



International Science Group
ISG-KONF.COM



ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ПРОДУКТІВ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

ISBN 979-8-90214-589-9

DOI 10.46299/979-8-90214-589-9

Косів Руслана

**ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ
ПРОДУКТІВ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ**

Monograph

2026

UDC: 664

Authors:

Косів Руслана Богданівна – к.т.н., доцент кафедри технології органічних продуктів Національного університету «Львівська політехніка»

Косів Р. Інноваційні технології обробки продуктів у харчовій промисловості. Monograph. – Primedia eLaunch, Boston, USA, 2026. – 106 p.

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

ISBN – 979-8-90214-589-9

DOI – 10.46299/979-8-90214-589-9

All rights reserved. Printed in the United States of America. No part of this publication may be reproduced, distributed, or transmitted, in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. The content and reliability of the articles are the responsibility of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required.

UDC: 664

ISBN – 979-8-90214-589-9

© Косів Р., 2026

Анотація

У монографії розглянуто сучасні методи обробки продуктів харчових виробництв. Обґрунтовано теоретичні засади, розроблено науково-методичні та практичні рекомендації щодо теоретичних і практичних аспектів їх застосування в харчових технологіях, виявлено їхні переваги та недоліки. Монографія дає відповіді на запитання про можливості заощадження енергії, підвищення рівня ефективності технологічних процесів, забезпечення якості та безпеки продуктів, подовження терміну їх зберігання, збереження у продуктах біоактивних сполук, зменшення впливу на довкілля.

Переваги, недоліки, ефективність та умови застосування розглянутих методів обробки є основою для визначення доцільності їх застосування в контексті сталого розвитку і циркулярної економіки.

Монографію рекомендовано для здобувачів вищої освіти, викладачів, наукових працівників, фахівців і практиків.

Зміст

Вступ	5
Розділ 1. Перспективні технології видобування і розділення компонентів	7
1.1. Інноваційні технології екстрагування	7
1.2. Мембранні технології	16
Розділ 2. Сучасні технології термічної обробки	30
2.1. Сучасні методи пастеризації та стерилізації	30
2.2. Електрофізичні методи обробки	36
Розділ 3. Перспективні технології нетермічної обробки	46
3.1. Обробка високим тиском	46
3.2. Опромінення	49
3.3. Обробка озоном	55
3.4. Обробка ультразвуком	59
3.5. Обробка ультрафіолетовим випромінюванням	65
Розділ 4. Сучасні холодильні технології обробки	71
4.1. Інноваційні методи охолодження	72
4.2. Інноваційні методи заморожування	78
4.3. Концентрування рідин виморожуванням. Сублімаційне сушіння	86
Висновки	92
Список літератури	98

Вступ

У харчовій промисловості технологія обробки продуктів (сировини, напівпродуктів, готової продукції) охоплює різні методи, які забезпечують якість, безпеку і тривалість зберігання харчових продуктів. Застосування цих методів дає змогу покращити органолептичні властивості продуктів, зберегти поживні речовини та запобігти розвитку патогенів і мікроорганізмів, які спричиняють псування.

Водночас технологія обробки є дуже складною, оскільки будь-який фізичний, хімічний чи фізико-хімічний вплив може призводити до зміни хімічного складу продукту – розкладу корисних компонентів чи утворення речовин, що негативно впливають на здоров'я людини.

Термічна обробка є основною технологією, яку протягом тривалого часу використовують у харчовій промисловості для забезпечення мікробіологічної безпеки продукції та інгібування ферментативних процесів. Проте під час термічної обробки за високої температури та значної тривалості процесу відбувається деградація біоактивних компонентів і погіршення якості продукту, зокрема зміна кольору, утворення сторонніх запахів або присмаків, зміна текстури. Тому доцільно застосувати такі методи й режими термічної обробки, які не лише забезпечують мікробіологічну стабільність та безпеку для споживача, але й дають змогу максимально зберегти якість продукту.

Харчові виробництва споживають велику кількість енергії, використовуючи як її джерело викопне паливо, що пов'язано з викидами парникових газів і впливом на глобальне потепління. Високі витрати енергії головно пов'язані з процесами стерилізації, пастеризації, сушіння, охолодження, заморожування тощо, які використовують для збільшення терміну зберігання продуктів. Інші впливи на довкілля охоплюють втрати під час переробки, неефективне використання сировини, значне споживання води, використання хімічних речовин, неналежну утилізацію відходів і стічних вод. З огляду на це, застосування в різних сегментах харчової промисловості сталих процесів для

очищення відходів та стічних вод, рекуперації компонентів з високою доданою вартістю та води для повторного використання, а також альтернатив процесам з високим споживанням енергії є актуальним і має практичне значення.

Аналіз глобального ринку харчових продуктів показує, що останнім часом споживачі дедалі більше обирають продукти здорового харчування, натуральні, свіжі, безпечні й органічні, вироблені сталими методами та екологічно чистим способом з малим вуглецевим слідом. Інноваційні технології видобування та розділення компонентів, електрофізичної, нетермічної та холодильної обробки продуктів пропонують чудові перспективи для застосування в харчових виробництвах, зокрема в контексті сталого розвитку і циркулярної економіки.

Ця монографія може бути корисною для здобувачів вищої освіти, викладачів, наукових працівників, фахівців і практиків, пропонуючи глибоке розуміння теоретичних і практичних аспектів застосування в харчовій промисловості інноваційних технологій обробки для забезпечення якості та безпеки харчових продуктів, подовження терміну їх зберігання, збереження в продуктах біоактивних сполук.

Розділ 1. Перспективні технології видобування та розділення компонентів

1.1. Інноваційні технології екстрагування

Екстракція полягає у вибіркового видобуванні одного або декількох компонентів з розчину або твердого матеріалу за допомогою розчинника (екстрагента), в якому добре розчиняються лише цільові компоненти і далеко гірше або практично зовсім не розчинюються інші. Екстракція відіграє важливу роль у сучасних харчових технологіях для ефективного виділення олій, біологічно активних речовин, антиоксидантів, ароматичних та інших цінних компонентів із продуктів і відходів харчових виробництв [1, 2]. Процес екстрагування зазвичай відбувається за нормальної температури (близько 20 °C), інколи для збільшення швидкості процесу температуру дещо підвищують, що суттєво не позначається на якості отриманого продукту.

У харчовій промисловості здебільшого застосовують екстракцію в системі твердий матеріал - рідина, рідше – в системі рідина - рідина. Основними чинниками, що впливають на ефективність і швидкість процесу екстрагування компонентів із продукту, є вид екстрагента, ступінь подрібнення продукту, температура, тиск, гідродинамічний режим, співвідношення екстрагента й продукту, диференціал концентрації, коефіцієнт дифузії, тривалість [2].

Як екстрагенти зазвичай застосовують воду, спирт, водно-спиртові суміші, різноманітні органічні розчинники (табл. 1).

Найважливішим критерієм під час вибору екстрагента є селективність – видобування за допомогою розчинника із продукту тільки одного або кількох цінних компонентів без сторонніх домішок. Крім цього, екстрагент повинен бути хімічно інертним до екстрагованих речовин. Він має легко відокремлюватися від екстракту за допомогою випаровування, не залишаючи шкідливих для організму людини речовин і не змінюючи органолептичних властивостей продукту. Не менш важливими є доступність і вартість екстрагента, а також низька токсичність і низька вогнебезпечність [3].

Таблиця 1.

Застосування екстрагентів у харчовій промисловості [1]

Екстрагент	Продукти
<i>Екстрагенти, які використовують відповідно до належної виробничої практики</i>	
Вода	Цукор, розчинна кава і чай
Етанол	Екстракти хмелю, фарбувальні речовини для маркування яєць і м'яса
Діоксид вуглецю	Екстракти хмелю та спецій, яєчні продукти, какао-порошок, харчові барвники, ефірні олії, горіхові олії
Етилацетат	Декофеїнізована кава і чай, екстракти спецій, харчові барвники
Бутан	Соева олія, ефірні олії
Ацетон	Екстракти спецій, фарбувальні речовини для маркування яєць і м'яса
<i>Екстрагенти, які використовують за певних умов, для них визначено максимальний залишковий вміст у продукті</i>	
Бутан-1-ол (н-бутанол)	Екстракти трав і спецій
Циклогексан	Олії з насіння, бобів, горіхів
Дихлорметан	Декофеїнізована кава і чай
Етилметилкетон	Фракціоновані жири та олії, декофеїнізована кава і чай
Гексан	Жири й олії, також фракціоновані, знежирені білкові продукти і борошно з круп
Метанол	Екстракти прянощів, фарбувальні речовини для маркування яєць і м'яса, екстракти хмелю та стевіолових глікозидів
Метилацетат	Декофеїнізована кава і чай
Пропан-2-ол (ізопропанол)	Нестандартизовані ароматизатори, екстракти прянощів

Екстракцію водою (вилуговування), що має очевидні переваги завдяки низькій вартості та повній безпеці, широко використовують для отримання цукру, кави і чаю. Олії та жири екстрагують органічними розчинниками, для яких у різних країнах діють вимоги, визначені законодавчими стандартами, щодо ступеня чистоти і допустимого залишкового вмісту в харчових продуктах.

Температура також відіграє важливу роль, оскільки з її підвищенням збільшується розчинність речовин і посилюється дифузія, проте водночас можуть відбуватися втрати леткого розчинника і розклад термочутливих сполук з утворенням домішок.

Процеси екстрагування проводять, застосовуючи різні способи: занурення матеріалу, ступінчасте зрошення екстрагентом або їх комбінування; статичні, динамічні або змішані; періодичні або безперервні.

У деяких харчових виробництвах екстракція є основним технологічним процесом: у цукровому виробництві видобування сахарози з бурякової стружки (екстрагент вода); екстракція олії з насіння соняшнику, бавовнику, сої тощо (бензин); у виробництві агару видобування його з морських водоростей (вода); у кон'ячному виробництві витягування дубильних, ароматичних і фарбувальних речовин з деревини дуба (спирт); одержання екстрактів прянощів з прямих рослин (зріджений діоксид вуглецю). Процес екстракції з твердих матеріалів відіграє важливу роль у виробництві вина, пива, крохмалю, желатину, лікеро-горілчаних напоїв, розчинної кави і чаю. За допомогою екстракції виділяють молочну кислоту з ферментаційних розчинів, сивушні олії із суміші компонентів, яку відбирають зі спиртової колони брагоректифікаційної установки у виробництві етилового спирту тощо.

Традиційні методи екстракції мають низку недоліків, що пов'язано з використанням органічних розчинників, надмірною витратою екстрагента, значною тривалістю процесу, негативним впливом на довкілля [2]. З огляду на це, актуальним є застосування альтернативних екстрагентів і нових методів видобування компонентів із продуктів харчових виробництв.

Зелені технології екстрагування

Високу ефективність і селективність екстрагування, коротшу тривалість процесу й менші витрати розчинників демонструють так звані зелені технології. В основу цих технологій покладено шість принципів [4]:

- 1) використання відновлюваних рослинних ресурсів (наприклад, екстракція відходів переробки фруктів та овочів);
- 2) застосування альтернативних екстрагентів (головно води або розчинників рослинного походження);

3) зменшення споживання енергії шляхом її рекуперації та використання інноваційних технологій;

4) отримання побічних продуктів;

5) скорочення кількості операцій;

6) відсутність негативного впливу на довкілля.

Зелені технології охоплюють мікрохвильову екстракцію (MAE), ультразвукову екстракцію (UAE), екстракцію імпульсним електричним полем (PEFE) та ферментативну екстракцію (EAE), характеристика яких наведена в табл. 2, а також екстракцію надкритичними рідинами (SFE).

Аналіз переваг і недоліків зелених технологій екстрагування дає змогу розглядати ці методи як перспективні, ефективні й екологічні альтернативи традиційним методам.

Екстракція надкритичними рідинами

До зелених технологій належить екстракція надкритичними рідинами (SFE), яку використовують для вилучення речовин із твердих матеріалів та рідин за температури і тиску, вищих від критичної точки екстрагента [14, 15].

Надкритична рідина – це стан речовини, в якому зникає відмінність між рідиною і газом. На рис. 1 представлено фазову діаграму речовини. Лінія між потрійною точкою та критичною точкою (крива конденсації) відповідає стійкій рівновазі рідкої і газоподібної фази. Точки, що лежать на цій кривій, відповідають параметрам переходу з рідкого стану в газоподібний і навпаки. У критичній точці зникає відмінність між рідиною та газом і речовина переходить у надкритичний стан.

Надкритична рідина має властивості газів, як-от висока швидкість дифузії, низька в'язкість, стисливість, і властивості рідин, як-от висока густина і висока розчинна здатність [14].

Таблиця 2.

Характеристика зелених методів екстракції [2-13]

	Мікрохвильова екстракція (MAE)	Ультразвукова екстракція (UAE)	Екстракція імпульсним електричним полем (PEFE)	Ферментативна екстракція (EAE)
Принцип методу	Обробка за допомогою електромагнітних хвиль з частотою в діапазоні від 300 МГц до 300 ГГц призводить до діелектричного нагріву і розчинення речовин. Розчинник проникає в рослинний матеріал, компоненти матеріалу розщеплюються за допомогою електромагнітних хвиль, а потім у розчиненій формі переходять з нерозчинної фази в розчин.	Ультразвукові хвилі, проходячи крізь оброблюване середовище, спричиняють його стиснення і розширення, тобто викликають явище кавітації. Процес кавітації полягає в рості та стисненні крихітних бульбашок, причому за перевищення критичного діаметра бульбашки руйнуються, водночас виділяється велика кількість енергії, яка, зокрема, перетворюється на тепло.	Суспензія клітин зазнає впливу електричного поля, що призводить до розщеплення молекул у клітинній мембрані. У найслабших ділянках мембрани після досягнення трансмембранного потенціалу 1 В заряджені молекули утворюють пори, внаслідок чого збільшується проникність мембрани, виникає електропорація.	Під дією деяких ферментів (наприклад, α -амілази, целюлази, геміцелюлази, пектиностерази, пектинази, протеази) руйнуються клітинні стінки, що полегшує вивільнення цільових компонентів. Цей метод використовують, коли речовини неможливо вилучити з матеріалу за допомогою розчинника через їх утримання водневими або гідрофобними зв'язками у вуглеводно-лігніновому комплексі.
Чинники впливу на ефективність екстракції	Частоти, які здебільшого використовують для мікрохвильової екстракції, становлять 0,915 і 2,45 ГГц.	Ультразвукову обробку здебільшого здійснюють за частоти від 20 до 100 кГц і потужності від 80 до 200 Вт. Ефекту кавітації зазнають рідини та тверді матеріали, що містять у своєму складі рідину. Основними чинниками впливу є тривалість обробки, вологість, розмір частинок, вид розчинника, температура	Основні чинники впливу – кількість підведеної енергії, кількість імпульсів, напруженість поля, температура та властивості оброблюваного матеріалу. Обробка електричним полем напруженістю 500 і 1000 В/см протягом 104-102 с може порушити клітинну мембрану за незначної деградації	Основні чинники впливу – вміст вологи, розмір частинок і хімічний склад матеріалу, тип та дозування ферменту, кількість розчинника, тривалість і температура.

	Мікрохвильова екстракція (MAE)	Ультразвукова екстракція (UAE)	Екстракція імпульсним електричним полем (PEFE)	Ферментативна екстракція (EAE)
		і тиск.	термолабільних компонентів.	
Переваги методу	Поєднання градієнтів концентрації та температури сприяє прискоренню процесу і підвищенню виходу екстрагованих речовин. Інші переваги – зменшення тривалості процесу, низька витрата розчинника, низьке енергоспоживання, легке промислове масштабування, можливість проведення процесу без використання розчинника.	Завдяки кавітаційним процесам суттєво підвищується проникнення розчинника у клітини рослинного матеріалу, а руйнування їхніх стінок веде до збільшення виходу екстрагованих речовин на 20-30 %. Інші переваги – скорочення тривалості процесу (до кількох хвилин замість годин або діб), низьке споживання енергії, менша витрата розчинника, низька робоча температура, менший рівень термічного розкладу, ефективна екстракція термолабільних сполук.	Енергетична ефективність, селективність, низькі експлуатаційні витрати, легке масштабування, низьке енергоспоживання, безвідходний процес, безперервна робота, неруйнівний вплив, відсутність термічного ефекту, менша тривалість процесу.	Висока селективність, підвищення виходу екстрагованих речовин, екологічність (використання ферментів природного походження та води як екстрагента замість небезпечних розчинників).
Недоліки методу	Висока вартість обладнання, нерівномірне нагрівання або перегрів оброблюваного продукту можуть знизити ефективність екстракції та спричинити термічний розклад цінних компонентів.	Малі обсяги оброблюваного середовища, високі енерговитрати, висока вартість обробки й апаратури, недовговічність акустичних випромінювачів.	Висока вартість, залежність ефекту обробки від складу середовища (провідності), висока вартість обладнання.	Висока вартість ферментів, суворий контроль рН середовища і температури для оптимальної дії ферментів. Для підвищення виходу екстрагованих речовин ферментативну екстракцію поєднують з іншими методами, зокрема з екстракцією надкритичними рідинами.

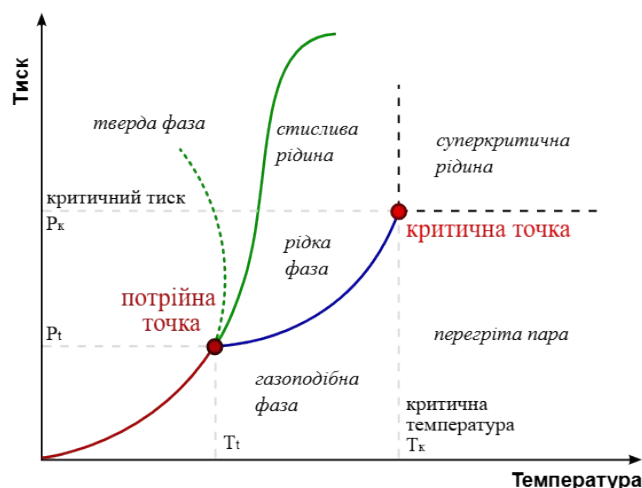


Рисунок 1. Діаграма стану речовини¹

Ці властивості обумовлюють високу інтенсивність масопереносу в середовищі надкритичної рідини. Це дає змогу надкритичній рідині легко проникати в продукт й ефективно витягувати цільові компоненти [16].

Під час вибору екстрагента враховують його розчинну здатність, хімічну стабільність, економічність, доступність, токсичність, вибухонебезпечність, займистість. У табл. 3 представлено критичні параметри низки розчинників, які застосовують у надкритичній екстракції. Екстрагенти з високими критичними температурами (аміак, н-пентан, ацетон, метанол, етанол, толуол, вода) не придатні для екстракції термочутливих природних речовин.

Дедалі більше уваги привертає надкритична вода як полярний розчинник, але у зв'язку зі складністю досягнення критичних параметрів та складністю роботи в умовах високих температур і тисків її використання непоширене [17-19]. Для досягнення критичних параметрів метану, етану та пропану потрібно менше енерговитрат, але через високу вибухонебезпечність їх застосування як екстрагентів обмежене.

Особливий інтерес становить застосування діоксиду вуглецю як екстрагента, що зумовлено його низькими критичними параметрами.

¹ Frederic, D., Yantao, W., Anitha, M., Karim, E. O., Guy, M., Christophe, L. (2018). Hydrolysis of Hemicellulose and Derivatives – A Review of Recent Advances in the Production of Furfural. Frontiers in Chemistry. V. 6. DOI:10.3389/fchem.2018.00146

Таблиця 3.

Критичні параметри розчинників, застосовуваних у надкритичній екстракції

[14, 15]

Розчинник	Критична температура, °C	Критичний тиск, МПа	Критична густина, кг/дм ³
Метан	-82,6	4,5	0,162
Етилен	9,3	5,0	0,215
Вуглекислий газ	31,1	7,4	0,469
Етан	32,3	4,9	0,203
Пропілен	91,9	4,5	0,232
Пропан	96,8	4,3	0,217
Аміак	132,3	11,3	0,240
н-Пентан	196,5	3,4	0,240
Ацетон	232,8	4,6	0,278
Метанол	239,6	8,1	0,272
Етанол	240,9	6,1	0,276
Толуол	318,7	4,1	0,290
Вода	374,1	22,1	0,322

Діоксид вуглецю переходить у стан надкритичної рідини за тиску більш ніж 7,4 МПа та температури вище 31,1 °C [3, 14, 15]. Надкритичний вуглекислий газ забезпечує стабільні робочі умови за тиску від 10 до 45 МПа.

Діоксид вуглецю відрізняється низькою вартістю, він нетоксичний, негорючий та екологічно безпечний. Надкритичний вуглекислий газ дає змогу проводити екстракцію за нормальної температури (від 18 до 22 °C) та повністю видаляється з оброблюваного середовища під час зниження тиску в апараті до атмосферного [16]. Завдяки своїм властивостям діоксид вуглецю дає змогу отримати цільовий продукт без втрат, спричинених руйнуванням.

Надкритичний діоксид вуглецю – неполярний розчинник, що ускладнює процес вилучення полярних компонентів. Для підвищення вилучення та

поліпшення розчинної здатності в потік екстрагента в малих кількостях додають хімічний модифікатор: етанол, воду, метанол або ацетон [3].

Фізико-хімічні властивості вуглекислого газу залежать від температури й тиску процесу надкритичної екстракції. Варіювання параметрів дає змогу досягти високої селективності [15, 16].

Переваги використання надкритичного діоксиду вуглецю охоплюють підвищення селективності, покращення масообміну, збільшення виходу екстрагованих речовин, можливість повторного використання екстрагента, збільшення швидкості процесу, відсутність потреби у фільтрації обробленого матеріалу, відсутність використання токсичних розчинників, можливість вилучення термолабільних сполук за низької температури [3, 14-16].

Надкритичний діоксид вуглецю знаходить все ширше застосування для видалення кофеїну з кави і чаю; отримання екстрактів хмелю; екстрагування та концентрування ароматичних сполук із фруктів і спецій, олій з цитрусових, горіхів і насіння; отримання високоякісних ефірних олій; видалення холестерину з молочних продуктів, з сухого яєчного білка та яйцепродуктів; екстрагування бета-каротину з паприки [14, 15].

Основною перевагою застосування надкритичної екстракції є вилучення біологічно активних речовин з рослинної сировини і побічних продуктів виробництва й отримання продуктів з високою доданою вартістю. Так, за допомогою надкритичних рідин за низьких температур екстрагують чутливі до нагрівання природні й синтетичні сполуки (вітаміни, білки, ферменти тощо), натомість їх очищення традиційними методами призводить до часткового або повного термічного розкладу. Надкритичною екстракцією здійснюють також дезодорацію деяких продуктів, зокрема сироватки й харчових олій. Надкритичними рідинами на практиці успішно екстрагують олійні культури, які під час концентрування або розділення традиційною вакуумною дистиляцією за високих температур зазнають термічного розкладу. Іншим застосуванням цього методу є видалення жирів з харчових продуктів, наприклад, з картопляних чипсів. Надкритичними рідинами вилучають цільові речовини з розбавлених

водних розчинів після їх отримання ферментацією, приміром, етанол за допомогою надкритичного вуглекислого газу [15].

Екстракція надкритичними рідинами має менше недоліків порівняно з традиційними методами, і вони переважно пов'язані з більшими інвестиційними витратами на обладнання.

1.2. Мембранні технології

Суть методів мембранного розділення

Останніми роками мембранна технологія стала одним із найширше використовуваних нетермічних процесів у харчовій промисловості. Її суть полягає в перетворенні потоку рідинної або газової суміші на два потоки, збагачені різними компонентами суміші через проникнення одного / декількох з них крізь напівпроникну мембрану. Цей метод вигідно відрізняється низькими енергетичними витратами й відсутністю поглинання компонентів. Широке впровадження мембранних процесів у практику харчових виробництв стало можливим завдяки розвитку науки про полімери й використанню синтетичних полімерних мембран.

Рушійною силою процесу проникнення рідини крізь перешкоду у вигляді тонкої перегородки можуть бути тиск, різниця концентрацій розчинених речовин по обидва боки мембрани, різниця температур або електрорушійна сила. Найширше розповсюдження мають баромембранні процеси розділення, в яких рушійною силою є гідростатичний тиск. До таких процесів належать мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація та зворотний осмос. У цьому ряді процесів розмір пор мембран зменшується, а робочий тиск зростає (табл. 4).

Принцип мембранного розділення компонентів представлено на рис. 2.

Баромембранні процеси класифікують за розмірами відокремлюваних частинок розчинених речовин і за структурою використовуваних напівпроникних мембран. Мембрани різного типу затримують розчинені речовини в межах певного діапазону молекулярної маси (табл. 4).

Таблиця 4.

