Problemele energeticii regionale*.
20. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Гаврилов А.В., Сиротюк И.В., Щербич М.В. Система инновационных энерго- технологий обезвоживания пищевого сырья *Problemele energeticii regionale*
21. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1974. – 328с

Отримано в редакцію 22.05.2022
Прийнято до друку 21.09.2022

Received 22.05.2022
Approved 21.09.2022

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ ДЕРЕВИНИ ДУБА В АПАРАТАХ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ТИПУ

Акімов О.В., аспірант, Мординський В.П., к.т.н., доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. У статті говориться про перспективний метод отримання рідких екстрактів за допомогою електромагнітного випромінювання. Виділяються основні переваги перед традиційними методами екстрагування. Коротко перелічено використання дубової деревини у промисловості. Було визначено основні медичні властивості компонентів дубу, запропоновано перспективне використання рідких екстрактів з дубу у виноробній промисловості. Визначено тенденцію у технології екстрагування, яка полягає у переході до інтенсивних та перспективних методів, зазначені їхні основні принципи. Визначено основні фактори, що обумовлюють перехід до нових методів екстрагування. У статті було визначено основні проблеми виробництва коньяків під час витримки, що впливають на собівартість кінцевого продукту. Зазначено ключові компоненти деревини дубу, які формують характерний смак та букет у коньяках та бренді. Сформульовані науково-технічні протиріччя процесів екстрагування і витримки, запропонована гіпотеза для їхнього вирішення. Представлені експериментальні стенди, на яких проводилися дослідження. Зазначені усі параметри, при яких проводилися експерименти. Представлені термограми процесів та визначено, що найнижча температура спостерігається у циркуляційному МХ екстракторі. З аналізу даних по концентрації сухих речовин, було визначено, що найкращі показники належать циркуляційному МХ екстрактору, де в якості екстрагенту використовувався водно-спиртовий розчин з більшою концентрацією спирту. Дані про швидкість вилучення сухих речовин додатково підтверджують високу ефективність застосування циркуляційного екстрактора. Підтверджено крацій ефект механодифузії у циркуляційному МХ екстракторі. Зроблені висновки, щодо перспективності впровадження таких апаратів у виробництво.

Ключові слова: електромагнітне поле, екстрагування, кінетика, дубова деревина, лікарські рослини.

Вступ. Одним з перспективних та інноваційних методів отримання рідких екстрактів з рослинної сировини для різних галузей промисловості є використання електромагнітного випромінювання. До переваг екстрагування за допомогою електромагнітних технологій перед традиційними методами є те, що процес може протікати при нижчих температурах, що дозволяє зберегти термолабільні компоненти сировини та за рахунок інтенсифікації процесу дифузії суттєво скоротити тривалість процесу екстрагування. А використання в якості екстрагенту таких полярних розчинників, як спирт і вода, дозволяють не тільки здешевити процес виробництва рідких екстрактів, а ще й завдяки ефекту механодифузії вилучити компоненти, які традиційні технології не здатні без використання додаткових етапів підготовки сировини та використання декількох розчинників.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми. Екстрагування – це один з головних технологічних процесів в промисловості для отримання різних продуктів: екстрактів для харчової, фармацевтичної та косметичної промисловості, витриманих вин та коньяків. Сировиною для вищезазначених методів виступає дубова деревина. Відомо, що дубова деревина використовується для виробництва бочок, в яких проводять витримку вин та коньяків. Як альтернатива витримці у дубових бочках використовують дубові чіпси. Рідкі екстракти з дубової деревини використовуються у медицині, як для зовнішнього, так і для внутрішнього застосування. Особливо відоме використання дубу у стоматології. Компоненти деревини дубу мають кровоспинну дію, протимікробні, антиоксидантні та протизапальні властивості, позитивно впливають на шлунково-кишковий тракт, мають загоювальний ефект [1, 2]. Відоме також використання дубу як складового компоненту парфумів. Також перспективним напрямком для використання екстрактів з дубової деревини може стати їх використання при виробництві високоекстрактивних вин, як альтернатива витримці в дубових бочках або на дубових чіпсах, та як один із способів виробництва коньяків за прискореним методом. У виробництві рідких екстрактів спостерігається поступовий перехід від традиційних методів екстрагування до інтенсивних та перспективних. Їхніми основними принципами – є енергоефективність, повнота вилучення цільових компонентів, мінімальний руйнівний вплив на компоненти сировини, зменшення тривалості та трудомісткості процесу, доступність та безпечність екстрагенту. Відхід від традиційних методів обумовлений тим, що вони не дозволяють в повній мірі виснажити сировину, через що, в ній залишається значна частина цільових компонентів, при вилученні яких, вони можуть дати позитивний економічний ефект на підприємствах при правильному використанні. Крім того, не повністю виснажена сировина може негативно впливати на навколишнє середовище. Не менш важливим фактором, що обумовлює перехід – це тривалість процесу екстрагування, у традиційних методах, тривалість може складати до 24 годин, а в деяких випадках навіть більше. Тривалість також впливає на економічні показники і на якість самого екстракту. Ще

одним фактором є трудомісткість процесу, а саме необхідність заповнювати великі резервуари сировиною, настоювати тривалий час, зливати насичений екстрагент і одночасно подавати свіжий, забезпечувати протічцію сировини і екстрагента, поділяти сировину та екстрагент на частини для кожної батареї апарату і т.д. [3, 4]. У сучасних технологіях фітопрепаратів відомі поліекстракти [3] (поліфракційний екстракти) – це такі препарати, які отримують шляхом послідовного екстрагування лікарської рослинної сировини декількома розчинниками, наприклад, зі зростаючою полярністю. А таке поступове використання різних екстрагентів теж ускладнює процес виробництва та підвищує вартість готового продукту.

Виробництво витриманих вин та коньяків (брєнді) відбувається за традиційною технологією, де головним виступає процес дозрівання, який відбувається у дубових бочках під час витримки. Тривалість технологічного процесу досить висока і складає: для вин від 6 місяців, а для коньячних спиртів від 3 років і більше. Основні процеси, що протікають у цей період можна розділити на фізичні, до яких відносять екстрагування та випаровування спирту, хімічні, до яких відносять окиснення екстрагованих сполук та взаємодія між ними та біохімічні процеси, які протікають, як під час старіння клепок, так і під час витримки. Як вже зазначалося раніше, має місце випаровування спирту під час витримки, так при дотриманні всіх температурних режимів, вологості повітря та вентиляванні приміщень, середньорічні втрати спирту у навколишнє середовище становлять 3% за безводним спиртом, цей показник є достатньо високим, враховуючи саму тривалість витримки, що і призводить до високих цін на готову продукцію. Крім того, слід ще враховувати необхідність підтримання постійної температури у приміщенні де проводиться витримка та забезпечення циркуляції повітря для безпеки, через наявність парів спирту у повітрі, що теж призводить до підвищення вартості готового продукту. Відомо, що спирт проникає в деревину на невелику глибину, всього 3-4 мм, тому існує необхідність заміни деревини бочок або видалення виснаженого шару деревини з попереднім їх розбиранням, для того, щоб можна було отримати продукти належної якості. А це призводить до підвищення трудомісткості процесу, а деревина використовується не повністю [5, 6, 7].

Висока тривалість процесу витримки обумовлена низькою швидкістю процесу дифузії з деревини дубу компонентів, що приймають активну участь в утворенні характерних смаку і букету витриманих вин та коньяків. Лігнін складає в середньому 25% від маси деревини, це полярний полімер. Складається головним чином з ароматичних сполук. Основну роль тонах витримки коньяку належить продуктам розпаду лігніну, зокрема ароматичним альдегідам, відповідальних за появу у букеті цінних ванільних відтінків. Інші продукти розпаду беруть участь у формуванні «тіла» коньяку, сприяють пом'якшенню смаку, беруть участь у створенні тонів витримки у букеті. Слід відмітити, що не знайдено ще якоїсь однієї речовини або групи речовин, які утворюють «коньячний» тон у букеті, букет коньяків утворюється завдяки поєднанню ароматів багатьох сполук. Із особливостей лігніну можна відмітити, що він не розчинний у відомих розчинниках через його сітчасту структуру та хімічні зв'язки з вуглеводами. Вилучається головним чином з міжклітинної речовини і загалом важко піддається вилученню. Дубильні речовини (таніди) – це група водорозчинних екстрактивних речовин складають приблизно 10% від маси деревини, вони є найбільш легко вилученими компонентами деревини дубу. Дубильні речовини в коньячному спирті відіграють важливу роль не тільки у пом'якшенні смаку та поліпшенні забарвлення, вони також беруть участь у перетвореннях інших компонентів. Дубильні речовини беруть участь у створенні повноти та м'якості смаку. Геміцелюлози є полісахаридами і складають приблизно 22% від маси деревини. Продукти їхнього розпаду істотно впливають на формування органолептичних переваг коньяку, надаючи повноти і м'якості смаку, впливають на формування забарвлення. Термообробка деревини дає масу продуктів карамелізації [5, 8, 9].

В промисловості спостерігається попит на впровадження більш енергоефективних, з інтенсифікацією процесів дифузії та менш трудомістких методів обробки сировини. Одним з таких є електрофізичні методи обробки сировини: електростатичне поле, струми ВЧ і НВЧ, ультразвук, інфрачервоне випромінювання та ін. Використання цих методів у технологіях переробки сировини дозволяє забезпечити раціональні температурні режими, скоротити тривалість обробки, зменшити питомі витрати електроенергії, що в свою чергу, може забезпечити значний економічний зріст і підвищити якість готової продукції [10]. Серед вищезазначених методів, поступово набирає популярність НВЧ енергетика – надвисокочастотна енергетика, яка широко застосовується в різних галузях виробництва, а обумовлено це її ефективністю. Традиційні методи екстрагування не можуть в повній мірі відповідати запитам сучасних виробництв. Досить гостро постає питання повного та дбайливого використання рослинної сировини, що підштовхує на розробку нових, ресурсо- та енергоефективних, продуктивних та менш трудомістких методів отримання рідких екстрактів.

Науково-технічне протиріччя процесів екстрагування та витримки. В процесах екстрагування температура процесу є ключовим фактором. Підвищення температури, з одного боку, позитивно впливає на продуктивність екстрактора, а з іншого боку, підвищення температури має негативний вплив на збереження цільових компонентів. При витримці коньячних спиртів у дубових бочках одним з важливих процесів є екстрагування компонентів деревини для подальшого їхнього перетворення. Важливим фактором при витримці є температура: так при підвищених температурах (вище 20°C) відбувається прискорення процесу дозрівання коньячних спиртів, більший вихід екстрактивних речовин, а з іншого боку, спостерігаються значні втрати спирту та ароматичних сполук у навколишнє середовище. При знижених температурах (нижче 20°C) упові-

льнюється дозрівання коньячних спиртів, аромат та смак стає недостатньо розвинений, але спостерігаються менші втрати спирту у навколишнє середовище.

Гіпотеза дослідження. При використанні адресної доставки енергії, узгодженні режимних та конструкційних параметрів апаратів можна здійснити підвищений вихід лігніну, танідів, геміцелюлоз та продуктів їхнього розпаду з деревини дубу у вигляді фрагментів сітки лігніну, лігніно-вуглеводного комплексу, карамелізованих цукрів, ароматичних сполук та багатьох інших компонентів, що мають лікувальний ефект завдяки трансформації та руйнуванню структури деревини, що дозволить прискорити процес екстрагування та дозрівання вин, коньячних спиртів, надасть природного кольору коньякам, покращить їх букет та смак, дозволить отримати лікарські препарати широкого спектру дії що, в свою чергу, зможе значно змінити виробництво вин, коньяків та лікарських препаратів.

Експериментальне моделювання та методика дослідження. Для проведення експериментальних досліджень в якості сировини використовувалася дубова деревина у вигляді кубиків розміром 2 на 2 см, як термічно оброблених, так і термічно необроблених. Термічна обробка проводилася для кращого вилучення екстрактивних речовин. В якості екстрагенту використовували дистильовану воду та водно-спиртовий розчин. Експерименти проводилися на двох екстракційних установках. Схеми установок, на яких проводилися дослідження, представлені на *рис. 1* та *2*. Замір температури проводився пірометром (FLIR TG54). Концентрацію сухих речовин визначали методом висушування невеликого об'єму отриманих екстрактів у сушильній шафі, вагу вимірювали на електронних аналітичних вагах високої точності.

Всього було проведено 2 серії експериментальних дослідження з екстрагування дубової деревини водою на двох експериментальних установках та 6 серій досліджень з екстрагування дубової деревини водно-спиртовим розчином міцністю 62% об та 72% об. Параметри експериментальних досліджень представлені в *таблиці 1*.

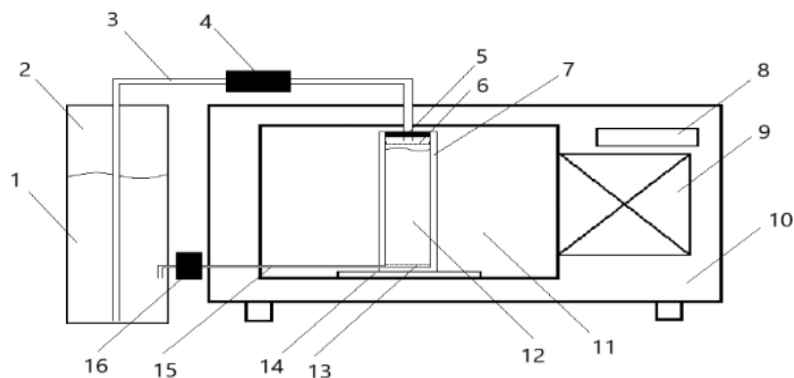


Рис. 1 – Плівковий МХ екстрактор

ПМХЕ складається з наступних елементів: 1 – об'єм екстрагента; 2 – зовнішня ємність для екстрагента; 3 – підвідний патрубок; 4 – насос; 5 – кришка реакторної камери; 6 – розпилюючий пристрій; 7 – реакторна камера; 8 – пульт керування; 9 – магнетрон; 10 – корпус установки; 11 – мікрохвильова камера; 12 – сировина; 13 – фільтруюча сітка; 14 – підставка; 15 – відвідний патрубок; 16 – кран.

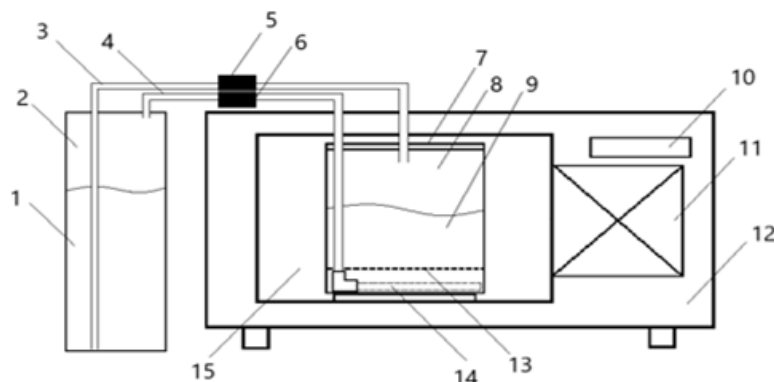


Рис. 2 – Циркуляційний МХ екстрактор

Основні вузли ЦМХЕ наступні: 1 – екстрагент; 2 – ємність для об'єму екстрагента; 3 – підвідний патрубок; 4 – відвідний патрубок; 5 – підвідний насос; 6 – насос для відкачування; 7 – кришка реактора; 8 – реакційна камера з сировиною; 9 – сировина; 10 – пульт керування; 11 – магнетрон; 12 – корпус апарату; 13 – тефлонова підставка з перфораванням; 14 – фільтр; 15 – мікрохвильова камера.

Таблиця 1

Параметри процесу екстрагування

№ дослід-ду	Екстрактор	Маса деревини, г	Екстрагент	Маса екстрагенту, г	Вид деревини	Температура процесу, °C	Потужність, Вт	Тривалість, хв
1	ПМХЕ	140	вода	700	оброблена	до 50	255	50
2	ЦМХЕ	140	вода	700	оброблена	до 50	255	50
3	ПМХЕ	140	етиловий спирт 62%	420	оброблена	до 60	255	16
4	ЦМХЕ	180	етиловий спирт 62%	540	оброблена	до 50	255	16
5	ЦМХЕ	180	етиловий спирт 62%	540	необроблена	до 55	255	20
6	ЦМХЕ	180	етиловий спирт 62%	540	оброблена	до 55	255	20
7	ЦМХЕ	180	етиловий спирт 72%	540	оброблена	до 55	255	20
8	ЦМХЕ	180	етиловий спирт 72%	900	оброблена	до 55	255	20

Результати експериментальних досліджень та їх обговорення. В ході проведення експериментальних досліджень з екстрагування деревини дубу були отримані наступні дані: термограми процесів екстрагування (рис. 3), питома концентрація сухих речовин (рис. 4) та питомі витрати сухих речовин (рис. 5). Термограма процесів екстрагування усіх експериментів представлена на рис.3.

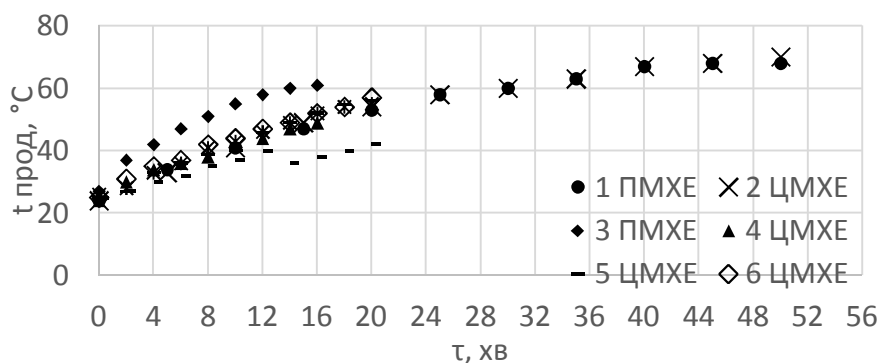


Рис. 3 – Порівняння термограм

Аналіз даних рис.3 показав, що найнижча температура спостерігається у ЦМХЕ. Ймовірно, це пов'язано з тим, що мікрохвильове випромінювання впливає безпосередньо на продукт та вологу в ньому, а не на сам об'єм екстрагенту. Можна сказати, що в таких конструкція ефективність використання енергії вища, і тому, є вища вірогідність організації ефекту механодифузії. Наступним етапом є аналіз питомих концентрацій сухих речовин (рис.4) та питомих витрат сухих речовин (рис.5).

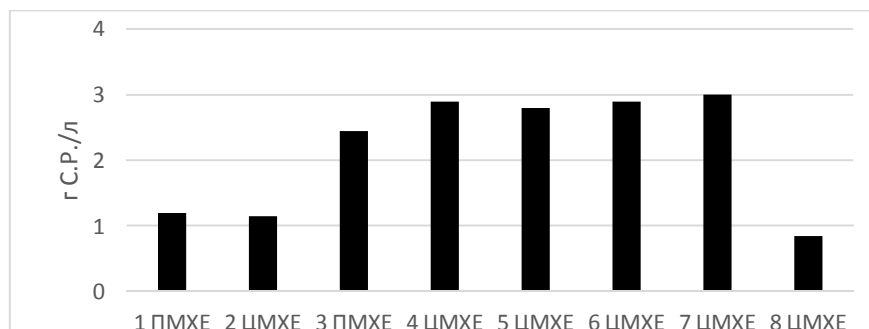


Рис. 4 – Питомі показники концентрації сухих речовин

З аналізу даних рис.4 можна зробити декілька висновків. По-перше екстрагування водно-спиртовим розчином ефективніше у більше ніж 2 рази у порівнянні із водою. Хоча слід відмітити, що отримані зразки водних екстрактів теж мали приємний аромат дубу, але не такий насичений, світло-коричневий колір, як

колір слабо завареного чаю. По-друге, підтверджується попередні висновки, щодо ефективності використання циркуляційного екстрактора та більш концентрованих водно-спиртових розчинів разом з термообробленою деревиною.

Для порівняння конструкцій апаратів із МХ генераторами, процеси, які відрізнялись потужністю магнетронів, гідромодулем, масою твердої фази, необхідно запропонувати такий загальний питомий показник, який дозволяв би визначати їхню ефективність. За такий показник було запропоновано прийняти відношення маси вилучених цільових компонентів із твердої фази до одиниці розчину за одиницю часу (рис.5).

З аналізу даних рис.5 можна зробити деякі висновки щодо показників ефективності МХ екстракторів. Циркуляційний МХ екстрактор у досліді 7 ЦМХЕ показав найкращі результати серед усіх дослідів, беручи до уваги те, що такі параметри процесів, як гідромодуль та потужність магнетрону були однакові, температура знаходилася в межах 50-60°C. Отримані на циркуляційних апаратах екстракти характеризуються темно-коричневим кольором, схожим на колір міцно завареного чорного чаю та ярко вираженим, характерним ароматом дубової деревини.

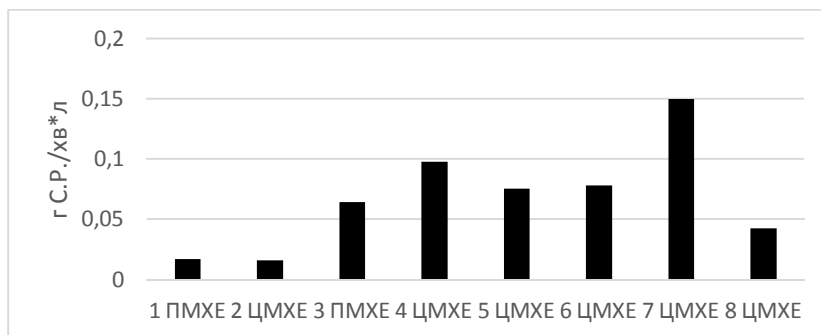


Рис. 5 – Питомі показники витрат сухих речовин

Висновки. В результаті комплексних експериментальних досліджень була доведена доцільність та ефективність використання циркуляційного екстрактора на основі мікрохвильового випромінювання. Описано доведено наявність такого ефекту, як механодифузія завдяки таким показникам як питома концентрація та питомі витрати С.Р. Підтверджено, що кращий ефект механодифузії спостерігається у ЦМХЕ, де мікрохвильове випромінювання впливає безпосередньо на полярні молекули розчинника, які проникли в середину деревини, при використанні більш концентрованого водно-спиртового розчину. Доведено можливість отримання поліекстрактів при використанні лише одного розчинника із полярними молекулами та в умовах мікрохвильового випромінювання. Доведено, що при попередній термічній обробці деревини дубу, виділяється більше цільових компонентів завдяки руйнуванню структури деревини на трансформації компонентів всередині. Вихід цільових компонентів у циркуляційному мікрохвильовому екстракторі при використанні в якості екстрагенту водно-спиртового розчину в 2 рази вищий, ніж при екстрагуванні водою. При дотриманні вищезазначених параметрів гарантується висока якість рідких екстрактів та існує можливість отримання поліекстрактів.

В технологіях переробки рослинної сировини МХ екстрактори мають перспективи для їхнього використання для отримання рідких лікарських екстрактів. МХ екстрактори можуть прискорювати та спростити процеси виробництва продуктів для виноробної, фармацевтичної, косметичної та інших галузей, здатні вирішувати проблемні питання у цих галузях. Серед конструкцій наразі вважається привабливими конструкції плівкових та циркуляційних екстракторів. Такі екстрактори мають вагомі переваги перед традиційними методами екстрагування, вони дозволяють отримати якісні рідкі екстракти з дубової деревини, дозволяють вилучити більше цільових компонентів за менший час, завдяки ефекту механодифузії можуть дати можливість отримувати поліекстракти. Тому, такі апарати безсумнівно мають перспективи промислового впровадження.

References

1. Maznev N. I. (2008). *Zolotaya kniga lekarstvennykh rasteniy* OOO Izdatel'stvo «DOM. XXI vek». (in Russian)
2. Tovstukha Ye. S. (1990). *Fitoterapiya*. K.: Zdorov'ya.
3. Chuyeshov V.I., Gladukh Ye.V., Sayko O.A., et. al. (2014). *Tekhnologiya lekarstv promyshlennogo proizvodstva* : Vinnitsa : Nova Kniga (in Ukrainian).
4. Tikhonov A. I., Yarnykh T. G. (2002). *Tekhnologiya lekarstv*. Kh.: Izd-vo NFAU (in Ukrainian).
5. Skurikhin I.M. *Khimiya kon'yaka i brendi*. M.: DeLi print, 2005. — 296 p.
6. Martynenko E.Ya. (2003). *Tekhnologiya Kon'yaka*. Simferopol', «Tavrida».
7. Gerasimov M.A. (1959). *Tekhnologiya vina*. — M.: Kartonazhnaya fabrika,. — 642 p.
8. Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. (1999). *Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* SPb.: SPbLTA.

