
ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ ХАРЧОВОЇ БЕЗПЕКИ

Петренко О. В., Семенюк Д. П., Смілик М. М.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-18>

ВСТУП

Глобальний приріст населення на планеті, проблема глобального потепління, і як наслідок мінливі та екстремальні кліматичні явища, світова пандемія COVID-19, військові конфлікти в світі в цілому, і війна в Україні, як окремий випадок, все це визначає дефіцит у загальносвітовому виробництві продуктів харчування. За даними ООН¹ на сьогодні в багатьох країнах світу частина населення не в змозі забезпечити себе необхідним раціоном харчування. 3,1 млрд. людей не можуть дозволити собі здоровий раціон харчування. У 22,3% дітей молодше 5 років спостерігалось відставання в зростанні, а 6,8% страждали від виснаження. Тим часом, за даними Міжнародного інституту холоду, щорічно втрачається від 20 до 30% всіх продуктів харчування, що виробляються у світі, що становить майже мільярд тон. З цієї кількості не менше 50% – це продукти, що швидко псуються, збереження яких можливе за допомогою низьких температур.

На сьогодні низькотемпературні технології дозволяють швидко консервувати харчову сировину та продукти з мінімальними втратами їх харчової та поживної цінностей, широко застосовується на підприємствах харчової та переробної індустрій різної потужності. Негативних процесів в структурі харчових продуктів пов'язаних в першу чергу з перерозподілом вологи та кристалоутворенням можна запобігти за рахунок інноваційних рішень низькотемпературної обробки харчової продукції.

¹ Положення справ в області продовольчої безпеки і харчування у світі // Офіційний сайт. – URL: <https://www.fao.org/3/cc3017ru/online/state-food-security-and-nutrition-2023/food-security-nutrition-indicators.html> (дата звернення 25.03.2024).

1. Виникнення передумов проблеми та формулювання проблеми

Тривожні тенденції прослідковуються в Доповіді про стан продовольчої безпеки та харчування у світі (СОФД). Так за даними ООН², якщо з 2015 р. частка голодуючих залишалася відносно незмінною, але в 2020 р. вона почала зростати і у 2021 р., досягла 9,8% від чисельності світового населення. Для порівняння, у 2019 р. ця частка становила 8 %, а в 2020 р. – 9,3%.

Світова спільнота, ще не повністю оговталася від пандемії COVID-19 і тепер відчуває на собі наслідки війни в Україні, що спричинила потрясіння на ринках продовольства та енергоносіїв. У результаті у 2021 році кількість людей, які стикаються з проблемою голоду, зростає ще приблизно на 38 млн. осіб. У лютому 2022 року, коли світ тільки почав одужувати від тяжких наслідків пандемії, почалася війна в Україні, в яку опинилися залучені два найбільші виробники сільськогосподарської продукції у світі, що викликало потрясіння на ринках сировинних товарів та електроенергії, сповільнило відновлення економіки та додатково посилило ситуацію невизначеності³.

Таким чином, вирішення проблем харчової безпеки для населення нашої країни та проблем забезпечення людства, в цілому якісним продовольством в обсягах, що відповідають науково обґрунтованим раціональним нормам споживання, є глобальною проблемою розвитку міжнародної спільноти, а питання збереження та скорочення втрат продовольства під час транспортування, переробки та збереження сировини і готової продукції – дуже актуальними⁴.

Відомо що вода – основний компонент сировини та готових харчових продуктів. Вміст води коливається у межах: у рослинних продуктах – від 80 (груші) до 95% (помідори і огірки); у тваринних продуктах – від 50% (жирна свинина) до 78% (яловичина). Наявність у харчових продуктах великої кількості вологи впливає на теплофізичні процеси при низькотемпературній обробці та подальшому зберіганні продуктів, що зумовлено особливостями її розподілу та зв'язку з іншими компонентами продукту, великою її теплоємністю та теплою фазового переходу при кристалізації та випаровуванні.