Характеристика мембранних процесів [1, 20]

Процес	Молекулярна маса речовин, кДа	Розмір частинок, мкм	Робочий тиск, МПа	Середня проникність, $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{МПа})$	Матеріал мембран	Конфігурація мембран
Мікрофільтрація (MF)	100-500	0,1-10	0,1-0,3	50	Поліпропілен, ПВДФ (фторопласт), лавсан, кераміка	Рулонні, порожнисті волокна, трубчасті
Ультрафільтрація (UF)	20-150	0,001-1	0,2-0,5	15	Поліпропілен, акрилонітрил, ПВДФ, полісульфон, кераміка	Рулонні, порожнисті волокна, трубчасті
Нанофільтрація (NF)	2-20	0,001-0,01	0,5-1,5	1-2	Ацетат целюлози, ароматичні поліаміди (полісульфоамід), кераміка	Рулонні, порожнисті волокна, трубчасті
Зворотний осмос (RO, UO)	0,2-2	0,0001-0,001	1,5-7,5	0,5-1	Ацетат целюлози, ароматичні поліаміди	Рулонні, порожнисті волокна, плоскі

Основними параметрами процесу є якість і склад одержуваних фракцій, а також продуктивність за основним продуктом. Ці параметри залежать від питомого навантаження за вихідною сумішшю, температури суміші, величини рушійної сили, опору осаду й опору фільтрувальної мембрани.

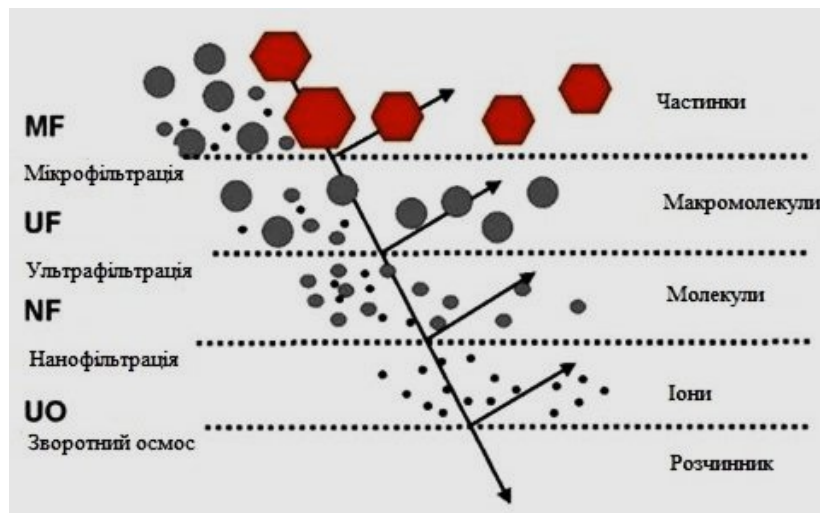


Рисунок 2. Принцип мембранного розділення компонентів²

Зворотний осмос (RO, UO). Осмос – це переміщення розчинника крізь напівпроникну мембрану з області низької концентрації розчиненої речовини до області високої її концентрації. Тиск, що встановлюється під час досягнення рівноваги, дорівнює осмотичному тиску. Зворотний напрямок руху розчинника створюють застосуванням гідростатичного тиску, що перевищує осмотичний (звідси й термін «зворотний осмос»).

Мембрани зворотного осмосу, по суті, непористі. Розміри молекул і йонів розчинених у воді речовин, розчинника і розміри пор мембран мають приблизно однаковий порядок – $(1-5) \cdot 10^{-3}$ мкм [21]. Механізм розділення ґрунтується на процесах розчинення й дифузії. Молекули води розчиняються в мембранній матриці та дифундують під високим тиском. Мембрани зворотного осмосу ефективно утримують розчинені речовини, зокрема солі, цукри та низькомолекулярні органічні речовини [20, 21].

Для розчинів речовин з низькою молекулярною масою характерний високий осмотичний тиск – від 0,5 до 9 МПа і більше (табл. 5). Для подолання осмотичного тиску та перебігу процесу розділення робочий тиск у зворотно-осмотичних установках має бути дещо більшим за осмотичний – 1-10 МПа [20, 21].

² Zacharof, M.P., Lovitt, R.W. (2013). Complex Effluent Streams as a Potential Source of Volatile Fatty Acids. Waste Biomass Valor 4, 557-581. <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9202-6>

Таблиця 5.

Осмотичний тиск деяких рідин [1]

Рідина	Концентрація	Осмотичний тиск, МПа
Розчин лактози	4,7 г/100 см ³	0,38
Молочна кислота	1 г/100 см ³	0,55
Молоко	9 % сухих речовин	0,69
Сироватка	6 % сухих речовин	0,69
Розчин хлориду натрію	1 г/100 см ³	0,86
Апельсиновий сік	11 % сухих речовин	1,59
Виноградний сік	16 % сухих речовин	2,07
Яблучний сік	15 % сухих речовин	2,72
Цукровий сироп	20 % сухих речовин	3,41
Кавовий екстракт	28 % сухих речовин	3,45

Максимальний гідростатичний тиск змінюється в діапазоні від 6 до 10 МПа та визначається технічними параметрами зворотноосмотичної мембрани. Осмотичний тиск рідини враховують під час вибору мембрани, адже вона повинна витримувати відповідну різницю тисків (трансмембранний тиск).

Ступінь розділення речовин методом зворотного осмосу залежить від хімічного складу та структури мембрани, а також від тиску, температури, рН і хімічного складу рідини. Питома продуктивність (проникність) визначається швидкістю дифузії молекул крізь мембрану та трансмембранним тиском.

Мембрани зворотного осмосу затримують речовини з молекулярною масою від 100 Да за тиску 4-7 МПа до 500 Да при 2,5-4 МПа. Молекулярна структура зворотноосмотичних мембран є головним чинником, що визначає швидкість дифузії розчинених речовин. Матеріали мембран повинні мати високу водопроникність, високий рівень відштовхування розчинених речовин, довговічність. Мембрани виготовляють з матеріалів, здатних витримувати температуру до 80 °С в діапазоні рН 3-11. Швидкість потоку в типовій установці зворотного осмосу становить від 450 дм³/год за тиску 4 МПа до 1200-2400 дм³/год при 8 МПа [1].

Нанофільтрація (NF). Займає проміжне положення між зворотним осмосом та ультрафільтрацією. Процес розділення полягає в проходженні рідини крізь селективні нанофільтраційні мембрани з розміром пор нанометрового діапазону під тиском 0,2-4 МПа [21]. Розмір частинок, які затримує мембрана, становить 1-10 нм [20-23], а їхня молекулярна маса більш ніж 200-1000 Да [21, 23]. Основним матеріалом мембран є полісульфоамід, фторопласт, ацетат целюлози та ін. [20, 22].

Механізм затримки частинок являє собою комбінацію процесів розділення за розміром і електростатичної взаємодії (поверхневий заряд мембрани відіграє певну роль у відштовхуванні йонів) [20].

Методом нанофільтрації ефективно видаляють з рідин солі двовалентних металів і невеликі органічні молекули, водночас одновалентні йони (наприклад, Na^+ , Cl^-) частково проникають крізь мембрану [20-22].

Ультрафільтрація (UF). Ультрафільтрація займає проміжне положення між мікро- й нанофільтрацією. Метод ультрафільтрації заснований на використанні ультрафільтраційних мембран, розмір пор яких становить 0,001-1 мкм (здебільшого від 0,02 до 0,1 мкм) [20].

Ультрафільтраційні мембрани призначені для відокремлення макромолекул від розчинених речовин нижчої молекулярної маси і води. Вода й низькомолекулярні розчинені речовини проникають під тиском крізь пористу мембрану, а більші розчинені речовини концентруються на її поверхні. Відбувається концентрування розчину високомолекулярних сполук та очищення іншого розчину від них. Рівень затримання ультрафільтраційними мембранами становить 95-100 % для високомолекулярних розчинених речовин і 0-10 % для низькомолекулярних.

Принцип затримки частинок ґрунтується як на розділенні за розміром, так і на адсорбційній взаємодії [20]. Чинники, що впливають на переміщення речовин крізь мембрану, охоплюють опір шарів рідини з обох боків мембрани, ступінь забруднення мембрани, а також швидкість, в'язкість і температуру рідини.

Ультрафільтраційні мембрани затримують лише великі молекули (наприклад, білки, колоїди), що мають нижчий осмотичний тиск, а менші розчинені речовини переходять крізь мембрану з водою. Тому процес розділення відбувається за меншого тиску (0,1-0,5 МПа), як порівняти зі зворотним осмосом або нанофільтрацією [20].

Для виготовлення мембран використовують тверді керамічні або склоподібні полімери. Ці матеріали механічно міцні, довговічні та стійкі до стирання, нагрівання, гідролізу й окиснення, вони не зазнають розм'якшення та руйнування під тиском. Ультрафільтраційні мембрани мають більшу товщину від мембран зворотного осмосу (0,1-0,5 мкм). Розмір пор з внутрішнього боку мембрани визначає розмір молекул, які можуть проходити крізь неї.

Мікрофільтрація (MF). Метод мікрофільтрації подібний до ультрафільтрації, проте для розділення використовують нижчий тиск (0,1-0,3 МПа, в деяких випадках 0,01-0,2 МПа) і відокремлюють дисперсні частинки більшого розміру – колоїдні частинки, краплі жиру, клітини мікроорганізмів тощо [20, 24]. Тобто за розміром відокремлюваних частинок мікрофільтрація займає проміжне положення між ультрафільтрацією та звичайною фільтрацією.

Механізм затримки частинок головно полягає в розділенні за розміром – частинки, розмір яких перевищує розмір пор, затримуються на поверхні мембрани [20].

Мікрофільтраційні мембрани подібні до ультрафільтраційних і складаються з двох частин: макропористого опорного матеріалу й мікропористого покриття на поверхні. Розмір пор мембран становить 0,1-10 мкм [24].

Застосування мембранних методів у харчовій промисловості

Мембранні технології широко використовують у харчовій промисловості для обробки рідин (води, напоїв, молочних продуктів, соків) з метою фільтрації (видалення дисперсних частинок), стерилізації (видалення мікроорганізмів) і відбілювання (видалення забарвлених речовин). Така обробка сприяє

поліпшенню органолептичних і фізико-хімічних показників якості продуктів та підвищенню їхньої стійкості під час зберігання.

Важливі напрями застосування зворотного осмосу в харчовій промисловості охоплюють [21, 25-29]:

- концентрування сироватки у виробництві сиру, як попередній етап перед сушінням у виробництві сухої сироватки або для використання у виробництві морозива;

- концентрування яєчного білка до вмісту 30 % з уникненням його денатурації;

- концентрування та очищення ферментів, фруктових соків, зброджених рідин, рослинних олій, лимонної кислоти, молока, кави, сиропів, натуральних екстрактів і ароматизаторів;

- концентрування суслу й регулювання вмісту цукру у виноробстві;

- видобування нутрицевтиків з рослинної сировини;

- очищення вина і пива;

- вилучення спирту з пива і вина для виробництва напоїв з низьким вмістом алкоголю;

- видалення небажаних компонентів у пивоварінні (диметилсульфіду, альдегідів);

- відновлення білків або інших речовин із залишків після дистиляції, розведених соків, стічних вод після переробки кукурудзи або інших технологічних вод;

- попереднє концентрування екстрактів кави й рідких яєць перед сушінням, соків і молочних продуктів перед випарюванням для збільшення економічності сушарок і випарників;

- опріснення морської води;

- демінералізація та очищення води, зокрема зі свердловин або річок;

- очищення стічних вод.

Обробка води за допомогою зворотного осмосу дає змогу вилучити з неї на 99,9 % одновалентні й багатовалентні йони, бактерії та органічні речовини з

молекулярною масою понад 300 Да, що забезпечує високу чистоту технологічної води для виробництва харчових продуктів, зокрема напоїв [29].

Застосування зворотного осмосу для обробки виноградних вин розв'язує питання їхньої стабілізації – крізь мембрану проходить вода й етиловий спирт, а йони калію і винна кислота залишаються в концентраті, з якого інтенсивно випадає в осад винний камінь [21].

Нанофільтраційні мембрани використовують для знесолення води у низці харчових виробництв (молока і молочних продуктів, м'яса і м'ясних продуктів, соків, напоїв (зокрема безалкогольних), цукру, хлібопекарських дріжджів тощо); для часткового знесолення сироватки під час переробки молока; очищення стічних вод харчових виробництв; опріснення морської води [22, 23, 26-29].

До найбільш поширених напрямів застосування ультрафільтрації належать [26-30]:

- концентрування молока, концентрування сироватки до вмісту сухих речовин 20 %, селективне вилучення лактози й солей з продуктів переробки молока;
- стандартизація вмісту сухих речовин у молоці для виробництва сиру;
- відокремлення кисломолочного сиру від сироватки, що сприяє збільшенню виходу продукту й підвищенню його харчової цінності;
- концентрування томатної пасты;
- розділення й концентрування ферментів, білків, пектину;
- видалення білкової каламуті з меду й сиропів;
- концентрування соків, що відбувається за нормальної температури та дає змогу зберегти біоактивні сполуки й отримати продукт з високими смаковими і поживними властивостями;
- вилучення барвників з бурякового та тростинного цукру;
- очищення крохмалю;
- видалення мікроорганізмів і високомолекулярних речовин з пива;
- концентрування, очищення та фракціонування розчинів і рідких харчових продуктів;

- обробка технологічної води для видалення високомолекулярних сполук і мікроорганізмів;
- очищення стічних вод у виробництві напоїв, м'яса та м'ясних продуктів, риби тощо;
- попередня обробка рідин перед використанням мембран зворотного осмосу для запобігання забрудненню мембран суспендованими органічними й колоїдними частинками;
- очищення повітря, створення регульованих газових середовищ для зберігання продукції.

Мікрофільтрацію вин, пива і соків здійснюють для збільшення їхньої прозорості, поліпшення якості та забезпечення колоїдної і біологічної стійкості під час зберігання. У виробництві молока і молочних продуктів за допомогою мікрофільтрації фракціонують молочний жир, а також видаляють з молока бактерії. Мікрофільтрація також є першим етапом підготовки технологічної води й очищення стічних вод [24, 26-29].

Концентрування рідких продуктів мембранним методом є перспективним. Мікро- й ультрафільтрацію часто використовують для видалення завислих частинок і макромолекул, тоді як нанофільтрацію та зворотний осмос – для тонкого розділення, зокрема видалення солей, органічних речовин та низькомолекулярних розчинених речовин [20].

Відсутність нагрівання веде до незначної зміни органолептичних властивостей і поживної цінності продуктів, що обумовлює придатність мембранних методів для концентрування чутливих до нагрівання продуктів, ароматизаторів, барвників і ферментних препаратів. Основними недоліками мембранного концентрування є вищі капітальні витрати, як порівняти з випаровуванням, забруднення мембран, досягнення після концентрування невисокої концентрації сухих речовин у продукті (щонайбільше 30 %).

Застосування мембранної фільтрації для знезараження продуктів також має низку переваг: низьке споживання енергії, проведення процесу за

нормальної температури, можливість обробки термолабільних матеріалів, висока технологічна адаптивність.

Крім того, мембранні способи застосовують для отримання особливо чистих хімічних реактивів, сполук, селективного виділення цінних чи шкідливих продуктів реакцій. Використовувані в таких процесах мембрани називають реакційними. Їх підготовка полягає у введенні до складу селективних мембран відповідних хімічних реагентів, каталізаторів, ферментів. Мембрани з фіксованими ферментами (імобілізовані ферменти) можуть бути застосовані багаторазово, що дає змогу ефективніше проводити безперервний ферментативний процес.

Мембранні технології, крім самостійного застосування, добре поєднуються з традиційно використовуваними виробничими прийомами. Це відкриває широкі можливості для створення нових, простих і комплексних, високоефективних технологічних процесів розділення рідких і газових сумішей.

Виробництво молока і молочних продуктів У виробництві молока й молочних продуктів для видобування та розділення компонентів рідин важливу роль відіграють методи мікро-, ультра-, нанофільтрації і зворотного осмосу [21].

Мікрофільтрація є ефективним методом вилучення мікроорганізмів з молока й розсолів, що забезпечує ступінь їх очищення 99,9 і 99 % відповідно. Звільнення розсолів від мікроорганізмів дає змогу забезпечити незмінний вміст солі в них, розв'язати питання регенерації розсолів у виробництві сирів, істотно скоротити витрату солі, звести до мінімуму обсяг відпрацьованого розсолу [24].

За допомогою ультрафільтрації стандартизують молоко за вмістом білка для виробництва сиру – вихідне молоко концентрують в 1,2-1,4 рази залежно від вмісту в ньому білка. Стандартизація молока забезпечує не лише отримання продукту високої якості й однорідної консистенції, але й сприяє збільшенню виходу сиру і зменшенню витрати сичужного ферменту та стартових культур мікроорганізмів. Ультрафільтрацію також застосовують для відокремлення кисломолочного сиру від сироватки, що дає змогу зменшити витрату молока до

3-3,2 кг на 1 кг сиру й отримати безпечний з погляду мікробіологічного забруднення продукт, який можна використовувати, зокрема, для дитячого харчування. Методом ультрафільтрації отримують концентрати сироватки й сироваткових білків, які використовують для власних потреб виробництва або спрямовують на отримання сухих концентратів [30].

Методом зворотного осмосу концентрують знежирене й нормалізоване молоко та сироватку [27]. Так, у виробництві сухої сироватки концентрування вихідної сироватки до вмісту 22-24 % сухих речовин дає змогу замінити перший ступінь вакуум-упарювання та скоротити витрату енергії в 4-6 разів.

Нанофільтрація є ефективною для видалення води й солей із сироватки під час її переробки [27]. Цим методом здійснюють також регенерацію мийних лужних розчинів (водних розчинів з концентрацією каустику 1-1,5 %), що забезпечує повторне їх використання до 90 %, сприяє чималій економії споживання свіжого луку й води, а також зменшенню навантаження на очисні споруди виробництва.

Крім цього, мембранні процеси ефективно застосовують для підготовки води й очищення стічних вод у виробництві молока й молочних продуктів [27].

На основі методів зворотного осмосу й ультрафільтрації розроблено комплексну технологічну схему переробки молока [27]. Схема складається з таких основних етапів: відокремлення сепарацією вершків, які направляють на вироблення масла; стандартизація вмісту білка у знежиреному молоці за допомогою ультрафільтрації з отриманням концентрату знежиреного молока, що надходить на виробництво сиру (вихід сиру зростає на 15-20 %), йогуртів, сухого знежиреного молока, продуктів дитячого харчування тощо; концентрування лактози методом зворотного осмосу з подальшим висушуванням.

Очищення води. Підприємства харчової промисловості споживають велику кількість води й генерують великий обсяг стічних вод [28].

Стічні води галузі несуть високе органічне і мікробне навантаження, тому для них характерні високі значення біохімічного й хімічного споживання кисню (відповідно БСК і ХСК), а також у них можуть бути присутні мийні та дезінфікуючі засоби. Характеристику стічних вод харчових виробництв наведено у табл. 6 [28].

Таблиця 6.

Характеристика стічних вод харчових виробництв [28]

Виробництво	Кількість стічних вод, м ³ /т продукту	ХСК, мг О ₂ /дм ³	БСК, мг О ₂ /дм ³
Виробництво фруктових соків	1,2-5,0	1200-11 200	140-1400
Переробка овочів	близько 30	5000-200 000	близько 4500
Виробництво картопляного крохмалю	0,7-1,5	3000-7800	2500-6500
Виробництво пива	близько 4,2	близько 2500	близько 1800
Виробництво спирту		900-1200	
Переробка м'яса	0,3-1,7	150-1800	140-1400
Переробка риби		4000-20 000	
Виробництво молочних продуктів	близько 90	50-65 000	860-42 000

Для підготовки води й очищення стічних вод у харчовій промисловості широко використовують мембранні методи [29]. Порівняльну характеристику цих методів наведено в табл. 7, хоча прямий порівняльний аналіз різних типів мембран є складним через мінливість умов експлуатації, характеристик стічних вод і параметрів обробки.

Зворотний осмос і нанофільтрація є високоефективними для видалення солей жорсткості та важких металів, проте застосування цих методів ускладнене низькою проникністю мембран і високим потенціалом їх забруднення. Прямий осмос є універсальним варіантом із середнім рівнем видалення солей і важких металів та помірною проникністю мембран, водночас на нього сильно впливає склад оброблюваної води.

Таблиця 7.

Порівняльна характеристика мембранних технологій підготовки води й очищення стічних вод [29]

Мембранна технологія	Мікрофільтрація (MF)	Ультрафільтрація (UF)	Нанофільтрація (NF)	Зворотний осмос (RO)	Прямий осмос (FO)
Ступінь видалення одновалентних йонів (Na, K, Cl, NO ₃), %	< 5	< 40	< 50	> 98	50-90 % (залежно від типу розчиненої речовини)
Ступінь видалення двовалентних йонів (Ca, Mg, SO ₄), %			> 90	> 99	
Ступінь видалення важких металів, %	< 10	20-50	50-95	98-99,9	60-90
Проникність, дм ³ /(м ² ·год·МПа)	> 100	1-100	0,15-3	0,1-1	0,5-5
Тиск, МПа	0,01-0,3	0,05-1	0,2-4	1-7,5	Осмотичний тиск
Стійкість до забруднення	Дуже висока	Висока	Помірна	Низька	Помірна
Можливість очищення мембран	Відновлення потоку на більш ніж 95 % після зворотного промивання або хімічного очищення	Відновлення потоку на більш ніж 90 % після хімічного очищення	Зниження потоку на 10-50 %; менша схильність до накопичення солей жорсткості порівняно зі зворотних осмосом	Зниження потоку на 30-70 % (залежно від попередньої обробки)	Зниження потоку з часом на 20-40 %; вища стійкість до органічних забруднень, проте нижча до нагромадження солей жорсткості

Ультра- й мікрофільтрація є незамінними методами попередньої обробки води, для яких характерна висока проникність мембран і стійкість до їх забруднення, проте обмежена селективність щодо розчинених речовин.

Від типу застосовуваної мембрани значною мірою залежить її стійкість до забруднення. Мембрани прямого осмосу зазвичай демонструють помірне забруднення через низький робочий тиск. Мембрани зворотного осмосу, хоча й високоселективні, схильні до забруднення мікроорганізмами й солями жорсткості, а тому потребують попередньої обробки. Нанофільтраційні мембрани виявляють помірну схильність до забруднення, особливо органічного й біологічного. На противагу цьому, ультра- та мікрофільтраційні мембрани мають найвищу стійкість до забруднення, оскільки більші розміри пор дають змогу легко здійснювати зворотне промивання й очищення мембран для відновлення продуктивності [29].

Розділ 2. Сучасні технології термічної обробки

2.1. Сучасні методи пастеризації та стерилізації

Термічна обробка продуктів полягає в їх нагріванні до певної температури протягом певного часу для знищення мікроорганізмів, інактивації ферментів, забезпечення безпеки продуктів та подовження терміну їх придатності [31].

У харчовій промисловості термічна обробка продуктів є однією з найважливіших. Її застосовують для зміни фізико-хімічних, структурно-механічних і органолептичних властивостей, що в сукупності визначають ступінь готовності продукту; надання продуктам відповідного смаку й аромату; знищення мікроорганізмів; інактивації ферментів; пришвидшення перебігу хімічних, біохімічних і масообмінних процесів; вибіркового видалення летких компонентів, зокрема води – для гальмування росту мікроорганізмів і зменшення активності ферментів, спирту – для отримання міцних алкогольних напоїв або ароматичних компонентів.

Теплову стерилізацію, пастеризацію та методи бланшування традиційно використовували в харчовій промисловості протягом тривалого часу для забезпечення мікробіологічної безпеки продукції та інгібування ферментативних процесів [31-35]. Для забезпечення мікробіологічної безпеки та стабільності продукту протягом тривалого часу необхідна досить жорстка термічна обробка, що може спричинити не тільки деградацію біологічно активних компонентів продукту, але й погіршення його якості, наприклад, зміну кольору, утворення сторонніх запахів або присмаків, зміну текстури [34]. Такі зміни більшою мірою характерні для попередньо запакованих продуктів з високою густиною, в яких теплопередача відбувається повільно. Внаслідок цього досить важко провести обробку всього об'єму продукту (особливо в геометричному центрі пакування), використовуючи традиційні поверхневі способи нагрівання.

Із застосуванням термічних процесів пов'язане споживання великої кількості енергії на підприємствах харчової промисловості, зокрема 40-80 % становлять витрати на технологічні процеси обробки, які застосовують для

подовження терміну зберігання продуктів, – стерилізацію / пастеризацію теплом, випаровування, сушіння тощо.

З огляду на це, актуальним є застосування таких технологій обробки, які дають змогу не лише максимально зберегти якість і харчову цінність продуктів, подовжити термін їх придатності та гарантувати безпеку, але й скоротити споживання енергії. Вибір методу обробки залежить від типу продукту, бажаного терміну придатності та температури зберігання.