9. Nikitin V.M., Obolenskaya A.V., Shchegolev V.P. (1978). *Khimiya drevesiny i tsellyulozy*. M.: «Lesnaya promyshlennost».
10. Poperechnyi, A. M. (2014). *Protsesy i aparaty kharchovykh vyrobnytstv* (O. V. Bohomolova, & V. I. Maiak (eds.); 2-e vydann). Svit Knyh..
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/ajdf.v0iOF.7303>
12. Burdo, O. G., Syrotyuk, I. V., Alhury, U., et al. (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. 10.5281 <https://doi.org/zenodo.1217259>

RESEARCH OF EXTRACTION PROCESS OF OAK WOOD IN ELECTRODYNAMIC APPARATUSES

**Akimov O.V., postgraduate student, Mordynskiy V.P., PhD in Tech. Sci., associate prof.,
Odesa national university of technology, Odesa**

Abstract. *The article begins with a promising method of obtaining liquid extracts using electromagnetic radiation. The main advantages over traditional method of extraction are highlighted. Usage of oak wood in industry is listed briefly. The article also defines the main medical properties of oak wood components, promising usage of liquid oak wood extracts in winemaking industry is provided. The trend in extraction technologies has been determined which consists in the transition to intensive and promising methods, and their main principles are also indicated. The main factors determining the transition to new extraction methods have been identified. The article identifies the main problems of the production of cognacs during aging, which affect the price of the final product. The authors indicated the key components of oak wood, which form a taste and aroma in cognacs and brandy. The scientific and technical contradictions of the extraction and aging processes were formulated, and a hypothesis for their solution was proposed. The experimental stands on which the research was conducted are presented. All parameters at which the experiments were performed are specified. The thermograms of the processes are presented and it is determined that the lowest temperature is observed in the circulating MW extractor. From the analysis of the data on the concentration of dry matter, it was determined that the best indicators belong to the circulating MW extractor, where a water-alcohol solution with a higher concentration of alcohol was used as the extractant. The data on the rate of extraction of dry matter confirm the high efficiency of the circulating extractor. The data analysis also confirms that better effect of mechanodiffusion was detected in the circulating MW extractor. Conclusions have been made regarding the possibility of introducing such devices into production.*

Key words: electromagnetic field, extraction, kinetics, oak wood, medicinal plants.

Список використаної літератури

1. Мазнев Н. І. Золота книга лікарських рослин / Н. І. Мазнев. - 15-те вид., Дод. - М.: ТОВ «ІД РІПОЛ Класік», ТОВ Видавництво «ДІМ. ХХІ століття», 2008. - 621 с.
2. Товстуха Є. С. Фітотерапія / Є. С. Товстуха. — К.: Здоров'я, 1990. — 304 с.
3. Чуешов В.І., Гладух Є.В., Сайко О.А., та ін. Технологія ліків промислового виробництва: підручник для студ. вищ. навч. закл. : в 2 вид., Вінниця : Нова Книга, 2014. - 696 с.
4. Тіхонов А. І., Ярних Т. Г. Технологія ліків: Навч.підру., для фармац. вузів та фак.: - Х.: Вид-во НФАУ; Золоті сторінки, 2002. - 704 с.
5. Скуріхін І.М. Хімія коньяку та бренді. - М.: Делі принт, 2005. - 296 с.
6. Мартиненко Е.Я. Технологія коньяку. - Сімферополь, "Таврида", 2003. - 320 с.
7. Герасімов М.А. Технологія вина. - М.: Картонна фабрика, 1959. - 642 с.
8. Азаров В.І., Буров А.В., Оболенська А.В. Хімія деревини та синтетичних полімерів: Підручник для вузів. СПб.: СПбЛТА, 1999. - 628 с.
9. Нікітін В.М., Оболенська А.В., Щеголев В.П. Хімія деревини та целюлози. Навчальний посібник. М.: «Лісова промисловість» 1978. - 368с
10. Поперечний, А. М. Процеси і апарати харчових виробництв: / за ред., О. В. Богомолова, В. І. Маяк. Харків: Світ Книг, 2014. 495с.
11. Kalla, A. M., Devaraju, R. Microwave energy and its application in food industry: Journal of dairying, foods & home sciences. 2017
12. Burdo, O. G., Syrotyuk, I. V., Alhury, U., та ін. 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. C. 58–71.

Отримано в редакцію 21.05.2022

Прийнято до друку 21.09.2022

Received 21.05.2022

Approved 21.09.2022

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ КУКУРУДЗЯНОГО КРОХМАЛЮ

Шуцькін І.С. аспірант, Сухий К.М. д.т.н., професор, Третяков А.О. к.т.н., доцент,
Черваков Д.О. к.т.н., доцент, Беляновська О.А. к.т.н., доцент
Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний
університет», м. Дніпро

Анотація. Стаття присвячена створенню композитів на основі кукурудзяного крохмалю з синтетичним полімером. В роботі вирішуються задачі створення нових матеріалів, що здатні до біорозпаду та, які можна виготовляти з доступної рослинної сировини. В якості синтетичного полімеру застосовано сополімер етилену з вінілацетатом. В ході проведення роботи було досліджено можливість переробки композицій стандартними для полімерів методами, а саме екструзією та литтям під тиском. Було досліджено зміну механічних властивостей біокомпозиту від концентрації синтетичного полімеру. При цьому концентрація змінювалась від 0 до 40 масових відсотків синтетичного полімеру. Отримані результати дають можливість визначити мінімальну концентрацію синтетичного полімеру при якій біокомпозит має мінімально допустимі механічні властивості для його подальшого використання. Це значення складає 20 % синтетичного полімеру і 80% кукурудзяного крохмалю. Проведено порівняння механічних властивостей отриманих під час проведення дослідницької роботи матеріалів з тонажними синтетичними полімерами, такими як полістирол та поліетилен високого та низького тиску. Завдяки такому порівнянню показана можливість застосування отриманих композитів при виробництві упакування та одноразового посуду. Результати наукових досліджень дають можливість прогнозувати властивості біокомпозиту в залежності від співвідношення крохмаль-синтетичний полімер. Таким чином є можливість обирати склад композиції в залежності від вимог до конкретного виробу. Показана здатність композиту на основі крохмалю поглинати вологу. Висока здатність поглинати вологу пластифікованим крохмалем сильно обмежує можливість його використання в чистому вигляді без синтетичного полімеру. Досліджена кінетика процесу для ряду композитів. Досліджено залежність механічних властивостей біокомпозиту від його вологості. Експериментально встановлено, що з підвищенням вологості в композиті підвищуються його механічні властивості. Також проведені випробування, які свідчать, що отримані композити, навіть ті, які містять максимальну концентрацію синтетичного полімеру проявляють властивості саме біокомпозитів, тобто здатні до біорозпаду у відносно короткий проміжок часу. Для цього був використаний метод Штурма. Досліджено зміну фізико-механічних властивостей в процесі біодеградації отриманих композицій. Це, безумовно є непрямым доказом того, що композити здатні до біорозкладу. Також, такого роду дослідження показують працездатність виробів з біокомпозитів в екстремальних умовах. Таким чином у роботі показані перспективи використання композитів з високим вмістом рослинної сировини – кукурудзяного крохмалю. Такі композиції здатні вирішувати як екологічні задачі, так і економічні, бо по суті вони є альтернативними синтетичним полімерам.

Ключові слова: крохмаль, біополімер, композит, механічні властивості.

Вступ. Сучасне виробництво вимагає особливого ставлення до захисту природи та навколишнього середовища, тому для цього бажано замінити використання синтетичних матеріалів на біорозкладні.

Сьогодні масштаби забруднення навколишнього середовища ставлять перед науковцями завдання створення екологічно безпечних матеріалів, і в першу чергу тих, які мають менш негативний вплив на природу за рахунок повного та пришвидшеного розкладу у природних умовах. Можна сказати, що використання біополімерних матеріалів є необхідним з точки зору зменшення забруднення та швидшого очищення навколишнього середовища від шкідливих пластикових полімерних відходів. Це забезпечить не лише збільшення ресурсу нових матеріалів, але й покращить процес їх утилізації. Головна мета створення біорозкладних полімерів полягає у тому, що вироби з них повинні зберігати необхідні властивості протягом усього періоду експлуатації, але швидко деградуватися в процесі утилізації [1].

У світі є тенденція натурального, або штучного дефіциту корисних копалин, які є сировиною для полімерів. Тому актуальними джерелами сировини зараз є ті джерела, які мають щорічне відновлення, а саме рослинні. Рослинна сировина зараз не схильна до таких коливань у ціні як нафта, або газ. Зважаючи на той факт, що Україна завжди була і є аграрною країною, саме рослинна сировина ключ до економічної незалежності.

Біополімерний матеріал повинен замінити синтетичні матеріали за рахунок кращих або таких же фізичних якостей.

Створені композити: кукурудзяний крохмаль з сополімером етилену з вінілацетатом (EVA). Досліджено зміну механічних властивостей в залежності від концентрації EVA в композиті.

Мета роботи. Метою досліджень було дослідити зміну механічних характеристик біополімерних композитів при зміні співвідношення у композиції компонентів крохмаль-EVA, а саме: міцність при розриві, відносне подовження при розриві та ударна в'язкість за Шарпі.

Методика проведення експерименту. У процесі виконання поставлених задач в експериментальних дослідженнях використовували наступні методики: випробування на розрив полімерів ISO 527, визначення відносного подовження ASTM D 638 та випробування ударної в'язкості по Шарпі ISO 791.

Це основні механічні властивості термопластичних полімерів, а саме поліолефінів та полістиролу. Ціль роботи була не тільки дослідити механічні властивості біокомпозиту, але й порівняти їх з властивостями синтетичних полімерів широкого призначення. Для проведення вищезначених випробувань з біополімеру було отримано зразки методом лиття під тиском. Біополімерна композиція досить технологічна при переробці на стандартному обладнанні для переробки синтетичних полімерів. Температура переробки по зонах термопластавтомата складала 130-140-165°C. Для визначення міцності на розрив та відносного подовження відливали лопатки. Довжина робочої частини складала 60 мм, ширина 10 мм, товщина 4 мм. Навантаження та подовження зразка фіксували в момент його руйнування у розривній машині.

Для визначення ударної в'язкості методом лиття під тиском отримали зразки довжиною 120 мм, шириною 15 мм, товщиною 10 мм. Випробування проводили за зразках баз надріза.

Результати. Для дослідження впливу зміни співвідношення компонентів композиції на її механічні властивості було обрано наступні концентрації (мас.%), які наведені у таблиці 1:

Таблиця 1

Концентрації компонентів композиції

Кукурудзяний крохмаль	EVA
100	0
90	10
80	20
70	30
60	40

При цьому завданням випробувань було визначити концентрації, при яких використання композиту не має сенсу з точки зору надто низьких механічних властивостей. Визначити концентрації, при яких використання композиту можливо при виготовленні виробів не конструкційного призначення. Визначити, чи є такі концентрації, при яких можна отримати біокомпозит аналогічний за своїми механічними властивостями синтетичним полімерам. Саме такі дослідження можуть дати базис для подальшої більш глибокої розробки матеріалів призначених для виконання конкретних завдань. Це можуть бути або конструкційні матеріали, або матеріали для упакування за наперед заданими властивостями, або матеріали з регульованим строком життєдіяльності. Основні механічні властивості було досліджено і систематизовано у таблиці.

Дані випробувань наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати випробувань

Концентрація синтетичного полімеру, мас.%	Міцність при розриві, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість за Шарпі, кДж/м ²
0	0,5	1,5	3
10	1,1	3	7,3
20	5,7	15	10
30	11,2	49	-
40	17,4	120	-

Згідно даних чітко видно, що з підвищенням у композиції вмісту синтетичного полімеру механічні властивості підвищуються. При цьому більш-менш «міцний» біокомпозит має співвідношення крохмалю-EVA 80:20 відповідно. Сам по собі кукурудзяний крохмаль не є полімером у класичному сприйнятті. Для того, щоб його можна було переробити стандартними методами він повинен бути пластифікований. В даному випадку при нульовій концентрації синтетичного полімеру використовувався пластифікований крохмаль.

Для пластифікації кукурудзяного крохмалю використовували чев'ячний прес типу МЧТ-90. Пластифікація відбувалась за рахунок високих деформацій зсуву [2], при цьому спостерігався саморозігрів суміші до 140°C.

Суміщення пластифікованого крохмалю з полімером проводили на черв'ячно-дисковому екструдері при температурі 150°C.

Механічні характеристики пластифікованого крохмалю досить невисокі, щоб говорити про те, що цей матеріал можна використовувати у будь-якому виробництві. При концентрації EVA 10% отриманий матеріал, який може бути використаний для виробництва, наприклад, одноразового посуду, або упакування. Тобто, можна вважати, що 10% синтетичного полімеру, це мінімальна концентрація, при якій ми отримаємо біокompозит, який можна використовувати у виробництві. Після 30% можна вже говорити про те, що біокompозит в деяких випадках може повністю замінити собою такі полімери, як поліетилен, полістирол [3]. Такий висновок можна зробити виходячи з того, що біокompозит може бути перероблений на стандартному обладнанні, тобто він досить технологічний. Також під час переробки він дуже добре може бути зафарбований у масі стандартними пігментами, як органічними, так і неорганічними. Біокompозит хімічно нейтральний до пігментів під час переробки. Механічні властивості, а саме міцність при розриві і ударна в'язкість у композита, який містить від 30% EVA на рівні механічних властивостей поліетилену та полістиролу. Зважаючи на те, що сировина для виготовлення біокompозиту, а саме, крохмаль вітчизняна, а полістирол та поліетилен імпортується в Україну з економічної точки зору біокompозит має конкурентні переваги.

Отримані результати дають можливість визначити тенденцію змін механічних властивостей в залежності від підвищення у складі біокompозита синтетичної компоненти. Виходячи з даних досліджень механічні властивості з підвищенням вмісту синтетичної складової підвищуються. Максимальні механічні значення будуть наближатися відповідати значенням EVA за умови якісного суміщення пластифікованого крохмалю та EVA. З економічної точки зору максимальний вміст крохмалю в композиції є більш вигідним. Також можна припустити, що з підвищенням концентрації EVA здатність композиту до біорозпаду буде знижуватися.

У таблиці 3 для порівняння наведені властивості деяких синтетичних полімерів і отриманих композицій. В даному випадку наведені загальні властивості полімерів без прив'язки до конкретних виробників і марок.

Таблиця 3

Властивості синтетичних полімерів та отриманих композицій

Полімер	Міцність при розриві, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість за Шарпі, кДж/м ²
Полістирол загального призначення	40	3	2
Поліетилен високої густини	18-32	300-800	-
Поліетилен низької густини	7-16	150-1000	-
Біокompозит, 90% крохмалю	1,1	3	7,3
Біокompозит, 60% крохмалю	17,4	120	-

Зважаючи на той факт, що крохмаль є гігроскопічним матеріалом доцільно було дослідити поглинання вологи отриманими композитами. Результати випробувань показали, що зі збільшенням вмісту в композиті синтетичного полімеру здатність поглинати вологу знижується. На рисунку 1 показана залежність поглинання вологи від складу композита крохмаль-EVA. Для дослідження зразки композитів витримували у вологому середовищі впродовж 24 годин.

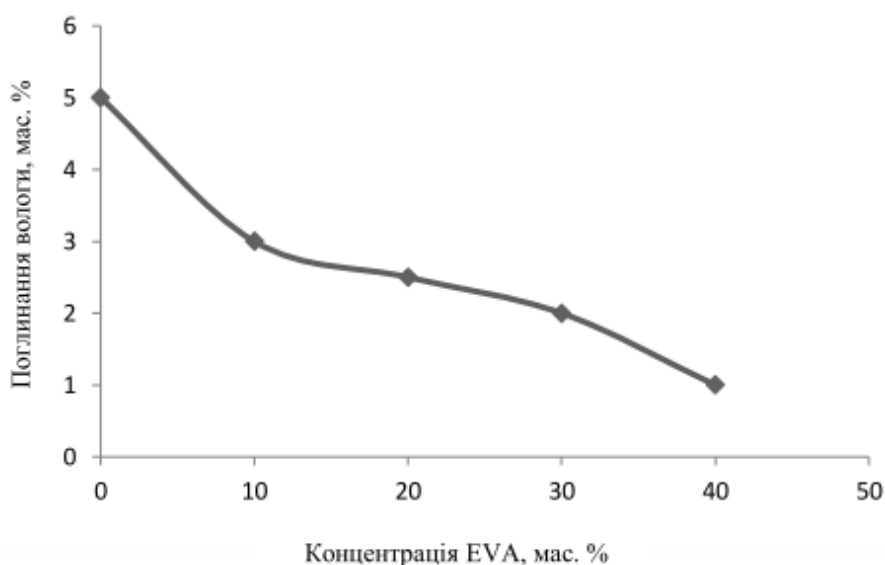


Рис. 1 – Залежність поглинання вологи (мас. %) від концентрації EVA (мас. %)

Висока здатність поглинати вологу пластифікованим крохмалем сильно обмежує можливість його використання в чистому вигляді без синтетичного полімеру [4]. Але треба зазначити, що в порівнянні з звичайним кукурудзяним крохмалем пластифікований крохмаль здатен поглинати набагато менше води. Так вологість кукурудзяного крохмалю згідно стандартів може досягати 20%. Але в ході пластикації та волога, які містяться у крохмалі взаємодіє з пластифікатором та приймає участь у перетворенні крохмалю на полімер (у класичному розумінні цього слова).

Також було помічено, вологість композиту впливає на його механічні властивості. Було досліджено композити після 24 годин витримки у вологому середовищі. В таблиці 4 показано як змінюються міцнісні параметри, а саме процент підвищення механічних характеристик.

Таблиця 4

Зміни механічних властивостей композиту

Концентрація синтетичного полімеру, мас. %	Підвищення механічних властивостей композиту, %		
	Міцність при розриві	Відносне подовження	Ударна в'язкість за Шарпі
0	0	35	10
10	40	30	15
20	50	30	15
30	65	50	-
40	65	60	-

Виходячи з отриманих даних можна зробити висновок, що підвищення міцності при збільшенні води відбувається за рахунок додаткової пластикації крохмалю. Також можна припустити, що паралельно змінюється міцність зв'язку між крохмалем і синтетичним полімером в композиті, саме цим можна пояснити, збільшення механічних властивостей зі збільшенням концентрації EVA.

Цікаво біло дослідити здатність отриманих композитів до біорозкладу. Отримані суміші крохмаль-синтетичний полімер розкладаються за таким механізмом, коли іде практично 100% розпад крохмалю, а синтетичний полімер розпадається на шматочки. При змішуванні крохмалю з синтетичним полімером відбувається взаємопроникнення сітчастої структури крохмалю в сітчасту структуру полімеру. Така структура буде неоднорідною, бо крохмаль буде накопичуватися в менш упорядкованих шарах полімера, щільність на межі розподілу фаз крохмаль-полімер буде меншою, ніж у об'ємі крохмалю, чи об'ємі полімеру. Тому при знищенні наповнювача бактеріями полегшується доступ мікроорганізмів до менш стійкої по відношенню до біодеструкції частини полімеру. Таким чином, здатність полімерних матеріалів до біодеструкції обумовлена в першу чергу їх хімічним складом, структурою та властивостями макромолекул. Водночас на стійкість полімерів до біологічного розкладання великий вплив надають деякі макроструктурні характеристики (величина пористості, рівномірність розподілу добавок у полімерній масі, особливості обробки поверхні виробів тощо), а також технологічні параметри виготовлення матеріалу та його переробки в упаковку.

Для оцінки здатності до деструкції використовували Штурм-тест ASTM 5209-91.

В основі методу лежить вимірювання швидкості асиміляції досліджуваного матеріалу у водному розчині у присутності бактеріальної мікрофлори, що реєструється за швидкістю виділення вуглекислого газу в результаті життєдіяльності мікроорганізмів. По зміні обсягу HCl пішла на титрування судили про кількість CO₂, що виділився.

Для тестування був обраний матеріал з найбільшим вмістом синтетичного полімеру, тобто 40 мас. % EVA та 60 мас. % крохмалю.

Кінетичні криві зміни індексу біорозпаду композиції (рис. 2 – 4) характеризуються наявністю ознак окислення вже у першу добу випробувань. У першу добу індекс біорозпаду знизився до 65% і потім монотонно знижувався до 10% впродовж 21 дня у порівнянні з чистим синтетичним полімером.

Згідно отриманих даних можна зробити висновок, що отримані композити здатні до біорозпаду за відносно короткий проміжок часу.

Ці данні важливі для оцінки здатності матеріалу виконувати свої функції в готових виробах під впливом бактерій і води. Так, вище було показано, що вода не знижує, а навпаки підвищує механічні властивості матеріалу, але це лабораторні випробування, які не приймають до уваги час впливу вологого середовища, та можливість деструкції крохмалю мікроорганізмами та бактеріями.

Тому, безперечно, цікаво було провести випробування фізико-механічних властивостей композиту одночасно з біовипробуваннями. Було проведено фізико-механічні дослідження композиції, яка містила 40 мас. % EVA. Дослідження фізико-механічних властивостей наочно демонструють якісні зміни структури композитів в процесі біорозпаду.

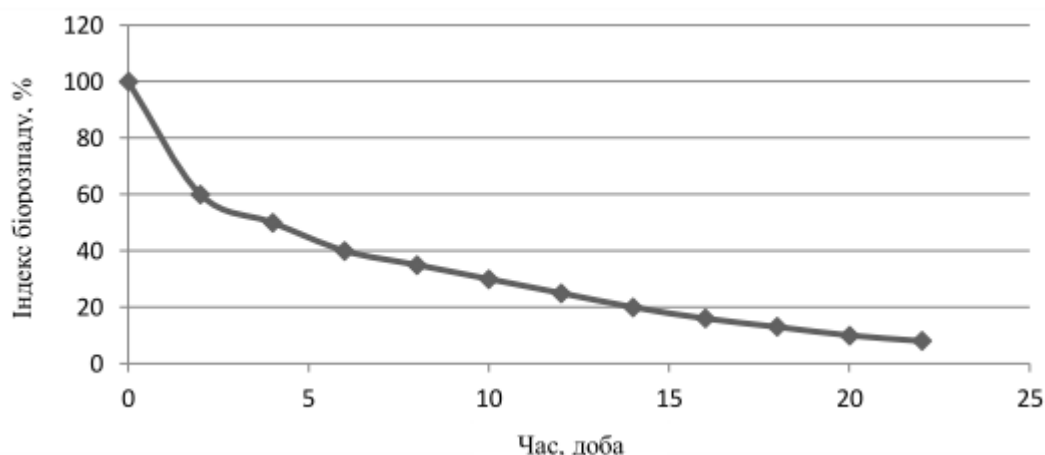


Рис. 2 – Залежність індексу біорозпаду (%) від часу витримки (доба)

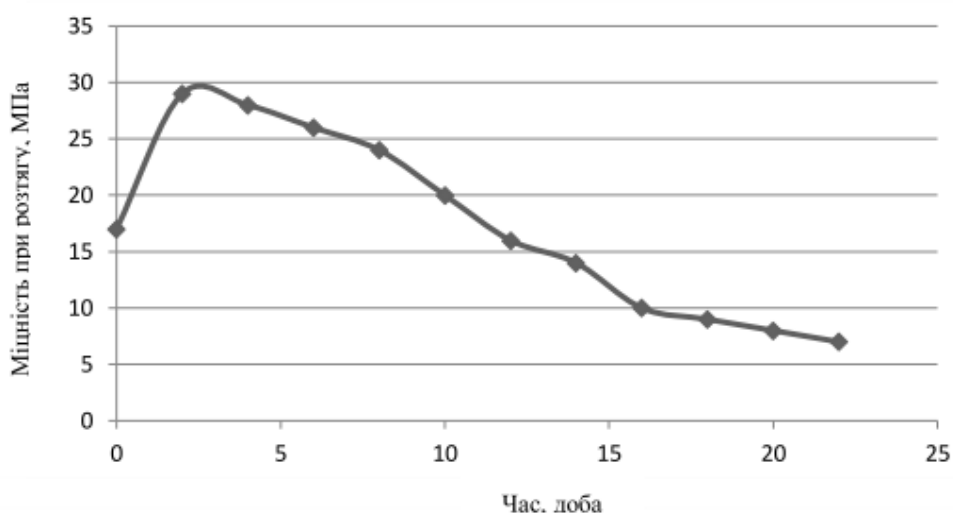


Рис. 3 – Залежність міцності при розтягу (МПа) від часу витримки (доба)

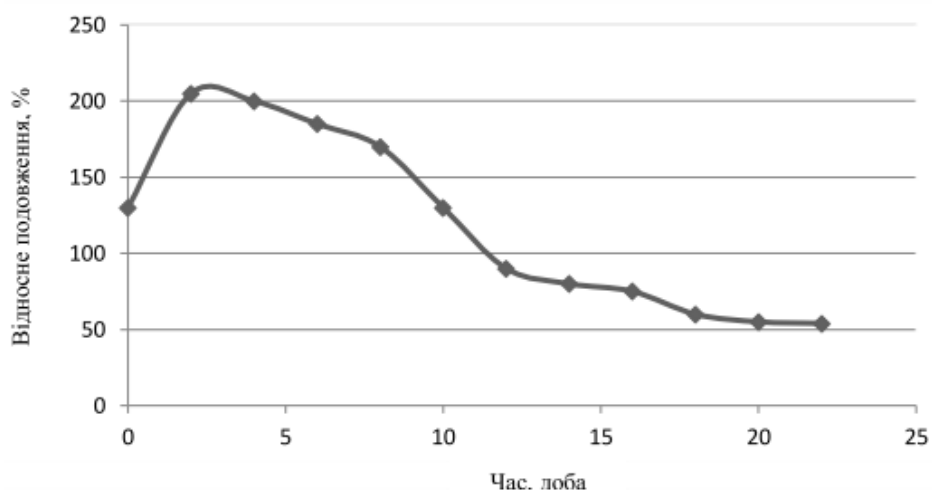


Рис. 4 – Залежність відносного подовження (%) від часу витримки (доба)

Згідно даних випробувань впродовж 21 доби спостерігається зниження механічних властивостей за рахунок деградації композитів бактеріями. Спочатку є підвищення механічних властивостей, але цей факт корегує в вищезначеними дослідженнями. Але потім, за рахунок того, що крохмаль розпадається спостерігається монотонне зменшення міцності, а саме міцності на розрив та відносного подовження.