² ФАО, МФСР, ЮНИСЕФ, ВПП и ВОЗ. 2022. Доповідь. Стан продовольчої безпеки та харчування у світі, 2022. Переорієнтація продовольчої та сільськогосподарської політики, щоб зробити здорове харчування більш доступним. Рим, ФАО. // Офіційний сайт. – URL: <https://doi.org/10.4060/cc0639en> (дата звернення 27.03.2024)

³ ФАО. 2023. Global food security challenges and its drivers: conflicts and wars in Ukraine and other countries, slowdowns and downturns, and climate change. Council, Hundred and Seventy-second Session, Rome, 24–28 April 2023. CL 172/5. Rome. // Офіційний сайт. – URL: www.fao.org/3/nl652en/nl652en.pdf (дата звернення 29.03.2024)

⁴ Шутюк В.В., Бессараб О.С., Душак О.В., Ємцев В.І. Холодильні технології: навчальний посібник. Київ: НУХТ, 2022. С. 9.

Перетворення води на лід при заморожуванні супроводжується міграцією вологи та змінами теплофізичних та механічних властивостей продуктів. Випаровування вологи з поверхні продуктів при низькотемпературній обробці та зберіганні призводить до втрати маси та погіршення якості продукту. Зміна фазового стану води – головний чинник, що зумовлює гальмування небажаних дифузійних, хімічних, біохімічних та мікробіологічних процесів у харчових продуктах за умови їх заморожування.

Звідси можна зробити короткий висновок: чим менше води в сировині, тим менше поживного середовища для мікроорганізмів, тим довше термін зберігання та вища якість продукту.

З іншого боку при зниженні температури нижче криоскопічної починається фазовий перехід води харчового продукту з утворенням кристалів льоду, тобто головний чинник пошкодження клітин під час заморожування є також процеси перетворення води на лід.

Руйнівний фактор кристалізації на внутрішні структури харчових продуктів, при зниженні їх температур нижче температур фазового переходу води у вільному та зв'язаному, станах пояснюється різницею між густиною води та льоду. Кристали льоду, що утворюються всередині клітин і в суспензії міжклітинного простору, створюють механічну напруженість через збільшення внутрішнього об'єму. Процеси неминучого зрощення первинних кристалів та їх подальшого зростання (за рахунок дегідратації прилеглих до кристалів тканин) призводять до повного або часткового механічного руйнування клітинних та міжклітинних структур. Одночасно підвищуються концентрації розчинених речовин, і вплив цих концентрацій на матрицю продукту призводить при зберіганні до денатурації білків, окислення жирів, руйнування вуглеводів, вітамінів і, відповідно, до деградації органолептичних властивостей вихідного продукту.

Одним із шляхів вирішення вищезазначених проблем на сучасному рівні є використання низькотемпературних технологій в технологічних процесах консервування та переробки продуктів тваринного та рослинного походження, від моменту заготівлі до моменту споживання та зменшення розмірів кристалів льоду, що утворюються при заморожуванні, аж до запобігання їх утворенню.

2. Аналіз існуючих методів вирішення проблеми та формулювання завдання для оптимального розвитку техніки

Як відомо, основне завдання низькотемпературних технологій в області збереження харчових продуктів – розробка процесів зовнішнього впливу на харчові продукти при холодильній обробці та зберіганні та знаходження раціональних режимів такого впливу з

урахуванням індивідуальних особливостей кожного виду продуктів, тривалості зберігання та споживчого призначення.

На сьогодні, застосування низькотемпературних технологій у харчовій та переробній промисловості дозволяє вирішувати питання зберігання харчової продукції протягом тривалого часу двома шляхами:

- заморожування харчової сировини та продуктів;
- кріопереробка харчової сировини.

Швидке заморожування харчових продуктів нині є найпрогресивнішим і найрозповсюдженим методом їх зберігання. Низькі температури широко використовуються при зберіганні кулінарних напівфабрикатів, м'ясної, рибної та плодоовочевої продукції. У оброблених методом швидкого заморожування продуктах краще зберігаються смакові якості та поживна цінність, що дає можливість використовувати їх у чистому вигляді, застосовувати для виробництва продуктів для дитячого та дієтичного харчування.