Пастеризація. Використовувані у промисловості процеси пастеризації не призводять до загибелі всіх мікроорганізмів, які контамінують продукт. Пастеризація – відносно м'яка термообробка (зазвичай нижче 100 °C) для інактивації патогенних мікроорганізмів, дріжджів та цвілевих грибів [31-34]. М'яка термообробка (70-100 °C) інактивує ферментну систему рослинних клітин, максимально зберігаючи водночас нативні властивості продукту [32, 33, 35]. Пастеризація може бути застосована як для упакованого продукту (тунельні пастеризатори), так і для неупакованого (проточні пастеризатори). На харчових підприємствах поширене поєднання пастеризації рідкого продукту в потоці, розливу та потім пастеризації вже упакованого продукту [34]. Застосовувані режими термічної обробки згубні для патогенної мікрофлори, але недостатні для руйнування термостійких спор. З огляду на використання невисоких температур зазвичай пастеризовані продукти потребують зберігання за знижених температур [31].

Поєднання температури / тривалості, що використовують у пастеризації, залежить певною мірою від рН продукту. Для висококіслотних продуктів основна мета термічної обробки – деактивація ферментів (наприклад, у фруктових соках) та інактивація мікрофлори, що викликає бродіння та псування, (дріжджів, цвілевих грибів, молочнокислих бактерій). У низькокіслотних харчових продуктах основна мета – руйнування патогенів, зокрема *Salmonella*, *Listeria monocytogenes* та ін. [32].

Поєднання тривалості й температури термічної обробки повинно бути ефективним для знищення найбільш термостійкого мезофільного анаеробного спороутворювального патогена *Clostridium botulinum* [31, 32]. Оскільки термообробка під час пастеризації недостатньо жорстка, щоб інактивувати спори *C. botulinum*, пастеризовані продукти потребують подальшого холодильного зберігання та ретельного контролю безпеки, особливо це важливо для перероблених овочів, що мають рН вище 4,6 та активність води більш ніж 0,92 [31, 34]. Термостійкі мікроорганізми, а також бактеріальні спори витримують пастеризацію та, потенційно, за настання сприятливих умов, можуть розвинути та спричинити псування пастеризованих продуктів, навіть під час зберігання за знижених температур. Це призводить до дуже обмеженого терміну придатності таких продуктів – приблизно 1-2 місяці або менше залежно від складу. Це значно менше, ніж термін придатності стерильних продуктів, що становить один – три роки.

Оптимальний термічний процес для пастеризації залежить від природи продукту, рН, ступеня інфікування та наявних мікроорганізмів. Теоретично можливе використання кількох варіантів поєднання тривалості й температури обробки, які забезпечать необхідну мікробіологічну стабільність [32]. Але на практиці зазвичай вибирають такі поєднання температури та тривалості, які поряд з безпекою забезпечують і краще збереження органолептичних властивостей готового продукту.

Стерилізація. Процес стерилізації полягає в повному руйнуванні мікроорганізмів, що контамінують продукт, за температур вище 100 °C. Через наявність термостійких бактеріальних спор у продукті стерилізація часто означає обробку за температури 121 °C не менш ніж 15 хв (або еквівалент термічного навантаження), щоб інактивувати спори патогенного *C. botulinum* і більшості мікроорганізмів, які спричиняють псування [31, 34]. Стерилізація також означає, що кожна частинка продукту повинна зазнати впливу високої температури.

Проте на практиці продукт, підданий стерилізації, може не бути стерильним. Оскільки принцип абсолютної стерильності не може бути досягнутий (не всі мікроорганізми гинуть), ймовірність виживання повинна бути мінімізована до прийняттого рівня. Ця умова прийнята для 10^{-12} виживання *C. botulinum* (12-кратне зменшення кількості спор), назване принципом 12D (еквівалентний термообробці за температури 121,1 °C впродовж 3 хв, $F_0=3$ хв) [34]. Деякі термостійкі спори можуть перенести цю й навіть інтенсивнішу термообробку. Будучи теплолюбними, ці мікроорганізми, що вижили, не можуть рости за нормальних умов зберігання, які переважають у помірних зонах (за температури навколишнього середовища без охолодження), що свідчить про промислову стерильність.

На відміну від пастеризації, стерилізація призначена для продуктів з терміном придатності від 6 місяців до 3-4 років за нерегульованої температури (зазвичай від 0 до +25 °C). Процеси стерилізації можуть бути розділені для зручності на дві категорії: «в пакуванні» – стерилізація, якій піддають упаковані у споживче пакування продукти (бляшані та скляні банки, пляшки, реторт-пакети з полімерних і комбінованих матеріалів та ін.); «у потоці» – стерилізація продукту в проточному теплообміннику [34]. Зазвичай потім здійснюють охолодження продукту з подальшим фасуванням у стерильне пакування в асептичних умовах.

Процес термічної стерилізації широко практикують у всьому світі. Стерилізація парою (вологим теплом) відбувається з використанням насиченої пари під тиском і є найширше використовуваним процесом. Цей процес парової стерилізації нетоксичний, недорогий, швидко руйнує мікроорганізми, інактивує спори, тепло швидко проникає в продукт.

Проте цей вид обробки призводить до суттєвих змін якості продукту, особливо це стосується високов'язких продуктів у великому пакуванні, які піддають тривалому нагріванню та витримці за температури 120 °C [34]. Попри низку недоліків, тепер стерилізація є головним методом термічної обробки

низькокислотних продуктів. І якщо для рідких продуктів можливе зниження термічного навантаження шляхом попередньої короткотривалої високотемпературної стерилізації в потоці з подальшою щадною стерилізацією упакованого продукту, то для високов'язких упакованих продуктів можливе використання лише тривалої температурної дії.

Високотемпературна короткотривала обробка (HTST), або миттєва пастеризація – метод термічної обробки швидкопсувних рідких продуктів, як-от молока, фруктових і овочевих соків, пива, вина тощо. Миттєва пастеризація є ефективним методом, що дає змогу забезпечити безпеку для вживання рідкого продукту без необґрунтованої зміни його органолептичних характеристик або харчової цінності [33]. Під час цієї обробки використовують регенерацію енергії, що, безперечно, вигідно відрізняє цей метод від альтернативних процесів своєю енергоефективністю.

Найважливішими визначальними чинниками для забезпечення належної безпеки продуктів є якість сировини, дотримання температурно-часових умов обробки, зниження або усунення ймовірності забруднення після пастеризації та забезпечення підтримки низької температури під час зберігання [34].

Високотемпературну короткотривалу обробку широко застосовують для обробки молока. Традиційний процес періодичної пастеризації здійснюють з витримкою 30 хв при 63 °C [32]. Миттєва пастеризація являє собою безперервний процес, під час якого продукт нагрівають до 72 °C і подають через трубчастий витримувач зі швидкістю, що забезпечує необхідну тривалість обробки. Тривалість витримки, необхідна для досягнення тієї ж летальності, як і за періодичного процесу, становить лише 15 с [31-33].

Короткотривала високотемпературна пастеризація пропонує значну операційну ефективність порівняно з традиційною періодичною пастеризацією. Системи миттєвої пастеризації дають змогу виробляти великі обсяги продукції з використанням мінімальної технологічної площі.

Ультрависокотемпературна обробка (УНТ), або ультрапастеризація, – це процес стерилізації рідких харчових продуктів за температури вище 135 °С протягом 2-5 с [33], тоді як класичну стерилізацію проводять за температури 121 °С протягом декількох хвилин. Здебільшого під час ультрапастеризації рідкий продукт нагрівають до 135-150 °С, витримують 3-5 с. Стерильний продукт охолоджують і фасують у попередньо стерилізоване пакування в асептичних умовах [31]. Ультрапастеризацію використовують у виробництві молочних продуктів, для обробки фруктових соків, вершків, соєвого молока, йогуртів, вина, кремів, томатного пюре, продуктів дитячого харчування, десертів, соусів, безалкогольних напоїв тощо [31, 33].

У технології ультрапастеризації є безперечна перевага – мінімальний вплив на показники якості продукту та перебіг деяких хімічних процесів, наприклад, денатурації білка й руйнування вітамінів [33]. Цей метод обробки дає змогу отримати продукти з ліпшими органолептичними властивостями та більшим вмістом поживних речовин порівняно з класичною стерилізацією продуктів у пакуванні.

Методи миттєвої та ультрапастеризації були розроблені з метою заміни традиційних процесів пастеризації та стерилізації. Обробка продуктів у пакуванні цими методами – економічний процес, в якому отримують продукт прийнятної якості, незалежно від його складу та консистенції. Миттєва й ультрапастеризація продуктів за високих температур є короткотривалими, тому меншою мірою впливають на органолептичні та фізико-хімічні властивості продуктів порівняно з традиційними методами термічної обробки. Щоб підвищити чутливість мікроорганізмів до м'якших режимів термічної обробки, миттєву й ультрапастеризацію поєднують з іншими методами обробки.

Перевагою миттєвої та ультрапастеризації є регенерація енергії, що, безперечно, вигідно відрізняє ці методи за енергоефективністю від традиційних. Зважаючи на короткотривале та швидке виконання операцій, процес реалізують за безперервним принципом з використанням теплообмінників. Проте

застосування миттєвої та ультрапастеризації має певні обмеження: для їх проведення потрібне спеціалізоване обладнання, крім того, таку обробку можуть застосовувати лише для рідких продуктів [33].

2.2. Електрофізичні методи обробки

Електрофізичні методи нагріву пропонують нові можливості для обробки, забезпечуючи ліпше збереження органолептичних властивостей і поживної цінності продуктів, ніж традиційні методи теплової обробки. Електрофізичні методи нагріву полягають у впливові на матеріал електричного струму або електромагнітної енергії випромінювання (прямий і непрямий нагрів відповідно). До електрофізичних методів обробки належать: високочастотна [ВЧ, радіохвильова (RF)], надвисокочастотна [НВЧ, мікрохвильова (MW)], електроконтактна (омічний нагрів), обробка інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням [36, 37]. Спектр електромагнітного випромінювання представлено на рис. 3.

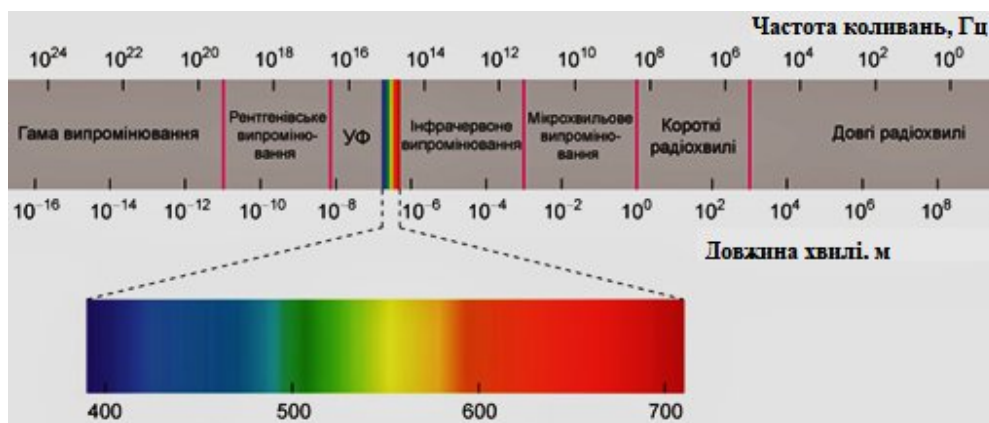


Рисунок 3. Спектр електромагнітного випромінювання³

ВЧ-, НВЧ-обробку й омічний нагрів використовують для забезпечення збереження якості продуктів під час зберігання, тоді як ІЧ-випромінювання — здебільшого для зміни властивостей продуктів (кольору поверхні, смаку й аромату). Іноді застосовують комбіновані методи.

³ C. Minchiotti, M. (2024). UV-Visible Spectrophotometry: Introduction, Quantification, Equipment and Biotechnological Applications. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.1007147

Термічна обробка продуктів за допомогою цих сучасних методів відбувається швидше й ефективніше завдяки використанню енергії електромагнітного випромінювання різних частин спектра. Ефективність електромагнітних методів обробки зазвичай вища, ніж традиційних методів кондуктивного або конвекційного нагрівання [36].

Нагрівання продуктів в електромагнітному полі відрізняється від традиційних методів тим, що елементи середовища, яке є між генератором електромагнітних коливань та об'єктами нагріву, здебільшого не беруть участі в перенесенні теплоти. Тому тепловий потік не є безперервним, а енергія переноситься у формі електромагнітних коливань. Теплота виникає в самих об'єктах нагріву під час їх взаємодії з електромагнітним полем. Теплоту переносять хвилі довжиною 0,6-104 мкм. Цей діапазон охоплює ВЧ-, НВЧ- та ІЧ-випромінювання.

Обробка високочастотним і надвисокочастотним випромінюванням.

ВЧ- та НВЧ-обробка полягає у використанні енергії електромагнітного поля високої та надвисокої частот (в діапазонах від 1 до 200 МГц та від 300 МГц до 300 ГГц відповідно) для рівномірного нагрівання продуктів за нетривалий час.

Відповідно до міжнародної угоди про розподіл частот для ВЧ-установок застосовують частоти 13,560 і 27,120 МГц, зрідка 40,68 МГц, а для НВЧ-установок – 915 і 2450 МГц [34, 35].

Нагрівання НВЧ-випромінюванням зумовлене обертанням дипольних молекул у діелектрику [35, 38]. Типовою дипольною молекулою є молекула води. Вимушені коливання полярних молекул під впливом зовнішнього електричного поля спричиняють міжмолекулярне тертя, у результаті в усьому об'ємі діелектрика виділяється теплота. В неідеальних діелектричних матеріалах (що частково проводять електричний струм) відбувається додатковий нагрів завдяки провідності [35, 38]. У діелектриках, в яких процес поляризації молекул незначний, а електропровідність вкрай мала, нагрівання електромагнітним полем відсутнє. Це характерно для скла, паперу, кераміки, полімерних матеріалів, повітря тощо.

З погляду електрофізики, харчові продукти належать до напівпровідників. Харчові продукти є складними гетерогенними сумішами, що містять воду в кількості 50-95 %. Деякі компоненти продуктів (білки, жири, вуглеводи, вода) належать до неідеальних діелектриків, тоді як водні розчини солей (електроліти) – до провідників. Під впливом зовнішнього електричного поля в продукті виникають струми зміщення, пов'язані з діелектричними властивостями, і струми провідності, пов'язані з переміщенням вільних зарядів. Останні завжди наявні у вологих продуктах, оскільки основи, кислоти та солі дисоціюють у воді, внаслідок чого утворюються йони і виникає активна провідність матеріалу [36].

Ефект нагріву харчових продуктів у НВЧ-полі пов'язаний здебільшого (але не повністю) з їхніми діелектричними властивостями, що визначаються поведінкою в такому полі диполів. Диполі (дипольні молекули й атоми) можуть бути присутні в продукті, наприклад, молекули води, або виникати в ньому під дією зовнішнього електричного поля. Орієнтація вже наявних диполів, а також виникнення нових диполів та їх орієнтація під впливом зовнішнього електричного поля є суттю поляризації. Це явище посідає центральне місце в механізмі виникнення теплоти в матеріалах, що перебувають у НВЧ-полі. Енергія зовнішнього поля, витрачена на поляризацію діелектрика, перетворюється в ньому на теплоту, причому теплота виникає в усьому об'ємі матеріалу, а не тільки на його поверхні [38].

Діелектричні властивості харчових продуктів і різних матеріалів залежать головню від їхньої природи, вологості, температури та частоти коливань поля. Особливості щодо кількості виділеного тепла та глибини проникнення НВЧ-поля призводять до необхідності підбору продукту такої товщини, щоб не відбувався перегрів його зовнішніх (за великих значень коефіцієнта поглинання) та внутрішніх (за малих значень коефіцієнта поглинання) шарів [37].

Кількість теплоти, швидкість нагріву й розташування «холодних точок» залежать від низки чинників: складу продукту, його форми, об'єму та площі поверхні, частоти електромагнітних хвиль, тривалості та температури обробки [35].

Глибина, на яку проникають ВЧ- та НВЧ-випромінювання, залежить від їхньої частоти і характеристик оброблюваного продукту. Глибина проникнення в радіочастотному діапазоні (27 і 40 МГц) у кілька разів перевищує глибину проникнення в мікрохвильовому діапазоні (915 і 2450 МГц) за однакової температури обробки. Так, глибина проникнення змінюється в межах від 8-22 см на рівні 915 МГц до 3-8 см на рівні 2450 МГц, залежно від вологості продукту. Тому рекомендовано використовувати радіочастотну технологію для більших або товстіших виробів, тоді як для малих або тонких зразків краще використовувати мікрохвильовий нагрів [35]. На глибину проникнення впливають також вологість продукту, вміст у ньому жиру, солі, густина та ін.

НВЧ-нагрів має низку переваг перед традиційними методами термічної обробки: висока швидкість і рівномірність нагрівання, збереження вітамінів та інших незамінних нутрієнтів, можливість м'якого режиму термообробки й обробки імпульсами, висока економічність процесу [37].

Останнім часом НВЧ-обробку здебільшого застосовують у громадському харчуванні та харчовій промисловості в таких процесах: розігріву та приготування страв, сушіння, розморожування, бланшування, варіння, випічки, знезараження, екстрагування, а також як стимулюючий чинник, спрямований на інтенсифікацію технологічних процесів і підвищення харчової цінності напівпродуктів і готової продукції [35-37]. Досягнення температури обробки за короткий час веде до кращого збереження поживних речовин, аромату й текстури продукту, тому ця технологія має певний потенціал для застосування в пастеризації овочів.

ВЧ-хвилі мають більшу проникну здатність, ніж мікрохвилі, через нижчий рівень частоти (3 кГц-300 МГц). Тому обробку ВЧ-випромінюванням застосовують для продуктів більшого розміру. Так, тривалість приготування м'яса й м'ясних продуктів з ВЧ-нагрівом набагато менша, ніж звичайне приготування, водночас втрати м'ясного соку значно скорочуються. ВЧ-нагрів розглядають як ефективний метод післязбиральної обробки та дезінсекції

фруктів [39]. Цей метод також застосовують для безперервної обробки рідких продуктів у потоці, як-от фруктових соків і молока.

Основні напрями застосування НВЧ- та ВЧ-обробки продуктів у харчовій промисловості, а також переваги й недоліки цих методів порівняно з традиційними представлено в табл. 8. Ці методи електронагрівання знайшли застосування в харчовій промисловості, зокрема для теплової обробки заморожених продуктів, попереднього приготування м'яса й сушіння макаронних виробів. Методи електричного нагріву демонструють значні переваги перед традиційними, а саме: скорочення тривалості обробки, поліпшення якості продуктів, зменшення впливу на довкілля.

Електроконтактна обробка (обробка струмом, омичний нагрів, нагрів опором). Електроконтактний метод нагрівання полягає в перетворенні електричної енергії на теплову під час проходження змінного електричного струму промислової частоти (220 В, 50 Гц) через продукт як через провідник, якому властивий опір [35, 37, 40].

Харчові продукти є складною системою, до якої входять різні сполуки (вуглеводи, білки, жири, вітаміни, мінерали, вода, барвники, ароматизатори тощо). Коли ці харчові матеріали містять достатню кількість води й електролітів (переважно у формі мінеральних солей), вони діють як носії заряду та пропускають крізь себе електричний струм [38]. У результаті всередині продуктів в усьому об'ємі генерується тепло.

Кількість тепла, що генерується всередині продукту, залежить від електропровідності продукту [35]. Електропровідність продуктів збільшується в присутності йонних речовин, як-от кислот і солей, та зменшується в присутності неполярних компонентів, наприклад, жирів і ліпідів. Електропровідність підвищується зі збільшенням температури [40].

Швидкість нагріву продукту прямо пропорційна квадрату напруженості електричного поля та залежить від електропровідності компонентів продукту, густини продукту, рН, теплопровідності та питомої теплоємності компонентів, тривалості обробки.

Таблиця 8.

Інноваційні технології термічної обробки продуктів: переваги, недоліки, застосування [37]

Технологія	Переваги	Недоліки	Застосування
Надвисокочастотна обробка (мікрохвильова, MW)	Зменшення вуглецевого сліду Можна використовувати окремо або в поєднанні з традиційними методами Теплота утворюється всередині продукту Скорочення тривалості обробки Отримання безпечних харчових продуктів	Наявність спеціально підготовленого персоналу Високі витрати на електроенергію Наявність знань / досвіду для розуміння нерівномірності нагріву, теплових втрат	Розморожування й темперування страв Розігрівання страв Приготування страв, випічка Вакуумне сушіння термолабільних продуктів Розморожування риби, м'яса та заморожених харчових продуктів Темперування заморожених продуктів Знезараження, пастеризація та стерилізація продуктів Екстрагування
Високочастотна обробка (радіохвильова, RF)	Більша пропускна здатність Менша площа, необхідна для встановлення обладнання Коротші технологічні лінії з миттєвим запуском Безконтактний нагрів Більша проникність Більше можливостей для розробки нових продуктів Можна використовувати окремо або в поєднанні з традиційними методами Харчова цінність, органолептичні й функціональні властивості змінюються меншою мірою Енергоефективний метод	Висока вартість обладнання та значні експлуатаційні витрати Не підходить для обробки свіжих продуктів та білка Не підлягають обробці продукти, що містять пробіотики	Вакуумне сушіння термочутливих продуктів Сушіння печива та хлібобулочних виробів після випічки Розморожування риби та м'яса Темперування заморожених продуктів перед подальшою обробкою Бланшування овочів Енергоефективна обробка горіхів, насіння, спецій тощо Очищення стічних вод Знезараження та пастеризація продуктів без хімічних агентів Контроль проростання зерна і насіння, поліпшення зберігання

Технологія	Переваги	Недоліки	Застосування
Електроконтактна обробка	Дає змогу здійснювати миттєву та ультрапастеризацію рідких, твердих продуктів і суспендованих матеріалів Генерує тепло всередині продукту Енергоефективна обробка Об'ємний і рівномірний нагрів Застосовують як у періодичних, так і в проточних системах Висока пропускна здатність та менша тривалість процесу	Наявність спеціально підготовленого персоналу Виявлення та вимірювання «холодних точок» під час обробки складних харчових продуктів Електропорація знижує продуктивність ферментації Матеріали, що підлягають обробці, повинні містити достатню кількість води й електролітів	Бланшування, випаровування, екстракція, зневоднення, ферментація, стерилізація, пастеризація та нагрівання Зменшується тривалість лаг-фази під час ферментації Спричиняє термічний і нетермічний летальний вплив на мікроорганізми Використовують у військових або космічних місцях Перспективний для асептичної обробки рідин, що містять частинки, та рідин з високою в'язкістю Підходить для обробки як рідких, так і твердих продуктів Високоєфективний для інактивації дріжджових клітин
Інфрачервона обробка	Велика швидкість нагрівання та менша тривалість процесу Рівномірна температура сушіння Високий ступінь контролю процесу Можливість вибіркового нагрівання Скорочення тривалості сушіння Підвищення енергоефективності Ліпша якість готової продукції Мікробіологічна чистота умов виробничого середовища Можливість поєднання з традиційним конвективним нагріванням	Низька проникна здатність Тривале опромінення біологічних матеріалів може спричинити руйнування клітин	Сушіння та зневоднення продуктів переробки плодів і овочів Сушіння водоростей, овочів, рибних пластівців, макаронних виробів Інактивація бактерій, дріжджів і цвілевих грибів як у рідких, так і в твердих харчових продуктах Інші сфери застосування охоплюють запікання, смаження, обсмажування, нагрівання та приготування (м'ясо і м'ясні продукти, соєві боби, зернові культури, какао-боби, горіхи)

Важливими параметрами продукту, який обробляють струмом, є в'язкість, електропровідність, густина, питома теплоємність, вид продукту, консистенція. Омічний нагрів має переваги для обробки двокомпонентних продуктів – рідин, що містять тверді частинки. Цей метод використовують для нагрівання твердих частинок, не завдаючи негативного термічного впливу на рідкий носій, адже частинки мають вищу провідність і тому нагріваються швидше [37].

Під час використання безперервної технології продукт послідовно подають у секції нагрівання, витримки й охолодження аналогічно тому, як це здійснюють під час пастеризації рідких харчових продуктів, з тією відмінністю, що водночас впливу зазнають і завислі тверді частинки, наявні в продукті. В'язкі маси прокачують через блок омічного нагріву за допомогою насоса. Після цього продукт надходить через секцію охолодження до системи асептичного розливу (упакування) [40].