Висновки. Опираючись на дані дослідження можна говорити про те, що сам по собі пластифікований кукурудзяний крохмаль не має потенціалу для його переробки класичними методами переробки полімерів у вироби, альтернативі виробам з синтетичних полімерів. Але, введення синтетичного полімеру, тобто суміщення крохмалю і синтетичного полімеру, дає можливість переробляти отриманий композит литтям під тиском, або екструзією у вироби, які отримають з тонажних полімерів. Тобто підвищення концентрації EVA у складі композиції дає можливість замінити такі полімери як поліолефіни, ПВХ та полістирол. Для вирішення конкретної задачі по заміщенню виробу з синтетичного полімеру на біокомпозит треба шукати баланс між потрібними механічними властивостями та здатністю матеріалу до біорозпаду. Слід відмітити, що використання біокомпозитів на основі крохмалю може вирішувати не тільки екологічні задачі суспільства, а і економічні. Крохмаль є рослинною сировиною, яку можна отримувати щороку, на відміну від нафти і газу, запаси яких обмежені. Окрім того, ціна на крохмаль значно нижче ціни на будь який синтетичних полімер. У роботі показана тенденція змін властивостей біокомпозиту в залежності від його складу: крохмаль-синтетичний полімер. Також показана залежність таких композитів від їх вологості, а саме залежність механічних властивостей. В роботі доказано, що композиційні матеріали, що містять пластифікований крохмаль здатні до біорозпаду.

References

1. Bastioli C. (2005). Handbook of Biodegradable Polymers. Italy: Rapra Technol. Limited.
2. Evan J., Sikdar S. (2012). Biodegradable plastic. An idea whose time has come. Chemtech.
3. Azizov A.N., Ibragimova M. D., Aliyeva L.I. (2012). Biorazlagayemye sinteticheskiye polimery (obzor) [Biodegradable synthetic polymers (review)] Chemistry for sustainable development, 20, 385 - 383.
4. Averous L., Pollet E. (2012) Biodegradable polymers. Environmental Silicate Nano-Biocomposites, 13 – 39.

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF BIOCOMPOSITES BASED ON CORN STARCH

Shunkin I.S. postgraduate student, Sukhyy K.M. Dr. Sci. Tech. Prof., Tretyakoff A.O. PhD, docent, Chervakov D.O. PhD, docent, Belyanovskaya E.A. PhD, docent
State higher educational institution «Ukrainian State University of Chemical Technology», Dnipro

Abstract. The article is devoted to the creation of composites based on corn starch with a synthetic polymer. The paper solves the problems of creating new materials that are capable of biodegradation and can be made from available plant raw materials. An ethylene copolymer with vinyl acetate is used as a synthetic polymer. The change in the mechanical properties of the biocomposite depending on the concentration of the synthetic polymer was studied. The obtained results make it possible to determine the minimum concentration of the synthetic polymer at which the biocomposite has the minimum acceptable mechanical properties for its further use. The mechanical properties of materials obtained during the research work with tinted synthetic polymers, such as polystyrene and high-and low-pressure polyethylene, are compared. The trend of change in mechanical properties with increasing concentration of synthetic polymer was also investigated. The results of scientific research make it possible to predict the properties of the biocomposite depending on the starch-synthetic polymer ratio. Thus, it is possible to choose the composition of the composition depending on the requirements for a particular product. The ability of a starch-based composite to absorb moisture is shown. The dependence of the mechanical properties of a biocomposite on its humidity is studied. It has been experimentally established that with increasing moisture in the composite, its mechanical properties increase. Also, conducting tests that show that the resulting composites, even those that contain the maximum concentration of synthetic polymer, exhibit the properties of biocomposites, that is, they are capable of biodegradation in a relatively short period of time. Thus, the paper shows the prospects for using composites with a high content of vegetable raw materials – corn starch. Such compositions are able to solve both environmental and economic problems, because in fact they are alternatives to synthetic polymers.

Keywords: starch, biopolymer, composite, mechanical properties

Список використаної літератури

1. Bastioli C. Handbook of Biodegradable Polymers. Italy: Rapra Technol. Limited, 2005. - 552 p.
2. Evan J., Sikdar S. Biodegradable plastic. An idea whose time has come. Chemtech. - 2012. - P. 38-42.
3. Азизов А.Н. Биоразлагаемые синтетические полимеры (обзор) / А.Н. Азизов, М. Д. Ибрагимова, Л.И. Алиева// Химия в интересах устойчивого развития. - 2012.- No20. - С. 385 - 383.
4. Averous L. Biodegradable polymers/ L. Averous, E. Pollet// Environmental Silicate Nano-Biocomposites. - 2012. - P. 13 – 39.

Отримано в редакцію 18.05.2022

Прийнято до друку 26.09.2022

Received 18.05.2022

Approved 26.09.2022

ПРОЦЕСИ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ МАКУХИ АМАРАНТУ

Ружицька Н.В., к.т.н., асистент, Сиротюк І.В., PhD, асистент,
Акімов О.В., аспірант, Молчанов М.Ю.
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. В статті розглядаються підходи до переробки макухи амаранту, як основного відходу виробництва амарантової олії. Проаналізовано хімічний склад макухи амаранту. Показано, що макуха амаранту є джерелом рослинного білка, який характеризується дуже високою засвоюваністю, крохмалю та клітковини. Пропонуються три шляхи виробництва білкового концентрату амаранту. Концентрати з найбільшим вмістом протеїну та ізоляти одержали шляхом екстрагування розчинами гідроксиду натрію із залученням технологій адресної доставки енергії та вакууму. Досліджено кінетику вилучення залишків олії з макухи та вплив попереднього знежирення макухи на вихід білку.

Окрім протеїну з макухи амаранту вилучено дрібнозернистий, багатий на амілопектин крохмаль, вміст якого у сировині близько 65 %. Наведено показники якості крохмалю амаранту. Розглядаються також альтернативні підходи до переробки, які передбачають розділення протеїну та крохмалю без екстрагування білків лугом. Один з підходів передбачає гідромеханічну обробку подрібненої макухи за температури навколишнього середовища. В результаті отримано білковий концентрат, продукт, що містить клітковину та протеїн та нативний крохмаль амаранту. Також розглянуто схему, яка передбачає водне екстрагування крохмалю з твердої фази у вигляді клейстеризованого розчину. Ця схема передбачає денатурацію білку та обробку сировини при температурах до 90 °C. Наведено результати дослідження статистики екстрагування клейстеризованого крохмалю з макухи амаранту.

В результаті одержано тверду фазу-концентрат білку та клітковини та клейстеризований крохмаль. Проаналізовано вміст протеїну у продуктах високотемпературної обробки макухи: білкового концентраті та клейстеризованому крохмалі.

Ключові слова: макуха амаранту, протеїн, екстрагування, адресна доставка енергії, крохмаль

Вступ. Україна є виробником олії та інших продуктів з амаранту [1]. Після віджиму одного з найцінніших продуктів – олії, залишаються великі обсяги відходів - макухи. Оскільки макуха амаранту містить велику кількість білка, харчових волокон, крохмалю та деяку кількість олії, розглядаються різноманітні шляхи її подальшого використання [1, 2].

Формулювання завдань досліджень. Макуха амаранту є складною капілярно-пористою сировиною, яка містить термолабільні білки, дрібнозернистий крохмаль, в основному зосереджений у кулеподібних гранулах ендосперму зерна, та клітковину. Завданням дослідження є енерго- та ресурсоефективне розділення макухи на окремі складові: білковий концентрат або ізолят, крохмаль та клітковину.

Характеристика об'єкту дослідження. Макуха амаранту після віджиму олії являє собою гранули часток клітковини (оболонки зерна), білку (частинки зародку), та зерна майже не зруйнованого при пресуванні ендосперму, якій містить основну частину крохмалю. Вміст білків коливається від 15 до 22%, вуглеводів – в межах 57...78 %, жирів – 2...8 % [2, 3].

У досліджуваних зразках макухи амаранту вміст олії складав 2,3...2,8 %, білку - 16 %, вуглеводів - 78 %. Крохмаль в макусі амаранту міститься близько 60...65 %, з нього близько 48 % - дрібнозернистого, з розміром часток 1 – 3 мкм [1, 4 – 6]. Особливістю амарантового крохмалю є дуже високий вміст амілопектину (88...98 %), і цим зумовлена його стійкість до процесів деградації (черствіння), здатність утворювати стійкі до заморожування-розморожування клейстери та гелі. Драглеутворення у розчинах амарантового крохмалю відбувається за температур 62...76 °C [4 – 6].

Найбільш цінною складовою макухи амаранту є білок, який за амінокислотним складом наближається до ідеального. Близько 60 % білка складає лєгкорозчинна глутелінова фракція, 20% - глобулінова (розчинна у розчинах NaCl), 17 % - водорозчинна альбумінова та близько 2 % - проламінова (спирторозчинна). Такі особливості складу протеїну амаранту необхідно враховувати у виборі екстрагентів [2]. За міжнародною шкалою якості білок насіння амаранту має 75 балів. Для порівняння, білок коров'ячого молока – 72,2 бали, сої – 68 [1]. Вміст незамінної амінокислоти лізин в білку амаранту один з найвищих – 11,7 г/100 г білка. Для порівняння в пшеничному вміст лізину тільки 2 г/100 г білка, в білку коров'ячого молока – 7,8 г/100 г [1].

Олія амаранту характеризується високим вмістом ненасичених жирних кислот, особливо лінолевої (до 45%), олеїнової (близько 28%). Насичені жирні кислоти представлені стеариновою та пальмітиновою кислотами (близько 20%). Також в амарантовій олії міститься до 2% токоферолів, та близько 10% фосфоліпідів. Найбільш цінним компонентом олії є сквален, вміст якого складає 6...8 % [7].

Результати досліджень. Оскільки в макусі амаранту залишається олія, розглядалась можливість вилучення її екстрагуванням. Екстрагування проводилось етанолом у інноваційному екстракторі з адресною доставкою енергії. Кількість підведеної енергії складала 425 Вт/кг продукту, гідромодуль 1:9, температура – 70...75 °С. Одержано кінетичні криві процесу (рис. 1)

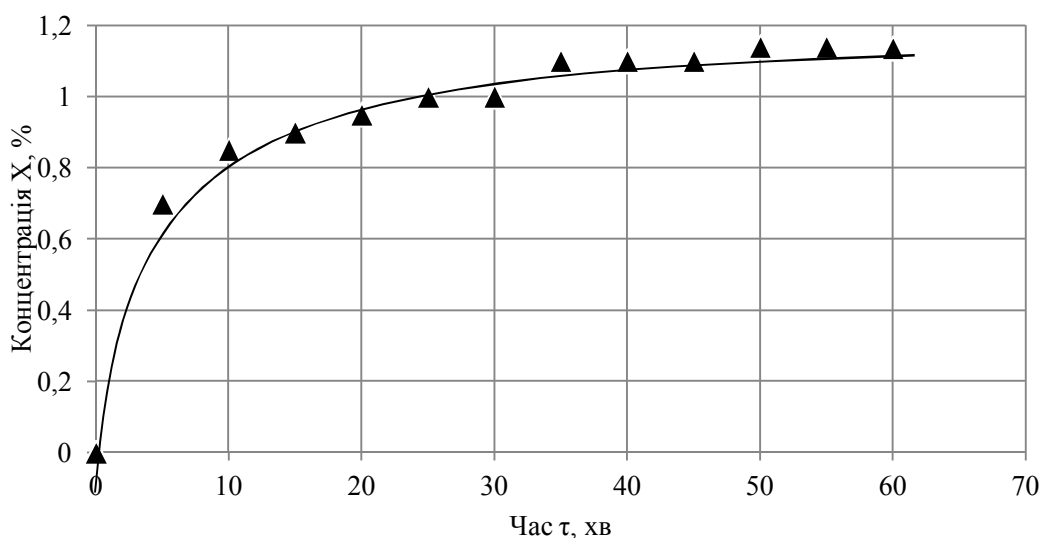


Рис. 1 – Зміна концентрації екстракту в часі

З графіку видно, що концентрація екстракту стає постійною після 35 хвилин процесу, основна кількість (75%) спирторозчинної фракції переходить у екстракт протягом перших 10 хвилин.

Одержана олія відрізняється складним хімічним складом. Фото зразків наведено на рис. 2

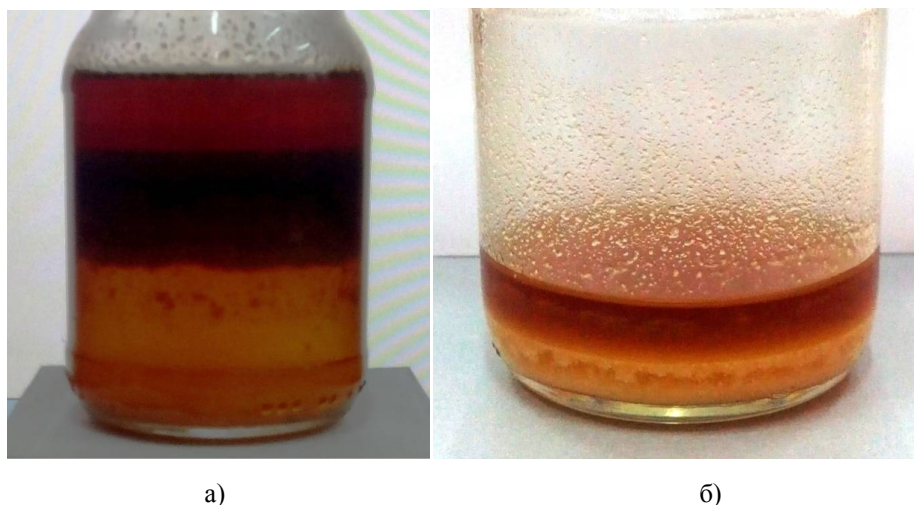


Рис. 2 – Зразки олієвмісного продукту з макухи амаранту: а) одержаний при 70...75 °С; б) одержаний при 40...45 °С.

Після знежирення макухи 96 % етанолом при 45 °С, в твердій фазі залишилось 54 % (1,6 % маси макухи) від початкової кількості олії, після знежирення 96 % етанолом при 70 °С – 21 % (0,6 % маси макухи). Проте знежирення макухи перед екстрагуванням білка за температури вище 40...45 °С викликає денатурацію білку, тому не може бути використане у лінії екстрагування білку. З матеріального балансу визначено, що у продукті екстрагування етанолом міститься близько 20 % жирів, решта – невстановлені спирторозчинні речовини.

На стадії вилучення протеїну важливою умовою проведення процесу є дотримання температури не вище 40 °С, для запобігання денатурації. У водний екстракт переходять альбумін, цукри та сапоніни. Оскільки етанол, який використовується для вилучення залишків олії у макусі, у високих концентраціях може викликати денатурацію альбуміну, вивчали вплив попереднього знежирення макухи за температури 40...45 °С на вилучення водорозчинної фракції з гідромодулем 1:10 (рис. 3).

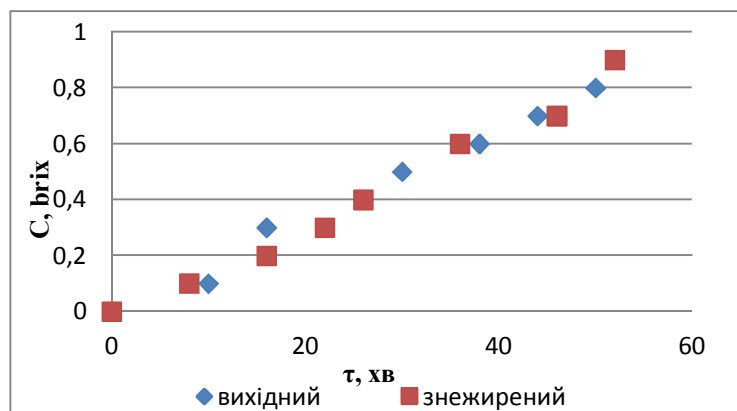


Рис. 3 – Вплив попереднього знежирення макухи амаранту на вилучення альбумінової фракції

Як видно з графіку, попереднє знежирення макухи суттєвого впливу на вилучення альбумінової фракції не спостерігається, отже доцільність попереднього знежирення визначається скоріше економічною доцільністю, ніж технологічною [8].

Оскільки більшу частину білків амаранту складають лугорозчинні глутеліни, екстрагування протеїнів пропонується здійснювати 0,1н розчином NaOH, який забезпечує рН середовища на рівні 11. Для визначення доцільності попереднього подрібнення сировини, досліджувався вплив подрібнення сировини на інтенсивність вилучення білку 0,1н NaOH з гідромодулем 1:10 (Рис. 4).

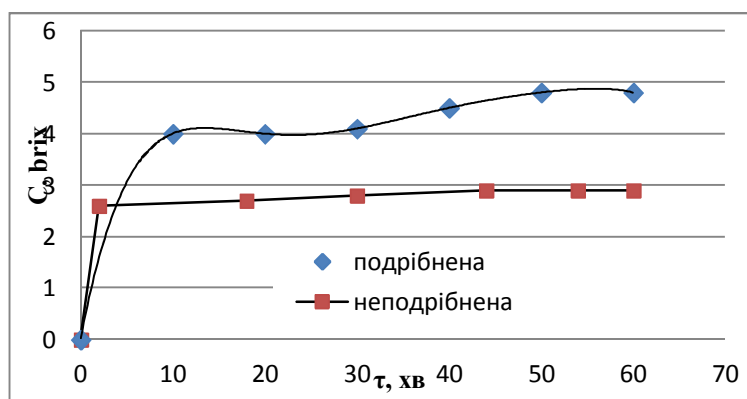


Рис. 4 – вплив подрібнення сировини на інтенсивність вилучення білку з макухи амаранту

Встановлено значний вплив подрібнення сировини. Цілі гранули макухи вкриваються твердою плівкою омиленних сполук та перехід білку зсередини гранули до розчину припиняється.

Також на прикладі вилучення лугорозчинної фракції демонструється вплив адресної доставки енергії на інтенсивність процесу екстрагування (рис. 5).

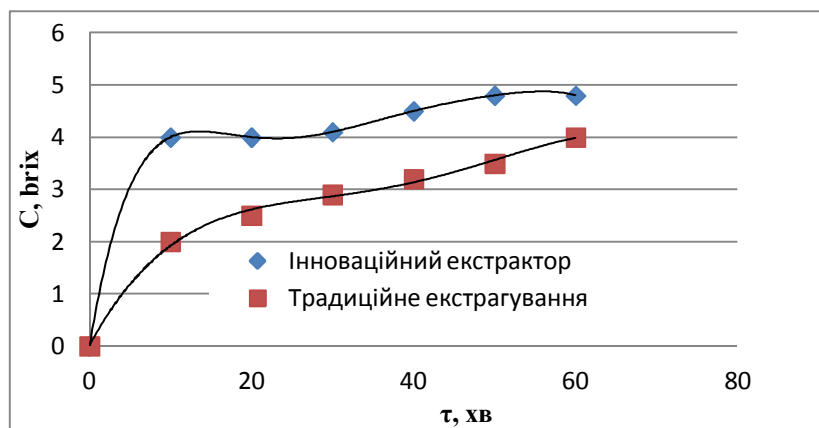


Рис. 5 – Вплив адресної доставки енергії на інтенсивність екстрагування білку та сухих речовин з макухи амаранту

Як видно з графіку, тривалість процесу скорочується в шість разів, а питомі енерговитрати – в 4...5 разів.

Таким чином інтенсифікувати процес екстрагування протеїну з макухи амаранту пропонується за рахунок використання екстракційного обладнання, в якому здійснюється адресна доставка енергії [8].

Подальше вилучення білку передбачає осадження крохмалю з екстракту, оскільки екстракт містить приблизно 70 % крохмалю. Густина екстракту в середньому 1020 кг/м^3 , в'язкість – $7,78 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Встановлено, що за такої високої в'язкості для ефективного осадження крохмалю, необхідно забезпечити фактор розділення не менше 3000.

Подальша обробка освітленого білкового екстракту передбачає осадження розчинених глютелінів нейтралізацією лужного середовища розчином HCl , та зневоднення білкового осаду. Отриманий продукт може містити від 60 до 90 % білку, в залежності від якості очищення.

Велика кількість крохмалю яка потрапляє до відходів може бути вилучена як окремий продукт. Процес вилучення крохмалю включає багаторазове промивання крохмального молока (суспензії зерен крохмалю) до $\text{pH} \approx 7$ та осадження крохмалю. Одержаний зразок нативного крохмалю наведено на рис. 6.



Рис. 6 – Нативний крохмаль амаранту

Розділення крохмалю та протеїнової фракції також можливе без використання розчину лугу в якості екстрагенту. Пропонуються дві схеми: холодна (вилучення нативного крохмалю, без клейстеризації) та гаряча (вилучення екстрагування клейстеризованого крохмалю).

Холодне вилучення передбачає промивання сировини великою кількістю води та осадження зерен крохмалю. При цьому необхідно визначити, наскільки суттєві втрати сухих речовин з водою після промивання. Встановлено, що після перших чотирьох промивань з водою втрачається до 20% сухих речовин (водорозчинні білки, цукри), причому 17...17,5 % сухих речовин втрачається після першого та другого промивання втрачається. Також встановлено, що швидкість осідання частинок білку амаранту більша за швидкість осідання частинок крохмалю. Зерна крохмалю з частинками білка після осадження з крохмального «молока» утворюють шар осаду сіро-бежевого кольору. Після багаторазового промивання та осадження розділяються білий нативний крохмаль та протеїн. В результаті отримано продукт, що містить клітковину та білок, білковий концентрат з вмістом протеїну 46% та нативний крохмаль (рис. 7).



Рис. 7 – Продукти «холодного» розділення макухи амаранту: а) – білковий концентрат; б) нативний крохмаль

«Гарячий» спосіб розділення макухи амаранту передбачає, що клейстеризований крохмаль вилучається заварюванням макухи амаранту водою температурою 80...90 °С. Статика вилучення сухих речовин з макухи амаранту гарячою водою наведено на рис. 8.

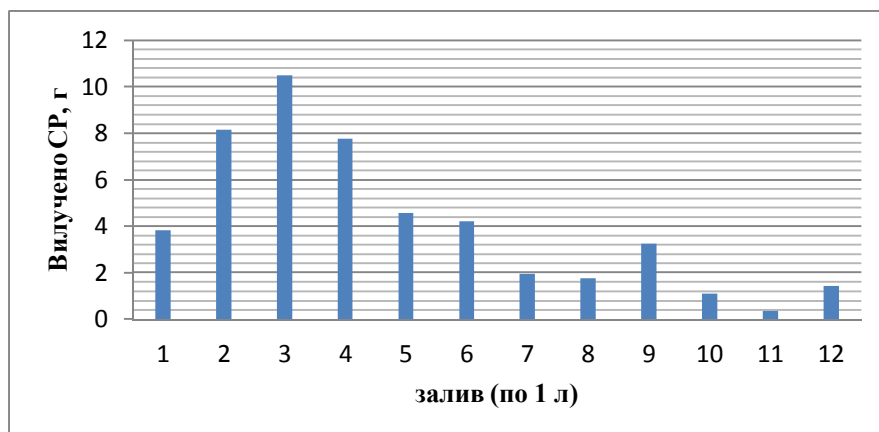


Рис. 8 – Статика вилучення клейстеризованого крохмалю з макухи амаранту

Водорозчинні білки (альбумін) за таких температур денатують і стають нерозчинними. У розчин переходять клейстеризований крохмаль, інші водорозчинні вуглеводи. Найбільша досягнута концентрація сухих речовин у екстракті – 12,5 г/л.

Припускається, що денатурований протеїн в процесі вилучення крохмалю залишається у твердій фазі, і таким чином його відсоток у продукті збільшується.