В основу технології швидкого заморожування покладено метод відбору тепла від продукту шляхом зниження температури охолоджуючого середовища до мінус 30...35 °С. Найчастіше в якості охолоджуючого середовища застосовують повітря, яке інтенсивно обдуває продукт. Більш низька температура охолоджуючого середовища не має сенсу, оскільки це призводить до деформацій продукту і невиправданих витрат потужності холодильного обладнання. Для уникнення негативних явищ (температурного та осмотичного шоку) низькотемпературну обробку харчової продукції рекомендовано проводити в три етапи.

Перший етап охолодження продукту до 0°C за рахунок обдування потоком повітря, з температурою мінус 35...37°C.

Другий етап – зниження температури продукту нижче кріоскопічної, яка в залежності від специфічних особливостей продукту може коливатися. На цьому етапі відбувається кристалізація більшої частини води, що міститься в продуктах та формування розмірів кристалів льоду. І на останньому третьому етапі проводиться процес доморожування продукту, зі зниженням його температури до заданої технологічної⁵.

Як вказувалось раніше, одним з істотних недоліків процесу заморожування є утворення кристалів льоду, які за розміром більші за клітини продукту і тому ушкоджують харчові волокна. При регенерації такий продукт втрачає близько 20% маси, а при тривалому зберіганні дещо погіршуються його смакові та зовнішні якості. Наприклад, заморожені фрукти після 1,5 місяців зберігання покриваються льодяною

⁵ Семенюк Д.П., Петренко О.В. Холодильне обладнання : підручник. – Х.: Світ книг, 2021. – С. 355, ISBN 978-966-2678-69-7

шкоринкою і при подальшому приготуванні дуже швидко втрачають вологу.

Отже, зменшити негативний вплив пов'язаний з кристалоутворенням притаманний традиційним методам заморожування можливо за рахунок додаткових засобів впливу саме на молекули води в харчових продуктах.

Для контролю росту та структури кристалів льоду можливо застосовувати наступні технології та стратегії: зниження температури охолоджуючого середовища, збільшення темпу охолодження, підвищення коефіцієнта передачі поверхневого тепла, використання кріопротекторів, високого тиску, акустичних хвиль, електричного та магнітного поля.

Розглянемо деякі інноваційні рішення низькотемпературних технологій обробки харчової сировини за рахунок яких можливо покращити якість продукції та підвищити харчову безпеку, їх переваги та недоліки, а також можливі варіанти конструктивної реалізації.

Літературні дані свідчать про те, що підвищення швидкості теплопередачі і масообміну, викликане впливом ультразвуку, істотно впливають на темп зниження температури і може прискорити цей процес⁶. Цей факт пояснюється тим, що в середовищі утворюються кавітаційні бульбашки здатні поліпшити масообмін і підвищити теплопередачу з поверхні⁷.

На цьому ефекті заснована інноваційна технологія Acoustic Extra Freezing (AEF), що поєднує в собі дію низьких температур та акустичних хвиль. Суть технології AEF полягає у дії акустичних хвиль, які створюють усередині клітинної структури та у міжклітинному просторі мікроскопічні льодяні кристали, настільки дрібні, що непомітні неозброєному оку. Під впливом хвиль і низьких температур кристали збільшуються, заміщаючи воду, але при цьому не порушують структуру продукту, оскільки кристали не з'єднуються між собою навіть за тривалого зберігання⁸.

Перевагами даної технології є:

– збереження структури продукту (кристали льоду, що утворюються під впливом акустичних хвиль не порушують структуру клітин, не деформують їх тому зберігається форма і текстура продукту навіть після тривалого зберігання);

⁶ Shi Z. et al. The effects of ultrasonic treatment on the freezing rate, physicochemical quality, and microstructure of the back muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *LWT*. Academic Press, 2019. Vol. 111. P. 306.