Обробку струмом застосовують для різних цілей. Завдяки нагріванню здійснюють асептичну обробку готових страв, пастеризацію продуктів, що містять тверді частинки, попередній нагрів продуктів перед консервуванням, пастеризацію молока та фруктових соків, отримання високоякісних фруктів для йогуртів, розморожування м'ясних і рибних блоків. Під час обробки соків відбувається інактивація ферментів, водночас їхній аромат зберігається. Для поліпшення консистенції м'ясних напівпродуктів та якості готової продукції проводять електрокоагуляцію, що полягає в короткотривалому нагріванні напівпродуктів струмом. Завдяки впливу електричного струму на рослинну сировину відбувається електроплазмоліз, у результаті чого збільшується проникність клітинних оболонок, що сприяє підвищенню виходу соку. А під час обробки струмом м'яса відбувається електростимуляція (механічне скорочення м'язових волокон), що прискорює процес його дозрівання. Інші можливі напрями застосування омічного нагрівання охоплюють бланшування, розморожування, зневоднення та екстракцію [35, 37, 40].

Основні напрями застосування омічного нагріву продуктів у харчовій промисловості, а також переваги й недоліки цього методу порівняно з

традиційними представлено в табл. 8. Омічне нагрівання забезпечує більш рівномірний розподіл тепла в об'ємі та меншу тривалість обробки, як порівняти з традиційними методами, що сприяє кращому збереженню поживних речовин та органолептичних властивостей продуктів.

Обробка інфрачервоним випромінюванням. ІЧ-випромінювання – це електромагнітне випромінювання, що охоплює спектральну область між видимим світлом (0,38-0,78 мкм) та мікрохвильовим випромінюванням (1-1000 мм) [37, 41, 42].

Харчові продукти є складними сумішами різних біохімічних молекул, біологічних полімерів, неорганічних солей і води. ІЧ-спектри таких сумішей виникають через механічні коливання молекул або певних молекулярних агрегатів у межах дуже складного явища взаємного перекриття. Амінокислоти, поліпептиди і білки виявляють дві сильні смуги поглинання, розташовані на 3-4 та 6-9 мкм. З іншого боку, ліпіди демонструють явища сильного поглинання по всьому спектру ІЧ-випромінювання з трьома сильнішими смугами поглинання, розташованими на 3-4, 6 та 9-10 мкм, тоді як вуглеводи дають дві сильні смуги поглинання з центрами 3 та 7-10 мкм.

Під час обробки продукту ІЧ-випромінювання може викликати зміни в електронному, коливальному та обертальному станах атомів і молекул. Коли продукт зазнає впливу ІЧ-випромінювання, воно поглинається, відбивається чи розсіюється. Інтенсивність поглинання на різних довжинах хвиль залежить від компонентів продукту.

Залежно від довжини хвилі ІЧ-випромінювання поділяють на три діапазони: ІЧ-А (близьке) від 0,7 до 1,4 мкм, ІЧ-В (середнє) – від 1,4 до 3,0 мкм, ІЧ-С (далеке) – від 3,0 мкм до 1 мм [40]. Далекий ІЧ-діапазон є найбільш придатним для обробки харчових продуктів, оскільки їхні складники здебільшого поглинають випромінювання в цьому діапазоні [37].

Під час нагрівання ІЧ-випромінюванням з поверхні продукту інтенсивно випаровується вода, в результаті чого охолоджуються поверхневі шари продукту. Це дає змогу підводити до продукту потужний потік тепла, доки

поверхневі шари не будуть значною мірою зневоднені. Відмінність ІЧ-нагріву від діелектричного полягає у механізмі трансформації енергії випромінювання в тепло. ІЧ-поле проникає на невелику глибину продукту. Глибина проникнення ІЧ-випромінювання обернено пропорційна коефіцієнту поглинання. Зі зменшенням довжини хвилі глибина проникнення ІЧ-випромінювання збільшується і може досягати в окремих випадках 3-5 мм. З огляду на це такий нагрів є проміжним між поверхневим та об'ємним [42].

ІЧ-обробку використовують головно для нагрівання продуктів. Основні напрями застосування ІЧ-обробки: сушіння дрібних продуктів з низькою вологістю; у хлібопечах, вакуумних і ліофільних сушарках, деяких НВЧ-печах – для утворення коричневої скоринки на виробах; обробка термоусадкової пакувальної плівки; смаження продуктів; розморожування продуктів; з'єднання частин шоколадних виробів; підрум'янення готових страв; поверхнева пастеризація хліба; стерилізації пакувальних матеріалів [42].

Використання обробки ІЧ-випромінюванням для сушіння харчових продуктів має чимало переваг, зокрема скорочення тривалості сушіння, альтернативне джерело енергії, підвищену енергоефективність, рівномірну температуру в продукті під час сушіння, якісніші готові продукти, економію виробничої площі. Водночас застосування комбінованого методу – обробки ІЧ-випромінюванням і звичайного конвективного нагрівання – вважають ефективнішим порівняно з одним лише ІЧ- або конвективним нагріванням, оскільки це дає синергетичний ефект.

Основні напрями застосування ІЧ-нагріву продуктів у харчовій промисловості, а також переваги й недоліки цього методу порівняно з традиційними представлено в табл. 8. Обробка ІЧ-випромінюванням забезпечує значні переваги порівняно з традиційними методами нагрівання, зокрема скорочення тривалості обробки, рівномірність нагрівання, зниження втрат якості продуктів, відсутність міграції розчинених речовин у продуктах, універсальне, просте та компактне обладнання, а також значну економію енергії.

Розділ 3. Перспективні технології нетермічної обробки

Технології термічної обробки продуктів пов'язані з впливом на них тепла протягом тривалого часу, що спричиняє небажані зміни в поживному складі продуктів, знижує їхню якість, надає стороннього присмаку та може призводити до утворення гетероциклічних ароматичних амінів [43]. Технології ж нетермічної обробки не лише подовжують термін придатності харчових продуктів, а й забезпечують збереження їхніх органолептичних властивостей і харчової цінності. До таких технологій належать обробка високим тиском, опромінення, обробка ультразвуком, обробка озоном та обробка ультрафіолетовим випромінюванням.

3.1. Обробка високим тиском

Технологію високого тиску (HPP) вважають однією з найкращих інноваційних технологій у харчовій промисловості за останні 50 років. Вона полягає в застосуванні до упакованих або неупакованих продуктів тиску від 100 до 1000 МПа за температури від -20 до 60 °C протягом короткого часу (від кількох секунд до кількох хвилин) для їх пастеризації [31, 37, 43, 44]. Обробку високим тиском можуть використовувати як для рідин, так і для твердих продуктів з високим вмістом вологи.

Під час обробки високим тиском упакованого продукту його поміщають у герметично закриту камеру та піддають впливу гідростатичного тиску за певної температури. Рідину, здебільшого воду, використовують як засіб передачі тиску з міркувань безпеки й низької вартості [31, 43, 44].

Обробка високим тиском базується на трьох фундаментальних принципах: принципі мікроскопічного впорядкування, ізостатичному принципі та принципі Ле Шательє. Принцип мікроскопічного впорядкування пояснює, що збільшення ступеня молекулярного впорядкування речовини відбувається через підвищення тиску за постійної температури, що, своєю чергою, спричиняє вплив на молекулярні структури й перебіг хімічних реакцій. Ізостатичний принцип показує, що прикладений тиск рівномірно розподіляється в усіх напрямках під

час стиснення, незалежно від розміру, форми чи складу продукту. Принцип Ле Шательє демонструє, що будь-який процес, що перебуває в рівновазі (наприклад, конформаційна зміна, фазовий перехід або хімічна реакція) та який відбувається зі зменшенням об'єму, може бути посилений застосуванням тиску [37, 43, 44]. Високий тиск призводить до порушення водневих зв'язків в молекулах продукту, тоді як ковалентні зв'язки не зазнають змін [37, 44].

Однією з основних цілей застосування технології високого тиску є інактивація мікроорганізмів. Ступінь мікробної інактивації, якого досягають під впливом високого тиску, залежить від низки чинників: тиску, типу і кількості мікроорганізмів, складу й характеристик продукту (вмісту солі, водної активності, рН), температури та тривалості обробки [31]. Мікроорганізми проявляють різну стійкість до впливу високого тиску: найменш стійкими є грамнегативні бактерії, цвілеві гриби та дріжджі, стійкішими – грампозитивні бактерії, а найменш уразливими – бактеріальні спори.

Згубна дія високого тиску на вегетативні клітини мікроорганізмів пов'язана з низкою можливих змін, що відбуваються в мікробній клітині. Денатурація білків, зміна ліпідної фази в шарі плазматичної мембрани та вплив на ферменти можуть порушити морфологію клітин, генетичні механізми і перебіг біохімічних реакцій. Як можливий механізм впливу розглядають інактивацію ключових ферментів, зокрема залучених до реплікації та транскрипції ДНК. Крім того, під впливом тиску відбувається розрив клітинної мембрани і пов'язане з ним руйнування цілісності клітини [31].

Пастеризацію продуктів зазвичай здійснюють під тиском в діапазоні 300-600 МПа упродовж короткого часу – від кількох секунд до кількох хвилин. За таких умов зазнають інактивації вегетативні мікроорганізми, зокрема патогенні. Деякі спори стійкі навіть до тиску більш ніж 1000 МПа за температури 45-75 °С. Тому стерилізацію продуктів проводять під тиском вище 600 МПа у поєднанні з високою температурою [37]. Дріжджі та цвілеві гриби здебільшого зазнають інактивації за тиску 300-400 МПа і температури 25 °С протягом декількох

хвилин, проте для інактивації аскоспор дріжджів потрібний вплив вищого тиску. Обробка високим тиском ефективна проти патогенних мікроорганізмів, як-от *Campylobacter jejuni*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella spp* [31]. Вегетативні форми мікроорганізмів, які спричиняють псування, як-от *E. coli*, *Listeria innocua* та *Staphylococcus aureus*, здебільшого зазнають інактивації в результаті обробки продуктів під тиском 400-600 МПа протягом 5-10 хв.

Обробку високим тиском застосовують для багатьох видів харчових продуктів, зокрема соків, напоїв, фруктів, овочів, м'яса, риби, молока, сирів, йогуртів, а особливо продуктів, чутливих до термічної обробки, та продуктів з високою кислотністю [31, 37, 43]. Застосування обробки тиском від 400 до 600 МПа сприяє збереженню органолептичних властивостей, зменшенню кількості мікроорганізмів і подовженню терміну придатності плодів та овочів, тоді як обробка тиском від 100 до 400 МПа є ефективною для збереження швидкопсувних продуктів тваринного походження (м'яса, риби, молока, сирів, йогуртів) завдяки знищенню патогенних мікроорганізмів, підтриманню органолептичних властивостей і збільшенню терміну придатності [45]. Обробка тиском за підвищених температур у межах 80-100 °C дає змогу інактивувати спори та стерилізувати м'ясні, фруктові й овочеві продукти [37]. Слід зазначити, що обробка високим тиском молочних продуктів є найскладнішою та не завжди забезпечує отримання продукту задовільної якості, тому промислове впровадження цього методу в молочному секторі залишається обмеженим [46].

До основних переваг обробки продуктів високим тиском належать висока енергетична ефективність і можливість запобігти повторному зараженню завдяки обробці упакованих продуктів. Інактивація мікроорганізмів, зокрема патогенних і мікроорганізмів-збудників мікробного псування, а також ферментів і вірусів дає змогу подовжити термін зберігання продуктів. Водночас текстура, колір, смак і біологічно активні сполуки харчових продуктів після обробки високим тиском змінюються незначно. Обробка напоїв високим тиском може запобігти реакції Майяра та карамелізації цукрів.

Основні напрями застосування обробки продуктів високим тиском у харчовій промисловості, а також переваги й недоліки цього методу порівняно з традиційними представлено в табл. 9. Обробку високим тиском для забезпечення безпеки продуктів та подовження терміну їх зберігання застосовують більш як 350 компаній у всьому світі, вона є доцільною та економічно вигідною [37]. Близько 30 % оброблюваних виробів становлять м'ясні продукти, хоча цей метод також використовують для обробки великого асортименту фруктових, овочевих і деяких молочних продуктів. Крім того, обробка продуктів високим тиском ефективна в процесах екстракції, гомогенізації, заморожування та розморожування.

3.2. Опромінення

Опромінення продуктів полягає в їх обробці іонізуючим випромінюванням певної дози для знищення мікроорганізмів і подовження терміну зберігання [37, 43, 47, 48].

Іонізуюче випромінювання – це високоенергетичні частинки та хвилі дуже короткої довжини, які мають достатньо енергії, щоб видаляти електрони з атомів, тобто іонізувати їх [43]. Механізм дії іонізуючого випромінювання під час обробки продуктів ґрунтується на іонізації молекул і атомів, що містяться в мікробних клітинах, унаслідок чого порушуються їхні біологічні функції і клітини гинуть. Біологічну дію іонізуючого випромінювання поділяють на пряму й непряму. Пряма дія пов'язана з хімічними змінами речовин під безпосереднім впливом енергії випромінювання, а непряма – зі змінами внаслідок впливу на речовини активних радикалів, які утворюються внаслідок прямої дії іонізуючого випромінювання на менш стійкі речовини. У харчових продуктах частка змін, спричинених непрямою дією, становить приблизно 80 %. Під час опромінення продуктів з високим вмістом вологи переважає непряма дія іонізуючого випромінювання, зумовлена виникненням активних частинок унаслідок радіолізу води. Пряма дія характерна для сухих продуктів і жирів [1].

Таблиця 9.

Інноваційні технології нетермічної обробки продуктів: переваги, недоліки, застосування [37]

Технологія	Переваги	Недоліки	Застосування
Обробка високим тиском	Відсутність токсичності Збереження кольору, смаку і поживних речовин Скорочення тривалості обробки Однорідність обробки всього продукту Можливість отримання бажаних змін текстури Можливість обробки в упаковці	Незначний вплив на активність ферментів Деякі мікроорганізми можуть залишатися життєздатними Висока вартість обладнання Для досягнення антимікробного ефекту продукти повинні містити приблизно 40 % вільної води	Знищення вегетативних бактерій (і спор за вищих температур) Пастеризація та стерилізація фруктів, овочів, м'яса, соусів, маринадів, йогуртів і салатних заправок Можливість зменшення витрати хімічних консервантів або відмови від їх використання Знезараження інгредієнтів з високою вартістю, чутливих до нагрівання
Опромінення	Велика проникна здатність Надійність та енергоефективність Незначна втрата якості продуктів Придатність для великомасштабного виробництва Поліпшення смакових властивостей деяких харчових продуктів Мінімальні зміни смаку, кольору і поживних речовин Незначні або ледь помітні втрати біоактивних сполук Відсутність підвищення температури продуктів під час обробки	Високі капітальні витрати Локальні ризики від впливу радіації Недостатнє сприйняття споживачами Зміна смаку внаслідок окиснення Вищі дози можуть спричинити утворення продуктів розпаду під дією радіації Утворення вільних радикалів	Метод придатний для стерилізації Інсектицидний ефект Придатний для інших напрямів застосування (н-д, для запобігання проростанню) Придатний для збереження фруктів, овочів, трав, спецій, м'яса й риби Придатний для обробки упакованих продуктів Підходить для сирих, сухих і готових продуктів
Обробка озоном	Метод ефективний для продуктів, чутливих до термічної обробки Зменшує перехресне забруднення та утворення біоплівки на обладнанні Мінімальний вплив на якість та зовнішній вигляд продукту	Може погіршувати якість харчових продуктів Знижує антиоксидантну здатність, пов'язану з наявністю вітаміну С, каротиноїдів, антоціанів і поліфенолів у фруктах, овочах,	Подовження терміну придатності продуктів Інактивація поверхневої мікрофлори (зокрема спор) на пакувальних матеріалах / поверхнях продуктів Онлайн-дезінфекція обладнання

Технологія	Переваги	Недоліки	Застосування
		травах і спеціях Може призвести до окиснення поліненасичених жирних кислот	Ефективна обробка нестандартної упаковки
Ультразвукова обробка	Скорочення тривалості та зниження температури обробки Незначна необхідність адаптації наявного обладнання Підвищена теплопередача Періодичний або безперервний режим роботи Можливість використання окремо або в поєднанні з обробкою теплом та/або тиском Вища пропускна здатність і нижче споживання енергії Досягнення необхідного рівня патогенних мікроорганізмів у фруктових соках	Складний механізм дії Глибина проникнення залежить від вмісту сухих речовин у продукті Можливе пошкодження речовин вільними радикалами Небажана зміна структури та текстури продукту Необхідність використання в поєднанні з іншим процесом (наприклад, нагріванням) Негативно змінює деякі властивості харчових продуктів, зокрема смак, колір, харчову цінність	Метод ефективний для інактивації вегетативних клітин, спор і ферментів Мінімальний вплив на вміст аскорбінової кислоти Підвищує вихід екстракту Зберігання фруктових соків
Обробка ультрафіолетовим випромінюванням	Відсутній термічний ефект Збереження якості, текстури та поживних речовин Може бути застосовано у поєднанні з іншими технологіями нетермічної обробки Не підвищує температуру продукту й не викликає небажаних органолептичних змін На відміну від хімічних біоцидів, не змінює хімічний склад, смак, запах, рН продукту, в продукті відсутні токсини	Потрібно збільшувати дозу випромінювання для обробки в'язких рідких продуктів	Подовження терміну придатності готових до вживання продуктів Знезараження поверхні яєць і курятини Альтернативна обробка (замість пастеризації) свіжих соків Інактивація бактерій у фруктових соках і молоці Знезараження обладнання Знезараження харчових порошоків Стерилізація води й дезінфекція стічних вод Знезараження повітря та поверхонь Зменшення вмісту алергенів у харчових продуктах

Опромінення продуктів можуть здійснювати за допомогою різних джерел випромінювання, як-от гамма-променів ^{60}Co або ^{137}Cs , рентгенівських променів, електронних пучків [46]. Електронні пучки з діапазоном енергії від 3 до 10 МеВ через малу глибину проникнення здебільшого використовують для обробки поверхонь, а також для цілеспрямованого знищення бактерій, зокрема патогенів. Гамма-промені, що мають довжини хвиль коротші за 10^{-11} м, енергію понад 100 кеВ і велику проникну здатність, запобігають розмноженню бактерій, впливаючи на їхню ДНК. Рентгенівські промені з енергією від 100 еВ до 100 кеВ і довжинами хвиль від 10^{-8} до 10^{-12} м мають здатність проникнення в продукти від помірної до надзвичайно високої та можуть проникати крізь пакувальні матеріали [43].

Процес обробки полягає в ретельному опроміненні продуктів певною дозою іонізуючого випромінювання у спеціальному приміщенні для обробки на конвеєрній стрічці протягом певного періоду [47].

На ефективність опромінення продуктів впливає низка чинників: тип випромінювання, доза опромінення, температура, склад і фізичний стан продукту, активність води в продукті [37, 49].

Дози опромінення можуть бути високими, низькими або середніми залежно від продукту, який піддають опроміненню, та бажаного ефекту обробки [47, 49]. Низькі дози (10 Гр-1 кГр) затримують дозрівання плодів і овочів та пригнічують проростання коренеплодів і бульб під час тривалого зберігання; середні дози (1-10 кГр) інактивують патогени й мікроорганізми, що спричиняють псування; високі дози (більш ніж 10 кГр) можуть бути використані для стерилізації різних продуктів [49]. Для повного знищення мікроорганізмів потрібно застосовувати дуже великі дози опромінення, приблизно 150-200 кГр, оскільки мікроорганізми, особливо спори анаеробів, дуже стійкі до радіаційного впливу. Для радіаційної інактивації ферментів дози мають бути набагато більші, ніж для інактивації мікроорганізмів, приблизно 100 кГр. Проте такі великі дози опромінення неприйнятні для обробки харчових продуктів, оскільки призводять до появи в продуктах сторонніх запахів і присмаків, розкладання деяких речовин,

утворення токсичних сполук. Типова доза опромінення становить менш ніж 10 кГр [43].

Залежно від дози опромінення продуктів обробка викликає різні ефекти [48]. Запобігання псуванню продуктів пов'язане з інактивацією ферментів унаслідок розриву хімічних зв'язків, інактивацією мікроорганізмів (зокрема патогенних) через пошкодження ДНК, а також знищенням комах-шкідників. Водночас смак і текстура продуктів не змінюються. В результаті зменшуються втрати під час зберігання, подовжується термін зберігання та підвищується рівень безпеки харчових продуктів [47].

Для подовження терміну зберігання сухих продуктів (зернові й бобові культури, зернопродукти, сухофрукти, сушені овочі, харчові концентрати) їх перед зберіганням опромінюють, уникаючи тим самим розвитку шкідників [47].

Опромінення має позитивний вплив на подовження термінів зберігання упакованих м'яса, м'ясних виробів, продуктів моря. Стерилізація продуктів у герметичній тарі за допомогою іонізуючого випромінювання за доз приблизно 10-25 кГр дає змогу зберігати продукти тривалий час за кімнатної температури. Проте високі дози опромінення спричиняють зміни білків, окиснення жирів, зміну смаку й запаху продуктів, тому метод не знайшов застосування [1]. Для обробки м'яса й риби застосовують лише пастеризаційні дози (6-10 кГр). Для запобігання змінам їхньої якості опромінювання здійснюють за якомога нижчих температур – від -20 до -40 °С.

Крім цього, технологію опромінення застосовують в інших відмінних цілях. Так, для пригнічення проростання коренеплодів і бульб їх перед закладанням на зберігання опромінюють у дозі 0,08-0,1 кГр, що сприяє подовженню зберігання у весняно-літній період [47]. За допомогою опромінення забезпечують гальмування або повне пригнічення розвитку шкідливої мікрофлори під час зберігання плодово-овочевої продукції, насамперед м'яких фруктів і ягід (суниця, виноград тощо). Наприклад, обробка суниці за дози 6-10 кГр з подальшим охолодженням дає змогу збільшити термін її зберігання вдвічі, водночас втрати ягід становлять 5-10 % проти 15-25 % для неопромінених

ягід. Опромінення деяких недозрілих плодів і овочів (яблука, груші, помідори) за дози 1-5 кГр гальмує їх дозрівання та дає змогу зберігати товарну якість продукції протягом тривалого часу [1, 47].

Під час опромінення низькосортного борошна за доз 10-20 кГр відбувається «зшивання» білкових молекул, що суттєво покращує його технологічні показники, надає йому властивостей борошна із сильної пшениці. За допомогою обробки іонізуючим випромінюванням фруктових соків досягають подовження терміну їх зберігання.

За правильно підібраних оптимальних параметрів опромінення не впливає на зміну кольору і хімічного складу харчових продуктів. Вища доза опромінення може викликати втрату деяких цінних компонентів продуктів, як-от вітамінів. Найчутливішим до опромінення є вітамін Е, потім у порядку зменшення чутливості розміщені: каротин (провітамін А), вітамін А, D, К [1]. Обробка за доз від 5 кГр і вище спричиняє руйнування вітамінів, білків, вуглеводів, пігментів, посилення виділення діоксиду вуглецю та інших газів, що призводить до псування продуктів.

Для запобігання небажаним змінам під час опромінення харчових продуктів можуть застосовувати такі заходи: попередню теплову обробку продуктів для інактивації ферментів, попереднє заморожування продуктів для перетворення великої частини рідини на лід, зменшення вмісту в продукті аскорбінової кислоти для захисту харчових речовин від окиснення тощо.

Основні напрями застосування опромінення продуктів у харчовій промисловості, а також переваги й недоліки цього методу порівняно з традиційними представлено в табл. 9.

Навіть низькі дози опромінення (менш ніж 1 кГр) призводять до неабиякого зниження кількості мезофільних, психротрофних, анаеробних і аеробних бактерій. Попри занепокоєння споживачів, ця технологія обробки поступово набирає популярності завдяки її перевагам, зростаючій обізнаності споживачів і їхньому сприйняттю безпеки та якості опромінених харчових продуктів [37, 47]. Процес опромінення вважають безпечним за умови

дотримання певних параметрів обробки. Використання випромінювання у відносно низьких дозах схвалене для обробки продовольчої сировини й харчових продуктів і прийняте в більш ніж 55 країнах, зокрема США, країнах ЄС, Японії та Китаї [37].

Застосування в харчовій промисловості іонізуючого випромінювання потребує меншої витрати енергії та є економічно більш вигідним, як порівняти з іншими методами обробки. Опромінення є придатним для продуктів, чутливих до термічної обробки, водночас не змінює їхнього смаку, кольору й поживної цінності [37]. Крім того, процес обробки є екологічно безпечним, для досягнення більшого ефекту його можна поєднувати з іншими методами обробки [43]. Проте подальшого ретельного вивчення потребують санітарно-гігієнічні аспекти опромінення харчових продуктів.

Зі зростанням популярності та комерціалізації опромінення харчових продуктів може відіграти важливу роль у світі в розв'язанні проблем продовольчої безпеки і хворіб, що передаються через харчові продукти.

3.3. Обробка озоном

Озон (O_3) – ефективний антимікробний агент, що знайшов широке застосування в харчовій промисловості для подовження терміну зберігання багатьох продуктів і як дезінфекційний засіб проти різноманітних мікроорганізмів [31, 43, 44, 50-52].