Для денатурації білків макуху амаранту нагрівали у сушильній шафі до температури 95...100 °С. Крохмаль виварювали як із вихідної макухи, так і зі знежиреного етанолом при 75 °С.

Вміст білка у продуктах після вилучення клейстеризованого крохмалю у різних режимах наведено у табл.1.

Таблиця 1

Вміст протеїну в продуктах «гарячого» розділення макухи амаранту

Продукт	Сировина (макуха)	Температура, °С	Початкова наважка, г	Кінцева маса твердої фази, г	Загальний гідромодуль	Маса протеїну, г
тверда фаза	вихідна, прогрита	вода - 85-90	100	28,5	1:150	7,3
крохмаль						9
тверда фаза	знежирена, прогрита	1) етанол - 75 2) вода - 85-90	100	28,1	1:110	7,8
крохмаль						6,9

Виявлено, що під час знежирення втрачається 1,5...2 % білка (від маси сировини). Також у екстракт переходить до 55 % білка у вигляді тонкодисперсної суспензії. Відокремлення білкової фази можливе методами розділення у полі відцентрових сил, або фільтруванням екстракту.

Зразки клейстеризованого крохмалю та білкового концентрату наведено на рис. 9.



Рис. 9 – Продукти «гарячого» способу переробки макухи амаранту: а) – клейстеризований крохмаль; б) – білковий концентрат

Показники якості одержаного крохмалю наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Показники якості крохмалю амаранту

Вологість, %	10,03
Вміст амілози, %	3,20
Вологоутримуюча здатність, %	199,48
Пошкоджений крохмаль, %	8,87
Розмір часток, нм	1373

Таким чином одержаний крохмаль характеризується дуже високою вологоутримуючою здатністю, низьким вмістом амілози, малим розміром зерен. Через низький вміст амілози такий крохмаль більш стійкий до процесів черствіння, ніж інші харчові крохмалі (пшеничний, картопляний, кукурудзяний).

Висновки. В результаті комплексної переробки макухи крохмалю можливе отримання комплексу продуктів: білкових концентратів з різним вмістом протеїну (від 30 до 90 %) та крохмалю (нативного та клейстеризованого). Технології адресної доставки дозволяють значно (до 6 разів за часом) інтенсифікувати процес екстрагування сухих речовин з макухи амаранту лужним розчином. Основною проблемою при розділенні білку та крохмалю амаранту є висока в'язкість екстрактів при відносно невеликій різниці густин часток і середовища, тому виникає потреба у використанні надцентрифуг з високим фактором розділення. Крохмаль з макухи амаранту можна вилучити щонайменше за трьома схемами. Одержаний крохмаль характеризується високою якістю.

References

1. Yanyuk, T., & Hryunval'd, N. (2022). Vyrobnystvo amarantu v Ukrayini: stan i perspektyvy [Amaranth production in Ukraine: state and prospects.]. *Prodovol'chi resursy*, 10(18), 179-192. <https://doi.org/10.31073/10.31073/foodresources2022-18> (in Ukrainian).
2. Naumenko K. I., Chernov N. K., Kapustyan A. I. (2022). Otrymannya ta kharakterystyka bilka z amarantovoyi makukhy [Preparation and characterization of protein from Amaranth cake]. *Zbirnyk tez dopovidey 82-yi naukovoї konferentsiyi vykladachiv universytetu*, 126–127. (in Ukrainian).
3. Hulak O.V., Polishchuk H.Ye., Kalinina H.P., Yanyuk T.I. (2007). Amarantove boroshno – perspektyvna kharchova dobavka u vyrobnystvi morozyva [Amaranth flour - a promising food additive in the production of ice cream]. *Produkty i ingrediventy*, 74 – 76. (in Ukrainian).
4. Ruzhyts'ka N. V., Akimov O. V. (2020). Perspektyvy ta mozhlyvosti oderzhannya krokhmalu zi zhmykhu amarantu [Prospects and opportunities for obtaining starch from Amaranth cake]. *Enerhiya. Biznes. Komfort*, 11–12. (in Ukrainian).
5. Urubkov S.A., Khovanskaya S.S., Smirnov S.O. 2019 Comparative Analysis of the Glycemic Index of Amaranth and Other Gluten-Free Products. *Food Processing: Techniques and Technology*, 49(4), 629–634.
6. Halasova G. Et al. (1993). Amaranth as food, forage and medicinal culture papers presented at the int. Symposium, 79-80.
7. Kapetula S. M. (2012). *Kinetyka ekstrakuvannya oliyi iz nasinnya amarantu v mikrohvil'ovomu poli* [Kinetics of extracting oil from amaranth seeds in a microwave field]. Odesa : ONAKhT. (in Ukrainian).
8. Terziyev, S., Ruzhyts'ka, N., Shcherbych, M., & Al'khuri, Yu. (2021). Intensyfikatsiya protsesu ekstrakuvannya v tekhnolohiyakh utylizatsiyi vidkhodiv kharchovykh ta oliynykh vyrobnystv [Intensification of the extraction process in food and oilseed waste disposal technologies.]. *Scientific Works*, 85(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2079> (in Ukrainian).

PROCESSES OF COMPLEX PROCESSING OF AMARANTH CAKE

Ruzhitska N.V., Sirotyuk I.V., Akimov O.V., Molchanov M.Yu.
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. In current paper the approaches to processing amaranth cake as the main waste product for the production of amaranth oil is discussed. The chemical composition of amaranth cake is analyzed. It has been shown that amaranth cake can be a source of vegetable protein, which is characterized by very high digestibility, starch and fiber. Three ways of producing amaranth protein concentrate are proposed. Concentrates with the highest protein content and isolates were obtained by extraction with sodium hydroxide solutions using targeted energy delivery and vacuum technologies. The kinetics of oil residue extraction from cake and the effect of cake pre-degreasing on protein yield have been studied. In addition to protein, fine-grained, amylopectin-rich starch was extracted from amaranth cake. The content of starch in a raw material is about 65 %. Indicators of the quality of amaranth starch are given. Alternative processing approaches that involve separating protein and starch without extracting proteins with alkali are also considered. One of approaches involves hydro-mechanical treatment of crushed cake at ambient

temperature. As the result a protein concentrate, a product containing fiber and protein, as well as native amaranth starch are obtained. Also a scheme that provides for aqueous extraction of starch from the solid phase in the form of gelatinized solution is considered. This scheme involves denaturation of protein and processing of raw material at temperatures up to 90 °C. The results of a study of the statics of extraction of gelatinized starch from amaranth cake are presented. As the result a solid phase- concentrate of protein and fiber and gelatinized starch are obtained. The protein content of high-temperature cake processing products such as protein concentrate and gelatinized starch has been analyzed.

Keywords: amaranth cake, protein, extraction, targeted energy delivery, starch

Список використаної літератури

1. Янюк, Т., & Грюнвальд, Н. Виробництво амаранту в Україні: стан і перспективи. Продовольчі ресурси, 10(18), 2022, 179-192. <https://doi.org/10.31073/10.31073/foodresources2022-18>
2. Науменко К. І. Отримання та характеристика білка з амарантової макухи / К. І. Науменко, Н. К. Черно, А. І. Капустян // Збірник тез доповідей 82-ї наукової конференції викладачів університету, Одеса, 26–29 квіт. 2022 р. / Одес. нац. технол. ун-т ; під заг. ред. Б. В. Єгорова. – Одеса : ОНТУ, 2022. – С. 126–127.
3. 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.
4. Ружицька Н. В. Перспективи та можливості одержання крохмалю зі жмиху амаранту / Н. В. Ружицька, О. В. Акімов // Енергія. Бізнес. Комфорт – 2020 : матеріали наук.-практ. конф., Одеса, 26 листоп. 2020 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. – Одеса : ОНАХТ, 2020. – С. 11–12.
5. Urubkov SA, Khovanskaya SS, Smirnov SO. Comparative Analysis of the Glycemic Index of Amaranth and Other Gluten-Free Products. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(4):629–634.
6. Halasova G. and all, Amaranth as food, forage and medicinal culture papers presented at the int. Symposium 19-23.08. 1992, Olomouc, 1993, p. 79-80
7. Кінетика екстрагування олії із насіння амаранту в мікрохвильовому полі: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.18.12 "Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв" / С. М. Капетула ; наук. кер. О. Г. Бурдо ; Одес. нац. акад. харч. технологій. — Одеса : ОНАХТ, 2012. — 153 с.
8. Терзієв, С., Ружицька, Н., Щербич, М., & Альхурі, Ю. Інтенсифікація процесу екстрагування в технологіях утилізації відходів харчових та олійних виробництв. Scientific Works, 85(1). 2021. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2079>

Отримано в редакцію 09.06.2022

Прийнято до друку 26.09.2022

Received 09.06.2022

Approved 26.09.2022

УТВОРЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ФРЕОНІВ ПРИ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОМУ ОТРИМАННІ ЦИРКОНІЮ, ГАФНІЮ, ТОРІЮ ТА УРАНУ

Нефедов В.Г., д.т.н., проф., Мухачев А.П., канд. ф-мат. наук,
Сухий К.М., д.т.н., проф., Беляновська О.А., к.т.н., доцент, Сухий М.К., студент
Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро

Анотація. Вивчено процеси виділення фреонів із анодних газів при електролітичному отриманні цирконію, гафнію, торію та урану. Розглянуто анодні процеси при виробництві цирконію шляхом електролізу електролітів $K_2ZrF_6 - KCl - KF$, $K_2ZrF_6 - KCl - KF - KI$ та $ZrF_4 - KCl - KF$. Виявлено недоліки застосування традиційного електроліту $K_2ZrF_6 - KCl - KF$. Показано, що введення в електроліт йодистого калію в кількості 0,03-0,5% йоду знижує розряд хлору на аноді та концентрацію його в анодному газі до 1%. Встановлено, що внаслідок зниження розряду KCl у присутності іонів йоду це дозволяє при роботі електролізера з струмовим навантаженням 10кА на електроліті $K_2ZrF_6 - KCl - KF - KI$ підвищити його продуктивність на 6%, знизити витрату KCl з 218,0кг до 40,0кг тоді як зменшення утворення баласту (KF) у 1,8 рази стабілізує рівень електроліту та процес електролізу. Це сприяє тому, що вихід по струму при цьому збільшується до 65%, і зниження витрат електроенергії та солей: при введенні KI витрата суміші солей K_2ZrF_6 і KCl знижується в 1,7 рази, а питома витрата лугу $NaOH$ на очищення газу від хлору падає з 0,7 т до 0,01 т на 1 т. Питома витрата електроенергії знижується на 16 кВт·год/кг. Встановлено, що заміна K_2ZrF_6 на ZrF_4 та зниження фторидності електроліту на 3÷5% сприяє підвищенню електропровідності та виходу по струму до 85 – 90 %, що дозволяє знизити питому витрату електроенергії до 40 кВт·год на 1 кг порошку. Показано, що переробка продуктів анодних реакцій дозволяє отримати фтор-хлорпохідні вуглеводні, зокрема, фреони Ф-11 – Ф-14. Встановлено, що вихід фреону при використанні електроліту $K_2ZrF_6 - KCl - KF$ дорівнює 1,00, $K_2ZrF_6 - KCl - KF - KI - 0,78$ та $ZrF_4 - KCl - KF - 1,50$ кг/кг порошку цирконію. Показана перспективність переробки продуктів анодних реакцій при електролізі розплавів тетрафторидів цирконію, гафнію, торію та урану.

Ключові слова: електроліз розплавів, виробництво цирконію, гафнію, торію та урану, енергоефективність, фреони.

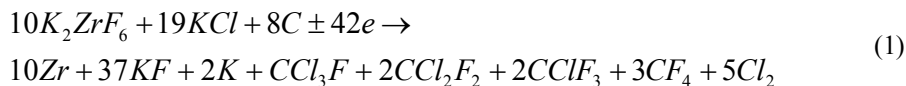
Вступ. Ядерна енергетика є високотехнологічною та небезпечною галуззю енергетики, що працює з іонізуючим випромінюванням та потоками нейтронів, гамма-кванти яких беруть участь у розподілі ядра. Ефективність ядерних процесів залежить як від чистоти компонентів ядерного палива, так і від чистоти конструкційних матеріалів ТВС. Конструкційні матеріали повинні відпрацьовувати необхідний термін служби за умов потужних полів і потоків випромінювань без втрати експлуатаційних властивостей, які становлять для реакторів до 60 років, а для збірок – до 5 років.

До конструкційних матеріалів виготовлення трубок тепловиділяючих елементів (ТВЕл) належить цирконій та його сплави з ніобієм, хромом, оловом і залізом. Цирконій має надзвичайно малий поперечний переріз захоплення нейтронів – 0,18 барн і зберігає міцність при високих температурах. В даний час виробництво цирконію засноване на електролізі розплавленої суміші хлориду калію, фториду калію та фторцирконату калію солей в електролізерах з струмовим навантаженням 10 і 20 кА. В якості анодних продуктів є фтор-хлор-похідних вуглеводів (фреони 11, 12, 13 та 14). Під час використання відкритих електролізерів фреони викидаються в атмосферу, що є надзвичайно небезпечним з точки зору екології, оскільки одна молекула фреона здатна зруйнувати до 10 молекул озону. З іншої сторони, фреони є цінним продуктом під час створення теплових насосів та холодильної техніки.

Мета роботи – опис ресурсо- та енергозберігаючого процесу отримання цирконію та утилізації фтор-хлор-похідних вуглеводів шляхом переробки анодних газів.

Утворення фреонів при отриманні цирконію

Цирконій можна отримувати електролізом кількох складів, зокрема $K_2ZrF_6 - KCl - KF$. Процес виробництва порошку цирконію супроводжується руйнуванням графітового анода та описується наступною сумарною реакцією (1- 3)



В результаті сильної деполяризації при взаємодії з вуглецем потенціал розряду фтор-іонів знижується з 2,93 до 0,9 В, що виявляється нижче потенціалу розряду іонів хлору, рівного 1,2В при температурі 700 °С. При цьому на аноді протікають дві електрохімічні реакції:



На фториді вуглецю потенціал розряду іона хлору знижується до 0,78В і при цьому може протікати реакція:



При взаємодії CF з хлором утворюються термодинамічно нестійка сполука CFCl, яка розпадається на ряд більш стійких фреонів складу $CF_{4-m}Cl_m$ (де m=0, 1, 2, 3):



Фреони, що утворюються, термодинамічно стійкі і виділяються в складі анодного газу. При надлишку фтор-іону в електроліті прискорюється процес утворення цетирифтористого вуглецю, що призводить до виникнення анодного ефекту і знижує вихід струму цирконію.



Цей процес може протікати лише за електрохімічним механізмом. Концентрація цетирифтористого вуглецю в анодному газі за нормального перебігу процесу електролізу не перевищує 20%. Сума вмісту фреонів 11, 12, 13 також не перевищує 20%. Вміст хлору в анодному газі становить приблизно 60%.

Участь вуглецю в анодному процесі призводить до руйнування анода за 50 діб безперервного ведення електролізу. Питома витрата графіту становить 600кг на 1т цирконієвого порошку. Вихід складних фреонів досягає 1т на 1т порошку, що потребує їх повної переробки для утилізації фтору та хлору, оскільки взаємодія фреонів з озоновим шаром атмосфери призводить до його знищення.

Аналізи складу анодного газу показали такі концентрації фреонів: Ф-11 - 5±1%, Ф-12 - 4±1%, Ф-13 - 9±2%, Ф-14 - 18±2% і хлору 57±3% при сумі Co , CO_2 , O_2 і N_2 рівній 5%. Таким чином, доля фреонів в анодному газі складає, приблизно, 36%, а доля кожного фреона β в суміші фреонів Ф-11 - 14%, Ф-12 - 11%, Ф-13 - 25%, Ф-14 - 50%

Електрохімічні еквіваленти хлору і фреонів Ф-11, Ф-12, Ф-13 і Ф-14 визначаються з суммарного рівняння за формулою:

$$k = \frac{\nu M}{zF} \quad (11)$$

та складають, відповідно $k_{Cl_2}=0,33\text{г/Агод}$, $k_{\Phi 11}=0,128\text{г/Агод}$; $k_{\Phi 12}=0,225\text{г/Агод}$; $k_{\Phi 13}=0,195 \text{ г/Агод}$; $k_{\Phi 14}=0,246 \text{ г/Агод}$.

На виділення хлору витрачається, відповідно,

$$Q_{Cl_2} = \frac{M}{k_{Cl_2}} = \frac{600 \times 10^3}{0,33} = 1,81 \times 10^6 \text{ Агод} \quad (12)$$

а на виділення фреонів –

$$Q_{\Phi} = \frac{M_{\Phi}}{\left(\frac{\beta}{k}\right)_{\Phi 11} + \left(\frac{\beta}{k}\right)_{\Phi 12} + \left(\frac{\beta}{k}\right)_{\Phi 13} + \left(\frac{\beta}{k}\right)_{\Phi 14}} = \frac{10^6}{4,88} = 0,205 \times 10^6 \text{ Агод} \quad (13)$$

Підсумовуючи результати отримання цирконію з електроліту $K_2ZrF_6 - KCl - KF$, можна відзначити, що основними недоліками цього процесу є:

- велика витрата хлористого калію, для підтримки концентрації хлору в електроліті 10%;
- утворення агресивного анодного газу, що складається із суміші хлору (50-60%) та небезпечних для озону атмосфери фреонів Ф11-Ф14;
- накопичення в електроліті KF, що вимагає періодичного зливу електроліту з погіршенням якості порошку. Злив електроліту з ванни призводить до підвищених витрат електроенергії, збільшення витрати солі Zr, що збільшує собівартість переділу електролізу;

- підвищення вмісту фтору в електроліті призводить до погіршення змочуваності анода та прояву анодного ефекту, внаслідок чого різко збільшується напруга на електродах, зростають енерговитрати та прискорюється процес руйнування анодів.

З метою усунення одного з недоліків процесу електролізу, що полягає у попутному розкладанні хлористого калію з утворенням металевого калію на катоді, та хлору на аноді, за реакцією:



В електроліт вводився йодистий калій у кількості 0,03-0,5% йоду. Аналіз анодного газу показав, що при введенні електроліту добавки KI зменшується розряд хлору на аноді і його концентрація в анодному газі знижується до 1%. Хлору, що виділяється, достатньо лише для утворення фреону-13. В анодному газі міститься $CClF_3$ – 35%, CF_4 – 60%, решта – домішки N_2 , O_2 , CO і CO_2 . Наявність в анодному газі всього двох фреонів дозволяє провести процес їх поділу і ліквідувати скидання фреонів в атмосферу. Оскільки йоду в анодному газі не виявлено, і вміст електроліту в процесі електролізу залишається приблизно постійним, можна припустити два варіанти протікання анодного процесу.

1. Йод сорбується на аноді, збільшуючи його змочуваність, але не входить у електрохімічну реакцію. Цей варіант з точки зору термодинаміки малоімовірний, оскільки потенціал виділення йоду з розплаву індивідуальної солі при температурі 700 °C становить +0,146В [4], що значно менше, ніж хлору та фтору, навіть з урахуванням їхньої деполяризації.

2. Йод окислюється на аноді за реакцією:

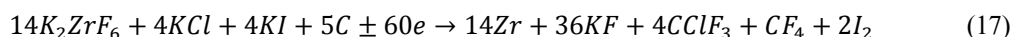


і тут же в прианодному шарі електроліту відновлюється іонами двовалентного цирконію:



Після чого знову бере участь у анодному процесі.

У цьому випадку сумарну реакцію одержання цирконію можна навести, як:



Незважаючи на відносно невеликий вміст йоду в електроліті, реакції (1) та (2) мають термодинамічні переваги в порівнянні з розрядом хлору. Швидкість розряду хлору при цьому знижується на порядок, з 0,8 кг до 0,05 кг на 1 кг порошку за добу. Хлор виділяється на фтористому вуглєці за реакціями:



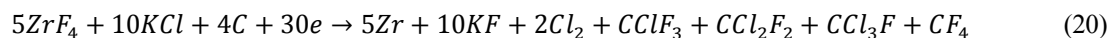
Деполяризація розряду іону фтору спочатку йде на поверхні графіту, а потім на сполуці, що утворюється CF . Виділення фтору при даному складі електроліту починається при $E=0,9$ В, що дозволяє йому випередити розряд хлору та вступити в реакцію з вуглєцем.

Поява на аноді термодинамічної міцної сполуки CF_4 підтримує деполяризацію розряду іону фтору на чистій поверхні графіту і призводить до прискорення швидкості руйнування графіту внаслідок анодного ефекту. Витрата графіту при утворенні фреонів 13 і 14 (12,3 кг/добу) помітно перевищує його витрату (7 кг/добу) при спільному отриманні хлору та суміші фреонів 11, 12, 13, 14. Вміст фреону 14 в анодному газі при введенні KI збільшується втричі, з 20% до 60%, а CF_3Cl з 5% до 35%. Утворення фреонів 11 та 12 у цьому випадку відсутня або знижується на порядок.

Аналіз роботи електролізера з струмовим навантаженням 10кА на електроліті $K_2ZrF_6 - KCl - KF - KI$ показав, що його продуктивність зростає на 6%. Витрата KCl знижується з 218,0 кг до 40,0 кг на добу. Зниження розряду KCl у присутності іонів йоду призводить до зменшення утворення баласту (KF) у 1,8 раза, стабілізує рівень електроліту та процес електролізу. Вихід струму при цьому зростає до 65%, знижується витрата електроенергії та солей. Концентрація F^- в електроліті знижується з 27,0 до 22,0 %. Сумарно витрата суміші солей K_2ZrF_6 і KCl , при введенні KI, знижується з 578 до 340 кг на добу, тобто. у 1,7 раза. Питома витрата луку $NaOH$ на очищення газу від хлору у зв'язку зі скороченням його виходу знижується з 0,7 т до 0,01 т на 1 т Zr .

Загалом це призводить до зниження витрати електроенергії з 56 кВт·год/кг порошку цирконію до 40кВт·год/кг.

Сумарну реакцію отримання цирконію з електроліту ZrF_4-KCl можна навесити, як:



Заміна K_2ZrF_6 на ZrF_4 не впливає на механізм розряду галогенів на аноді. Кількість фреонів, що утворюються, визначається наявністю на аноді вільних хлору і фтору. На 1 кг порошку цирконію розряджається 0,83кг фтору, і лише 0,06 кг фтору виділяється у газову фазу і утворює фреони, решта фтору йде на утворення KF . Розряд іону хлору на аноді як побічний процес, викликає підвищену витрату KCl , у результаті

частина фтору зв'язується з калієм. Відсутність KF у ZrF_4 та зниження фторидності електроліту на 3÷5% робить електроліт менш в'язким та більш електропровідним, що знижує витрату електроенергії.

Вміст CF_4 в анодному газі становить менше 20 %, проте в результаті анодного ефекту, він може зрости до 30% і більше. Це прискорює руйнування анода та збільшує вміст вуглецю в катодному продукті. Найбільша швидкість руйнування анода спостерігається в електроліті $K_2ZrF_6 - KCl - KF$. Вона дорівнює 0,7 кг вуглецю на 1 кг порошку. Швидкість руйнування анода в електроліті $K_2ZrF_6 - KCl - KF - KI$ та $ZrF_4 - KCl - KF$ практично однакова і становить 0,11 та 0,13 кг на 1 кг порошку цирконію. У порівнянні з першим електролітом вона зменшується в 6 разів, що спричинено, зниженням концентрації KF в електроліті на 5-7% та підвищенням концентрації Zr на 20 %. Склад електроліту впливає і на процес розряду іонів хлору. Вихід хлору та фреонів на аноді та витрата електроенергії при різних складах електроліту показані у таблиці.

Таблиця 1

Вихід хлору та фреонів на аноді і витрата електроенергії при різних складах електроліту

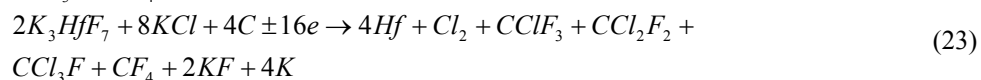
№ з/п	Електроліт /Склад	Вихід по струму цирконію, %	Вихід фреонів, кг/1кг порошку	Витрата електроенергії кВтгод/кг	Вихід хлору на 1 кг порошку
1.	$K_2ZrF_6 - KCl - KF$	55,0	1,00	70,0	0,60
2.	$K_2ZrF_6 - KCl - KF - KI$	65,0	0,78	56,0	0,05
3.	$ZrF_4 - KCl - KF$	85-90,0	1,50	40,0	0,74

Вміст Zr у солі ZrF_4 , порівняно з K_2ZrF_6 , зростає з 32,1 % до 54 %, що дозволяє підвищити концентрацію Zr в електроліті на 20 %, до 6,0 % та збільшити продуктивність електролізера зі 160 до 180 кг порошку на добу. У процесі електролізу KF утворюється у кількості, достатній, щоб рівень електроліту у ванні був постійним.