⁷ Martínez-Ramos T., Corona-Jiménez E., Ruiz-López I. I. Analysis of ultrasound-assisted convective heating/cooling process: Development and application of a Nusselt equation. *Ultrasonics Sonochemistry*. Elsevier B. V., 2021. Vol. 74. P. 301.

⁸ Aef technology acoustic extra freezing // Офіційний сайт. – URL: <https://www.aeftrade.eu> (дата звернення 25.03.2024).

– збільшення терміну зберігання продукту (невеликі за розмірами кристали льоду забезпечують кращу стабільність та захист від утворення великих кристалів, що можуть пошкодити структуру продукту та вплинути на його якість. Це дозволяє продуктам, обробленим за допомогою технології АЕФ, подовжити термін зберігання без втрати якості);

– високі органолептичні властивості та поживна цінність (збереження клітинної структури продукту допомагає зберегти смакові якості та поживну цінність продукту).

Після дефростації продукти втрачають максимум 2% своєї ваги. За структурою, виглядом та смаком вони практично ідентичні свіжим. Окислення продукту знижується до 98% порівняно зі звичайним заморожуванням.

Технологія АЕФ реалізується за допомогою спеціальної системи, яка складається з акустичних блоків і процесора, керованих вбудованим програмним забезпеченням. Налаштування програм залежать від виду замороженого продукту – напівфабрикати, риба, овочі, м'ясо та ін.

Технологія АЕФ може бути вбудована в готове технологічне холодильне обладнання для заморожування харчової продукції, як в камери шокового заморожування так й в швидкокоморозильні апарати (тунельного, стелажного, порційного, контактного або спірального типу).

Однак при застосуванні даної технології відзначаються деякі недоліки. Висока інтенсивність впливу акустичними хвилями може призвести до виникнення теплового ефекту на поверхні зразків, що знижує швидкість охолодження⁹. Для забезпечення балансу між кавітаційним і тепловим ефектом ультразвуку необхідний ретельний підбір режиму впливу. В роботі авторів¹⁰ було відзначено, що для кожної стадії заморожування існує своя оптимальна інтенсивність впливу, тому доцільно підбирати режим впливу зі змінними параметрами.

Окрім цього, велику роль відіграє походження сировини та продукції, тому що ультразвук є механічною хвилею та коефіцієнт його ослаблення при поширенні хвилі відрізняється у різних середовищах. Зокрема, при обробці рослинної сировини слід враховувати, що

⁹ Kiani H., Sun D. W. Numerical simulation of heat transfer and phase change during freezing of potatoes with different shapes at the presence or absence of ultrasound irradiation. *Heat and Mass Transfer*. [Waerme- und Stoffuebertragung]. Springer Verlag, 2018. Vol. 54, no 3. P. 890.

¹⁰ Zhu Z. et al. Effects of micro-nano bubbles on the nucleation and crystal growth of sucrose and maltodextrin solutions during ultrasound-assisted freezing process. *LWT*. Academic Press, 2018. Vol. 92. P. 408.

наявність порожнин у тканинах рослин сприяє розсіюванню хвилі, а їх кількість у тканинах різних рослин може значно відрізнятись¹¹.

Отже обираючи технологію заморожування з застосуванням ультразвукових хвиль та відповідне технологічне обладнання дуже важливо дотримуватись усіх рекомендацій та інструкцій щодо заморожування кожного окремого виду продуктів у відповідності до програми заморожування закладеної у налаштуваннях.

Позитивним моментом є те що технологія AEF є безпечною для людини та навколишнього середовища, оскільки вона не використовує небезпечних хімічних речовин, акустичні хвилі, які вона використовує, не мають негативного впливу при нормальному використанні.