Озон є сильним окисником (у 1,5 рази сильніший від хлору) [50], проте водночас нестійким, швидко зазнає рекомбінації та перетворюється на молекулярний кисень. Період напіврозпаду озону дуже короткий, зазвичай 30-40 хв у воді та 2-3 год на повітрі, хоча ці параметри можуть змінюватися залежно від температури та значень рН [51].

Озон зазвичай отримують фотохімічним способом за допомогою УФ-випромінювання та під дією електричного (коронного) розряду (високоенергетичного електричного поля) [31, 43, 44, 51].

Механізми інактивації мікроорганізмів під впливом озону пов'язані з проникненням його в клітини; деструктивною дією на компоненти клітинної мембрани, внаслідок чого збільшується її проникність; поступовим окисненням життєво важливих клітинних компонентів (амінокислот, що входять до складу білків і ферментів, і поліненасичених жирних кислот); інактивацією ферментів і руйнуванням генетичного матеріалу клітини (ДНК, РНК). Це зрештою призводить до витоку клітинного вмісту й лізису клітин [31, 43, 44, 50, 51].

Спори бактерій мають більшу стійкість до обробки озоном, ніж вегетативні клітини (табл. 10). Грампозитивні й грамнегативні бактерії мають різну стійкість до обробки. Озон ефективно інактивує бактерії *E. coli*, *Pseudomonas fluorescens*, *Leuconostoc mesenteroides*, *Listeria monocytogenes*. Водночас бактерії *E. coli* є найстійкішими, а бактерії *L. monocytogenes* – найчутливішими [51]. Озон також є сильним протигрибковим агентом як у водному розчині, так і в газоподібному стані, і він ефективніший, ніж хлор або діоксид хлору, проти найпростіших паразитів. Крім того, це ефективний противірусний агент за низьких концентрацій та малої тривалості обробки.

Озон ефективніше діє у воді, ніж у повітрі, тому під час обробки продуктів у середовищі повітря потрібно використовувати вищі його концентрації [31]. Водночас швидкість розкладання озону в повітрі зростає зі збільшенням відносної вологості повітря.

Озон має значну антиоксидантну дію проти мікотоксинів. Мікотоксини є надзвичайно шкідливими хімічними речовинами, що утворюються в продовольчій сировині, причому навіть готові харчові продукти містять слідові їх кількості. Озон здатний змінювати вміст біологічно активних сполук і впливати на функціональні властивості продуктів, покращує текстуру та знижує в'язкість крохмалю [31].

На ефективність обробки продукту озоном впливає чимало чинників: мікробне навантаження продукту, властивості наявних мікробних штамів, фізіологічний стан клітин мікроорганізмів; тип і маса продукту, властивості його поверхні, водна активність; температура, тривалість обробки, концентрація

озону та методи застосування (обробка газоподібним озоном, його водним розчином, комбінація з іншими методами) [50].

Таблиця 10.

Інактивація мікроорганізмів озоном [1]

Мікроорганізми	Інактивація (log КУО ⁴)	Умови обробки		
		тривалість, хв	концентрація озону, мг/дм ³	продукт
Бактерії				
<i>E. coli</i> O157:H7	близько 3,7	3	21-25	поверхня яблук
	близько 0,6	3	21-25	всередині яблук
<i>Listeria monocytogenes</i>	від 0,7 до 7,0	0,5	0,2-1,8	вода
<i>Shigella sonnei</i>	5,6	1	2,2	вода
<i>Yersinia enterocolitica</i>	1,0	1	5	поверхня картоплі
<i>Salmonella enteritidis</i>	1,0	0,25	8% мас.	поверхня тушки птиці
<i>Salmonella typhimurium</i>	4,3	1,67	0,23-0,26	вода
<i>Bacillus cereus</i>	6,1	11	11	суспензія спор
Цвілеві гриби та дріжджі				
<i>Aspergillus flavus</i> (конідії)	1,0	1,72	1,74	буфер рН 7,0
<i>A. niger</i> (спори)	менш ніж 1,0	5,0	0,188	вода
<i>Candida tropicalis</i>	2,0	0,3	0,02-1,0	вода
Найпростіші				
<i>Giardia lamblia</i>	2,0	1,1	0,7	вода
<i>G. muris</i>	2,0	2,8	0,5	вода
<i>Cryptosporidium parvum</i>	більш ніж 1,0	5,0	1,0	вода
<i>Naegleria gruberi</i>	2,0	2,1	2,0	вода
Віруси				
Бактеріофаг MS2	більш ніж 3,0	0,17	0,37	вода
Поліовірус типу 1	2,5-3,0	1,67	0,23-0,26	вода
Вірус гепатиту А	3,9	0,08	0,3-0,4	фосфатний буфер
Ротавірус Wa	2,0-5,0	1,0	1,9-15,9	вода

Озон використовують у харчовій промисловості як безпечний і потужний засіб для дезінфекції широкого спектру харчових продуктів, зокрема м'яса,

⁴ Колонієутворюючі одиниці мікроорганізмів

птиці, яєць, морепродуктів, плодів та овочів, соків, спецій і трав, молока та молочних продуктів, а також для контролю росту небажаних мікроорганізмів на поверхні обладнання [31].

Газоподібний озон застосовують для контролю мікробної безпеки свіжих плодів і овочів під час зберігання. Миття плодів і овочів озонованою водою здійснюють перед закладанням на зберігання в замороженому стані [31, 50, 51].

Озонування води особливо перспективне, бо дає змогу не лише досягти зниження рівня мікробного числа, але й забезпечує інактивацію шкідливих хлорорганічних сполук, що можуть бути присутні у водопровідній воді, сприяє зниженню об'єму стічних вод та організації систем оборотного водопостачання. Озон успішно використовують для обробки води в консервній промисловості. Підготовку води за допомогою озону для виробництва бутильованих вод і напоїв здійснюють вже протягом тривалого часу в США та країнах ЄС.

Обробка винограду озоном може коригувати популяцію небажаних дріжджів, як-от *Brettanomyces spp.*, і покращити тим самим ферментацію вина за участю чистих культур дріжджів. Водночас обробка озоном сприяє підвищенню концентрації у вині антоціанів, поліпшенню фізико-хімічних властивостей, кольору, рН, окисної стійкості вина та забезпеченню відповідної концентрації летких сполук, зокрема естерів [52].

Озонування можна використовувати для подовження терміну придатності рідких харчових продуктів, зокрема соків і молока, та збереження в них біологічно активних сполук [31, 43]. Низький рівень озону ($0,02-10 \text{ мг/м}^3$) покращує дозрівання та зберігання різних сортів сиру, тоді як зберігання в атмосфері озону ($5-7 \text{ мг/м}^3$ протягом 4 год що 3 доби) може запобігти появі цвілевих грибів на період до 4 міс. Водночас озонування значно поліпшує якість сирів [43].

Застосування озону в концентрації 10 мг/м^3 для обробки м'яса та птиці дає змогу подовжити термін їх зберігання. Позитивного ефекту під час зберігання м'яса досягають унаслідок щоденного одно- або дворазового озонування протягом 2-4 год [31].

Невеликі концентрації озону (до 10 мг/м³) успішно застосовують для озонування повітря сховищ, холодильних камер, технологічних ділянок для подовження терміну зберігання плодів і овочів, яєць, вершкового масла, м'яса, риби тощо. Для знезараження тари й технологічного обладнання в молочній, пивоварній та інших галузях харчової промисловості застосовують озоновану воду й газоподібний озон.

Основні напрями застосування обробки продуктів озоном у харчовій промисловості, а також переваги й недоліки цього методу порівняно з традиційними представлено в табл. 9.

Озонування є перспективним, екологічно безпечним та економічно ефективним методом обробки з низькими експлуатаційними витратами і відсутністю потреби в очищенні чи утилізації відходів. Проте попри низку позитивних ефектів озон може погіршувати якість харчових продуктів. Тому використання озону має бути детально вивчене й оптимізоване для збереження відповідних органолептичних властивостей продуктів (кольору, зовнішнього вигляду, текстури, смаку) [51]. Обробка озоном через його потужну окиснювальну дію значно знижує антиоксидантну здатність, пов'язану з наявністю вітаміну С, каротиноїдів, антоціанів і поліфенолів у фруктах, овочах, травах і спеціях. На відміну від термічної обробка озоном не впливає на білок і амінокислоти. Високі концентрації озону можуть призвести до окиснення поліненасичених жирних кислот [43].

3.4. Обробка ультразвуком

Ультразвукова (УЗ) обробка продуктів полягає в застосуванні звукових хвиль з частотою понад 20 кГц для інактивації ферментів та мікроорганізмів, подовження терміну зберігання продуктів, поліпшення масообміну, зміни текстури, вилучення цільових речовин [31, 43, 44, 53-58].

Під час проходження УЗ-хвиль крізь оброблюване середовище механічні коливання створюють високочастотні цикли стиснення (ущільнення) та розрідження (розширення). Це призводить до утворення мікроскопічних

кавітаційних бульбашок, які за високої потужності ультразвуку розподіляються по всьому об'єму рідини, протягом кількох циклів збільшуються до критичного розміру і під дією високого тиску швидко руйнуються, генеруючи ударні хвилі та локальні «гарячі» точки (тиск до 100 МПа, температура до 5000 К) [31, 37, 44, 53-58]. Під час поширення в середовищі УЗ-хвилі переносять енергію, що може безпосередньо використовуватись у технологічних процесах або перетворюватись на інші різновиди енергії (теплову, хімічну, механічну).

УЗ-хвилі низької інтенсивності (менш ніж 1 Вт/см^2) з частотами вище 100 кГц завдяки здатності оцінювати структуру й фізико-хімічні властивості харчових продуктів під час переробки та зберігання відносять до діагностичних хвиль [31, 43, 55]. УЗ-хвилі високої інтенсивності (від 10 до 1000 Вт/см^2) високої та низької частоти (від 20 до 100 кГц) вважають руйнівними, оскільки вони значно змінюють фізичні, хімічні, біологічні та механічні характеристики продуктів, на відміну від УЗ низької інтенсивності, які практично не впливають на ці властивості [31, 55].

Вплив ультразвуку на мікроорганізми різноманітний і залежить від його інтенсивності та тривалості дії. За малої інтенсивності $2\text{-}3 \text{ Вт/см}^2$ і частоти 100-1000 кГц коливання частинок середовища сприяють кращому обміну речовин у клітинах мікроорганізмів. Підвищення інтенсивності ультразвуку призводить до виникнення в середовищі кавітації, а отже, і до механічного руйнування клітин [37, 43, 44, 53-56]. Грампозитивні бактерії більш стійкі до впливу ультразвуку завдяки товстішій і жорсткішій білковій оболонці в їхній клітинній структурі [53]. Зародками кавітації є газові бульбашки, наявні в середовищі.

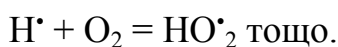
На ефективність обробки впливають частота та інтенсивність ультразвуку, а також характеристики оброблюваного продукту, як-от його об'єм і структура, наявність у середовищі розчиненого газу, температура, рН, тип і кількість мікроорганізмів, присутніх у продукті [53].

Під час поширення ультразвуку в середовищі відбувається його поглинання й перетворення акустичної енергії в теплову. Утворення тепла є нерівномірним. Локальне нагрівання на частки або одиниці градусів, зазвичай,

сприяє життєдіяльності мікроорганізмів, оскільки для процесів обміну речовин характерна температурна залежність. Проте підвищення інтенсивності ультразвуку та збільшення тривалості його дії спричиняють надмірне нагрівання й загибель мікроорганізмів.

Причиною змін, які виникають у середовищі під дією ультразвуку, можуть бути також вторинні ефекти фізико-хімічного характеру. Завдяки акустичним потокам відбувається енергійне перемішування внутрішньоклітинних мікроскопічних структур. Ультраакустичні коливання можуть підвищувати проникність клітинних оболонок і пришвидшувати процеси обміну речовин.

Кавітація в середовищі призводить до розриву молекулярних зв'язків [31, 37, 55]. Першопричиною окиснювальної дії ультразвуку є утворення вільних радикалів [53]. Так, радикали $\text{H}^\bullet$ і $\text{HO}^\bullet$ утворюються внаслідок розриву молекули води:



Аналогічно відбувається розщеплення під дією ультразвуку високомолекулярних сполук, зокрема нуклеїнових кислот і крохмалю [53, 55]. Кавітаційні процеси спричиняють у молекулах білка розрив кільця циклічних амінокислот, дезамінування амінокислот і розщеплення пептидного зв'язку. Ультразвук спричиняє зміну рН у лужний або кислий бік залежно від його інтенсивності та тривалості дії.

В діапазоні низьких частотах (20-100 кГц) переважає механічний ефект, за середніх частот (200-500 кГц) – хімічний ефект, тоді як за високих частот (більш ніж 1 МГц) хімічний і фізичний ефекти мінімальні, переважає вплив акустичного потоку [55]. Високі частоти зазвичай використовують для обробки продуктів з ніжною структурою, що можуть зазнати пошкоджень в умовах кавітації.

Є два типи перетворювачів, а саме магнітострикційні та п'єзоелектричні, які здебільшого використовують для генерації ультразвуку [43, 44, 53, 55].

Застосування ультразвуку охоплює майже всі технологічні операції харчових виробництв, починаючи від інспекції і сортування сировини та закінчуючи обробкою і зберіганням продуктів. УЗ-обробку можна вважати універсальною. Використання цієї технології окремо або в поєднанні з іншими методами може забезпечити підвищення виходу й поліпшення якості продуктів. Ультразвук суттєво сприяє низці промислових процесів, як-от фільтрації, заморожуванню, розділенню, сушінню, емульгуванню, розморожуванню, засолюванню, окисненню, гомогенізації, тендеризації м'яса, кристалізації, піногасінню, диспергуванню, розчиненню, поліпшенню консистенції, стерилізації, пастеризації, зміни в'язкості, ферментації та екстракції завдяки здатності поліпшувати енерго- й масообмін, змішування, збереження характеристик продуктів, а також зменшувати градієнти температури й концентрації [31, 37, 43, 44, 53-58].

Пастеризація молока за допомогою ультразвуку за кімнатної температури сприяє збереженню в ньому корисних речовин, які руйнуються внаслідок термічної обробки [58]. Застосування ультразвуку у виробництві молочних продуктів (сметани, сиру, кефіру, йогуртів тощо) дає змогу набагато поліпшити їхню якість, знизити рівень застосування консервантів і хімічних добавок, подовжити термін зберігання, знищити мікроорганізми, зокрема патогенні [55].

У виробництві хліба та хлібобулочних виробів за допомогою ультразвуку готують стійкі водно-жирові емульсії різних концентрацій і консистенції. Додавання в тісто таких емульсій поліпшує якість хлібобулочних виробів. Бродильна енергія оброблених ультразвуком хлібопекарських дріжджів підвищується в середньому на 15 %. Крім того, в оброблених дріжджах підвищується вміст ергостерину, з якого отримують високоактивний вітамін D.

Ультразвук пришвидшує кристалізацію сахарози й дає змогу отримати однорідну масу під час виготовлення кремів і помадок поліпшеної якості у виробництві кондитерських виробів [31, 54]. Під дією ультразвуку поліпшуються специфічні та смакові властивості шоколаду, скорочується тривалість його обробки. Крім того, в разі використання ультразвуку виникає

можливість заміни цукрової пудри на цукрову емульсію, що сприяє створенню безпечних умов праці.

У виробництві м'ясних продуктів під час виготовлення сосисок, сарделенок, вареної ковбаси ультразвуком обробляють фарш з водно-жировою емульсією, в результаті чого отримують соковиті ковбасні вироби. Ультразвук дає змогу пришвидшити процес соління м'яса, водночас сіль у тканинах м'яса розподіляється рівномірніше, м'ясо набуває рівномірного рожевого забарвлення [53-55]. У виробництві рибних продуктів ультразвук прискорює їх соління та сушіння [53], вилучення жиру з печінки риб, підвищує якість риб'ячого жиру завдяки збереженню цінних вітамінів А і D.

У консервній промисловості ультразвук застосовують для приготування овочевих і фруктових консервів-пюре. У процесі приготування соків ультразвук дає змогу збільшити вихід соку, пришвидшити процес освітлення та очищення соку, у десятки разів пришвидшити випадання винного каменю під час переробки в сік винограду. Крім того, ультразвук значно підвищує кількість біоактивних сполук (каротиноїдів, аскорбінової кислоти, фенолів і флавоноїдів) та антиоксидантну активність соку порівняно з термічною обробкою [56].

За допомогою ультразвуку досягають інтенсифікації процесу солодощення та поліпшення якості отриманого солоду. У виробництві пива ультразвук прискорює екстрагування гірких речовин з хмелю, сприяє кращому збереженню в ньому ароматичних речовин, дає змогу скоротити витрати хмелю та пришвидшити процес бродіння [43].

Ультразвук пришвидшує технологічні процеси отримання безалкогольних напоїв, концентратів і екстрактів, поліпшує якість та пришвидшує процеси виробництва настоянок, лікерів, коньяків та інших алкогольних напоїв. Тривалість процесу дозрівання настоянок скорочується від кількох місяців до кількох діб і навіть годин. У результаті обробки меду подовжується термін його зберігання без зниження смакових і споживчих властивостей. Ультразвук інтенсифікує процеси ферментації, швидкість яких може зростати в десятки разів [54]. Також ультразвук застосовують у процесі вініфікації винограду для

руйнування клітинних стінок за допомогою кавітації, що сприяє екстракції фенольних сполук з винограду.

Завдяки потужному кавітаційному полю та капілярному ефекту за допомогою ультразвуку можна не лише пришвидшити процес фільтрування, а й очищати фільтрувальні елементи від забруднень [53-55]. Цей метод застосовують як для металевих і полімерних фільтрувальних елементів, так і для керамічних фільтрів і ультрафільтраційних мембран. За допомогою УЗ-фільтрування можна розділяти рідкі неоднорідні системи.

Метод безреагентного знезараження й очищення води, що ґрунтується на комплексному застосуванні ультразвуку, ультрафіолету, магнітного поля, мембранних технологій, дає змогу не тільки очистити й знезаразити воду, а й поліпшити якість питної води. Під дією ультразвуку проводять дегазацію (деаерацію) рідин, зокрема води [53, 55].

Застосування ультразвуку в процесі сушіння може скоротити тривалість сушіння фруктів, овочів, м'яса й риби, водночас зростає швидкість тепло- й масообміну, що сприяє збереженню якості продукту [31, 53, 55]. Під час регідратації сушених продуктів (овочів, зернових) під впливом ультразвуку скорочується тривалість процесу [53, 55].

УЗ-обробка прискорює чимало масообмінних процесів (розчинення, екстракції тощо), перебіг яких обмежений швидкістю дифузії. Принцип УЗ-екстракції полягає у виникненні кавітації, внаслідок чого розриваються клітинні стінки рослинної сировини, що сприяє вивільненню біоактивних хімічних речовин [43, 57]. Під час приготування емульсій у виробництві соусів і майонезів ультразвук покращує їхні реологічні властивості та стабільність, водночас зменшується тривалість процесу [53-55].

Ультразвук інтенсифікує та поліпшує заморожування молочних продуктів, фруктів, овочів і м'яса завдяки збереженню мікроструктури, утворенню кристалів малих розмірів, швидкому зниженню температури. У процесі розморожування ультразвук сприяє скороченню тривалості процесу,

збереженню кольору заморожених продуктів, пригніченню окиснення ліпідів, покращенню якості продуктів, зменшенню рівня їх зневоднення [31, 53-55].

За допомогою ультразвуку очищають від забруднень метали, скляні, керамічні та інші матеріали, водночас забезпечуючи високу якість очищення й антимікробну дію. Крім того, наявні тепер методи УЗ-очищення повітря та знезараження й очищення промислових стоків дають змогу ефективно і комплексно розв'язувати екологічні проблеми.

Основні напрями застосування обробки продуктів ультразвуком у харчовій промисловості, а також переваги й недоліки цього методу порівняно з традиційними представлено в табл. 9. Попри те, що застосування ультразвуку має чимало переваг, в окремих випадках після обробки погіршуються властивості харчових продуктів (смак, колір, харчова цінність). Ліпше розуміння складного механізму дії ультразвуку, а також впливу ультразвуку на властивості харчових продуктів сприятиме впровадженню цієї технології в галузі [37]. Для збереження органолептичних характеристик продуктів необхідна оптимізація параметрів УЗ-обробки [44].

3.5. Обробка ультрафіолетовим випромінюванням

Обробка ультрафіолетовим (УФ) випромінюванням набирає популярності в харчовій промисловості як швидкий і недорогий спосіб стерилізації як рідких, так і поверхні твердих харчових продуктів, який також часто використовують як дезінфекційний засіб для поверхонь, води і повітря [31, 37, 43, 59-64].

УФ-випромінювання охоплює область електромагнітного спектра між видимим світлом і рентгенівськими променями з довжиною хвиль 100-400 нм (рис. 4) [31, 37, 43, 59, 61, 63].

УФ-випромінювання, що має велику енергію, виявляє сильну хімічну й біологічну дію. Дія різних ділянок УФ-спектра неоднакова. Промені з довжиною хвиль від 315 до 400 нм є хімічно активними, а з довжиною хвиль у межах 200-330 нм – біологічно активними, що сприяють синтезу в організмі вітаміну А. Промені з довжиною хвиль від 200 до 280 нм (бактерицидна ділянка)

пригнічують життєдіяльність мікроорганізмів і спричиняють їх загибель. Максимальну бактерицидну дію виявляють промені з довжиною хвилі приблизно 254 нм [60]. За променями з довжиною хвилі 200 нм лежить озонова ділянка спектра.

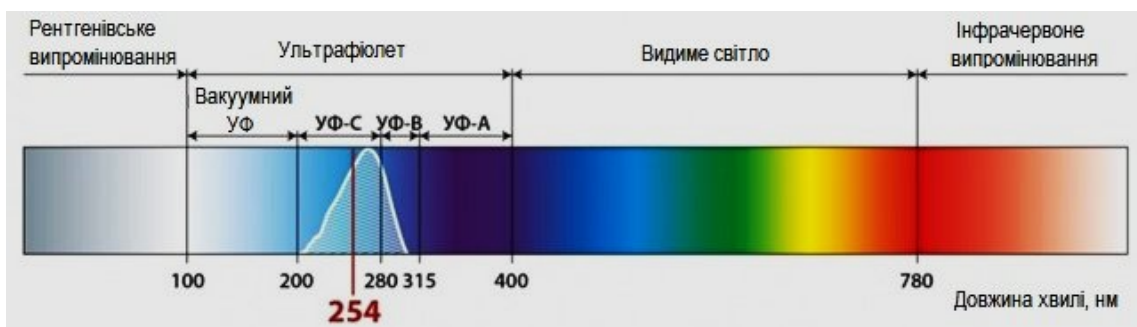


Рисунок 4. Діапазони УФ-випромінювання⁵

УФ-випромінювання поділяють на три діапазони: УФ-А (320-400 нм), УФ-В (280-320 нм) та УФ-С (200-280 нм) (рис. 4) [31, 43, 59, 61, 64]. УФ-С-випромінювання вважають бактерицидним, оскільки воно спричиняє незворотні пошкодження структури ДНК клітин мікроорганізмів [31, 43, 59-61, 64]. Пік антимікробної активності хвиль УФ-С співпадає з піком поглинання ДНК, що призводить до інактивації мікробів і руйнування білків.

УФ-С-випромінювання пошкоджує нуклеїнові кислоти мікроорганізмів, головно через утворення димерів піримідинових основ між сусідніми піримідинами в ланцюзі ДНК, що запобігає реплікації мікробів і зрештою призводить до загибелі клітин [64]. Продукти розкладу ДНК, утворені внаслідок фотохімічних реакцій під впливом УФ-випромінювання, є індикаторами мутації ДНК й загибелі клітин. Крім того, утворені під час УФ-опромінення активні форми кисню здатні окиснювати мембранні ліпіди та інгібувати важливі клітинні ферменти. Більшість ферментів, що містять ароматичні амінокислоти, ймовірно,

⁵ Ahmed, N., Mahammedi, A. (2020). Standalone Solar-Powered Ultraviolet Mobile Disinfectant : Bringing Solar Energy in the Global Fight against COVID-19. <https://doi.org/10.20944/preprints202005.0415.v1>

тією чи іншою мірою чутливі до УФ-випромінювання через їх поглинання в цій ділянці [31, 37, 60].

Ефективність УФ-обробки залежить від параметрів процесу (тривалості обробки, дози УФ-випромінювання, довжини хвилі, джерела УФ-світла), типу продукту (хімічного складу, в'язкості, каламутності, кольору тощо), обладнання, а також характеристик мікроорганізмів (виду, початкової концентрації, фази росту, умов відновлення) [59, 60, 63, 64].