Заміна солі збільшила вихід струму до більш, ніж 85 %, що дозволило знизити питому витрату електроенергії з 56,0 кВт·год до 40 кВт·год на 1 кг порошку. Час роботи електролізу в закритому режимі зростає за рахунок виключення операції зливу електроліту до 90 %, що покращує якість порошку та знижує його собівартість.

Аналогічні процеси відбуваються при електролізі розплавів тетрафториду гафнію, торію та урану.

Осадження гафнію вели з розплаву солей тетрафториду гафнію, гексафториду калію та гептафторгафна-ту калію. Процес електролізу у цих солях можна описати рівняннями:



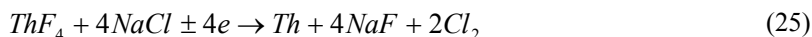
Анодні процеси при електролізі гафнію подібні до процесів при електролізі цирконію. У хлоридних електролітах виділяється лише хлор, який повертається у процес одержання тетрахлориду гафнію. Додавання до електроліту фтористих солей при великих концентраціях аніону фтору може призвести до виділення замість хлору фторвуглеців:



Потенціал виділення фтору позитивніше, ніж хлору, але вони можуть виділятися одночасно за рахунок утворення зв'язків фтору з вуглецем та деполяризації анода. Такий механізм може бути запропонований у разі електролізу фтор-натрієвих електролітів [4]. Зростання концентрації фтору в електроліті веде до зменшення кількості хлору в анодному газі за одночасного збільшення вмісту фреонів. Утворення фторвуглеців забезпечує помітну деполяризацію анода та зсув потенціалу в електронегативний бік. Збільшенню виходу фреонів та зниженню поляризації сприяє підвищення температури розплаву, яке сприяє зниженню в'язкості розплаву та збільшення змочуваності графіту. Найявність фторвуглеців було визначено за допомогою розчину йодистого калію методом інфрачервоної спектроскопії [5].

Електролітичне отримання торію можливе при використанні хлоридно-фторидних електролітів. Для електролізу застосовувалася еквімолекулярна суміш натрію хлоридів і калію з добавкою 15÷20% ThF_4 або $KThF_5$. Температура електролізу становила 800÷820°C. При нижчих температурах електроліт в'язкий, що сприяє великому його винесенню, а за більш високих – зменшується вихід струму. Початкова катодна щільність струму 11÷19 А/см².

У процесі електролізу на катоді виділявся торій, а на аноді – хлор:



При значному збідненні електроліту хлоридами на аноді починає розряджатися фтор, що взаємодіє з матеріалом анода з утворенням CF_4 :



Низькотемпературний електроліз розплавлених солей урану проводиться при температурах 375-425°C, що значно нижче температури плавлення урану (1133°C). Продукт при цьому утворюється у вигляді порошку або дендритів. Середньотемпературний електроліз при температурі 800-900°C також дає осад, а при високотемпературному електролізі уран отримують в рідкому вигляді.

Високотемпературний електроліз проводиться при температурі 1175-1200 °C суміші солей складу 40 % BaF_2 ; 40 % MgF_2 ; 20 % UF_4 . Гранична густина струму на початок анодного ефекту становить 36А/см².

Гази, що виділяються на аноді, складаються, переважно, CO та CO_2 з деякою кількістю CF_4 . Склад газів залежить від концентрації UF_4 . Якщо концентрація UF_4 більше 10 %, вміст CO в анодному газі досягає 75-82 %, якщо концентрація UF_4 менше 10 % - менше 50 %.

Висновки. Розглянуто процеси одержання фреонів шляхом переробки анодних газів при електролітичному отриманні цирконію, гафнію, торію та урану. Проаналізовано анодні процеси при виробництві цирконію з різних електролітів. Показано недоліки застосування традиційного електроліту $\text{K}_2\text{ZrF}_6 - \text{KCl} - \text{KF}$. Запропоновано вводити в електроліт йодистий калій у кількості 0,03-0,5 % йоду, що зменшує розряд хлору на аноді і знизити його концентрацію в анодному газі до 1 %. Показано, що при роботі електролізера з струмовим навантаженням 10 кА на електроліті $\text{K}_2\text{ZrF}_6 - \text{KCl} - \text{KF} - \text{KI}$ його продуктивність зростає на 6 %, витрата KCl знижується з 218,0 кг до 40,0 кг на добу, внаслідок зниження розряду KCl у присутності іонів йоду зменшення утворення баласту (KF) у 1,8 раза стабілізує рівень електроліту та процес електролізу. При цьому вихід струму збільшується до 65%, витрата електроенергії та солей знижується. Концентрація F-в електроліті зменшується на 5 %. Витрата суміші солей K_2ZrF_6 і KCl , при введенні KI , знижується в 1,7 рази, питома витрата лугу NaOH на очищення газу від хлору падає з 0,7т до 0,01т на 1т Zr . Це дозволяє знизити питому витрату електроенергії з 56 кВт·год/кг порошку цирконію до 40кВт·год/кг.

Заміна K_2ZrF_6 на ZrF_4 та зниження фторидності електроліту на 3-5 % робить електроліт менш в'язким та більш електропровідним, сприяє підвищенню виходу струмом до 85 – 90 %, що дозволяє знизити питому витрату електроенергії до 40 кВт·год на 1 кг порошку.

Переробка продуктів анодних процесів дозволяє одержати фреони Ф-11 - Ф-14. Встановлено, що введення в електроліт йодиду калію підвищує вміст фреону 14 в анодному газі, при введенні KI з 20 до 60%, а CF_3Cl з 5 до 35 %, виключити або знизити на порядок утворення фреонів 11 і 12. Максимальний питомих вихід фреонів встановлений для електроліту $\text{ZrF}_4 - \text{KCl} - \text{KF}$.

References

1. Zaharov, E.I., Abramkin, V.F., Kalinin, L.M. et al. (1979). *Primenenie pul'sacionnoj apparatury dlya gidrometallurgicheskoy obrabotki metallicheskih poroshko* [Application of pulsation equipment for hydrometallurgical processing of metal powders].v. M.:Atomizdat (in Russian).
2. Karpacheva S.M. (1972). *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser. Mashiny, apparaty, sredstva mekhanizacii i avtomatizacii proizvodstvennyh processov* [Machines, apparatuses, means of mechanization and automation of production processes], 1 (41) (in Russian).
3. *Razrabotka i primeneniye pul'sacionnoj apparatury* [Development and application of pulsation equipment] (1974). M.:Atomizdat,. 256 s (in Russian)
4. Bajmakov, YU.V., Vetlyukov, M.M. (1966). *Elektroliz rasplavlennyh solej* [Electrolysis of molten salts]. M.:Metallurgiya (in Russian).
5. Titov, V.E., Mishura, A.M., Konyachko, V.G. (2011). *Sovmestnaya elektrohimiicheskaya konversiya freonov S2 s dioksidami sery i ugleroda* [Joint electrochemical conversion of C2 freons with sulfur and carbon dioxide] *Voprosy himii i him. tekhnologii*, 4, 224-226 (in Russian)

ENERGY EFFICIENT METHOD OF OBTAINING ZIRCONIUM, HAFNIUM, THORIUM AND URANIUM

Nefedov V.G., SciD., Prof., Mukhachev A.P., PhD, Sukhyy K.M., SciD., Prof.,
Belyanovskaya E.A., PhD, Assoc. Prof.,
Sukhyy M.K., student

Abstract. The processes of obtaining freons by processing anode gases during the production of nuclear-grade zirconium have been studied. Anode processes in the production of zirconium by electrolysis of $\text{K}_2\text{ZrF}_6 - \text{KCl} - \text{KF}$, $\text{K}_2\text{ZrF}_6 - \text{KCl} - \text{KF} - \text{KI}$ and $\text{ZrF}_4 - \text{KCl} - \text{KF}$ are considered. The disadvantages of using the traditional electrolyte

K_2ZrF_6 - KCl - KF are revealed. It is shown that the introduction of potassium iodide in the amount of 0.03-0.5% iodine into the electrolyte reduces the discharge of chlorine at the anode and its concentration in the anode gas to 1%. It has been established that due to a decrease in the KCl discharge in the presence of iodine ions, this makes it possible, when operating the electrolyzer with a current load of 10 kA on the electrolyte K_2ZrF_6 - KCl - KF - KI , to increase its productivity by 6%, to reduce the consumption of KCl from 218.0 kg to 40.0 kg per day, while reducing the formation of ballast (KF) by 1.8 times stabilizes the electrolyte level and the electrolysis process. This contributes to an increase in current efficiency, while increasing to 65%, and reducing the consumption of electricity and salts: when KI is introduced, the consumption of a mixture of K_2ZrF_6 and KCl salts decreases by 1.7 times, and the specific consumption of $NaOH$ alkali for gas purification from chlorine drops from 0, 7 t to 0.01 tons per 1 ton of Zr . The specific power consumption is reduced by 16 kWh/kg. It has been established that the replacement of K_2ZrF_6 with ZrF_4 and a decrease in electrolyte fluoride by 3–5% contributes to an increase in electrical conductivity and current efficiency up to 78%, which makes it possible to reduce the specific power consumption to 40 kWh per 1 kg of powder. The processing of products of anodic reactions is shown to allow obtaining fluoro-chloro-derivative hydrocarbons, in particular, freons F-11 - F-14. It has been established that the freon yield when using electrolyte K_2ZrF_6 - KCl - KF is 1.00, K_2ZrF_6 - KCl - KF - KI - 0.78 and ZrF_4 - KCl - KF - 1.50 kg/kg of zirconium powder.

Keywords: electrolysis of melts, production of zirconium, energy efficiency, freons.

Список використаної літератури

1. Захаров, Е.И., Абрамкин, В.Ф., Калинин, Л.М. и др. Применение пульсационной аппаратуры для гидрометаллургической обработки металлических порошков. В сб.: Пульсационная аппаратура в народном хозяйстве. Ч.3. Пульсационные реакторы различного назначения.-М.:Атомиздат, 1979, С.79-84
2. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Машины, аппараты, средства механизации и автоматизации производственных процессов/Под ред. С.М.Карпачевой. Вып.1 (41), М.:ЦНИИ атоминформ,1972. 118с.
3. Разработка и применение пульсационной аппаратуры. М.:Атомиздат, 1974. 256с
4. Баймаков, Ю.В, Ветлюков, М.М. Электролиз расплавленных солей. М.:Металлургия, 1966. 559 с.
5. Титов, В.Е., Мишура, А.М., Конячко, В.Г. Совместная электрохимическая конверсия фреонов C_2 с диоксидами серы и углерода с.224-226. Вопросы химии и хим. технологии, 2011. №4. С.224-226

Отримано в редакцію 14.06.2022

Прийнято до друку 24.09.2022

Received 14.06.2022

Approved 24.09.2022

МОБІЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ ВОДОРОЗЧИННИХ ПОЛІМЕРІВ

Демченко В.Г. канд. техн. наук, Коник А.В. канд. техн. наук, Хоменко М.В.

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація. Економічна ситуація в Україні активно регресує в умовах воєнного стану і потребує зниження енергетичних витрат в побуті та промисловості, впровадження нових ефективних технологій й обладнання, що здатні інтенсифікувати технологічні процеси. У представленій статті надається пропозиція щодо використання мобільного технологічного комплексу для виробництва дисперсних систем на основі водорозчинних полімерів.

У статті розглядається формування водорозчинних полімерів на основі сухих речовин гуарової та ксантанової камеді та карбоксиметилцелюлози (ВРП). Такі водорозчинні полімери, крім високих технологічних характеристик, володіють значними адгезійними властивостями, що значно ускладнює процес їх виробництва. ВРП широко використовується в харчовій, фармацевтичній, гірничодобувній, текстильній, паперовій і будівельній промисловості, сільському господарстві, нафтовидобутку, очищення промислових стічних вод, стабілізації ґрунту і т.д. новою областю застосування ВРП є приготування рідких теплоакумулюючих матеріалів, що використовуються в системах зберігання теплової енергії (TES) і забезпечують стабільну роботу системи теплопостачання.

Робота мобільного технологічного комплексу заснована на тріступеневому змішуванні компонентів в певній послідовності, що обумовлено хімією процесу розчинення твердих речовин. Мобільний технологічний комплекс передбачає використання оригінального магнітного змішувача на початковому етапі для попередньої активації води і якісного перемішування ВРП, а в кінці модернізованого змішувального реактора для додаткового перемішування розчину.

Основний ефект від застосування мобільного технологічного комплексу - це підвищення якості і зменшення собівартості кінцевого продукту та зменшення часу технологічного процесу, що призводить до зниження споживання енергетичних ресурсів в процесах змішування, збільшення продуктивності та скорочення питомої енергоемності виробництва.

Ключові слова: мобільний технологічний комплекс, водорозчинні полімери, енергоефективність.

Формулювання проблеми. Розвиток енергоощадних технологій в різних галузях промисловості вимагає нових підходів до реалізації процесів, застосування нових матеріалів та обладнання. В представленій статті запропоновано принципово нову технологію приготування водорозчинних полімерів (ВРП), реалізовану у вигляді мобільного технологічного комплексу (МТК), що дозволяє безпосередньо у виробничих умовах отримувати багатфункціональні розчини.

Водорозчинний гідрофільний полімер, як правило, є полімерним матеріалом сухі речовини якого, можуть розчинятися у воді до отримання водного розчину або дисперсії. У молекулярній структурі ВРП міститься велика кількість гідрофільних груп, які умовно розподіляються на три категорії: катіонні, аніонні та неіоногенні групи [1], що значно урізноманітнює їх властивості. Їх водні розчини мають властивість псевдопластичності. Невеликі концентрації можуть призвести до значного зниження (до 80 %) турбулентного фрикційного опору води, в якій вони розчинені. ВРП застосовують для створення та регулювання необхідних фізико-хімічних та реологічних властивостей дисперсних систем та колоїдних розчинів: як структуротворювачів (загусників), що викликають збільшення реологічних параметрів; розріджувачів (диспергаторів), що не допускають надмірного збільшення в'язкості та структурних параметрів; флокулянтів, що викликають утворення пухких пластоподібних агрегатів (флокул) з дрібних колоїдних частинок дисперсної фази. За рахунок таких різноманітних хімічних, фізичних і теплофізичних властивостей [2-4] ВРП отримали широке застосування у харчовій, фармацевтичній, гірській, текстильній, паперовій промисловостях та будівництві, сільському господарстві, нафто-газовидобуванні, очищенні забруднених промислових стічних вод, стабілізації ґрунтів тощо [5-8].

Новим напрямком застосування ВРП є приготування рідких теплоакумуляційних матеріалів, що застосовуються в ємкісних теплових акумуляторах [9,10]. Акумулятори теплоти або системи теплового акумулювання (TES) [11,12] забезпечують стабільну роботу системи теплопостачання. Особливого значення теплові акумулятори набувають при використанні у якості джерела теплоти відновлювальних джерел енергії, оскільки дозволяють стабілізувати їх роботу. Використання розчинів ВРП спрямоване на отримання якісних продуктів та зменшення їх собівартості, зниження витрат енергії та екологічну безпеку.

Однак, технології приготування ВРП мають такі недоліки:

- тривалий час приготування;

- нерівномірність консистенції ВРП;
 - складність проведення технологічного процесу - виникає значне налипання та комкування внаслідок значних адгезійних властивостей сухих речовин.

Тому актуальним є питання вдосконалення наявних методів приготування ВРП для зменшення енергетичних виробничих витрат. Вирішення цих складнощів позитивно впливає на економію паливно-енергетичних ресурсів, а саме: зменшення витрат на електричну енергію. Відбувається скорочення шкідливих викидів у оточуюче середовище. Це призводить до зменшення собівартості виробництва та підвищення якості кінцевого продукту, а також дозволить вивести нові конкурентоздатні продукти й обладнання на ринок України. Пропонується використання універсального мобільного технічного комплексу, який можна застосовувати як стаціонарно на постійно діючому підприємстві, так і безпосередньо на об'єктах теплоенергетики, нафтогазових джерелах, будівельних майданчиках, для очищення забруднених вод та ін.

Метою даної роботи є проведення аналізу та обґрунтування створення мобільного технологічного комплексу для отримання водорозчинних полімерів, а саме: рідинних теплоаккумуляційних матеріалів, енергоефективних теплоносіїв та ін.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати хімічні та фізичні властивості багатофункціональних порошків, на основі яких готуються ВРП, провести аналіз літературних джерел стосовно технологій та режимів замішування при виробництві дисперсних систем та колоїдних розчинів на основі водорозчинних полімерів і запропонувати послідовність технологічних процесів, що дозволять якісно, швидко і енергоефективно провести приготування ВРП.

Хімічні та фізичні властивості багатофункціональних порошків. Розглянемо хімічні та фізичні властивості деяких багатофункціональних порошків на прикладі полісахаридів, що широко використовуються у перерахованих вище галузях [13,14].

Карбоксиметилцелюлоза (Carboxymethylcellulose, КМЦ, целюлозогліколева кислота) — полімер, продукт переробки целюлози загального складу $[C_6H_7O_2(OH)_3-x(OCH_2COOH)_x]_n$ (де $x = 0,08—1,5$). У молекулі карбоксиметильна група $(-CH_2-COOH)$ поєднується гідроксильними групами глюкозних мономерів, рисунок 1.

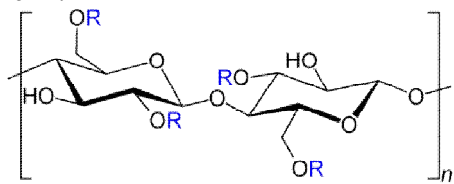


Рис.1 – Карбоксиметилцелюлоза [15]

целюлоза не розкладається під дією сонячного світла, не розчиняється в рослинних і тваринних маслах [16-18]. КМЦ розчиняється в органічних кислотах: мурашиній, молочній, крижаній оцтовій. У розчинах мінеральних кислот відбувається гідролітична деструкція метилцелюлози (МЦ) з глікозидних зв'язків із збереженням метоксильних груп. Насправді для отримання істинних розчинів МЦ спочатку замочують у гарячій воді (80-85 °С) для рівномірності змочування всіх частинок і згодом додають холодну воду. У разі підвищення температури в'язкість розчинів МЦ зменшується. Але при досягненні деякої температури відбувається розшарування фаз або утворення гелю.

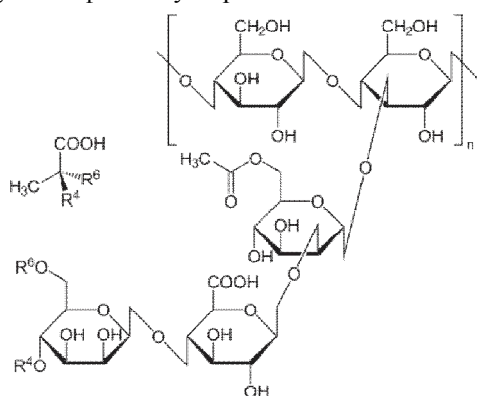


Рис. 2 – Камедь ксантана [19]

щільну структуру, довгостроково стабілізує харчові продукти та подовжує термін їх. Завдяки цим властивостям використовується у виробництві соусів, молочних продуктів, морозива, десертів, хлібобулочних виробів, напоїв та ін.

Карбоксиметилцелюлоза, натрійкарбоксиметилцелюлоза (харчова добавка E466) - безбарвна аморфна речовина, слабка кислота, за своєю хімічною природою є високополімерний іонний електроліт. Карбоксиметилцелюлозу отримують як результат реакції монохлорцетової кислоти з алкілцелюлозою, яку, у свою чергу, отримують з целюлози та каустичної соди. Карбоксиметилцелюлоза може бути генетично модифікована. Вона розчиняється у воді, не має запаху і безпечна у використанні. Карбоксиметилцелюлоза

Камедь ксантана або ксантанова камедь $(C_35H_49O_{29})_n$ — природне хімічне з'єднання, харчова добавка E415. Відноситься до групи стабілізаторів у харчовій промисловості. Ксантанова камедь - вуглеводневий полімер з високою молекулярною масою, лінійний поліцукрид, рисунок 2. Молекулярну масу й властивості ксантану можна регулювати, змінюючи умови життєдіяльності мікроорганізмів *Xanthomonas campestris*.

Розчин ксантану відзначається стійкістю до дії кислот (окрім соляної) та лугів, високих (до 120°C) та низьких (до -18°C) температур, спиртів та ферментів. Для ВРП на основі ксантанової камеді характерні високі значення в'язкості в діапазоні рН в межах від 2 до 12. Тому ВРП на основі камеді ксантана формує

Камедь гуарова ((C₆H₁₀O₅)_n) – порошок білого або жовтуватого кольору з характерним запахом. Його отримують із меленого ендосперму насіння гуарових бобів. Насіння містить до 70 % камеді (вищого полісахариду – галактоманнану). Молекулярна маса гуарової камеді >20000 [21].

Камедь гуарову використовують як стабілізатор, загусник або як засіб для капсулювання. Основною перевагою природних рослинних полісахаридів є низька вартість, проте їх технологічні показники невисокі, що звужує сферу застосування. Тому використовують хімічно модифіковані похідні целюлози, крохмалю і гуару, що мають комплекс необхідних технологічних властивостей.

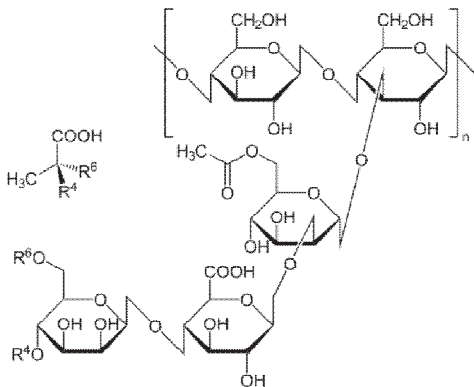


Рис. 3 – Камедь гуарова [20,13]

Розроблений на початку 1970-х років гідроксипропілгуар (HPG) стає найбільш широко використовуваним загусником технологічних рідин. HPG отримують реакцією пропіленоксиду з молекулою гуара, що дозволяє отримати більш в'язкий і стійкий до дії високих температур полімер. Продукти гуара зазвичай мають негідратуючий залишок у межах 8-12 %, HPG – 1-4 % [7].

Літературний аналіз технологій та режимів розчинення ВРП. Як відомо [22,23], найкращим і найбільш розповсюдженим розчинником є вода. Вода використовується у майже всіх наявних технологічних процесах на різних етапах. Але при проведенні процесу розчинення необхідно враховувати не лише фізико-хімічні та мікробіологічні показники, а й відомі аномалії води [24-26].

Метод розчинення КМЦ та параметри перемішування (зсув) у процесі розчинення визначають кінцеву в'язкість розчину. Розчинник, хімічний склад КМЦ та сила зсуву при перемішуванні готового розчину відбиваються на характеристиках розчинення КМЦ, таких як гідратації молекул КМЦ. Тобто для контролю в'язкості кінцевого розчину необхідно суворо дотримуватися необхідних умов розчинення КМЦ.

Важливою особливістю розчинення КМЦ є швидке намокання всіх частинок перед початком збільшення в'язкості. КМЦ за своєю природою є гідрофільною речовиною, тобто частинки КМЦ мають миттєво розчинятися при диспергуванні у воді. Обладнання, що використовується для перемішування, має бути досить ефективним для підтримки всього об'єму рідини в стані руху, щоб уникнути утворення грудок та згустків. Міксер повинен створювати потужний нижній потік у центрі змішувального танка і КМЦ повинна вноситися у вирву, утворену пристроєм, що перемішує.

Якщо нагрівання можливе, рекомендованою температурою приготування розчину КМЦ є 50-60 °С. Швидкість розчинення КМЦ залежить від розміру частинок. Порошок дрібного розміру розчиняється значно швидше, в даному випадку забезпечується гідратація кожної окремої частинки і грудки не утворюються.

Метилцелюлоза (МЦ) при розчиненні в лугах та деяких кислотах не потребує особливих умов, але для отримання водного розчину спочатку отримується високонцентрований розчин способом замочування порошку в гарячій воді (80-85 °С) для змочування всіх частинок, а потім додається холодна вода до утворення розчину необхідної концентрації.

Водорозчинні полімери розчиняються у воді, однак слід вжити заходів, щоб гарантувати їх повне розчинення.

Найбільш важливий етап усієї процедури розчинення полімерів відбувається в перші кілька секунд, коли індивідуальні частинки полімеру відокремлюються одна від одної.

У воді ВРП миттєво змочуються, однак у випадку нерівномірного диспергування відбувається часткове розчинення, змочені частинки склеюються в агломерати і утворюють гелі, які не вдається розчинити потім.

Високошвидкісного перемішування розчинених полімерів слід уникати, щоб запобігти деградації полімеру від зсуву. Органічні розчинники - з огляду на їх нижчу полярність - сольватують (змочують) повільніше, ніж вода. Завдяки цьому при розчиненні полімерів в органічних розчинниках зазвичай не виникає проблеми агломерації та гелеутворення.