Завдання створення компактного, екологічно безпечного, енергетично ефективного та високонадійного холодильника, що працює в діапазоні кімнатних температур, надзвичайно актуальне нині. Це обумовлено цілою низкою серйозних претензій до нині діючих систем охолодження. Відомо, зокрема, що при експлуатації можливих витоків робочих газів (холодоагентів), що використовуються в даний час, викликають такі серйозні екологічні проблеми як руйнування озонового шару і глобальне потепління. Серед різноманітних альтернативних технологій, які могли б використовуватися в холодильних пристроях, все більшої уваги дослідників у всьому світі привертає технологія магнітного охолодження. Інтенсивні роботи, присвячені магнітному охолодженню, ведуться у багатьох лабораторіях та університетах Європи, США, Канади та Китаю. Магнітний холодильник екологічно безпечний та дозволяє значно знизити споживання електроенергії. Остання обставина надзвичайно важлива з урахуванням воістину величезної кількості холодильних установок, що використовуються людиною в різних галузях її діяльності.

Технологія магнітного охолодження заснована на здатності будь-якого магнітного матеріалу змінювати свою температуру та ентропію під впливом магнітного поля, як це відбувається при стисканні або розширенні газу або пари в традиційних холодильниках. Така зміна температури або ентропії магнітного матеріалу при зміні напруженості магнітного поля, в якому він знаходиться, називається магнітокалоричним ефектом (МКЕ). Зміна температури магнітного матеріалу відбувається в результаті перерозподілу внутрішньої енергії магнітної речовини між системою магнітних моментів його атомів та кристалічною решіткою. Максимальної величини МКЕ досягає в магнітоупорядкованих матеріалах, таких як феромагнетики,

¹¹ Zhu Z. et al. Freezing Efficiency and Quality Attributes as Affected by Voids in Plant Tissues During Ultrasound-Assisted Immersion Freezing. Food and Bioprocess Technology. Springer New York LLC, 2018. Vol. 11, no 9. P. 1620.

антиферромагнетики і т.п., при температурах магнітних фазових переходів (температурах магнітного впорядкування – Кюрі, Нееля і т.д.). Головна перевага апаратів для магнітного охолодження пов'язана з високою щільністю матеріалу – твердого тіла – порівняно із щільністю пари чи газу. Зміна ентропії на одиницю обсягу у твердих магнітних матеріалах у 7 разів вища, ніж у газі. Це дозволяє робити значно компактніші холодильники, використовуючи в якості робочого тіла магнітний матеріал. Саме магнітне робоче тіло служить аналогом холодоагентів, які у традиційних парогазових холодильних установках, а процес розмагнічування-намагнічування – аналогом циклів стиснення – розширення.

Ефективність роботи холодильника головним чином визначається кількістю незворотної роботи, що проводиться протягом циклу – для ефективних пристроїв воно має бути якомога нижчим. У газовому рефрижераторі існують пристрої, що виробляють значну кількість незворотної роботи – це регенератор, компресор та теплообмінники. Значна частина незворотної роботи проводиться в теплообмінниках – вона прямо пропорційна адіабатичній зміні температури робочого тіла, яка значно більша в газі, ніж у магнітному матеріалі. З цієї причини найбільш ефективно відведення тепла відбувається в магнітному холодильному циклі, особливо в регенеративному. Спеціальна конструкція теплообмінника та використання регенератора з великою площею поверхні дозволяють досягти малої частки незворотної роботи при магнітному охолодженні. Відповідно до теоретичних оцінок ефективність магнітного регенеративного холодильного циклу в температурному діапазоні від 4,5 до 300 К може становити від 38 до 60 % ефективності циклу Карно (близько 52 % в інтервалі температур від 20 до 150 К, і близько 85% в інтервалі 300 К). При цьому на всіх етапах циклу умови теплопередачі будуть найбільш досконалими із відомих. Крім того, магнітні холодильники включають невелику кількість рухомих деталей і працюють при низьких частотах, що дозволяє звести до мінімуму знос холодильника і збільшити час його експлуатації.