УФ-випромінювання згубно діє на бактерії, віруси, цвілеві гриби, найпростіші, притім ефективніше інактивує грамнегативні бактерії, ніж грампозитивні [64]. Це пов'язано з відмінністю у структурі пептидоглікану клітинної стінки бактерій, що може впливати на проникнення випромінювання. Крім того, еукаріоти зазвичай стійкіші до УФ-випромінювання, ніж бактерії, через складність будови й більші розміри їхніх клітин. Відносно висока стійкість дріжджів до УФ-випромінювання також пов'язана з нижчим вмістом піримідину в ДНК порівняно з бактеріями, що може збільшити ймовірність поглинання фотонів іншими сполуками. Отже, на ефективність УФ-С-обробки впливають чинники, пов'язані з фізіологією клітин, тому для інактивації стійкіших мікроорганізмів потрібна триваліша обробка [60]. Доза опромінення, необхідна для забезпечення інактивації 90 % *Staphylococcus aureus* (індикаторні бактерії) становить 6 мДж/см², для мезофільних аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів (МАФАНМ) – 30-50, дріжджів – 40-70, цвілевих грибів – 50-100 мДж/см². Безспоріві бактерії гинуть швидше, ніж споріві. УФ-опромінення в поєднанні з впливом температури має найбільший ефект.

УФ-випромінювання має значний потенціал щодо застосування в харчовій промисловості як альтернатива традиційній термічній обробці. УФ-випромінювання застосовують для обробки рідких продуктів (води, фруктових та овочевих соків, алкогольних і безалкогольних напоїв тощо), пастеризації молока й молочних продуктів, обробки морепродуктів, м'яса й м'ясних продуктів, подовження терміну зберігання свіжих плодів і овочів, обробки повітря, а також поверхонь, що контактують з продуктами [31, 37, 43, 44, 59-64].

УФ-С-випромінювання використовують для очищення повітря на підприємствах харчової промисловості. УФ-лампи встановлюють у вентиляційних установках для стерилізації повітря під час його циркуляції в приміщенні, в результаті чого зменшується ризик забруднення повітря. Дезінфекцію повітря здійснюють шляхом опромінення лише верхніх частин приміщення або всього об'єму повітря, в порожньому приміщенні або за допомогою кондиціонера. УФ-випромінювання також використовують для дезінфекції поверхонь, зокрема виробничого обладнання, ділянок приготування продуктів і пакування готової продукції, пакувальних матеріалів для харчових продуктів. Для контролю росту поверхневих мікроорганізмів підходять ртутні лампи низького тиску, оскільки 90 % випромінюваного світла має довжину хвилі 253,7 нм [64].

УФ-С-випромінювання впродовж тривалого часу застосовують для дезінфекції води, яку використовують у харчових виробництвах, а також для запобігання розмноженню шкідливих бактерій та інших мікроорганізмів у системах комунального водопостачання [37, 59, 63, 64].

Для знезараження питної води рекомендовано мінімальну дозу УФ-опромінення 16 мДж/см^2 , що забезпечує зниження кількості патогенних бактерій у воді не менш ніж на 5 порядків, індикаторних бактерій – на 2-6 порядків, вірусів – на 2-3 порядки. Ефективність знезараження мало залежать від рН і температури води та деякою мірою залежить від її складу, зокрема наявні у воді суспензії екранують забруднення й поглинають частину випромінювання.

Найважливішими перевагами УФ-обробки води є відсутні зміни фізичних і хімічних характеристик води навіть за доз, що набагато перевищують оптимальний діапазон, відмова від додаткових реагентів, які можуть змінювати органолептичні характеристики продуктів.

Проте очищена за допомогою УФ-випромінювання вода може знову забруднюватися на подальших стадіях обробки чи транспортування, тобто ефект післядії відсутній. Щоб усунути цей недолік, УФ-обробку поєднують з іншими методами знезараження і фізичними впливами. Так, одночасна обробка води УЗ-

й УФ-випромінюванням, введення малих доз озону після УФ-обробки дає змогу зменшити необхідну дозу опромінення і гарантувати повне знезараження води навіть за наявності завислих частинок. Введення невеликих доз активного хлору, обробка води сріблом, міддю, йодом забезпечують ефект післядії. УФ-випромінювання в діапазоні 100-200 нм викликає утворення озону з молекул розчиненого у воді кисню та безпосередньо впливає на молекули органічних сполук. Використання потужних імпульсних ксенонових ламп дає змогу глибоко очищати воду від забруднень нафтопродуктами, пестицидами, токсичними й мутагенними циклічними органічними сполуками.

УФ-С-випромінювання використовують для подовження терміну придатності свіжих, мінімально оброблених і рідких продуктів (зокрема фруктовий і овочевих соків, виноградного сусла, сидру, молока та молочних продуктів, сироватки) шляхом зменшення мікробного навантаження та запобігання псуванню [31, 59-64]. УФ-випромінювання відбивається від поверхонь і має слабку проникну здатність у рідких продуктах (напоях, молоці тощо), тому рідкі продукти пастеризують, пропускаючи тонким шаром крізь ділянку УФ-опромінення.

Обробка охолодженого м'яса та риби УФ-випромінюванням протягом 4-10 хв дає змогу суттєво подовжити термін їх зберігання [31, 60].

Ще одним напрямом застосування УФ-випромінювання є усунення небажаних летких органічних сполук у промислових газових викидах. Розклад цих речовин відбувається завдяки сучасним процесам окиснення, що поєднують УФ-випромінювання з фотокаталізаторами, зокрема TiO_2 [59, 64].

Обробку УФ-С-випромінюванням можна використовувати для поліпшення або збереження властивостей і харчової цінності плодів і овочів [31, 59, 60, 64]. Під впливом УФ-С-випромінювання певні сполуки в харчових продуктах можуть активуватися або трансформуватися, що призводить до утворення біоактивних сполук. Так, вплив УФ-С-випромінювання підвищує рівень фенольних сполук та антиоксидантну активність у полуничному соку, рівень певних фітохімічних речовин у рослинних продуктах [31, 59].

Основні напрями застосування обробки продуктів УФ-випромінюванням у харчовій промисловості, а також переваги й недоліки цього методу порівняно з традиційними представлено в табл. 9. В процесі УФ-обробки зниження харчової цінності та зміна органолептичних показників продуктів мінімальні, водночас не утворюються побічні шкідливі продукти, крім того, метод більш енергоефективний, ніж традиційна теплова обробка.

Розділ 4. Сучасні холодильні технології обробки

У харчовій промисловості охолодження застосовують для зберігання продуктів (уповільнення біохімічних і мікробіологічних змін) та проведення низки технологічних процесів (кристалізації, розділення газів, сублімаційного сушіння, деяких хімічних процесів).

Ріст мікроорганізмів є найважливішим чинником, який обмежує термін придатності та якість свіжих харчових продуктів. Свіжі продукти, особливо м'ясо й риба, є швидкопсувними, що пов'язано з їхнім складом. Термін придатності охолоджених продуктів обмежений головно через мікробну активність, тому контроль мікробної активності під час обробки, розподілу та зберігання продуктів є ключем до подовження терміну їх придатності [65-69].

Температура є одним з найважливіших параметрів, що впливають на ріст мікроорганізмів. Швидкість процесів псування харчових продуктів також залежить від температури. Для зменшення псування й біохімічного розкладу під час зберігання та розповсюдження харчових продуктів використовують різні методи консервації, переважно засновані на охолодженні до низьких температур. Здебільшого використовують такі методи зберігання: охолоджених продуктів за температури від 0 до 4 °C, переохолоджених – за температури в діапазоні від -1 до -4 °C, а також заморожених – за температури від -18 до -40 °C [65, 68, 69].

Консервація продуктів зниженням температури має суттєві переваги в збереженні їхніх органолептичних властивостей і харчової цінності для отримання продуктів високої якості. Зазвичай, що нижча температура, то довше можуть зберігатися продукти [65, 68, 69]. Витрати, пов'язані з підтриманням температури охолоджених і заморожених продуктів у всьому ланцюзі розподілу, є основними в цій галузі [65].

Для виробництва деяких продуктів використовують концентрування виморожуванням і сублімаційне сушіння, що дає змогу надалі зберігати їх за температури навколишнього середовища [73-75].

Охолодженням знижують температуру продуктів до -1 – $+8$ °C, а під час заморожування – до нижчої температури для зміни стану частини води, наявної в продуктах, з утворенням кристалів льоду. Заморожені продукти мають термін придатності місяці або роки, тоді як свіжі продукти – доби або тижні [65, 68, 69].

Є два методи відведення тепла від продуктів для їх охолодження й заморожування: механічне стиснення парів з використанням холодоагентів і застосування кріогенних речовин. Холодоагенти повторно використовують у безперервному холодильному циклі, тоді як кріоагенти втрачаються в атмосферу [70].

4.1. Інноваційні методи охолодження

Охолодження полягає в зниженні температури продукту до -1 – $+8$ °C відведенням від нього тепла, що здійснюють для зменшення швидкості перебігу біохімічних і мікробіологічних процесів, а отже, подовження терміну зберігання свіжих і оброблених харчових продуктів. Охолодження спричиняє мінімальні зміни органолептичних властивостей і харчової цінності продуктів, у зв'язку з чим споживачі сприймають охолоджені продукти як високоякісні [67].

Останнім часом спостерігають неабияке розширення ринку охолоджених продуктів харчування [67]. Застосування функціональних інгредієнтів, зокрема пробіотиків і омега-3-жирних кислот, також сприяє збільшенню асортименту охолоджених продуктів.

Охолоджені продукти поділяють на три категорії відповідно до діапазону температур їх зберігання: від -1 до $+1$ °C, від 0 до $+5$ °C, від 0 до $+8$ °C. Для охолодження свіжих плодів та овочів до температури зберігання потрібно відвести як тепло продукту, так і тепло, утворене внаслідок дихальної активності. Проте не всі продукти можна охолоджувати. Тропічні, субтропічні й деякі вирощені в помірному кліматі фрукти втрачають якість під час охолодження до температур, вищих на 3 – 10 °C від точки замерзання [67].

Застосування охолодження дає чималий ефект на всіх етапах просування продуктів до споживача. Основна мета охолодження полягає в уникненні або максимальному уповільненні зміни стану продукції. Для посилення ефекту використовують додаткові способи обробки: введення антибіотиків або антиоксидантів, озонування, УФ-опромінення, обробку електромагнітним полем, герметичне й селективне упакування, застосування спеціальних газових середовищ з підвищеним вмістом азоту, вуглекислого газу й зі зменшеним вмістом кисню.

Для забезпечення ефективного зберігання необхідне налагодження безперервного холодового ланцюга від етапу збирання сировини до споживання продукту [66]. Холодовий ланцюг складається з двох різних типів операцій. У таких процесах, як первинне та вторинне охолодження / заморожування, метою є зменшення середньої температури продуктів. В інших, як-от зберігання, транспортування та демонстрація в роздрібній торгівлі охолоджених або заморожених продуктів, головною метою є підтримка температури продуктів.

Відведення необхідної кількості тепла від продукту є складною, трудомісткою й енергоємною операцією, але критично важливою для функціонування холодового ланцюга. У міру того, як продукт рухається холодовим ланцюгом, стає все важче контролювати й підтримувати його температуру [66]. Стабільність режимів температури й вологості в холодовому ланцюзі – основа гарантування безпеки та забезпечення якості швидкопсувної продукції. Розриви в холодовому ланцюзі можуть завдати непоправної шкоди якості продукції.

До сучасних і перспективних методів охолодження належать гідроохолодження, примусове повітряне, вакуумне, суперохолодження, глибоке, магнітне охолодження [67].

Гідроохолодження. Гідроохолодження (занурення в охолоджену воду або розсіл) застосовують для охолодження свіжозібраних плодів і овочів, для попереднього охолодження м'яса та птиці перед заморожуванням, охолодження

риби морською водою, охолодження сиру за допомогою прямого занурення в охолоджений розсіл.

Вода є найпоширенішим холодоагентом завдяки високій теплоємності та коефіцієнту тепловіддачі, а також доступності. Охолодження здійснюють підземною (артезіанською) водою, що має температуру $+8$ - $+15$ °C, а також охолодженою оборотною водою.

Охолодження водою здійснюють зануренням продуктів у холодну воду, розбризкуванням води над продуктами або використовують для цього поверхневі теплообмінники. Швидкість охолодження водою набагато вища, ніж повітрям. Крім того, додавання у воду антисептиків (табл. 11) поряд з охолодженням зменшує ймовірність псування продуктів унаслідок розвитку мікроорганізмів, водночас зменшуються до мінімуму втрати маси продукції [67].

Таблиця 11.

Дезінфікуючі засоби, які використовують під час гідроохолодження плодів і овочів [67]

Дезінфікуючий засіб	Переваги	Недоліки
1-Метилциклопропен	Швидке охолодження поверхні, що пригнічує утворення етилену	Нестабільний у рідкій фазі
ClO_2	Антимікробні, антиоксидантні властивості, зберігає якість, запобігає гниттю протягом подальшого зберігання	Викликає зміни пігменту
CaCl_2	Застосовують проти потемніння	
NaOCl	Швидке охолодження, зменшення кількості дріжджів і цвілевих грибів	

Найчастіше цей метод використовують для часткового зниження температури. Внаслідок інтенсифікації теплообміну скорочується тривалість процесу, відсутні втрати маси продукту.

Однак контактне охолодження незапакованих продуктів у рідкому середовищі має недоліки, що здебільшого пов'язані з частковим екстрагуванням

складових частин продукту та поглинанням поверхневими шарами деякої кількості охолоджувального середовища.

Охолодження у вологонепроникній упаковці унеможливорює безпосередній контакт продукту з навколишнім середовищем і тим самим усуває зазначені недоліки. Проте в цьому випадку потрібні додаткові витрати на пакування продукту.

Примусове повітряне охолодження. Для охолодження широкого асортименту харчових продуктів використовують циркуляцію повітря з температурою $-10\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$ за швидкості 4 м/с в охолоджувальних камерах періодичним або безперервним способом у тарі або без неї.

Найкращого технологічного ефекту охолодження досягають у камерах тунельного типу з поздовжньою або поперечною примусовою циркуляцією повітря, що забезпечує рівномірне охолодження продукції в усьому об'ємі. Для інтенсифікації процесу охолодження повітря перенасичують вологою, що сприяє збільшенню коефіцієнта його тепловіддачі.

На продуктивність примусового охолодження повітрям, швидкість процесу, збереження якості продуктів і витрати енергії впливає низка чинників. Швидкість охолодження залежить від характеристик продуктів (розміру та форми, складу, розташування в охолоджувальній камері) та характеристик повітря (температури, швидкості та відносної вологості) [67].

Вакуумне охолодження. Цей метод полягає в тому, що за низького тиску (під вакуумом) відбувається випаровування частини вологи, яку містить продукт. Метод ефективний у поєднанні з попереднім промиванням або частковим охолодженням у воді з подальшим вакуум-охолодженням. Під час охолодження вода, поглинута поверхневим шаром продукту, випаровується.

Вакуумне охолодження застосовують для зниження температури свіжих продуктів (плодів і овочів, зокрема зелених листових), хліба та хлібобулочних виробів, рідких продуктів (пива, молока, соків, соусів). Під час охолодження продукт поміщають у вакуумну камеру, в якій знижують тиск до 0,5 кПа. Охолодження відбувається в міру випаровування вологи з поверхні продукту. Зі

зменшенням вмісту вологи на 1 % температура знижується приблизно на 5 °С. Якщо температура продукту вище 100 °С, застосовують випарне охолодження [1].

Останнім часом вакуум-охолодження успішно застосовують у поєднанні з методом модифікованої атмосфери для деяких свіжих продуктів з метою покращення ефективності охолодження шляхом підвищення концентрації вуглекислого газу та кисню, тим самим знижуючи активність мікроорганізмів. Відмінність цього методу полягає в тому, що охолоджувальний ефект досягається шляхом випаровування певної кількості води з продукту в контрольованій газовій атмосфері оптимального складу: 7 % O₂, 7 % CO₂ та 86 % N₂. Ці умови забезпечують збереження кольору, вітаміну С та зниження швидкості дихання овочів під час зберігання за температури 4 °С протягом 21 доби. Водночас на процес охолодження та кінцеву якість продуктів впливає їхня шпаруватість, тоді як морфологія не впливає [67].

Суперохолодження. Ця технологія полягає у зниженні температури продукту до 1-2 °С нижче початкової точки замерзання. Процес суперохолодження складається з двох етапів. На першому етапі залежно від часових і температурних умов та швидкості процесу відбувається заморожування приблизно 30-35 % початкової кількості води (часткове заморожування). На поверхні продукту утворюється тонкий шар кристалів льоду. На другому етапі здійснюють зберігання продукту за температури на 1-2 °С нижче початкової точки замерзання. На цьому етапі шар льоду, що утворився на першому етапі, поглинає тепло від центральної незамороженої частини продукту. Встановлюється теплова рівновага з однаковою температурою та рівномірним розподілом кристалів льоду в усьому об'ємі продукту [65, 68].

Температури нижче точки замерзання пригнічують ріст мікроорганізмів і ендогенну активність ферментів. Отже, суперохолодження не тільки продовжує термін зберігання продуктів, але й дає змогу зберегти їхню свіжість. Крім того,

супероохолодження мінімізує необхідність частого заморожування і розморожування, знижуючи тим самим споживання енергії та подальший вплив на довкілля [68]. Тепер зберігання в супероохолодженому стані широко застосовують для плодів і овочів [69].

Глибоке охолодження. Для збереження продуктів за температур нижче -5 – -20 °C як низькотемпературні агенти застосовують лід, охолоджувальні суміші (суміші льоду з різними солями), розсоли (розчини хлористого кальцію, хлористого натрію тощо) і пари рідин, що киплять за низьких температур [65]. У деяких країнах застосовують охолодження продуктів рідким азотом у камерах зберігання чи в транспортних засобах.

Магнітне охолодження. Завдяки магнітокалоричному ефекту деякі металеві сплави нагріваються під впливом магнітного поля й охолоджуються після припинення цього впливу. Цей ефект використовують, зокрема, у теплових насосах, які переносять тепло із середовища з нижчою температурою в середовище з вищою. За магнітного охолодження практично відсутні втрати, відсутнє утворення пари, немає необхідності відведення тепла в холодильник, відсутній тиск, нульові значення показника руйнування озонowego шару ODP і потенціалу глобального потепління GWP. У перспективі – створення ефективного, екологічно безпечного й компактного холодильного обладнання, робота якого базуватиметься на принципі магнітокалоричного ефекту [70].

Консервація продуктів зниженням температури має суттєві переваги в збереженні їхніх органолептичних властивостей і харчової цінності. Так, охолодження плодів і овочів зменшує швидкість дихання й ферментативну активність, а отже, запобігає розм'якшенню, втраті води та в'яненню. Крім того, охолодження запобігає росту мікроорганізмів і тим самим гниттю під час зберігання. Охолодження пригнічує утворення етилену та вплив на чутливі до етилену продукти [69].

Існує широкий спектр методів охолодження для подовження терміну придатності харчових продуктів. Для охолодження деяких типів продуктів

можуть бути застосовні лише певні методи, ефективність яких оцінюють за впливом на показники якості охолоджених продуктів.

4.2. Інноваційні методи заморожування

Заморожування, що полягає в перетворенні в лід майже всієї кількості води, наявної у продукті, забезпечує більшу стійкість продуктів під час зберігання. Так, швидкопсувні продукти в замороженому стані можуть зберігатися протягом року й довше. Водночас важливо забезпечити збереження їхніх органолептичних властивостей і харчової цінності [71, 72].

Під час заморожування вода перетворюється в лід, що перешкоджає живленню мікроорганізмів, призводить до різкого зменшення швидкості біохімічних реакцій, які перебігають у продукті [72]. Імобілізація води у формі льоду й концентрування розчинених речовин у незамерзлій воді знижують у продукті активність води (a_w). Водночас розчинені речовини діють як кріопротектори, що зменшують пошкодження тканинних клітин. Це забезпечує збереження текстури продукту, коли температура заморожування є нижчою від температури зберігання в замороженому стані. Перетворення води в лід споріднене з ефектом зневоднення, адже в обох випадках зменшується кількість води. Відмінність полягає в тому, що під час заморожування вологу перетворюють у лід, тоді як під час зневоднення її видаляють.

Заморожування продуктів застосовують для різних цілей: зберігання продуктів упродовж тривалого часу; вилучення води під час концентрування рідких продуктів; зміни фізичних властивостей продуктів (твердість, крихкість тощо) під час підготовки до подальших технологічних операцій; сублімаційного сушіння; виробництва своєрідних харчових продуктів і надання їм специфічних смакових і товарних властивостей (морозива та ін. заморожених продуктів). Основними групами заморожених продуктів є: плоди й овочі, м'ясо і м'ясні продукти, риба та морепродукти, випічка і готові страви.

Зниження температури продукту нижче точки замерзання охоплює кілька етапів: відведення тепла для охолодження продукту; відведення тепла,

утвореного внаслідок дихання (для свіжих плодів і овочів); відведення тепла для фазового переходу води з рідкого стану в лід. Продукти здебільшого містять велику кількість води, що має високу питому теплоємність $[4,182 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})]$ і високу питому теплоту кристалізації ($334 \text{ кДж}/\text{кг}$). Тому необхідна велика кількість енергії для відведення тепла й утворення кристалів льоду.

Кріоскопічна температура характеризує початок утворення кристалів льоду в рідкій фазі продукту, а евтектична (кріогідратна) температура відповідає завершенню процесу перетворення в лід води, наявної в продукті у вільному чи зв'язаному стані. Евтектична температура є найнижчою з усіх можливих температур замерзання розчинів речовини. Для тканинних соків вона становить приблизно $-60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. На практиці не застосовують заморожування продуктів до досягнення евтектичної температури.

Початковим етапом заморожування продукту є утворення кристалів льоду, які перебувають у рівновазі з навколишньою водою. Є два типи зародження кристалів льоду: однорідне (випадкова орієнтація й поєднання молекул води) і гетерогенне (утворення кристалів довкола завислих частинок або на клітинній стінці). Міграція води до наявних центрів кристалізації є енергетично більш вигідним процесом, ніж утворення нових, тому в продуктах, найімовірніше, відбувається неоднорідне зародження кристалів льоду.

Усі харчові продукти містять розчинені речовини (вуглеводи, солі та ін.), які впливають на процес заморожування. Органолептичні властивості та харчова цінність заморожених продуктів залежать від розміру і розподілу кристалів льоду. Швидке заморожування призводить до утворення безлічі дрібних кристалів льоду, рівномірно розподілених зовні та всередині клітин, тим самим забезпечуючи мінімальне пошкодження текстури та збереження показників якості продуктів. І навпаки, під час повільного заморожування утворюються великі кристали льоду, нерівномірно розподілені по клітинах і тканинах, що завдає значної шкоди текстурі та якості продукту [72].

Температура, за якої кристал розчиненої речовини перебуває в рівновазі з незамерзеним розчином і льодом, є його евтектичною температурою

(наприклад, для глюкози вона становить -5°C , для сахарози – -14°C , для хлориду натрію – -21°C , для хлориду кальцію – -55°C). Однак важко визначити евтектичні температури складної суміші розчинених речовин у продуктах, тому використовують термін «кінцева евтектична температура». Це найнижча евтектична температура розчинених речовин у продукті (наприклад, для морозива вона становить -55°C , для м'яса – -50 – -60°C , для хліба – -70°C) [1]. У виробничих умовах продукти не заморожують до таких низьких температур, тому незаморожена вода завжди присутня.

Досягнення температури продуктів нижче від температури склування забезпечує збереження їхньої текстури, сприяє стабільності зберігання продуктів. Однак багато фруктів мають дуже низькі температури склування, що спричиняє зміни текстури під час зберігання в замороженому стані на додаток до пошкоджень, спричинених кристалами льоду. Деякі продукти (наприклад, морозиво, сурімі тощо) можуть містити мальтодекстрин, сахарозу чи фруктозу, які підвищують температуру склування. Якщо вона зростає вище температури зберігання в замороженому стані, термін зберігання продуктів подовжується.

Харчові продукти заморожують упакованими в паронепроникні оболонки; безпосередньо в рідких середовищах, які практично не випаровуються (хлористий натрій, хлористий кальцій, пропіленгліколь, етиленгліколь тощо) або випаровуються (вуглекислота, азот, фреон тощо); у металевих формах; між металевими холодильними поверхнями.

Заморожування традиційними методами може застосовуватись не для всіх харчових продуктів, оскільки може спричиняти фізичні й хімічні зміни та зниження якості деяких продуктів після розморожування. Для уникнення цих недоліків і поліпшення якості продуктів розробляють інноваційні методи заморожування.