Для заводських чи лабораторних вимог існує три основні категорії методів:

- додавання безпосередньо у воду;
- попереднє диспергування у водорозчинній речовині, що не розчиняє полімер;
- використання механічних пристроїв, які забезпечують диспергування з мінімальним зсувом.

Вибір використовуваної методики залежить від кінцевої в'язкості та необхідного обсягу.

Способи розчинення ВРП відрізняються в залежності від властивостей сухих речовин, тому при розробці універсального ТК необхідно враховувати можливість використання додаткового підігріву, зміни швидкості режимів перемішування та часу протікання процесу, можливості забезпечити поступову постадійну зміну концентрації розчину.

Технологічний комплекс для виробництва дисперсних систем та колоїдних розчинів. Аналізом літературних джерел [23, 25-27] визначено, що технологічний процес виготовлення розчинів на основі водорозчинних полімерів передбачає великі витрати електричної енергії на процес розчинення порошків. Запро-

понований спосіб інтенсифікації процесу змішування та зменшення споживання електричної енергії досягається шляхом використання активованої води та додаткового етапу перемішування розчину.

Мобільний технологічний комплекс передбачає на початковому етапі використання оригінального магнітного міксеру для проведення попередньої активації води та якісного замішування ВРП, а наприкінці – модернізованого реактора-змішувача для додаткового перемішування розчину. Основні засоби технологічного оснащення та елементи виробничої лінії ТК представлені на рисунку 4.

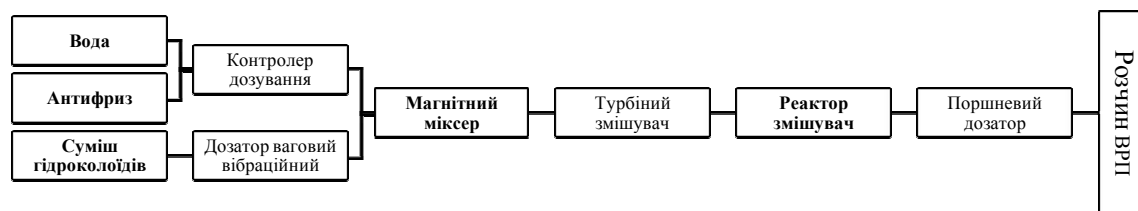


Рис. 4 – Основні засоби технологічного оснащення та елементи виробничої лінії технологічного комплексу

Використання трьох етапів змішування економить витрати електроенергії за рахунок зменшення часу розчинення порошкової суміші та розділення режимів перемішування.

На першому етапі використовується магнітний міксер, що передбачає попереднє замішування суміші порошків (надалі суміші) в активованій рідині-розчиннику.

Другий етап – турбінний змішувач, використовується для інтенсивного розмішування та перемішування двох і більше розчинів, отриманих в результаті змішування компонентів на першому етапі.

Третій етап – реактор-змішувач є додатковим способом перемішування розчину під час зберігання готового продукту та очікування його використання.

Методика використання МТК для розчинення проводиться наступним чином:

1. За необхідним відсотковим значенням розчину та об'ємом готової продукції попередньо визначається співвідношення маси суміші та об'єму рідин.

2. Задаються значення на контролери дозування суміші та рідин-розчинників, встановлюється час проведення кожного етапу перемішування:

2.1 Активування рідини за допомогою магнітного міксеру.

2.2 Додавання сухої суміші ВРП та попереднє перемішування протягом заданого часу.

2.3 Основне (ключове) перемішування попереднього замішених розчинів турбінним змішувачем до повного розчинення та протягом заданого часу.

2.4 Додаткове перемішування готового розчину протягом всього часу до його використання або відведення.

3. Застосування готового розчину.

Для адекватного використання МТК необхідно знати діапазон оптимальних концентрацій речовин, розрахувати оптимальний час та режими перемішування, попередньо визначити швидкість внесення компонентів та температурні характеристики ВРП, що вносяться.

Розглянемо три методи розчинення ВРП.

1. Гаряче розчинення. Воду необхідно нагріти до температури близької температурі кипіння ($\approx 97^\circ\text{C}$). На стінках ємності вище за рівень води часто спостерігається конденсація пари. Якщо це відбувається, може статися небажане осідання на стінки порошку сухих речовин ВРП. Щоб уникнути цього, майже киплячу воду слід енергійно перемішувати для створення вирви (500 – 600 об/хв). Під час перемішування рівень води підніметься ближче до верху ємності. При цьому зменшиться або зникне конденсація на стінках ємності. Після інтенсивного перемішування протягом хвилини швидкість слід зменшити до 50–60 об/хв. Потім вимикають джерело нагрівання, а перемішування продовжують зі швидкістю 50 – 60 об/хв.

2. Повне розчинення. Ця методика підходить для розчинення невеликого чи середнього об'єму у випадках, коли є лише мінімальне обладнання для перемішування. У цьому випадку відбувається диспергування ВРП у рідинах, що змішуються з водою, але не розчиняють сухі речовини ВРП, відокремлюючи індивідуальні частинки полімеру одну від одної. При додаванні води кожна окрема частинка має можливість набухнути, гідратувати та після цього розчинитись. При цій методиці вдається уникнути комкування, яке може відбуватися при використанні води.

3. Застосування для розчинення спиртів або гліколіз. Це надає додаткову перевагу, зменшуючи падіння в'язкості розчину, оскільки ці розчинники є стабілізаторами в'язкості розчину.

Більшість методів попереднього диспергування відбувається в рідинах, що змішуються з водою, але не розчиняють полімер. Таке розчинення ВРП можливе для великих партій при серійній підготовці розчинів. Для зручності у заводських умовах попереднє диспергування виконується у сумішевому реакторі. Потім до диспергованого водорозчинного полімеру у реактор додається необхідна кількість води.

Додавання солей до води знижує розчинність полімерів. У таких сольових або лужних розчинах також відбувається поділ частинок, подібний до описаного в попередній методиці. Розчинення полімеру відбувається при розведенні цих розчинів водою.

Обидва методи - застосування попереднього диспергування в рідинах, що змішуються з водою, але не розчиняють полімер, і диспергування у водних розчинах солей і лугів - корисні для розчинення полімеру як у дрібних, так і у великих обсягах.

Обговорення. Можливим і перспективним напрямком заощадження паливно-енергетичних ресурсів є використання теплоаккумуляційних матеріалів на основі ВРП. Наявність систем накопичення теплової енергії (TES) забезпечує безперебійне тепlopостачання житлових, адміністративних і промислових об'єктів.

За оцінками експертів, в Європі потенціал енергозберігання за допомогою широкого використання акумуляторів теплоти й холоду складає близько 1,4 млн. ГВт·год енергії за рік, що дає змогу скоротити на 400 млн. тон викиди CO₂ за рахунок широкого використання акумуляторів тепла і холоду. TES класифікують за призначенням та температурою збереження теплової енергії. Типові параметри для систем TES показані в таблиці, включаючи потужність, ефективність, період зберігання та вартість. Очевидно, водні розчини ВРП мають привабливу продуктивність, широкий діапазон потужності, високу ефективність та доступну вартість. Питома теплоємність розчинів ВРП приблизно на 30 % вище, а інвестиційні витрати не перевищують 10 % у порівнянні зі звичайною водою.

Таблиця 1

Основні параметри для зберігання TES

TES	Продуктивність системи TES, кВт·год/тн	Потужність, МВт	Ефективність, %	Час зберігання	Вартість періоду зберігання, €/кВт·год
Гаряча вода	10–50	0,001–10,0	50–90	доба/міс.	0,1 – 10
ВРП	30 – 65	0,001–10,0	75 - 90	годин/доба	0,1 – 10
Матеріал з фазовим переходом (PCM)	50–150	0,001–1,0	75–90	годин/міс	10 – 50
Хімічні реакції	120–250	0,01–1,0	75 – 100	рік/доба	8 –100

Висока щільність зберігання енергії і висока потужність для зарядки та розрядки є важливими властивостями будь-якої системи зберігання. Найбільш ефективна акумуляція досягається при використанні теплоти фазових перетворень чи теплоти хімічних реакцій (утворення та розпаду кристалогідратів солей). Найменш ефективною є акумуляція при використанні тільки теплоємності речовини, зміни її ентальпії зі зміною температури без фазових перетворень [10]. Розчини ВРП створюють в об'ємі води аморфні трьохмірні структури на кшталт кристалогідратів, що пояснює ефективність їх використання.

Запропонований МТК для отримання розчинів ВРП дозволить використовувати технологічні властивості гідроколідів, що вплине на розширення сфери їх використання при розробці інноваційних теплоносіїв і ТАМ.

Висновки. Застосування МТК дозволить отримати наступні практичні результати для промисловості України:

- Розширити галузі використання ВРП шляхом отримання та впровадження нових композиційних рідинних ТАМ для збереження енергії та енергоефективних теплоносіїв. Економічний ефект полягає в скороченні часу на отримання готового продукту, в залежності від складу і якості порошку, що розчиняється. Також зменшуються витрати електричної енергії в діапазоні від 15 до 65 % на виробництво 1 кілограма готової продукції.
- Застосування МТК надає можливість ощадливого використання викопних та біологічних видів палива, що позитивно впливає на підвищення екологічної безпеки оточуючого середовища.
- При виготовленні обладнання з уніфікованих вузлів значно спрощується технологія виробництва, що зменшує вартість кінцевого продукту. Таким чином, забезпечується конкурентоздатність нової концепції при появі аналогів на ринку.

Використання в суспільній практиці результатів впровадження МТК надають можливість збільшення загальної ефективності і підвищення надійності, економії енергії та екологічну безпеку. На ринку з'являться обладнання та матеріали, які не мають вітчизняних та закордонних аналогів. Відбудеться впровадження ресурсозберігаючих технологій в теплоенергетиці.

Використання МТК забезпечує конкурентоздатність нової концепції, створення та/або збереження робочих місць, можливість поповнення дохідної частини бюджету України. Попередні розрахунки свідчать

про швидку окупність капіталовкладень (рентабельність від 20 %, термін окупності варіюється в межах від 1,5 до 2 років) та доступність дешевих державних і іноземних інвестицій в енергетично ефективний проект.

Наука має можливість реалізувати сучасні енергоефективні розробки при створенні нових технологій і матеріалів на основі ВРП, отримати цільову державну підтримку розробок, пов'язаних зі створенням екологічних енергоефективних технологій.

References

1. Vodorozchynnyy polimer [Water-soluble polymer]. Retrieved from [Водорозчинний полімер - Сторінки \[1\] - Всесвітній енциклопедичні знання \(swewe.net\)](#) [in Ukrainian]. (2022, July, 14)
2. Barabanov V.P., Krupin S.V. (1984). *Vodorastvorimyye polimery i ikh primeneniye* [Water-soluble polymers and their application]. Kazan KKHTI. [in Russian]
3. Pertsevoy F.V., Bidyuk D.O., Koshel' O.YU. (2018). Analitichne obgruntuvannya ta vybir binarnoyi kombinatsiyi polisakharydiv dlya termostykykh molokovmisnykh nachynok [Analytical substantiation and selection of a binary combination of polysaccharides for heat-resistant milk-containing fillings]. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli* [Progressive equipment and technologies of food production, restaurant industry and trade], 1, 122-133. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2018_1_11 [in Ukrainian]. (2022, July, 14)
4. Demchenko V.G., Konyk A.V. (2020) Research of heat accumulation capacity binary water systems. Retrieved from. *Iosr journal of applied chemistry (iosr-jac)*, Retrieved from <https://doi.org/10.9790/5736-1306010107> [in English]. (2022, Juny, 10)
5. Kir'yanova A. A., Koretskaya I. L. (2009) Ispol'zovaniye gidrokolloidov v proizvodstve konditerskikh izdeliy [The use of hydrocolloids in the production of confectionery]. *Khlebopekarskoye i konditerskoye delo* [Bakery and confectionery business], 4, 33–40. [in Russian]
6. Kholmberg K., Yyësson B., Kronberg B., Lindman B. (2009) Poverkhnostno-aktivnyye veshchestva i polimery v vodnykh rastvorakh [Surfactants and polymers in aqueous solutions]. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy [BINOM. Knowledge Laboratory]. [in Russian]
7. Lykov O.P., Nizova S.A., Tolstykh L.I. (2007) Khimicheskiye reagenty neftegazovoy otrasli Svoystva, primeneniye. Ekologiya. Uchebnoye posobiye [Chemical reagents for the oil and gas industry. Properties, application. Ecology. Tutorial]. M.: FGUP izd-vo «Nef't' i gaz» RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubki-na [M.: FSUE publishing house "Oil and Gas" Russian State University of Oil and Gas. THEM. Sponges-na]. [in Russian]
8. Bashkatova S.T., Kazanskaya A.S., Vinokurov V.A. (2005) Teoreticheskiye osnovy ispol'zovaniya polimerov v neftegazovoy otrasli. Uchebnoye posobiye [Theoretical foundations for the use of polymers in the oil and gas industry. Tutorial]. – M.: FGUP izd-vo «Nef't' i gaz» RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina [M.: FSUE publishing house "Oil and Gas" Russian State University of Oil and Gas. THEM. Sponges-na]. [in Russian]
9. E. Gracia Oró, A.de, Castell A., Farid M.M., Cabeza L.F. (2012) Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications *Appl Energy*, no. 99, 513 – 533. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058> [in English]. (2022, July, 14)
10. Du, K., Eames, P., Kaiser, J., Calautit, S., Wu, Y. (2020). A state-of-the-art review of the application of Phase Change Materials (PCM) in Mobilized-Thermal Energy Storage (M-TES) for recovering lowtemperature Industrial Waste Heat (IWH). *Renewable Energy*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.057> [in English]. (2022, July, 14)
11. Dincer, I., Rosen M. (2002). *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, Wiley [in English].
12. Dincer, I., Rosen, M.A. (2010). *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, 2nd Edition, Wiley; ISBN: 978-0-470-74706-3. 620. [in English].
13. Filinska T. G., Chervakov O. V., Filinska A. O. (2017) Food polysaccharides: production, properties, use: education. manual. Dnipro: UDKhTU [in Ukrainian]
14. Voytsitskiy V. M., Danchuk V.V., Khizhnyak S.V., Samkova O.P., Ushkalov V.O. (2016). Safety and risks of food additives, Kyiv: Comprint [in Ukrainian]
15. Karboksimitilselyuloza [Carboxymethylcellulose]. Retrieved from [Карбоксиметилцелюлоза — Вікіпедія \(wikipedia.org\)](#) [in Ukrainian]. (2022, July, 14)
16. E466 – Karboksimitilselyuloza. Vse o Ye-dobavkakh i sostave produktov [E466 - Carboxymethylcellulose. All about E-additives and the composition of products]. Retrieved from <https://dobavkam.net/additives/e466> [in Russian]. (2022, July, 14)
17. Rogovin 3. A. (1972) Khimiya tsellyulozy [Chemistry of cellulose]. Moscow. [in Russian]
18. (1974) Tsellyuloza i yeyë proizvodnyye [Cellulose and its derivatives], t. 1-2. Moscow. [in Russian]
19. Ksantanova kamed' [Xanthan gum]. Retrieved from [Ксантанова камедь — Вікіпедія \(wikipedia.org\)](#) [in Ukrainian]. (2022, July, 14)
20. Huarova kamed' [Guar gum]. Retrived from [Гуарова камедь — Вікіпедія \(wikipedia.org\)](#) [in Ukrainian]. (2022, July, 14)
21. Huars'ka humka (huars'ka humka) [Guar gum (guar gum)]. Retrieved from <https://atk-ua.com/catalog/guarovaya-kamed-/> [in Ukrainian]. (2022, July, 14)

22. Frog B.N. (2001) Vodopodgotovka [Water treatment]. M.: MGU. [in Russian]
23. Shuleykin V.V. (1968) Fizika morya [Physics of the sea]. M.: Nauka. [in Russian]
24. (1985) Voda i vodnyye rastvory pri temperaturakh nizhe 0°C [Water and aqueous solutions at temperatures below 0°C]. K.: Naukova dumka. [in Russian]
25. (1980) Voda v pishchevykh produktakh [Water in food]. M.: Pishchevaya promyshlennost' [M.: Food industry]. [in Russian]
26. Slanik A. V. (2006) Vykorystannya mekhanizmiv dyskretno-impul'snoho vvedennya enerhiyi dlya obrobky vody: dys. kand. tekhn. nauk [The use of discrete-pulse energy input mechanisms for water treatment: dissertation]. NAN Ukrainy, In-t tekhn. teplofizyky [National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Technology thermophysics], 05.14, 192-203. [in Ukrainian].
27. Nikolayev A.F., Okhrimenko G.I. (1979) Vodorastvorimyie polimery [Water soluble polymers]. L.: Khimiya [L.: Chemistry]. [in Russian]

MOBILE TECHNOLOGY COMPLEX FOR THE PREPARATION OF WATER-SOLUBLE POLYMERS

Demchenko V.G., PhD, Konyk A.V., PhD, Khomenko M.

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

Abstract. *The economic situation in Ukraine is dynamically regressing under martial law and needs an immediate reduction in energy costs in everyday life and industry. The introduction of new efficient technologies and equipment that can intensify technological processes will help reduce energy costs and obtain new energy-efficient equipment. This article proposes the use of a mobile technological complex for the production of dispersed systems based on water-soluble polymers.*

The article considers the formation of water-soluble polymers based on dry substances of guar and xanthan gum and carboxymethylcellulose (WSP). Such water-soluble polymers, in addition to high technological characteristics, have significant adhesive properties, which greatly complicates the process of their production.

WSP is widely used in food, pharmaceutical, mining, textile, paper and construction industries, agriculture, oil production, industrial wastewater treatment, soil stabilization, etc. A new area of application of WSP is the preparation of liquid heat storage materials used in thermal energy storage (TES) and ensuring stable operation of the heat supply system.

However, with widespread use, several negative technological phenomena cause significant energy costs to obtain a homogeneous solution. To overcome these negative factors, the use of a mobile technological complex is proposed, which makes it possible to obtain a high-quality homogeneous water-soluble polymer both in the laboratory and industrial production conditions.

The operation of the mobile technological complex is based on the three-stage mixing of the components in a certain sequence, which is due to the chemistry of the process of dissolving solids. The mobile technological complex provides for the use of an original magnetic mixer at the initial stage for pre-activation of water and high-quality mixing of the WSP, and at the end of a modernized mixing reactor for additional mixing of the solution.

The main effect from the introduction of a mobile technological complex is a reduction in the cost of the final product and the time of the technological process, which leads to a decrease in the consumption of energy resources in mixing processes, an increase in productivity, and a reduction in the specific energy intensity of production.

Keywords: mobile technological complex, water-soluble polymers, energy efficiency.

Список використаної літератури

1. Водорозчинний полімер - Сторінки [1] - Всесвітній енциклопедичні знання. Всесвітній енциклопедичні знання. URL: http://uk.swewe.net/word_show.htm/?67693_1&Водорозчинний_полімер (дата звернення: 09.12.2022).
2. Баранов В.П., Крупин С.В. Водорастворимые полимеры и их применение. Казань, КХТИ, 1984. 80с.
3. Перцевой Ф.В., Бідюк Д.О., Кошель О.Ю. Аналітичне обґрунтування та вибір бінарної комбінації полісахаридів для термостійких молокозмісних начинок. Прогресивна техніка та технологія харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. 2018. 1, С. 122-133. Отримано з http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2018_1_11 (дата звернення: 09.12.2022)
4. Demchenko V.G., Konyk A.V. Research of heat accumulation capacity binary water systems. Retrieved from. Iosr journal of applied chemistry (iosr-jac). URL: DOI: 10.9790/5736-1306010107 (дата звернення: 09.12.2022)
5. Кирьянова А. А., Корецкая И. Л. Использование гидроколлоидов в производстве кондитерских изделий. Хлебопекарское и кондитерское дело. 2009. 4, 33–40.
6. Холмберг, Б. Йёссон, Б. Кронберг, Б. Линдман. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах. Москва: Лаборатория знаний. 2020. 531 с.

7. Лыков О.П., Низова С.А., Толстых Л.И. Химические реагенты нефтегазовой отрасли. Свойства, применение, экология. Москва: ФГУП издательство «Нефтигаз» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2007.
8. Башкатова С.Т., Казанская А.С., Винокуров В.А. Теоретические основы использования полимеров в нефтегазовой отрасли. Теоретические основы применения полимеров в нефтяной и газовой промышленности. Руководство. Москва: ФГУП изд-во «Нефтигаз» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2005.
9. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications / E. Oró et al. Applied Energy. 2012. Vol. 99. P. 513–533. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058> (date of access: 09.12.2022).
10. A state-of-the-art review of the application of Phase Change Materials (PCM) in Mobilized-Thermal Energy Storage (M-TES) for recovering low-temperature Industrial Waste Heat (IWH) for distributed heat supply / K. Du et al. Renewable Energy. 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.057> (date of access: 09.12.2022).
11. Dincer I., Rosen M. A. Thermal Energy Storage: Systems and Applications. Wiley, 2002. 579 p.
12. Dincer I., Rosen M. A. Thermal Energy Storage: Systems and Applications. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2011. 620 p.
13. Філінська Т. Г., Черваков О. В., Філінська А. О. Харчові полісахариди: виробництво, властивості, використання. Освіта. Посібник. Дніпро: УДХТУ. 2017. 253 с. ISBN 978-966-8018-98-5
14. Войціцький В. М., Данчук В. В., Хижняк С. В., Самкова О. П., Ушкалов В. О. Безпека та ризики харчових добавок. Київ: Компрінт. 2016. 174 с. ISBN 978-966-929-373-2
15. Учасники проєктів Вікімедіа. Карбоксиметилцелюлоза – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Карбоксиметилцелюлоза> (дата звернення: 09.12.2022).
16. E466 – Карбоксиметилцелюлоза | Добавкам.нет. Добавкам.нет - Все о Е-добавках и составе продуктов. URL: <https://dobavkam.net/additives/e466> (дата звернення: 09.12.2022).
17. Роговин З. А. Химия целлюлозы. Москва. Химия. 1972. 520с.
18. Байклз Н., Сегал Л. Целлюлоза и ее производные. Москва. 1974. 512с
19. Учасники проєктів Вікімедіа. Ксантанова камедь – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ксантанова_камедь (дата звернення: 09.12.2022).
20. Учасники проєктів Вікімедіа. Ксантанова камедь – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ксантанова_камедь (дата звернення: 09.12.2022).
21. Гуаровая камедь (Гуаровая смола) | atk-ua.com. Химические реактивы, химсырье, техническая химия крупным и мелким оптом | АТК-Украина. URL: <https://atk-ua.com/catalog/guarovaya-kamed-/> (дата звернення: 09.12.2022).
22. Фрог Б.Н. Водоподготовка. Москва. МГУ. 2001. 680с
23. Шулейкин В.В. Физика моря. Москва. Наука. 1968. 1090с.
24. Косевич М.В. Вода и водные растворы при температуре ниже 0°C. Киев. Наукова думка. 1985.
25. Дакурт Р.Б. Вода в пищевых продуктах. Москва. Пищевая промышленность. 1980. 810с.
26. Сланік А. В. (2006) Використання механізмів дискретно-імпульсного введення енергії для обробки води: дис. канд. техн. Використання дискретно-імпульсних механізмів підведення енергії для підготовки води: дис. НАН України, Ін-т техн. теплофізики НАН України, Інститут технологічної теплофізики. Київ, № 05.14, 192-203.
27. Николаев А.Ф., Охрименко Г.И. Водорастворимые полимеры. Ленинград. Химия. 1979. 144с

Отримано в редакцію 07.06.2022

Received 07.06.2022

Прийнято до друку 29.09.2022

Approved 29.09.2022

ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

Щербич М.В.¹, аспірант, Поян О.С.², інженер, Сиротюк І.В.¹, PhD, асистент

¹Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

²ТОВ «Дельта Вілмар Україна», м. Южне, Україна

Анотація. Проведено критичний аналіз світового досвіду використання електромагнітного випромінювання з метою інтенсифікації тепломасообмінних процесів в ході переробки харчової сировини. Встановлено, що проблеми екстрагування та зневоднення є досить актуальними, вирішення яких призведе до максимального використання енергетичного та сировинного потенціалу. Незважаючи на велике різноманіття проведених досліджень як вітчизняними, так і закордонними науковцями, отримані результати не розкривають реальні можливості мікрохвильових технологій. Відсутність вакууму, високі температури, довготривале термічне навантаження на сировину призводить до значного погіршення якостей кінцевого продукту не дивлячись на інноваційність організації процесу обробки. Для вирішення поставлених задач була запропонована гіпотеза, що використання електромагнітних технологій в процесах зневоднення дозволить організувати видалення вологи із капілярів харчової сировини не лише у вигляді парової фази, а й у вигляді рідини. В такому випадку з'являється можливість суттєво скоротити енерговитрати на процес та отримати абсолютно нові продукти. Результати досліджень показали, що вихід рідкої фази в 4 рази перевищує вихід парової. Даний ефект отримав назву «пародимамічний». Була запропонована технологія комплексної переробки вторинної сировини харчокопцентратних та олієжирових виробництв. В ході проведення експериментальних досліджень була доведена можливість додаткового вилучення цільових компонентів з олієвісних відходів. Такий принцип утилізації вторинної сировини вирішує цілий ряд проблем харчової промисловості за рахунок різкого зниження втрат продукту, відновлення реагентів та зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище. Лабораторний аналіз отриманих зразків готового продукту свідчить про їх високу якість та безпечність до споживання.

Ключові слова: екстрагування, зневоднення, мікрохвильові технології, електродинамічні апарати.

Вступ. Сучасний етап розвитку харчової індустрії характеризується динамічним зростанням інтересу до харчових концентратів, посиленням регламентацій екологічної безпеки виробництва [1, 2], підвищенням ефективності використання ресурсів (енергетичних та сировинних [3-6]). Комплекс таких завдань, іноді суперечливих, визначає необхідність пошуку нових, інноваційних шляхів інтегрованого вирішення проблем енергетичної ефективності, екології та переробки відходів виробництва. Самостійний інтерес становлять відходи харчових виробництв. Часто вони містять значну кількість функціональних компонентів, комерційна привабливість яких навіть вища, ніж готовий продукт. Однак традиційні технології не в змозі їх вилучати, оскільки цільові компоненти зосереджені в мікро- та нанокapілярах і «в'яло» взаємодіють з екстрагентами. У роботі висувається концепція, що використання інноваційних генераторів енергетичної дії на харчову сировину здатне вирішувати у комплексі завдання енергетики, екології та резервних джерел їжі.

Аналіз літературних джерел і формулювання проблеми. У техніці концентрування розчинів використовуються 3 принципи видалення вологи: механічний, тепловий та дифузійний. Механічні апарати характеризуються мінімальними енергетичними витратами процес оскільки протікають без фазового переходу. До недоліків фільтруючих мембран відносяться: мала продуктивність, обмежене значення кінцевої концентрації та проблеми виробництва мембран. Теплові (випарювання) відрізняються відносною простотою конструкції та експлуатації, великою продуктивністю. До недоліків випарних апаратів відносяться: значні енергетичні витрати (необхідні для переведення вологи в пару), обмежене значення кінцевої концентрації та небезпека псування термолабільних компонентів сировини. До дифузійних відноситься процес кріоконцентрування, який характеризується низькими витратами енергії та повним збереженням функціональних властивостей компонентів. Проте устаткування потребує високих капітальних витрат, має обмежене значення кінцевої концентрації. Крім того, в апаратах блочного виморожування поки що не вирішені завдання реалізації тоннажного виробництва.

Для концентрування харчових розчинів найчастіше використовуються випарні апарати. Однак з підвищенням концентрації розчину зростає його в'язкість та зменшується інтенсивність теплопередачі [7]. За наявності твердої фази для зневоднення сировини застосовують технології сушіння, теорія якої відрізняється значною складністю серед усіх масообмінних процесів. Крім того, сушіння характеризується і високими витратами енергії. Наприклад, енергетичний ККД найпростішої випарки становить 85%, а найкращих сушильних технологій – у рази менше. Причина у відомому протиріччі сушильних технологій. Завдання підвищення інтенсивності процесів перенесення пов'язані з зростанням швидкості потоку теплоносія. І це ви-

магає підвищення витрати теплоносія і, як наслідок, зростання втрат енергії з відпрацьованим теплоносієм [8].

Останнім часом намітилося стабільне зростання інтересу до застосування електромагнітних джерел енергії для інтенсифікації процесу зневоднення. Так, у 2016 р. у Газіантепському університеті (Туреччина) було проведено експерименти щодо вивчення впливу мікрохвильового (МХ) випарного апарату (ВА) на колір та вміст фенольних компонентів у чорничному соку. Для ході експерименту було використано 75 мл соку з початковою концентрацією 10%Brix. Дослідження проводилися за двох потужностей МХ поля: 200 та 250 Вт. Підсумкова концентрація становила 65%Brix. Температура випарювання була не більше 90°C [9].

У 2017 р. вчені Мунзурського університету (Туреччина) застосували НВЧ нагрівання при концентруванні яблучного соку. Дослідження проводилися при різних рівнях потужності МХ поля, що підводиться (334-668 Вт) і тиску (500-800 мБар). У МХ випарному апараті містилася ємність з 450 мл яблучного соку з концентрацією 11%Brix. В результаті випарювання було отримано продукт з концентрацією 66,5%Brix. У ході досліджень вченими було визначено оптимальний режим параметрів процесу випарювання: 668 Вт та 500 мБар. Температура за такого поєднання значень параметрів становила 82°C [10].

У 2018 році там же на прикладі апельсинового соку було продемонстровано перспективні можливості МХ поля в області концентрування розчинів. Комбіноване застосування МХ поля (334 Вт) та розрядження (750 мБар) дало можливість підвищити концентрацію соку до 42%Brix при температурі 65°C [11].

У 2019 р. в університеті Акденіз (Туреччина) проводились дослідження процесу випарювання в умовах електромагнітного поля. Як харчові розчини виступали соки винограду (початкова концентрація $X_p = 15,93\%$ Brix), гранату ($X_p = 13,91\%$ Brix) та чорної моркви ($X_p = 11,23\%$ Brix). Початковий обсяг кожного зразка складав 400 мл. Досліди проводилися для двох рівнів потужності МХ поля: 180 та 300 Вт. Кінцева концентрація кожного зразка була близько 65%Brix. Дані про температури розчинів у процесі випарювання у статті не надано [12].

У 2019 р. група вчених Університету сільського господарства (Пакистан), Університету Об'єднаних Арабських Еміратів (ОАЕ), Державного коледжу (Пакистан) та Університету COMSATS в Ісламабаді (Пакистан) провели експерименти з випарювання соку цукрової тростини. У МХ камеру містилося 200 мл зразка соку і випарювалося до концентрації 75%Brix. Процес забезпечувався при різних рівнях потужності НВЧ випромінювання (30, 50, 80 та 100 Вт). Дані про температури зразків не надано [13].

У 2020 р. вчені Малайзійського університету Путра (Малайзія), Університету сільського господарства (Пакистан) та Університету Маеджо (Таїланд) досліджували процес випарювання кокосового молока з використанням МХ технологій. В камері МХ випарного апарату розміщувалося кокосове молоко об'ємом 100 мл з концентрацією 12,4%Brix. Процес тривав досягнення концентрації соку в 65%Brix. Температура продукту в ході випарювання трималася на позначці 103°C [14].

У 2020 р. в Ісфаханському технологічному університеті (Іран) було отримано досвід застосування МХ ВВА для концентрування соку барбарису. Дослідження проводилися при атмосферному тиску та при розрядженні 30 кПа. Кінцева концентрація готового продукту становила 60%Brix. Значення температур продукту не надано [15].

У 2015 р. у Горганському університеті сільськогосподарських наук (Іран) було вивчено зміну кольорних параметрів та каламутності кизилового соку після концентрування у МХ ВА. Початкові об'єм та концентрація соку кизилу становили 0,4 л та 7%Brix відповідно. Досліди проводилися за різних рівнів розрядження (12, 38,5 і 100 кПа). Потужність МХ поля становила 300 Вт. Після закінчення експериментів було отримано сік концентрацією 42%Brix. Температура при різних значеннях розрядження становила 60, 82 та 102°C відповідно [16].

У 2011 р. у Тегеранському університеті (Іран) було досліджено можливості МХ технологій при випарюванні гранатового соку. В якості об'єкту досліджень виступав гранатовий сік об'ємом 600 мл з початковою концентрацією 14,2%Brix. Випарювання проводилося при трьох рівнях розрядження (12 кПа, 38,5 кПа та 100 кПа). Потужність електромагнітного випромінювача становила 300 Вт (обумовлена тим, що при підвищенні потужності спостерігалось активне піноутворення та пригорання продукту, що суттєво погіршує процес випарювання). Кінцева концентрація одержаного продукту становила 40%Brix. Температури продукту на трьох рівнях розрядження протягом процесу коливалися в межах 60-65, 75-80 і 95-105°C. З-за підвищення концентрації продукту і, відповідно, підвищення температури кипіння розчину [17].

У 2011 р. там проводилися експерименти з випарювання соку чорної шовковиці в умовах МХ поля та вакууму. Як вихідний продукт було взято 600 мл соку чорної шовковиці з початковим вмістом сухих речовин 16%Brix. У ході експерименту забезпечувалося три ступені розрядження (7,3, 38,5 та 100 (атмосферне) кПа). Щоб уникнути піноутворення і пригорання продукту оптимальним рівнем потужності МХ поля, що підводиться, було прийнято 300 Вт. В результаті було отримано концентрат соку із загальним вмістом сухих речовин 42%Brix. Дані про температури відсутні [18].

Позитивні результати використання ІЧ та МХ генераторів при екстрагуванні, випарюванні та сушінні харчової сировини представлені в роботах авторів [19-21].

У 2020 р. силами наукових співробітників Технологічного університету в Хефеї, Пекінського університету технологій та бізнесу та Пекінського університету хімічних технологій (Китай) було вивчено вплив МХ

технологій на процес екстрагування зеленого чаю. Процес протікав при температурі до 70°C, що дуже сприятливим для зеленого чаю. Отриманий екстракт мав високий вміст кофеїну (до 87%) та інших корисних компонентів [19].

У 2018 р. вченими університету Улудаг у Бурсі (Туреччина) було проведено дослідження процесу сушіння куркуми за допомогою застосування МХ (діапазон потужності магнетрону 90-350 Вт), ІЧ (діапазон робочих температур 60-80°C) та низькотемпературних (НТ) технологій (температура процесу становила – 50°C при тиску 52 Па). В результаті проведення порівняльної характеристики було встановлено, що застосування МХ сушіння є найбільш ефективним з найменших витрат часу: 65 хвилин при потужності 350 Вт в порівнянні з ІЧ (120 хвилин при температурі 120°C) і НТ технологіями (600 хвилин) [20].

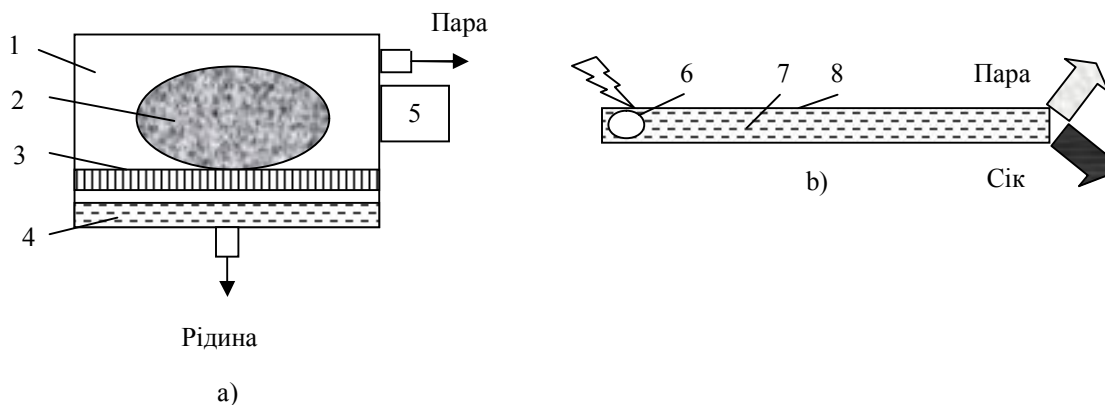
У 2016 р. в Анкарському університеті (Туреччина) було організовано сушіння банана та ківі шляхом комбінування ІЧ та МХ джерел енергії, потужність випромінювання яких становила 600 Вт та 360-420 Вт відповідно. Експерименти проводилися порівняно з конвективною (при 70°C протягом 480 хвилин) і МХ (з потужністю, що підводиться, в 180-360 Вт для банану і 350-490 Вт для ківі) технологіями сушіння [21].

Виконаний вище аналіз показує, що механічний віджимання є найменш енерговитратним процесом видалення рідини з твердої сировини. Але віджимання супроводжується повною деструкцією сировини та відчутними втратами цільових компонентів з відходами. Сушіння зберігає структуру сировини, але потребує суттєвих витрат енергії. У роботі поставлено завдання знайти еволюційні шляхи розвитку техніки зневоднення, перейти від конвективних принципів до інноваційних, зняти з повітря завдання теплоносія та залишити лише завдання дифузійного середовища.

Розв'язання задачі ґрунтується на науково-технічній ідеї: «Видалення рідкої фази з твердої сировини можливе за рахунок створення всередині об'єму сировини надлишкового тиску, що формується при частковому закипанні в глибині капілярів, пір, міжклітинного простору». Практичне рішення задачі засноване на використанні відповідних джерел енергії, які в змозі ініціювати гібридний процес, який забезпечить точкове пароутворення та стрибкоподібне зростання тиску. В результаті відбудеться механічний вихід потоку рідини з твердої об'єму фази. Як інноваційні джерела енергії розглядаються електромагнітні генератори мікрохвильового діапазону, які реалізують гібридний процес і пародинамічний ефект.

Інноваційна енерготехнологія видалення рідкої фази з твердої сировини.

Для вирішення задачі сформульована гіпотеза: «Застосування електромагнітних джерел енергії в процесі видалення вологи з харчової сировини, що містить тверду фазу, дозволить, окрім традиційного виходу парової фази, сформувати додатково своєрідний потік рідкої фази, рушійною силою якого є пародинамічний ефект, що виникає внаслідок локальної дисипації електромагнітної енергії в об'ємі твердої фази». Фактично, такий потік рідкої фази для харчової сировини представлятиме його сік. Розглянемо фізичну схему, що ілюструє гіпотезу (рис. 1).



а) фізична модель установки; б) модель «пародинамічного ефекту»

Рис. 1 – Схема процесу дегідратації.

Аналізований процес видалення рідкої фази, по суті, не є класичним сушінням (він не дифузійний), ні випарюванням [22]. Точніше його називати процесом дегідратації. Використання електромагнітних джерел енергії призводить до інших граничних (ГУ) умов. При ГУ 2 роду проходить дисипація електромагнітної енергії (рис.1б) теплоту. В результаті всередині капіляра 8, заповненого рідиною 7, формується паровий пляшечку 6. У глибині капіляра зростає тиск, який ініціює пародинамічний ефект – рідина викидається з відкритого торця капіляра в середу. Таким чином, на виході капіляра два потоки: пара та рідини. Вперше такий ефект заявлений у роботі авторів [23], подальший розвиток теорії бародифузії проведено у [24, 25], а доказ його існування відеозйомкою – у [26]. Встановлено інтервали формування бульбашки та часу повного осушення каналу [26].

Звісно ж, що запис нестационарної математичної моделі такого процесу дегідратації при ГУ 2 роду коректна за таких припущеннях.

1. Полярні молекули рівномірно розподілені за обсягом продукту. Тому потік електромагнітної енергії, що надходить у камеру, витрачається на підвищення внутрішньої енергії продукту і розглядається як рівномірно розподілені за обсягом внутрішні джерела енергії.
2. Усі фізичні характеристики у процесі зневоднення є безперервними функціями координат та часу.
3. Моделювання процесів у капілярах та міжклітинному просторі проводиться в циліндричних координатах.
4. Дія гравітаційних та інерційних сил в обсязі та теплообміном з навколишнім середовищем нехтується.

У такій постановці за початкових умов ($\tau = 0$): $t_1 = t_i$; $V_1 = V_i$; нестационарне поле температур для процесу нагрівання рідини записується у формі:

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_1 c_{1V} \rho_1}, \quad (1)$$

Формування бульбашки пари характеризується сталістю температури фазового переходу ($t_p = \text{const}$), а підведена енергія ($N\eta\tau$) витрачається на підвищення внутрішньої енергії:

$$N\eta = W_V t_p (c_L - c_V) = W_V r \quad (2)$$

В результаті стрибкоподібно підвищується тиск:

$$P(\tau) = Pa + \Delta P \quad (3)$$

У співвідношеннях (1 – 3): c – питома теплоємність; λ – коефіцієнт теплопровідності; a – коефіцієнт температуропровідності; N – потужність електромагнітного генератора; η – КПД магнетрона; τ – час роботи; W – витрати пари; r – питома теплота фазового переходу; L – рідина; V – пара; z, r, ϕ – координати.

Рівень зростання тиску (ΔP) визначається основним рівнянням гідравліки доповненим капілярним потенціалом каналу [13]:

$$\Delta P = \frac{\rho w^2}{2} \left[\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \zeta \right] + \rho g l + \frac{\sigma}{d} \quad (4)$$

де: l – довжина каналів, d – їх діаметр, λ – коефіцієнт тертя, ζ – сума місцевих гідравлічних тисків; σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

В результаті обсяг рідини в капілярі зменшується та його поточне значення визначається рівнянням матеріального балансу:

$$V_1(\tau) = V_H - (V_V - V_L)(\tau) \quad (5)$$

Причому зменшення обсягу може бути наслідком викиду обсягу пари (V_V) і частини рідини (V_L) із капіляру.

Сформульована гіпотеза підтверджена експериментально. Відповідно до рисунка 1 зібраний стенд, який включав вакуумну резонаторну камеру, мікрохвильовий генератор енергії (EG), холодильну установку (CM), систему вакууммування (VP), датчики температури пари ($S4$) і рідини ($S3$) (рис. 2).

Продукт встановлювався на тефлонову підставку (TP), вторинна пара конденсувалася у холодильнику-дистиляторі (C). Сік і конденсат збирались в окремі ємності, встановлені на вагах ТВЕ-0,21-0,01. Поточні значення ваги (датчики $S1$ і $S2$) і температур поступали на систему збору інформації (MCC), зібрану на базі планшета CHUWI CW1506. Електрична енергія, що споживається, вимірювалася за допомогою портативного електронного лічильника, а виміри температури продукту – пірометром Benetech GM320, вимірювання тиску за допомогою зразкових вакуумметрів ВО ГОСТ 6521-60. Періодично проводилися вимірювання концентрації соку і гідролату електронним рефрактометром НІ 96801. Досліди проводилися з високовологою сировиною – бананами і кавуном. Діапазон зміни тиску в камері 10...110 кПа, температур – 40...96°C.

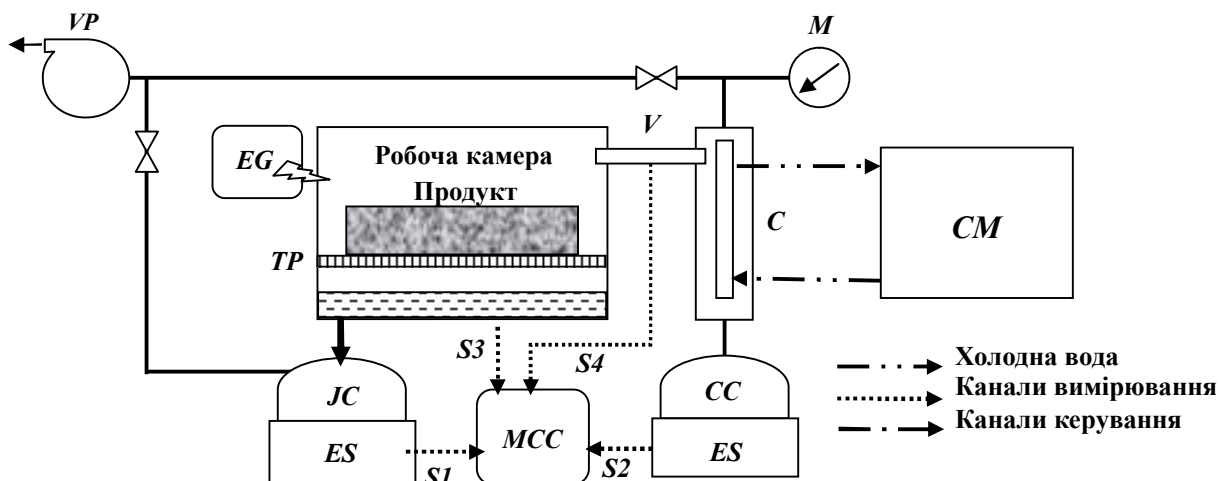


Рис. 2 – Схема експериментального стану.

Внаслідок пародинамічного ефекту сік стікав на дно камери, звідки відводився в ємність завдяки різниці тисків у камері з продуктом та в ємності для збирання соку (рис. 3).

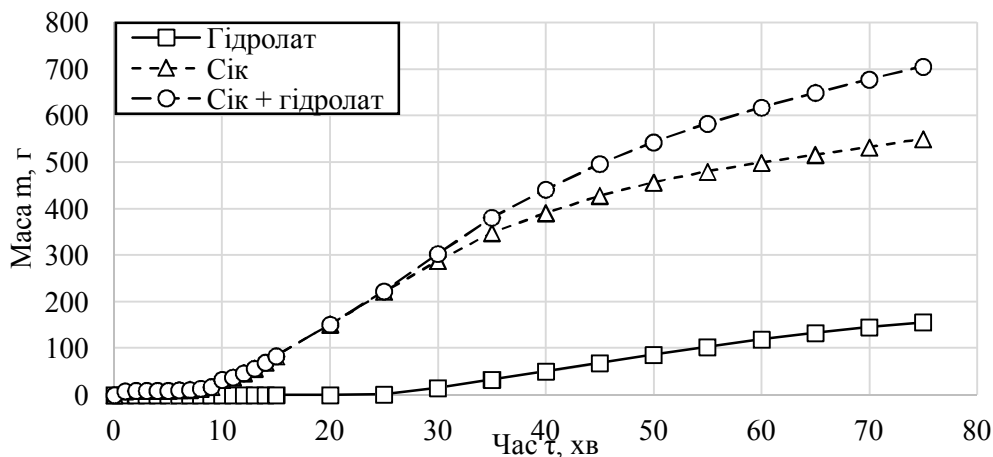


Рис. 3 – Кінетика зневоднення сировини із твердою фазою.

Досліди проводилися при атмосферному тиску в камері, температури змінювалися від початкової до 96°C (рис. 4). Порівняння результатів дослідів показує, що сік почав виходити з твердої фази на 8 хвилині (рис. 3), а температура поверхні в цей час дорівнювала 50°C (рис. 4). Це свідчить, що температура пароутворення досягалася в глибині твердої фази раніше, ніж на поверхні.

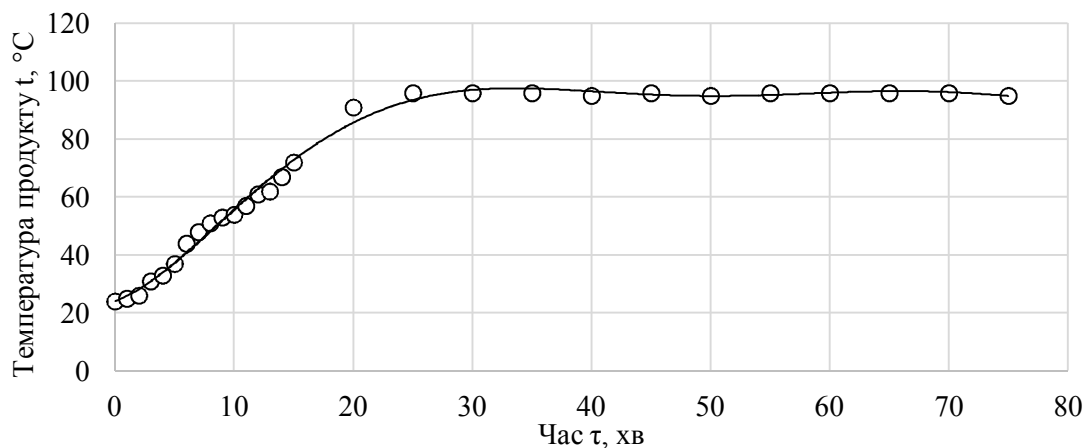


Рис. 4 – Термограма процесу зневоднення.

Результати досліджень, проведених на кавуні (рис. 3) підтверджують сформульовану гіпотезу. За час експерименту вихід соку виявився в 4,3 рази вищим, ніж пара (гідролату). Це свідчить про суттєве зниження енергетичних витрат у запропонованому методі зневоднення.

Таким чином, робота апарату в режимі пародинамічного ефекту має такі переваги: у 4 рази зменшуються витрати енергії на процес дегідратації та зберігається структура сировини.

Самостійний інтерес мають завдання використання пародинамічного ефекту, процесу фільтраційної дегідратації під час переробки відходів харчових виробництв.

Інноваційні енерготехнології екстрагування та дегідратації при переробці відходів харчових виробництв. Як об'єкти досліджень обрані олійні відходи харчоконцентратних і масложирових виробництв. Це оболонки зерен кави та кавовий шлам, макуха після виробництва олії амаранту, що відпрацювали реагенти (перліт, глина) у виробництві олії соняшника. Схема переробки таких відходів з урахуванням розробок лабораторії однакова (рис. 5).