Заморожування в потоці повітря. Заморожування здійснюють у морозильних камерах, в яких повітря температурою -30 – -40°C подають зі швидкістю 1-2 м/с [1]. За низьких температур і високої швидкості руху повітря

відбувається швидке заморожування з рівномірним утворенням льоду. Найкращого технологічного ефекту досягають під час заморожування фасованих продуктів. Широке застосування цього методу обумовлене його простотою й універсальністю, а також доброю якістю заморожених продуктів.

Заморожування у псевдозрідженому шарі холодоагента. Повітря з певною температурою, яке подають за високої швидкості під тиском, обтікає поверхню завислих у потоці продуктів. До надшвидкого методу належить заморожування у псевдозрідженому шарі кріогенного холодоносія (рідкого азоту, фреону тощо), в якому вся поверхня продукту бере участь у теплообміні, а дуже низька температура (температура кипіння кріоагента) забезпечує заморожування продукту за кілька хвилин. Водночас кріогенне заморожування призводить до меншої зміни органолептичних і фізико-хімічних властивостей продукту, ніж заморожування в потоці повітря [72].

Заморожування шляхом фазового перетворення. Цей метод використовують обмежено, коли видалення вологи з продукту сприяє проведенню подальших технологічних процесів. Так, під час сублімаційного сушіння на першому етапі за зниженого тиску (під вакуумом) завдяки бурхливому випаровуванню води з продукту відбувається швидке зниження температури з утворенням кристалів льоду, а потім у результаті обробки замороженого продукту під глибоким вакуумом відбувається сублімація льоду та зневоднення продукту [1].

Заморожування під високим тиском. Застосування тиску до 210 МПа знижує точку замерзання води, тим самим підвищуючи ступінь переохолодження. Швидкість зародження кристалів льоду збільшується приблизно в 10 разів з кожним градусом переохолодження. Поєднання високого тиску й низької температури призводить до утворення різних поліморфних форм кристалів льоду, що пов'язано зі зміною кута водневого зв'язку й утворенням компактніших молекулярних структур. Рівномірний розподіл кристалів льоду однакового розміру, щільніших за воду, сприяє меншому пошкодженню тканин продукту та скороченню втрат клітинної рідини після розморожування [72].

Також зменшується ентальпія кристалізації, що прискорює процес фазового переходу.

Замороженням під тиском отримують продукти вищої якості з меншими біохімічними змінами завдяки зниженню мікробної та ферментної активності, з меншими змінами кольору, текстури, смаку й аромату, а також з більшим рівнем утримання поживних речовин.

Високі капітальні витрати на обладнання є однією з перешкод, що стримують подальший розвиток заморожування під тиском, як і притаманний цьому процесу періодичний характер і тривалий етап попереднього охолодження, необхідний для утворення зародків кристалів льоду [71].

Гідрозаморожування (гідрофлюїдизація). Заморожування харчових продуктів досягають створенням турбулентного руху охолоджувальної рідини, що забезпечує збільшення площі поверхні теплопередачі, скорочення тривалості процесу (наближається до криогенного заморожування), рівномірний розподіл температури [71]. Наприклад, за температури крижаної суспензії -25°C полуницю, абрикоси, сливи заморожують від 25 до -18°C за 8-9 хв, малину й вишню – за 1,5-3 хв, а зелений горошок, чорницю, журавлину – за 1 хв [1].

Цей метод відкриває нові можливості заморожування продуктів, а саме: створення охолоджувальних суспензій на основі багатокомпонентних холодоагентів; суспензії для занурення можуть містити у своєму складі антиоксиданти, функціональні інгредієнти й харчові добавки для подовження терміну зберігання продуктів, підвищення їхньої харчової цінності та покращення органолептичних властивостей; отримання нових продуктів з використанням специфічних охолоджувальних рідин (наприклад, для виробництва десертних продуктів заморожені в сиропах фрукти, що зберігають характерний колір, смак і текстуру).

Гідрозаморожування має низку переваг перед традиційними методами: високі показники тепловіддачі за меншої різниці температур між продуктом і охолоджувальною рідиною; майже вдвічі нижчі капітальні й енергетичні

витрати; за низької швидкості рідини й тиску зменшуються енерговитрати, мінімізуються механічні пошкодження продукту; продукт швидко проходить критичну зону кристалізації води, що забезпечує утворення дрібних кристалів льоду й тим самим запобігає пошкодженню клітин; поверхня продукту замерзає миттєво, утворюючи тверду кірку, яка зменшує масообмін і забезпечує чудовий зовнішній вигляд поверхні; процес безперервний, зручний для автоматизації, потребує низьких витрат праці.

Дегідрозаморожування. Часткове висушування продукту перед заморожуванням сприяє кращому збереженню його кольору, смаку й текстури, зменшенню втрат клітинної рідини під час розморожування, забезпечує економію енергії, оскільки заморожується менша кількість води, зменшується маса продукту, який надалі транспортують і зберігають [71]. Зазвичай видаляють 50-60 % вологи сушінням або осмотичною дегідратацією (осмодегідрозаморожування), хоча деякі джерела вказують, що достатньо видаляти лише 2-10 % вологи [1].

Під час осмодегідрозаморожування продукт замочують у розчині (переважно цукру, кукурудзяного сиропу, сорбіту або солі), що підвищує температуру склування [71]. Погіршення якості продукту та зміни його аромату й кольору є мінімальними завдяки зменшенню рухливості молекул і уповільненню перебігу біохімічних процесів. Така попередня обробка захищає структуру заморожених плодів і овочів, зменшує втрати клітинної рідини під час розморожування. Крім того, після такої обробки у продукті краще зберігаються хлорофіл, вітамін С, антоціани.

Заморожування під впливом магнітного поля. Магнітне заморожування перешкоджає кристалізації льоду, завдяки чому знижується температура переохолодження. Заморожування складається з двох етапів. На першому етапі продукт зазнає впливу магнітного поля, що перешкоджає кристалізації льоду за переохолодження нижче точки замерзання [72]. На другому етапі через певний час дію магнітного поля припиняють, і продукт зазнає швидкого заморожування, рівномірного в усьому об'ємі. Водночас утворюються дрібні кристали льоду, які

не пошкоджують структуру продукту, не відбувається міграція води й небажана клітинна дегідратація.

Магнітне заморожування застосовують, зокрема, на борту риболовецьких суден для заморожування тунця, для збереження тріски й ікри – продуктів, які раніше не піддавали заморожуванню; для консервації делікатного тіста, фуа-гра, качиноного м'яса, трюфелів; для заморожування вершків, молока, манго, морепродуктів, суші тощо.

Витрати на магнітне заморожування на 20-100 % більші за деякі традиційні методи, проте неабиякими перевагами є зменшення енергетичних витрат і збереження дуже високої якості продуктів.

Заморожування під впливом ультразвуку та інших методів обробки.

УЗ-обробка викликає кавітацію в рідинах, що призводить до утворення бульбашок газу й мікропотоків. Під час заморожування наявність бульбашок сприяє утворенню нових центрів кристалізації, що збільшує швидкість заморожування, а мікропотoki прискорюють швидкість тепло- й масообміну. Для обробки застосовують УЗ-хвилі низької частоти (від 18-20 до 100 кГц) та високої інтенсивності (зазвичай вище 1 Вт/см²) [72].

У межах, визначених утворенням тепла під час проходження ультразвуку крізь середовище, зі збільшенням потужності ультразвуку та тривалості впливу зростає швидкість заморожування. Обробка за оптимальної тривалості 2 хв та потужності 15,9 Вт, що забезпечує найбільшу швидкість заморожування, веде до утворення дрібних внутрішньоклітинних кристалів льоду й меншого руйнування клітин. Крім того, за допомогою УЗ-обробки можливе руйнування великих кристалів льоду й рівномірний розподіл кристалів за розмірами в продукті (наприклад, у морозиві) [72].

Високої швидкості замерзання й утворення дрібних кристалів льоду досягають обробкою електростатичним полем або радіочастотним випромінюванням.

Застосування кріопротекторів. Кріопротектори знижують температуру замерзання продуктів, модифікують або пригнічують ріст кристалів льоду під

час заморожування й гальмують перекристалізацію льоду під час зберігання продуктів у замороженому стані. Вони зменшують пошкодження клітинних мембран і тим самим захищають структуру тканин, зменшують втрати поживних речовин з клітинною рідиною.

На практиці найширше використовують спирти (маніт, сорбіт, еритрит, інозит); амінокислоти (аланін, валін, пролін, серин); цукри (глюкозу, ксилозу, лактозу, мальтозу, рибозу, рафінозу, манозу); білки (альбумін, желатин).

Великий інтерес становлять кріопротектори – глікопротеїни або антифризові протеїни, які виділяють з бактерій, грибів, рослин, безхребетних, риб. У цих організмах розвинувся синтез таких речовин як механізм їхнього захисту від низьких температур. Різні організми синтезують різні типи речовин з різноманітними функціями [71].

На етапі розморожування замороженого продукту основними завданнями є уникнення перегрівання продукту, мінімізація тривалості розморожування, уникнення надмірного зневоднення продукту та втрат клітинної рідини. Продукти розморожують у вакуумній камері конденсацією пари, теплою водою (20 °C) або вологим повітрям, яке циркулює над продуктом. Швидшого розморожування досягають, використовуючи діелектричну енергію, омичний нагрів або ультразвукове відтавання. Застосування тиску забезпечує розморожування за нижчих температур [71].

Під час розморожування заморожених продуктів за допомогою повітря або води поверхневий лід тоне, утворюючи шар води. Вода має нижчу теплопровідність, ніж лід, тому поверхневий шар води зменшує швидкість перенесення тепла до заморожених внутрішніх частин продукту. Цей ефект ізолювання посилюється в міру того, як шар розмороженого продукту стає товстішим. На відміну від цього, під час заморожування збільшення товщини льоду веде до пришвидшення процесу завдяки вищій теплопровідності льоду. Тому розморожування є набагато довшим процесом, ніж заморожування, за подібних різниць температур та інших умов [1].

Недоліки заморожування пов'язані з травмуванням тканин продукту й частковою денатурацією білка, що відбуваються через перерозподіл вологи в процесі заморожування продукту. Проте ці недоліки проявляються лише в разі порушення режимів заморожування й розморожування.

4.3. Концентрування рідин виморожуванням. Сублімаційне сушіння

Концентрування рідин виморожуванням

Концентрування рідин виморожуванням (кріоконцентрування) полягає в частковому заморожуванні розчину з подальших відокремленням кристалів льоду, в результаті чого збільшується вміст розчинних сухих речовин у розчині [73]. Збільшення концентрації розчинених речовин під час заморожування призводить до зміни рН, в'язкості, поверхневого натягу й окисно-відновного потенціалу незамороженого розчину. Коли температура знижується, окремі розчинені речовини досягають точки насичення та кристалізуються.

У продуктах, що містять значну кількість води, утворення льоду великою мірою впливає на їхні теплофізичні властивості: знижується густина, зростає теплопровідність (теплопровідність льоду приблизно в чотири рази більша, ніж води), зменшуються ентальпія й питома теплоємність.

Рідину, що містить розчинені речовини, охолоджують нижче точки замерзання за контрольованих умов, уникаючи евтектичної температури. У цей момент вода й одна з розчинених речовин замерзають одночасно. За контрольованого заморожування рідких продуктів утворюються кристали льоду з температурою вище евтектичної, що підвищує чистоту кристалізованої води, зберігаючи всі властивості вихідного розчину. Верхня межа розчинів, концентрованих заморожуванням, коливається від 40 до 50 % сухих речовин, що змінюється залежно від складу харчового продукту та вмісту розчинених сухих речовин. Для зменшення вмісту води концентрування можна проводити неодноразово [73]. Ступінь концентрування розчинених речовин, якого

досягають внаслідок виморожування, можна визначити за допомогою відповідних графіків (рис. 5).

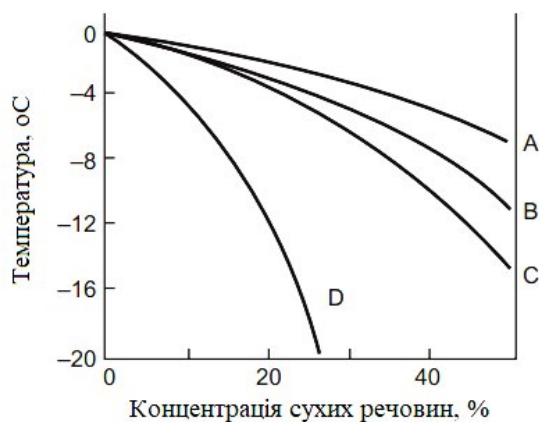


Рисунок 5. Вплив температури заморожування продуктів на вміст розчинених речовин у концентрованому розчині:
А) екстракту кави; В) яблучного соку; С) соку чорної смородини; D) вина [1]

На швидкість утворення й росту кристалів льоду впливають концентрація розчинених речовин і температура переохолодження. Під час концентрування виморожуванням бажано, щоб кристали льоду утворювалися якомога більшими й водночас у них не переходив концентрований розчин. Цього досягають за допомогою перекристалізації – повільного перемішування густої суспензії, яка містить кристали льоду, що сприяє їх збільшенню через приєднання менших кристалів.

Низькі температури, за яких ведуть процес, забезпечують високий рівень утримання летких ароматичних речовин у продукті та практично повне збереження його харчової цінності. Однак концентрування виморожуванням потребує великих витрат на обладнання та процес охолодження, і характеризується низькою продуктивністю, як порівняти з концентруванням кип'ятінням.

Під час заморожування досягають концентрації розчину вищої, ніж у випадку застосування мембранних процесів, але нижчої, ніж у випадку концентрування кип'ятінням.

Концентрування виморожуванням використовують не широко, здебільшого для попереднього концентрування екстракту кави перед сушінням заморожуванням, попереднього концентрування молока, збільшення вмісту спирту у вині, концентрування фруктових соків, оцту, деяких напоїв, отримання екстрактів риби, м'яса, овочів, трав.

Сублімаційне сушіння

Сублімаційне сушіння (ліофілізація) відрізняється від інших методів зневоднення, оскільки воду спочатку заморожують, а потім перетворюють безпосередньо в пару сублімацією, а не видаляють з поверхні продукту випаровуванням [74].

Першим етапом сублімаційного сушіння твердого продукту є швидке заморожування його невеликих шматків з утворенням дрібних кристалів льоду, які не спричиняють пошкодження клітинної структури продукту. Водночас основна частина вологи (не менш ніж 70 %) переходить у твердий агрегатний стан. Проте частина води у продукті залишається незамерзеною в дуже в'язкому стані. Процес перебігає до досягнення температури склування, водночас вміст вологи у продукті зменшується до 15 % [1].

На другому етапі тиск у середовищі довкола продукту зменшують нижче 610 Па, і на заморожений продукт повільно подають тепло, що сприяє перетворенню льоду у водяну пару. Сублімаційне сушіння перебігає, коли тиск парів навколишнього середовища нижчий від тиску в потрійній точці (рис. 1). Водночас лід, минаючи рідку фазу, перетворюється в пару, яка асимілюється навколишнім середовищем або конденсується на холодній поверхні випарника. У процесі сушіння в зону пароутворення безперервно підводять енергію в кількості, достатній для компенсації теплоти фазового перетворення. Підведення теплоти в зону пароутворення стає складнішим у міру просування цієї зони вглиб

продукту. Утворений шар підсохлого продукту чинить опір як переходу пари із зони пароутворення до поверхні продукту, так і передачі теплоти з-зовні в зону пароутворення. Теплота може утворюватися внаслідок проходження крізь продукт мікрохвильового або радіочастотного випромінювання [74].

У міру сушіння фронт сублімації рухається до заморожених ділянок продукту, залишаючи за собою частково висушені шари. Встановлюється градієнт тиску водяної пари, оскільки тиск у навколишньому середовищі нижчий від тиску пари на поверхні льоду. В результаті цього водяна пара рухається від висушеного продукту в сушильну камеру, конденсується на холодильних елементах і видаляється.

У рідкому продукті, що не має клітинної структури, повільне заморожування використовують для утворення решітки великих кристалів льоду. Канали, утворені льодом, дають змогу швидше відводити пару, ніж з твердого продукту.

Решту незамороженої на першому етапі води видаляють на третій стадії випаровуванням (десорбцією) до досягнення вмісту води в продукті 2 %. Десорбція відбувається за підвищення температури в сушарці до температури навколишнього середовища й підтримання низького тиску. У деяких рідких продуктах (наприклад, фруктових соках, концентрованому екстракті кави) утворення склоподібного стану під час заморожування створює труднощі для руху пари. В такому випадку рідину заморожують у формі піни (вакуумне сублімаційне сушіння) або сік сушать разом з м'якоттю. Обидва методи сприяють утворенню каналів для виходу пари з продукту. В іншому способі заморожений сік подрібнюють для отримання гранул, що пришвидшує процес сушіння та дає змогу краще контролювати розмір частинок висушеного продукту.

Залежно від хімічного складу, структури й умов заморожування, компоненти сухої речовини можуть перебувати в аморфному стані (коли швидкість заморожування висока) або в кристалічному стані. У випадку великої кількості аморфних компонентів вміст води після завершення сублімаційного

сушіння може потенційно впливати на стабільність зберігання. Вміст води може становити 5-20 % від початкового (залежно від вмісту сухих речовин у продукті). З іншого боку, вміст води в кристалічних матеріалах після завершення сублімації є незначним, оскільки вся доступна вода кристалізується під час заморожування [74]. Продукти здебільшого можна висушити цим методом до залишкового вмісту води 1-5 %.

Коли тепло досягає фронту сублімації, воно сприяє підвищенню температури й тиску пари, утвореної з льоду. Утворена пара рухається крізь висушений продукт до ділянки низького тиску пари в сушильній камері.

На градієнт тиску водяної пари впливає низка чинників: тиск у сушильній камері й температура конденсатора пари (обидва чинники мають бути якомога нижчими з економічного погляду); температура льоду на фронті сублімації, яка має бути якомога вищою, проте не спричиняти танення льоду [74]. На практиці найнижчий економічно доцільний тиск у камері становить 13 Па, найнижча температура конденсатора близька до точки замерзання.

Однак за температури вище визначеного критичного значення (табл. 12) концентрований розчин речовин у продукті стає достатньо рухливим і перетікає в канали, утворені після випаровування льоду. Відбувається незворотне руйнування структури продукту [74]. Це обмежує швидкість перенесення пари. Завершення сушіння ефективно за дещо нижчої температури. Отже, температура продукту має бути нижче температури руйнування структури на етапі сублімаційного сушіння й нижче температури склування під час десорбційного сушіння.

Асортимент продуктів, отриманих сублімаційним сушінням, досить різноманітний: м'ясо і м'ясопродукти, морепродукти, молочні продукти, яйцепродукти, плоди й овочі, пюре, плодово-ягідні соки, швидкорозчинний чай і кава, прянощі, активні інгредієнти (зокрема пробіотики, ферменти та ін. функціональні інгредієнти для продуктів харчування). Цей метод застосовують для сушіння цінних продуктів, які мають ніжний аромат чи консистенцію. Іншими напрямками застосування цього методу є приготування повноцінних

страв для туристів, військових, космонавтів, отримання нових продуктів, зокрема ліофілізованих вершків, йогуртів, кремів для використання в кашах для сніданку, кондитерських виробів і в начинках для десертів. Сублімаційне сушіння використовують також для підготовки до тривалого зберігання активних ферментів і мікробних культур.

Таблиця 12.

Температура руйнування структури під час сублімаційного сушіння [1]

Продукт	Температура руйнування структури, °C
Яблучний сік (22 % вологи)	-41,5
Яловичина	-12
Сир Чеддер	-24
Екстракт кави (25 % вологи)	-20
Риба	від -6 до -12
Виноградний сік (16 % вологи)	-46
Морозиво	від -31 до -33
Ківи	-57,2
Гриби	-77,9
Картопля	-12
Солодка кукурудза	від -8 до -15
Помідори	-41

Під час сублімаційного сушіння й концентрування виморожуванням консервувального ефекту досягають зменшення активності води без нагрівання продукту, в результаті чого термолабільні компоненти продукту зазнають мінімальної шкоди. Крім того, сублімаційне сушіння сприяє утворенню пористої, пухкої структури, що швидко й повністю регідрує.

Однак цей метод є складним і передбачає чотириразову зміну стану води (заморожування, сублімація, конденсація, розморожування), що зумовлює високу енергоємність, вартість та трудомісткість цієї технології [75].

Висновки

Розглянуто сучасні технології обробки продуктів у харчовій промисловості. Обґрунтовано теоретичні засади, розроблено науково-методичні та практичні рекомендації щодо теоретичних і практичних аспектів їх застосування в харчових технологіях, виявлено їхні переваги та недоліки. Монографія дає відповіді на запитання про можливості заощадження енергії, підвищення рівня ефективності технологічних процесів, забезпечення якості та безпеки продуктів, подовження терміну їх зберігання, збереження у продуктах біоактивних сполук, зменшення впливу на довкілля.

У харчовій промисловості для видобування компонентів із продуктів використовують різні методи екстракції. Традиційні технології не відповідають концепції зеленого та сталого виробництва, оскільки часто пов'язані з високими витратами енергії та потребою утилізації токсичних розчинників. Зелені технології екстрагування є більш селективними, швидшими, сталими і перебігають за нижчих температур. Проте вони все ще залишаються дорогими та непрактичними для промислових цілей. Такі інноваційні методи екстракції, однак, можуть бути застосовані для вилучення біологічно активних речовин з рослинної сировини і побічних продуктів виробництва й отримання продуктів з високою доданою вартістю (наприклад, харчових добавок) для задоволення зростаючого попиту на них.

Як альтернативу традиційним методам розглядають екстракцію надкритичними рідинами. Використання надкритичного діоксиду вуглецю є перспективним, оскільки він нетоксичний, негорючий, відрізняється низькою вартістю і має низькі критичні параметри. Екстракцію з використанням надкритичних рідин визнано екологічно чистою, енерго- та ресурсоощадною технологією, здатною забезпечувати можливість створення замкнутого екстракційного циклу. Відмінною перевагою надкритичної екстракції є висока чистота цільового продукту без зниження біологічної активності. Застосування

надкритичних рідин як екстрагентів дає змогу вилучати цільові компоненти без їх руйнування і спрощує процес сепарації.

Використання мембран у різних сегментах харчової промисловості привертає дедалі більше уваги. Висока ефективність розділення, проведення процесу за м'яких умов, менші витрати енергії порівняно з дистиляційними методами, можливість відновлення ресурсів і впровадження стійких процесів, зменшення кількості етапів обробки, уникнення використання хімічних агентів, збереження органолептичних властивостей продуктів – це основні переваги технологій мембранного розділення перед традиційними методами.

Проте мембранна технологія стикається зі значними проблемами, які потребують розв'язання для практичного та економічно ефективного її впровадження. Обмежена стійкість полімерних мембран, особливо під час розділення продуктів високої чистоти, потребує розробки більш надійних матеріалів. Водночас забруднення мембран призводить з часом до зниження їхньої проникності, а це негативно впливає на експлуатаційні витрати через потребу частого очищення або заміни мембран. Попри те, що мембранні технології мають нижчі експлуатаційні витрати в довгостроковій перспективі, початкові капітальні витрати на мембрани, модулі, допоміжне обладнання можуть бути непомірними, особливо для малих і середніх підприємств. Розв'язання проблеми високих капітальних витрат, пов'язаних з використанням мембран у великих масштабах, особливо у водоочищенні, потребує економічно ефективних методів виробництва та тривалішого терміну використання мембран.

Термічна обробка відіграє основну роль у харчовій промисловості для забезпечення безпеки та прийнятних споживчих властивостей харчових продуктів. Проте вона може призводити до погіршення їхніх органолептичних властивостей і харчової цінності. Сучасні методи миттєвої та ультрапастеризації продуктів за високих температур є короткотривалими, тому меншою мірою впливають на органолептичні та фізико-хімічні властивості продуктів, і водночас вигідно відрізняються від традиційних методів за енергоефективністю.

Значні переваги перед традиційною термічною обробкою демонструють електрофізичні методи – омічний нагрів, обробка високочастотним, надвисокочастотним та інфрачервоним випромінюванням. Омічне нагрівання є найменш витратним і найбільш енергоефективним варіантом, проте потребує ретельного проектування для широкого спектру продуктів. Мікрохвильовий нагрів є універсальним і широко застосовуваним, але нагрівання може бути нерівномірним. Радіочастотна обробка може забезпечити більш рівномірне нагрівання, проте є більш спеціалізованою у застосуванні та зазвичай дорожчою.

Основні переваги електрофізичних методів полягають у скороченні тривалості обробки, поліпшенні якості продуктів і зменшенні впливу на довкілля. Ці методи інтенсивно розвиваються, триває розроблення спеціалізованого обладнання та пристроїв для контролю за перебігом процесів, а отже, згодом електрофізичні методи займуть належне місце у виробництві високоякісних харчових продуктів.

Збереження органолептичних властивостей і поживної цінності продуктів, збільшення терміну їх зберігання за відсутності впливу високих температур забезпечують методи нетермічної обробки продуктів. Технологія обробки високим тиском має великий потенціал для розвитку нових оброблених продуктів з доданою вартістю, високим вмістом поживних речовин, ліпшими органолептичними властивостями, новою текстурою та подовженим терміном зберігання. Опромінення продуктів призводить до низки ефектів, як-от уповільнення дозрівання плодів, запобігання проростанню, знищення комах, патогенних і умовно-патогенних мікроорганізмів, що дає змогу подовжити терміни зберігання продукції.

Дедалі більше уваги виробників харчових продуктів привертає озон, що є одним з найсильніших антимікробних агентів і має низку безперечних переваг порівняно з іншими засобами. Озон перетворюється на нетоксичний кисень, тому після завершення процесу не потрібна подальша обробка продуктів. Маючи винятково високу окиснювальну здатність, озон набагато ефективніший у процесах інактивації мікроорганізмів, спор бактерій, вірусів, ніж традиційно

використовувані засоби. Технологія озонування – екологічно чиста, безпечна, потребує невеликого дозування озону, проста й економічна.

Використання ультразвуку має чималі переваги щодо ефективності в численних технологічних процесах, зокрема процесах гомогенізації, емульгування, диспергування, гідрування, розм'якшення м'яса, окиснення, розчинення, кристалізації, розщеплення макромолекулярних речовин, знищення мікроорганізмів.

Обробка ультрафіолетовим випромінюванням є перспективнішою з-поміж інших методів нетермічної обробки завдяки нижчій вартості, згубному впливові на більшість мікроорганізмів, простоті використання, можливості проведення процесу за низької вологості та температури. Обробка ультрафіолетовим випромінюванням є найефективнішим бактерицидним засобом, який показав свою ефективність під час обробки плодів і овочів у зниженні інтенсивності дихання, затримці дозрівання, мінімізації потемніння, підвищенні вмісту антиоксидантів. Широке застосування цього методу для знезараження води пов'язане з низкою переваг: універсальністю й ефективністю впливу на різні мікроорганізми, екологічністю та безпечністю, невисокою вартістю, низькими капітальними й експлуатаційними витратами, простим обслуговуванням устаткування.

Універсальні, нові й перспективні технології нетермічної обробки широко впроваджують у харчовій промисловості для поліпшення якості харчових продуктів, подовження терміну їх зберігання та забезпечення безпеки.

Одним з ключових аспектів, що впливають на збереження свіжості та поживних властивостей продуктів харчових виробництв, є ефективне їх охолодження. Місце традиційних методів охолодження поступово займають інноваційні рішення, які забезпечують не тільки швидку й ефективну обробку продуктів, але й збереження органолептичних властивостей і мінімізацію втрат поживних речовин. До сучасних і перспективних методів охолодження належать гідроохолодження, примусове повітряне, вакуумне, суперохолодження, глибоке, магнітне охолодження.

Водночас більшу стійкість продуктів під час зберігання забезпечує їх заморожування. Для забезпечення збереження органолептичних властивостей і харчової цінності продуктів, досягнення контрольованого процесу кристалізації льоду, підвищення швидкості замерзання, скорочення тривалості фазового переходу та підтримки стабільності температури розроблено нові й перспективні технології заморожування, що іноді поєднують обробку за низьких температур та інші методи впливу.

Сублімаційне сушіння є найкращим методом збереження харчової цінності, кольору, біоактивних сполук і структури продуктів. Це пов'язано з низькою температурою та тиском, а також відсутністю доступу повітря. Водночас концентрування рідких продуктів виморожуванням використовують не широко, здебільшого для попереднього концентрування екстрактів перед кріосушінням. Більші капітальні витрати на обладнання та високі експлуатаційні витрати на енергію, що використовують для заморожування харчових продуктів, а під час сублімаційного сушіння – застосування глибокого вакууму, призводять до значних витрат на виробництво ліофілізованих продуктів. Унаслідок цього вартість сублімаційного сушіння суттєво більша від традиційних методів.

Отже, інноваційні технології обробки дають змогу забезпечити якість і безпеку продуктів, подовжити термін їх зберігання, зберегти у продуктах біоактивні сполуки. Проте для широкого впровадження цих методів у виробництво необхідні дослідження, зосереджені на оптимізації параметрів процесу, розумінні поведінки та властивостей продукту, а також зниженні потреб у енергії та скороченні капітальних витрат. Переваги, недоліки, ефективність та умови застосування розглянутих методів обробки є основою для визначення доцільності їх застосування в контексті сталого розвитку і циркулярної економіки.

Застосування в харчовій промисловості технологій нетермічної обробки відкриває нові можливості для цільової модифікації структури й функціональних властивостей харчових продуктів. Здебільшого механізми впливу таких процесів обробки ґрунтуються на взаємодії біологічних, (біо)хімічних і фізичних

чинників. Розроблення таких інноваційних технологій розширює інструментарій харчової промисловості завдяки введенню нових методів обробки в коло традиційних технологій.

Оптимізація процесів обробки відповідно до різновидів оброблюваних продуктів і кінцевих потреб має вирішальне значення для забезпечення високої якості продукції та досягнення енергоефективності.

Список літератури

1. Fellows, P. J. (2017). Food Processing Technology : Principles and Practice. Woodhead Publishing Food Science. Technology and Nutrition.
2. Pawar, K. R., Nema, P. K., Dadhaneeya, H. (2025). Novel Extraction Techniques in Food Processing. In: Deka, S. C., Nickhil, C., Haghi, A. K. (eds) Engineering Solutions for Sustainable Food and Dairy Production. Food Engineering Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75834-8_17.
3. Choton, S., Bandral, J. D., Sood, M., Gupta, N., Singh, J., Langeh, A., Choudhary, A. N. (2023). Green Extraction Technology and Its Application in Food Industry. Chemical Science Review and Letters, 12 (46), 79-88. DOI:10.37273/chesci.cs205402576.
4. Mena-Garcia, A., Ruiz-Matute, A. I., Soria, A. C., Sanz, M. L. (2019). Green techniques for extraction of bioactive carbohydrates. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 119: 1-43.
5. Putnik, P, Lorenzo, J. M., Barba, F. J., Roohinejad, S., Režek Jambrak, A., Granato, D., Montesano, D., Bursać Kovačević, D. (2018). Novel Food Processing and Extraction Technologies of High-Added Value Compounds from Plant Materials. Foods. Jul 5;7 (7):106. doi: 10.3390/foods7070106.
6. Терзієв, С., Ружицька, Н., Щербич, М., Альхурі, Ю. (2021). Інтенсифікація процесу екстрагування в технологіях утилізації відходів харчових та олійних виробництв. Scientific Works, 85 (1), 110-115. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2079>.
7. Акімов, О., Молчанов, М., Войтенко, О., Бурдо, О. (2021). Кінетика та енергетика процесів екстрагування з деревини дуба в електромагнітному полі. Scientific Works, 85 (1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2076>.
8. Коваленко, О. А., Славинський, Р. Л., Федосов, Я. С., Славинська, В. О., Аль-Хамад, І. М. (2023). Експериментальне моделювання процесів екстрагування ефірних олій у мікрохвильовому полі. Scientific Works, 87 (1), 109-116.

9. Молчанов, М. (2024). Інноваційні технології екстрагування рослинної сировини. *Scientific Works*, 88 (2), 51-57. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i2.3034>.
10. Целень, Б., Гоженко, Л., Радченко, Н., Іваницький, Г. (2020). Використання кавітаційних ефектів в процесах екстрагування. *Scientific Works*. 2020. № 84 (1). С. 92-97.
11. Акімов, О. В.; Мординський, В. П. (2022) Дослідження процесу екстрагування деревини дуба в апаратах електродинамічного типу. *Sci. Work.*, 86, 100-105, <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2410>.
12. Запорожець, Д., Молчанов, М. (2025). Інтенсифікація процесів екстрагування в апаратах електродинамічного типу. *Scientific Works*, 88 (2), 138-144. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i2.3130>.
13. Салєба Л. В., Сарібекова, Д. Г. (2021). Удосконалення процесу екстрагування антоціанів з використанням ферментних комплексів. *Вісник Хмельницького національного університету*. № 1, (293), 222-226.
14. Majid A., Phull, A. R., Khaskheli, A. H. et al. (2019). Applications and opportunities of supercritical fluid extraction in food processing technologies: A review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 6 (7): 99-103.
15. Tüysüz, B., Dertli, E., Çakir, Ö., Şahin, E. (2019). Implementation of Supercritical Fluid Extraction in Food Technology. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, 19-21 September. 716-721.
16. Gafurov, K., Muhammadiev, B., Mirzaeva, S., Kuldosheva, F. (2020). Отримання екстрактів з рослинної сировини двоокисом вуглецю. *Food Science and Technology*, 14 (1). <https://doi.org/10.15673/fst.v14i1.1651>
17. Сукманов, В., Супрун, А. (2021). Екстрагування біологічно активних речовин з лушпиння цибулі субкритичною водою в статичному режимі. *Journal of Chemistry and Technologies*. 29 (2), 265-278.
18. Сукманов, В, Ковальчук, О. (2023). Вплив параметрів екстрагування на властивості субкритичних водних екстрактів соєвого шроту. *Journal of Chemistry and Technologies*. 31 (1), 72-81.

19. Сукманов, В., Шостя, А., Усенко, С., Кузьменко, Л., Бараболя, О. (2025). Субкритична екстракція біологічно активних речовин з пшеничних висівок. *Journal of Chemistry and Technologies*. 33 (1), 200-212.
20. Singh, R., Vharamble, R. (2025). Applications of membrane technology in wastewater treatment, *International Journal of Science & Engineering Development Research*. Vol. 10, Issue 7, pp. b369-b376, July-2025.
21. Kumar, Y., Khalangre, A., Suhag, R., & Cassano, A. (2025). Applications of Reverse Osmosis and Nanofiltration Membrane Process in Wine and Beer Industry. *Membranes*, 15(5), 140. <https://doi.org/10.3390/membranes15050140>.
22. Gavrilas, S. (2025). Nanomembranes as Eco-Friendly Instruments for Modern Food Processing, from Filtration to Packaging. *Membranes*, 15(6), 167. <https://doi.org/10.3390/membranes15060167>.
23. Namla, D., Oves, M., Alshaeri, M.A. et al. (2025). Nanofiltration as an advanced wastewater treatment technique: a comprehensive review. *Discov Appl Sci* 7, 355 <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06576-3>.
24. Saboyainsta, L., Maubois, J.-L. (2000). Current developments of microfiltration technology in the dairy industry. *Le Lait*, 80 (6), pp.541-553.
25. Cassano, A., Rastogi, N. K., Basile, A. (2020). 10 - Reverse osmosis in food processing Editor(s): Cassano, A., Rastogi, N. K., Basile, A. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*. Elsevier. P. 229-257. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816777-9.00010-1>.
26. Teodoro, J. A., Arend, G. D., Proner, M. C., Verruck S., Rezzadori K. (2023). A review on membrane separation processes focusing on food industry environment-friendly processes. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 63 (32):11275-11289. doi:10.1080/10408398.2022.2092057.
27. Reig, M., Vecino, X., & Cortina, J. L. (2021). Use of Membrane Technologies in Dairy Industry: An Overview. *Foods*, 10(11), 2768. <https://doi.org/10.3390/foods10112768>.

28. Padhiary, M. (2024). Membrane Technologies for Treating Wastewater in the Food Processing Industry: Practices and Challenges. *Research Trends in Food Technology and Nutrition*, vol. 27, pp. 37-62. doi: 10.22271/ed.book.2817.
29. Foorginezhad, S., Zerafat, M. M., Ismail, A. F., Goh, P. S. (2025). Emerging membrane technologies for sustainable water treatment: a review on recent advances. Electronic supplementary information (ESI) available. *Environmental Science Advances*, V. 4, Issue 4, P. 530-570. <https://doi.org/10.1039/d4va00378k>.
30. Mohammad, A.W., Ng, C.Y., Lim, Y.P., & Ng, G. (2012). Ultrafiltration in Food Processing Industry: Review on Application, Membrane Fouling, and Fouling Control. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1143-1156.
31. Chiozzi, V., Agriopoulou, S., & Varzakas, T. (2022). Advances, Applications, and Comparison of Thermal (Pasteurization, Sterilization, and Aseptic Packaging) against Non-Thermal (Ultrasounds, UV Radiation, Ozonation, High Hydrostatic Pressure) Technologies in Food Processing. *Applied Sciences*, 12(4), 2202. <https://doi.org/10.3390/app12042202>.
32. Peng, J., Tang, J., Barrett, D. M., Sablani, S. S., Anderson, N., Powers, J. R. (2017). Thermal pasteurization of ready-to-eat foods and vegetables: Critical factors for process design and effects on quality, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57:14, 2970-2995, DOI: 10.1080/10408398.2015.1082126.
33. Polak, N., Kalisz, S., Kruszewski, B. (2024). High-Temperature Short-Time and Ultra-High-Temperature Processing of Juices, Nectars and Beverages: Influences on Enzyme, Microbial Inactivation and Retention of Bioactive Compounds. *Applied Sciences*, 14 (19), 8978. <https://doi.org/10.3390/app14198978>.
34. Bhunia, K., Tang, J., Sablani, S. S. (2024). Microwave-based sustainable in-container thermal pasteurization and sterilization technologies for foods. *Sustainable Food Technology*, 2 (4), pp. 926-944, 10.1039/d3fb00176h.
35. Xiao, H., Pan, Z., Deng, L., El-Mashad, H. M., Yang, X., Mujumdar, A. S., Gao, Z., Zhang, Q. (2017). Recent Developments and Trends in Thermal Blanching: A Comprehensive Review. *Inf. Process. Agric.*, 4 (2), 101-127. DOI:10.1016/j.inpa.2017.02.001.

36. Koutchma, T. (2023). Chapter 1. Basic principles and mechanisms of electromagnetic heating technologies for food processing operations, in *Microwave and Radio Frequency Heating in Food and Beverages*. Academic Press. 3-27.
37. Priyadarshini, A., Rajauria, G., O'Donnell, C. P., Tiwari, B. K. (2019). Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (19), 3082-3101. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1483890>.
38. Maloney, N.; Harrison, M. (2016). Advanced Heating Technologies for Food Processing. In *Innovation and Future Trends in Food Manufacturing and Supply Chain Technologies*. Woodhead Publishing: Sawston, UK,. pp. 203-256. DOI: 10.1016/B978-1-78242-447-5.00008-3.
39. Bermudez-Aguirre, D, Niemira, B.A. (2023). Radio Frequency Treatment of Food: A Review on Pasteurization and Disinfestation. *Foods*. Aug 15;12(16):3057. doi: 10.3390/foods12163057. PMID: 37628056; PMCID: PMC10452993.
40. Varghese, K. S., Pandey, M. C., Radhakrishna, K, Bawa, A. S. (2014). Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review. *J Food Sci Technol*. Oct;51(10):2304-17. doi: 10.1007/s13197-012-0710-3.
41. Fayaz, U., Aga, M. B., Bashir, I., Bashir, O., Jan, N., Gani, G., Bhat, S. A., Jabeen, A., Amin, T. (2023). Applications of infrared processing in the food industry. Editor(s): Jafari, S.M. In *Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry. Emerging Thermal Processes in the Food Industry*. Woodhead Publishing, Pp. 63-92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822107-5.00003-9>.
42. Anumudu, C. K., Onyeaka, H., Ekwueme, C. T., Hart, A., Isaac-Bamgboye, F., Miri, T. (2024). Advances in the Application of Infrared in Food Processing for Improved Food Quality and Microbial Inactivation. *Foods*, 13 (24), 4001. <https://doi.org/10.3390/foods13244001>.
43. Fordos, S., Kazmi, S. R. F., Amna, D., Tuseef, M., Aslam, M., Liaqat, I. (2025). Advances in Non-Thermal food processing technologies. In: Farooqi S. H., Kholik K. and Zaman M. A. (eds). *One Health Horizons: Integrating Biodiversity*,

Biosecurity, and Sustainable Practices. Unique Scientific Publishers, Faisalabad, Pakistan, pp: 335-341. <https://doi.org/10.47278/book.HH/2025.343>.

44. Arslan, M., Zareef, M., Afzal, M., Tahir, H. E., Li, Z., Aalim, H., Abaker, H. M. A., Zou, X. (2025). Innovative Non-Thermal Processing Technologies for Shelf Life Extension and Retention of Bioactive Compounds in Liquid Foods: Current Status and Future Prospects. *Foods*, 14, 2953. <https://doi.org/10.3390/foods14172953>.

45. Keyata, E., Bikila, A. (2024). Effect of High-Pressure Processing on Nutritional Composition, Microbial Safety, Shelf Life and Sensory Properties of Perishable Food Products: A Review. *Journal of Agriculture, Food and Natural Resources*, 2 (1), 69-78. <https://doi.org/10.20372/afnr.v2i1.659>.

46. Khouryieh, H. (2025). Impact of High Pressure Processing on the Safety and Quality of Food Products: A Review. *Recent Adv Food Nutr Agric*. 16 (1):31-40. doi: 10.2174/012772574X289005240215093457. PMID: 38409706.

47. Mshelia, R. D., Dibal, N. I., Chiroma, S. M. (2023). Food irradiation: an effective but under-utilized technique for food preservations. *J Food Sci Technol*. Oct. 60 (10): 2517-2525. doi: 10.1007/s13197-022-05564-4.

48. Farkas, J., Ehlermann, D. A. E., Mohácsi-Farkas, Cs. (2014). Food Technologies: Food Irradiation. Editor(s): Motarjemi, Y. *Encyclopedia of Food Safety*. Academic Press. P. 178-186. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00259-6>.

49. Bisht, B., Bhatnagar, P., Gururani, P., Kumar, V., Tomar, M. S., Sinhmar, R., Rath, N., Kumar, S. (2021). Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables – a review. *Trends in Food Science & Technology*. V. 114. P. 372-385. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.002>.

50. Xue, W., Macleod, J., Blaxland, J. (2023). The Use of Ozone Technology to Control Microorganism Growth, Enhance Food Safety and Extend Shelf Life: A Promising Food Decontamination Technology. *Foods*, 12 (4), 814. <https://doi.org/10.3390/foods12040814>.

51. Nath, A., Mukhim, K. B., Swer, T. L., Dutta, D., Verma, N., Gangwar, B. (2015). A Review on Application of Ozone in the Food Processing and Packaging.

52. Mostashari, P., Gavahian, M., Jafarzadeh, S., Guo, J. H., Hadidi, M., Pandiselvam, R., Huseyn, E., Mousavi Khaneghah A. (2022). Ozone in wineries and wine processing: A review of the benefits, application, and perspectives. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. Jul; 21 (4): 3129-3152. doi: 10.1111/1541-4337.12971.
53. Bispo, A. M., Almeida, C. J., Amorim, G. C., Mattos, P. H. R., Matos, L. C. P.; Krumreich, F. D. (2025). Ultrasound: Emerging Technology for Food Preservation. *Desafios. Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins*. Palmas, V. 12, N. 6, P. 140-159, DOI: https://doi.org/10.20873/2025_out_17699.
54. Gallo, M., Ferrara, L., Naviglio, D. (2018). Application of Ultrasound in Food Science and Technology: A Perspective. *Foods*, 7 (10), 164. <https://doi.org/10.3390/foods7100164>.
55. Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K., Sharanagat, V. S. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrason Sonochem*. Jan; 70: 105293. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105293.
56. Hoque, M, Talukdar, S, Roy, K. R., Hossain, M. A., Zzaman, W. (2024). Sonication and thermal treatment of pineapple juice: Comparative assessment of the physicochemical properties, antioxidant activities and microbial inactivation. *Food Sci Technol Int*. Jan; 30 (1): 37-48. doi: 10.1177/10820132221127504.
57. Mgoma, S. T., Basitere, M., Mshayisa, V. V., De Jager, D. A. (2025). Systematic Review on Sustainable Extraction, Preservation, and Enhancement in Food Processing: The Advancement from Conventional to Green Technology Through Ultrasound. *Processes*, 13, 965. <https://doi.org/10.3390/pr13040965>.
58. Луговський, О. Ф., Берник, І. М., Гришко, І. А., Желяскова, Т. М., Желясков В. П. (2023). Ультразвукові технології у виробництві молочних продуктів. Матеріали XXVII міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Том 2, № 27. С. 44-47.
59. Darré, M, Vicente, A. R., Cisneros-Zevallos, L., Artés-Hernández, F. (2022). Postharvest Ultraviolet Radiation in Fruit and Vegetables: Applications and Factors Modulating Its Efficacy on Bioactive Compounds and Microbial Growth. *Foods*. Feb. 23; 11 (5): 653. doi: 10.3390/foods11050653.

60. Ramos, G. L. P. A. , Esper, L. M. R., Gonzalez, A. G. M. (2024). A review on the application of UV-C treatment on food and food surfaces: association with food microbiology, predictive microbiology and quantitative microbial risk assessment, *International Journal of Food Science and Technology*, V. 59, Issue 3, March. P. 1187-1196, <https://doi.org/10.1111/ijfs.16880>.
61. Delorme, M. M., Guimarães, J. T., Coutinho, N. M., Balthazar, C. F., Rocha, R. S., Silva, R., Margalho, L. P., Pimentel, T. C., Silva, M. C., Freitas, M. Q., Granato, D., Sant'Ana, A. S., Duarte, M. C. K. H., Cruz, A. G. (2020). Ultraviolet radiation: An interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods. *Trends in Food Science & Technology*. V. 102. P. 146-154, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.06.001>.
62. Koutchma, T. (2008). UV Light for Processing Foods. *Ozone Sci. Eng.*, 30 (1), 93-98.
63. Singh, H., Bhardwaj, S. K., Khatri, M., Kim, K.-H., Bhardwaj, N. (2021). UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products. *Chemical Engineering Journal*. Volume 417. 128084. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128084>.
64. Tchoukouang, R. D., Lima, A. R., Quintino, A. C., Cristofoli, N. L., Vieira, M. C. (2023). UV-C Light: A Promising Preservation Technology for Vegetable-Based Nonsolid Food Products. *Foods*, 12 (17), 3227. <https://doi.org/10.3390/foods12173227>.
65. Kaale, L. D., Eikevik, T. M., Rustad, T., Kolsaker, K. (2011). Superchilling of food: A review. *Journal of Food Engineering*. V. 107, Issue 2. P. 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.06.004>.
66. James, S. J., James, C. (2023). Chapter 23. Chilling and Freezing. Editor(s): Andersen, V., Lelieveld, H., Motarjemi, Y. *Food Safety Management (Second Edition)*. Academic Press. P. 453-474. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820013-1.00005-X>.

67. Alabi, K. (2024). An overview of recent advances in cooling techniques for fresh fruits and vegetables. *Agri. Eng. Int. CIGR J.* 26, 213-221. <https://www.researchgate.net/publication/379435563>.
68. Mwakosya, A. W., Alvarez, G., Ndoye, F. T. (2025). Effects of Partial Freezing and Superchilling Storage on the Quality of Beef: A Kinetic Modelling Approach. *Foods.* Jul 30; 14 (15): 2687. doi: 10.3390/foods14152687.
69. Tian, T., Kang, Y., Liu, L., Wang, X. (2022). The effect of super-chilled preservation on shelf life and quality of beef during storage. *FoodSci. Technol.*, 42, e73222.
70. Lucia, U., Grisolia, G. (2024). Magnetocaloric Refrigeration in the Context of Sustainability: A Review of Thermodynamic Bases, the State of the Art, and Future Prospects. *Energies*, 17 (14), 3585. <https://doi.org/10.3390/en17143585>.
71. Li, B., Sun, D. W. (2002). Novel methods for rapid freezing and thawing of foods—a review. *Journal of food engineering*, 54(3), 175-182.
72. Grover, Y., Negi, P. S. (2023). Recent Developments in Freezing of Fruits and Vegetables: Striving for Controlled Ice Nucleation and Crystallization With Enhanced Freezing Rates. *Journal of Food Science.* 88 : 4799-4826.
73. Prestes, A. A., Helm, C.V., Esmerino, E. A., Silva R, da Cruz, A. G., Prudencio, E.S. (2022). Freeze concentration techniques as alternative methods to thermal processing in dairy manufacturing: A review. *J Food Sci.* Feb; 87 (2): 488-502. doi: 10.1111/1750-3841.16027.
74. Nowak, D, Jakubczyk, E. (2020). The Freeze-Drying of Foods. The Characteristic of the Process Course and the Effect of Its Parameters on the Physical Properties of Food Materials. *Foods.* Oct 18; 9 (10): 1488. doi: 10.3390/foods9101488.
75. Nowacka, M., Matys, A. Witrowa-Rajchert, D. (2024). Innovative Technologies for Improving the Sustainability of the Food Drying Industry. *Curr Food Sci Tech Rep* 2, 231-239. <https://doi.org/10.1007/s43555-024-00026-8>.