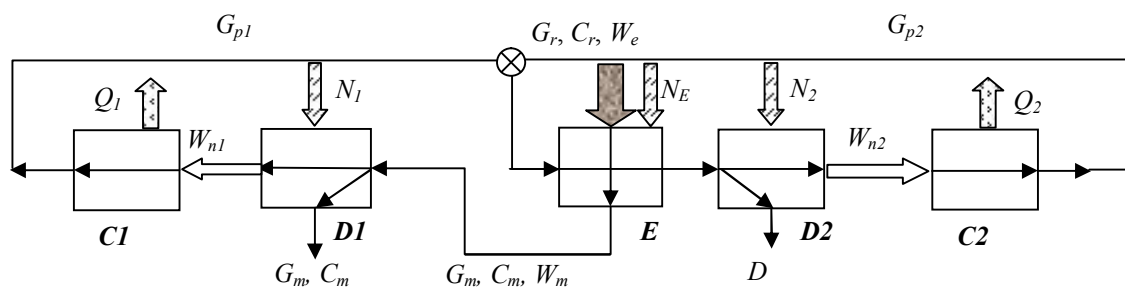


Рис. 5 – Схема матеріальних та енергетичних потоків.

Завдання технологічної лінії витягти олію з відходів виробництва. Із олієвмісної сировини, витрати якої G_r , в екстракторі E розчинником витягується олія. Знежирений шлам (шрот) надходить у мікрохвильовий дегідратор ($D1$), де з нього видаляються пари екстрагенту. У дистиляторі $C1$ екстрагент конденсується та повертається в екстрактор E потоком G_{p1} . Аналогічно з екстракту у дегідраторі ($D2$) видаляється пара екстрагенту і конденсується у $C2$. Розчин екстрагенту (G_{p2}) подається до екстрактора E . Характеристика потоків наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика матеріальних та енергетичних потоків

№	СимХОли	Потік	
		Матеріальний	Енергетичний
1	G_r	Зневоднені олієвмісні відходи.	Підводиться енергія N_E , необхідна для екстрагування.
2	D	Готовий продукт – олія, що вилучається з екстракту.	Підводиться енергія N_2 , необхідна для видалення розчинника.
3	G_m, C_m, W_m	Знежирений шлам, що містить сухі речовини (C_m) та екстрагент (W_m)	
4	G_m, C_m	Готовий продукт – сухий знежирений шлам.	Підводиться енергія N_1 , необхідна для видалення розчинника.
5	W_{n1}	Потік пари екстрагенту із дегідратору $D1$.	Відводиться енергія Q_1 , необхідна для конденсації парів у $C1$.
6	W_{n2}	Потік пари екстрагенту із дегідратору $D2$.	Відводиться енергія Q_2 , необхідна для конденсації парів у $C2$.
7	G_{p1}, G_{p2}	Потоки розчину екстрагенту.	

Перелік вихідних зразків та результати експериментів наведено в табл. 2. У досліді як екстрагент використовувався етанол, зберігалися однаковими режимні параметри: потужність магнетрону – 425 Вт, гідромодуль – 1:9, початкова маса продукту – 0,1 кг, температура процесу екстрагування – 70-75°C та робочий тиск – 0,1 МПа.

Характеристика об'єктів досліджень

Тип продукту	Концентрація олії X, %	Маса олії m, г
Лушпиння кавових зерен	0,8	5,2
Шрот із зерен амаранту	1,14	9,7
Перліт виморожений	1,35	10,3
Перліт не виморожений	1,8	12,4
Глина з екзотичними маслами	1,42	11,6
Глина із соняшниковою олією	2,7	22,2

Результати експериментів показали, що зі збільшенням рівня потужності МХ енергії, що підводиться, як наслідок, зростає температура продукту, що сприяє інтенсифікації процесу екстрагування. Концентрації отриманих екстрактів (табл. 2) свідчать про значний вміст олії у відходах, що підтверджує доцільність вибору вищезгаданих зразків.

Результати аналізу свідчать, що представлені в роботі інноваційні технології переробки відходів харчових виробництв забезпечують екологічну безпеку кінцевого продукту та його відповідність нормам якості.

Висновок. Важливим результатом роботи є доказ ефективності використання електромагнітних джерел енергії для інтенсифікації процесу екстрагування при утилізації відходів харчових виробництв. Задовільні результати отримані як при екстрагуванні цільових компонентів з відходів харчоконцентратного виробництва (кавового лушпиння, шламу), при утилізації макухи амаранту, так і при регенерації перліту та глини в технологіях соняшникової олії.

Розроблена інноваційна техніка екстрагування та дегідратації має широкі міжгалузеві перспективи.

References

- Goodman, E.M., Redmond, J., Elia, D., Harris, S.R., Augustine, M.B., & Hand, R.K. (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
- Gryshova, I., Nikoliuk, O., & Shestakovska, T. (2017). The Organic Production In The Context Of Improving The Ecological Safety Of Production Of The Food Industry. *Journal Of Food Science And Technology-Ukraine*, 11(4), 103-112. doi: 10.15673/fst.v11i4736
- Bazhenov, A.A., Mizikovskiy, I.E., Garina, E.P., Kuznetsov, V.P., & Gavrilov, A.I. (2018). Normal Flow of Resources as a Basis for Improving the Quality of Final Financial Information. *Conference on Future of the Global Financial System - Downfall or Harmony*, April 13-14 2018, 57, 309-315. doi: 10.1007/978-3-030-00102-5_32
- Trojahn, S. (2018). Logistics Strategies For Resource Supply Chains. *Transport And Telecommunication Journal*, 19(3), 244-252. doi: 10.2478/ttj-2018-0021
- Landgrebe, D., Kräusel, V., Bergmann, M., Werner, M., & Rautenstrauch, A. (2017). Conserving Resources in Production – Breaking New Ground. *Procedia Manufacturing*, 8, 619-626. doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.079
- Irmak, S. (2017). Biomass as Raw Material for Production of High-Value Products. *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy*, 201-225. doi:10.5772/65507
- 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
- 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
- Elik, A., Yanik, D.K., Mascan, M., & Göğüş, F. (2016). Influence of three Different Concentration Techniques on Evaporation Rate, Color and Phenolics Content of Blueberry Juice. *J Food Sci Technol*, 53(5), 2389-2395. doi: 10.1007/s13197-016-2213-0
- 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*, 1-9. doi: 10.1111/jfpe.12535
- Bozkir H., & Baysal T. (2018). Concentration of Orange Juice by Vacuum Microwave Evaporator. *3rd International Congress on Food Technology*; October 10-12, 2018 Nevşehir/Turkey. 426.
- Dinçer, C., Çam, I.B., Torun, M., Gulmez, 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

13. Alvi, T., Khan, M.K.I., Maan, A.A., Nazir, A., Ahmad, M.H., Khan, M.I., & Qureshi, S. (2019). Modelling and Kinetic Study of Novel and Sustainable Microwave-Assisted Dehydration of Sugarcane Juice. *Processes*, 10(7), 712. doi: 10.3390/pr7100712
14. Asghar, M. T., Yusof, Y. A., Noriznan Mokhtar, M., Yaacob, M. E., Ghazali, H. M., Varith, J., Chang, S.L., & Manaf, Y. N. (2020). Processing of Coconut Sap into Sugar Syrup using Rotary Evaporation, Microwave and Open-Heat Evaporation Techniques. *J Sci Food Agric*, 4012-4019. doi: 10.1002/jsfa.10446
15. Lohrasbi-Nejab, S., Shahedi, M., & Fathi, M. (2021). Comparative Study of Microwave-vacuum, Microwave and Convectional Evaporation Methods on Physicochemical Properties of Barberry Juice. *J Agr Sci Tech*, 23(2), 307-317.
16. Naderi, B., Maghsoudlou, Y., Aminifar, M., & Ghorbani, M. (2015). Investigation on the Changes in Color Parameters and Turbidity of Cornelian Cherry (*Cornus mass L*) Produced by Microwave and Convectional Heating. *Nutrition and Food Sciences Research*, 4(2), 39-46.
17. Yousefi, S., Emam-Djomeh, Z., Mousavi, A. & Askari, G.R. (2011). Comparing the Effects of Microwave and Conventional Heating Methods on the Evaporation Rate and Quality Attributes of Pomegranate (*Punica granatum L.*) Juice Concentrate. *Food Bioprocess Technol*, 5, 1328-1339. doi: 10.1007/s11947-011-0603-x
18. Fazaeli, M., Hojjatpanah, G., & Emam-Djomeh, Z. (2011). Effects of Heating Method and Conditions on the Evaporation Rate and Quality Attributes of Black Mulberry (*Morus nigra*) Juice Concentrate. *J Food Sci Technol*, 50(1), 35-43. doi: 10.1007/s13197-011-0246-y
19. 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
20. Taşkin, O., & Izli N. (2019). Effect of Microwave, Infrared and Freeze Drying Methods on Drying Kinetics, Effective Moisture Diffusivity and Color Properties of Turmeric. *Journal of Agricultural Sciences*, 25, 334-345. doi: 10.15832/ankutbd.439434
21. Ozturk, S., Şakıyan, O., & Alifaki, Y.O. (2016). Electric Properties and Microwave and Infrared-microwave Combination Drying Characteristics of Banana and Kiwifruit. *J. Food Process Eng.* doi: 10.1111/jfpe.12502
22. Planovskii, A.N. & Nikolaev, P.I. (1987). *Protsessy i apparaty himicheskoi i neftehimicheskoi tehnologii*. (3rd ed.). Himiya.
23. Burdo, O.G. (2005). Nanoscale Effects in Food-production Technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 78(1), 90-96.
24. Burdo, O.G. (2013). *Pishchevye nanoeergotekhnologii*. Herson.
25. Burdo, O.G. (2010). *Evolutsiya sushyl'nyh ustanovok*. Poligraf.
26. 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

INNOVATIVE ENERGY TECHNOLOGIES OF FOODS RAW MATERIAL PROCESSING

Shcherbich M.V.¹, postgraduate student, Poyan A.S.², engineer, Sirotyuk I.V.¹, PhD, assistant

¹Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

²LLC Delta Wilmar Ukraine, Yuzhne, Ukraine

Abstract. A critical analysis of the world experience of using electromagnetic radiation for the purpose of intensification of heat and mass exchange processes during the processing of food raw materials was carried out. It has been established that the problems of extraction and dehydration are quite urgent, the solution of which will lead to the maximum possible use of energy and raw material potential. Despite the wide variety of research carried out by both domestic and foreign scientists, the obtained results do not reveal the real possibilities of microwave technologies. Lack of vacuum, high temperatures, long-term thermal load on raw materials leads to a significant deterioration of the final product quality, despite the innovativeness of the treatment process organization. To solve the problems, a hypothesis was proposed that the use of electromagnetic technologies in dehydration processes will allow to organize the removal of moisture from the capillaries of food raw materials not only in the form of a vapor phase, but also in the form of a liquid. In this case, there is an opportunity to significantly reduce energy costs for the process and obtain completely new products. The research results showed that the output of the liquid phase is 4 times higher than the output of the vapor phase. This effect was called "parodynamic". The technology of complex processing of secondary raw materials of food concentrate and oil and fat industries was proposed. In the course of experimental studies, the possibility of additional extraction of target components from oil-containing waste was proven. This principle of utilization of secondary raw materials solves a number of problems of the food industry due to a sharp reduction in product losses, recovery of reagents and reduction of the ecological burden on the envi-

ronment. Laboratory analysis of the received samples of the finished product testifies to their high quality and safety for consumption.

Key words: extraction, dehydration, microwave technologies, electrodynamic apparatuses.

Список використаної літератури

1. 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. №12. P. 2356-2369. doi: 10.1016/j.jand.2018.03.027
2. Gryshova I., Nikoliuk O., Shestakovska T. The Organic Production In The Context Of Improving The Ecological Safety Of Production Of The Food Industry. *Journal Of Food Science And Technology-Ukraine*, 2017. Vol. 11. № 4. P. 103-112. doi: 10.15673/fst.v11i4736
3. Bazhenov A.A., Mizikovskiy I.E., Garina E.P., Kuznetsov V.P., Gavrilov A.I. Normal Flow of Resources as a Basis for Improving the Quality of Final Financial Information. *Conference on Future of the Global Financial System - Downfall or Harmony*, April 13-14 2018, 57, 2018. P. 309-315. doi: 10.1007/978-3-030-00102-5_32
4. Trojahn S. Logistics Strategies For Resource Supply Chains. *Transport And Telecommunication Journal*, 2018. Vol. 19. № 3. P. 244-252. doi: 10.2478/ttj-2018-0021
5. Landgrebe D., Kräusel V., Bergmann M., Werner M., Rautenstrauch A. Conserving Resources in Production – Breaking New Ground. *Procedia Manufacturing*, 8, 2017. P. 619-626. doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.079
6. Irmak S. Biomass as Raw Material for Production of High-Value Products. *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy*, 2017. P. 201-225. doi:10.5772/65507
7. 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. № 2. P. 210-218. doi: 10.3103/S1068375518020047
8. Бурдо О.Г., Тришин Ф.А., Терзиев С.Г., Гаврилов А.В., Сиротюк И.В. Электродинамические технологии – эффективное решение проблем пищевой индустрии. *Электронная обработка материалов*, Т. 56. № 3-4. С. 74-88. doi: 10.5281/zenodo.3970438
9. Elik A., Yanik D.K., Mascan M., Göğüş F. Influence of three Different Concentration Techniques on Evaporation Rate, Color and Phenolics Content of Blueberry Juice. *J Food Sci Technol*, 2016. Vol. 53. № 5. P. 2389-2395. doi: 10.1007/s13197-016-2213-0
10. 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
11. Bozkir H., Baysal T. Concentration of Orange Juice by Vacuum Microwave Evaporator. 3rd International Congress on Food Technology; October 10-12, 2018 Nevşehir/Turkey. 2018. P. 426.
12. Dinçer C., Çam I.B., Torun M., Gulmez 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
13. Alvi T., Khan M.K.I., Maan A.A., Nazir A., Ahmad M.H., Khan M.I., Qureshi S. Modelling and Kinetic Study of Novel and Sustainable Microwave-Assisted Dehydration of Sugarcane Juice. *Processes*, 2019. Vol. 10. № 7. P. 712. doi: 10.3390/pr7100712
14. Asghar M. T., Yusof Y. A., Noriznan Mokhtar M., Yaacob M. E., Ghazali H. M., Varith J., Chang S.L., Manaf Y.N. Processing of Coconut Sap into Sugar Syrup using Rotary Evaporation, Microwave and Open-Heat Evaporation Techniques. *J Sci Food Agric*, 2020. P. 4012-4019. doi: 10.1002/jsfa.10446
15. Lohrasbi-Nejab S., Shahedi M., Fathi M. Comparative Study of Microwave-vacuum, Microwave and Convectional Evaporation Methods on Physicochemical Properties of Barberry Juice. *J Agr Sci Tech*, 2021. Vol. 23. № 2. P. 307-317.
16. Naderi B., Maghsoudlou Y., Aminifar M., Ghorbani M. Investigation on the Changes in Color Parameters and Turbidity of Cornelian Cherry (*Cornus mas* L.) Produced by Microwave and Convectional Heating. *Nutrition and Food Sciences Research*, 2015. Vol. 4. № 2. P. 39-46.
17. Yousefi S., Emam-Djomeh Z., Mousavi A., Askari G.R. Comparing the Effects of Microwave and Conventional Heating Methods on the Evaporation Rate and Quality Attributes of Pomegranate (*Punica granatum* L.) Juice Concentrate. *Food Bioprocess Technol*, 2011. Vol. 5. P. 1328-1339. doi: 10.1007/s11947-011-0603-x
18. Fazaeli M., Hojjatpanah G., Emam-Djomeh Z. Effects of Heating Method and Conditions on the Evaporation Rate and Quality Attributes of Black Mulberry (*Morus nigra*) Juice Concentrate. *J Food Sci Technol*, 2011. Vol. 50. № 1. P. 35-43. doi: 10.1007/s13197-011-0246-y
19. 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. № 2. P. 428-432. doi:10.5740/jaoacint.19-0265

20. Taşkin O., İzli N. Effect of Microwave, Infrared and Freeze Drying Methods on Drying Kinetics, Effective Moisture Diffusivity and Color Properties of Turmeric. *Journal of Agricultural Sciences*, 2019. Vol. 25. P. 334-345. doi: 10.15832/ankutbd.439434
21. Ozturk S., Şakıyan O., Alifaki Y.O. Electric Properties and Microwave and Infrared-microwave Combination Drying Characteristics of Banana and Kiwifruit. *J. Food Process Eng*, 2016. doi: 10.1111/jfpe.12502
22. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. 3-е изд. Химия. 1987. 496с.
23. Burdo, O.G. (2005). Nanoscale Effects in Food-production Technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2005. Vol. 78. № 1. P. 90-96.
24. Бурдо О.Г. Пищевые наноэнерготехнологии. Херсон, 2013. 294с.
25. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Одесса: Полиграф, 2010. 368с.
26. 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. № 1. P. 58-71. doi: 10.5281/zenodo.121725

Отримано в редакцію 27.06.2022
Прийнято до друку 29.09.2022

Received 27.06.2022
Approved 29.09.2022

ЗМІСТ

ОРГАНІЗАЦІЯ ГІБРИДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЗАДАЧАХ УДОСКОНАЛЕННЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ	
Бурдо О.Г., Терзієв С.Г., Бурдо А.К.	4
ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЛАКТОЗИ В МОЛОЧНІЙ СИРОВАТЦІ	
Іваницький Г.К., Целень Б.Я., Радченко Н.Л.	11
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗНЕВОДНЕННЯ РОЗЧИНУ D-ФРУКТОЗИ	
Михайлик В.А., Дмитренко Н. В., Корінчевська Т.В., Парняков О.С., Снежкін Ю.Ф.	17
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗІЇ ЦУКРОЗИ В ПЛОДАХ ЯБЛУКА У ВИРОБНИЦТВІ ЯБЛУЧНИХ ЦУКАТІВ	
Гузьова І.О.	23
ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ НОВИХ БЕЗВІДХОДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ЯГІДНОЇ СИРОВИНИ	
Сильнягіна Н.Б., Степанова О.Є., Переяславцева О.О.	31
ДО ПРОБЛЕМИ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ ІЗ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ	
Дячок В.В., Венгер Л.О.	37
ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТІВ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ	
Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Щенський Д.Д.	44
ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ АДСОРБЦІЙНОГО ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОГО МОДУЛЯ ВІДКРИТОГО ТИПУ НА ОСНОВІ КОМПОЗИТНОГО АДСОРБЕНТУ «СИЛКАГЕЛЬ – КРИСТАЛОГІДРАТ»	
Беляновська О.А., Сухий К.М., Сергієнко Я.О., Сухий М.П., Пустовой Г.М., Суха І.В.	51
ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВ НА КІНЕТИКУ АДСОРБЦІЇ АЛЬБУМІНУ	
Сабадаш В.В., Гумницький Я.М.	57
ВПЛИВ ВИТРАТИ ХОЛОДНОГО ТЕПЛОНОСІЯ НА ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ ДЛЯ ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТА	
Алексєєв Є.С., Кравець В.Ю.	63
ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КОМБІНОВАНИХ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ	
Петрова Ж.О., Слободянюк К.С., Самойленко К.М., Вишнівський В.М., Граков О.П.	69
ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ ЯК ІНТЕНСИФІКАТОР ПРИ ВТОРИННІЙ ОЧИСТЦІ РІПАКОВОЇ ОЛІЇ	
Осадчук П. І.	78
ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ВОЛОГИ В МІКРОХВИЛЬОВИХ СТРИЧКОВИХ СУШИЛЬНИХ АПАРАТАХ	
Яровий І.І., Алі В.П.	84
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРЧОВИХ СИСТЕМ В ІЧ ПОЛІ	
Кравченко О.Ю., Молчанов М.Ю., Мілінчук К.С., Терзієв С.Г., Петровський В.В.	91
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ ДЕРЕВИНИ ДУБА В АПАРАТАХ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ТИПУ	
Акімов О.В., Мординський В.П.	100
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ КУКУРУДЗЯНОГО КРОХМАЛЮ	
Шулькін І.С., Сухий К.М., Третяков А.О., Черваков Д.О., Беляновська О.А.	106
ПРОЦЕСИ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ МАКУХИ АМАРАНТУ	
Ружицька Н.В., Сиротюк І.В., Акімов О.В., Молчанов М.Ю.	112
УТВОРЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ФРЕОНІВ ПРИ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОМУ ОТРИМАННІ ЦИРКОНІЮ, ГАФНІЮ, ТОРІЮ ТА УРАНУ	
Нефедов В.Г., Мухачев А.П., Сухий К.М., Беляновська О.А., Сухий М.К.	119
МОБІЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ ВОДОРОЗЧИННИХ ПОЛІМЕРІВ	
Демченко В.Г., Коник А.В., Хоменко М.В.	125
ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ	
Щербич М.В., Полян О.С., Сиротюк І.В.	133

CONTENTS

ORGANIZATION OF HYBRID PROCESSES IN THE TASKS OF FOOD TECHNOLOGIES IMPROVEMENT	
Burdo O.G., Terziev S.G., Burdo A.C.	4
USE OF HYDRODYNAMIC CAVITATION TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE LACTOSE CRYSTALLIZATION PROCESS IN MILKY WHEY	
Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya, Radchenko N.L.	11
STUDY OF THE HEAT OF DEHYDRATION OF D-FRUCTOSE SOLUTION	
Mykhailyk V., Dmytrenko N., Korinchevska T., Parniakov O., Ph.D., Snezhkin Yu.	17
STUDY OF SUCROSE DIFFUSION IN APPLE FRUITS IN THE PRODUCTION OF CANDIED APPLES	
Huzova I.	23
MAIN PRINCIPLES OF NEW WASTE-FREE TECHNOLOGIES FOR PROCESSING BERRY RAW	
Silnyagina N.B., Stepanova O.E., Pereiaslavytseva O.O.	31
TO THE PROBLEM OF CALCULATING THE EXTRACTION PROCESS FROM VEGETABLE RAW MATERIALS	
Dyachok V., Venher L.	37
USING OF HYDRODYNAMIC CAVITATION EFFECTS IN THE FOOD INDUSTRY	
Avdieieva L. Yu. Makarenko A. A. Shchenskyi D.D.	44
EXERGY ANALYSIS OF AN OPEN-MODE ADSORPTIVE HEAT STORAGE UNIT BASED ON COMPOSITE ADSORBENT ‘SILICA GEL – CRYSTALLINE HYDRATE’	
Belyanovskaya E.A., Sukhyy K.M., Serhiienko Ya.O, Sukhyy M.P, Pustovoy G.M., Sukha I.V.	51
THE EFFECT OF HYDRODYNAMIC CONDITIONS ON THE KINETICS OF ALBUMIN ADSORPTION	
Sabadash V.V., Gumnitsky J.M.	57
FLOW RATE OF COLD HEAT CARRIER INFLUENCE ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF PULSATING HEAT PIPE FOR HEAT EXCHANGER	
Alekseik Ye.S., Kravets V.Yu.	63
RESEARCH OF THE KINETICS OF THE DRYING PROCESS OF COMBINED PLANT MATERIALS	
Petrova Z.O., Slobodianiuk K.S., Samoilenko K.M., Vishnevsky V .M., Grakov O.P.	69
ELECTROMAGNETIC FIELD AS AN INTENSIFIER IN THE SECONDARY PURIFICATION OF RAPESEED OIL	
Osadchuk P. I.	78
PHYSICAL MODELING OF THE PROCESS OF DEHYDRATION OF PLANT RAW MATERIALS IN BELT MICROWAVE DRYERS	
Yarovyi I.I., Ali V.P.	84
RESEARCH OF RHEOLOGICAL DRYING PROCESSES OF FOOD SYSTEMS IN THE FIELD OF IC	
Kravchenko O.Yu., Molchanov M.Yu., Milinchuk K.S., Terziev S.G., Petrovsky V.V.	91
RESEARCH OF EXTRACTION PROCESS OF OAK WOOD IN ELECTRODYNAMIC APPARATUS-ES	
Akimov O.V., Mordynskiy V.P.	100
STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF BIOCOMPOSITES BASED ON CORN STARCH	
Shunkin I.S., Sukhyy K.M., Tretyakoff A.O., Chervakov D.O., Belyanovskaya E.A.	106
PROCESSES OF COMPLEX PROCESSING OF AMARANTH CAKE	
Ruzhitska N.V., Sirotiyuk I.V., Akimov O.V., Molchanov M.Yu.	112
ENERGY EFFICIENT METHOD OF OBTAINING ZIRCONIUM, HAFNIUM, THORIUM AND URANIUM	
Nefedov V.G., Mukhachev A.P., Sukhyy K.M., Belyanovskaya E.A.	119
MOBILE TECHNOLOGY COMPLEX FOR THE PREPARATION OF WATER-SOLUBLE POLYMERS	
Demchenko V.G., Konyk A.V., Khomenko M.	125
INNOVATIVE ENERGY TECHNOLOGIES OF FOODS RAW MATERIAL PROCESSING	
Shcherbich M.V., Poyan A.S., Sirotiyuk I.V.	133