МКЕ було відкрито порівняно давно (1881 року) Є. Варбургом (E. Warburg)¹². Варбург спостерігав, як під впливом магнітного поля залізний зразок нагрівався чи охолоджувався. Вчений зробив висновок про те, що зміна температури зразка є наслідком зміни внутрішньої енергії речовини, що володіє магнітною структурою, під дією поля. Проте практичного використання цього явища було ще далеко. Ланжевен (Langevin, 1905) був першим, хто продемонстрував, що зміна намагніченості парамагнетика призводить до оборотної зміни температури зразка.

¹² Warburg E. Magnetische untersuchungen. Ann. Phys, 1881, V. 249. № 5. – P. 151.

Власне магнітне охолодження було запропоновано майже через 50 років після відкриття МКЕ незалежно двома американськими вченими Петером Дебаєм (Peter Debye, 1926) і Вільямом Джіоком (William Giauque, 1927) як спосіб досягнення температур нижче точки кипіння рідкого гелію. Джіок і МакДугалл були першими, хто продемонстрував найпростіший експеримент із магнітного охолодження у 1933 році¹³. (Тільки пізніше це зробили також де Гааз (de Haas, 1933) і Курті (Kurti, 1934). В ході цього експерименту вдалося досягти температури 0,25 К, а в якості тепловідвідної субстанції використовувався рідкий гелій, що накачується, при температурі 1,5 К. Таблетка з магнітною сіллю перебувала в стані теплової рівноваги з тепловідвідною речовиною, поки в соленоїді існувало сильне магнітне поле. Коли ж соленоїд розряджався, магнітна таблетка термічно ізолювалася і її температура знижувалася. Однак, потужність такого рефрижератора та його робочий інтервал температури надто малі для промислових застосувань.

Більш складні методи, що включають теплову регенерацію і циклічні зміни магнітного поля, були запропоновані в 60-х роках минулого століття. Дж. Браун з НАСА в 1976 продемонстрував регенеративний магнітний холодильник, що діє вже поблизу кімнатної температури з робочим інтервалом температур в 50 К. Потужність холодильника і його ефективність і в цьому випадку були низькими, оскільки температурний градієнт необхідно було підтримувати шляхом перемішування тепловідвідної рідини, а час, необхідний зарядки і розрядки магніту було занадто великим. Невеликі малопотужні холодильні пристрої були побудовані в 80-х-90-х роках відразу в кількох дослідницьких центрах: Los Alamos National Lab, Navy Lab в Annapolis, Oak Ridge National Lab, Astronautics (усі США), Toshiba (Японія).

Наразі роботи над невеликими магнітними холодильниками для космічних застосувань, що працюють за принципом адіабатичного розмагнічування, фінансуються кількома дослідницькими центрами НАСА. Дослідження можливостей магнітних холодильників для комерційних застосувань ведуться Astronautics Corporation of America (США, Вісконсін) та Університетом Вікторія (Канада). Вивченням матеріалів для робочих тіл магнітних холодильників з прикладної точки зору зараз інтенсивно займаються Лабораторія Еймса (Ames, штат Айова), Університет Three Rivers в Квебеку (Канада), NIST (Gathersburg, MD) та компанія “Перспективні магнітні технології та консультації” (AMT&C).

¹³ Стріха М.М. Методичний посібник до курсу «Розвиток фізичних теорій» для студентів факультету радіофізики, електроніки та комп’ютерних систем. К.:ВЦ «Київський університет», 2021. – С. 154 с.

У 1997 році Astronautics Corporation of America продемонструвала відносно потужний (600 Ватт) магнітний холодильник, що працює поблизу кімнатної температури¹⁴. Ефективність цього холодильника була порівнянна з ефективністю звичайних фреонових холодильників. Використовуючи активний магнітний регенератор (в цьому пристрої суміщені функції теплового регенератора і робочого тіла), цей холодильник працював протягом більш ніж 1500 годин, забезпечуючи робочий інтервал температур 10 К поблизу кімнатної температури, потужність 600 Ватт, ефективність близько 35% по відношенню до циклу Карно при зміні магнітного поля завбільшки 5 Тесла. У цьому пристрої застосовувався надпровідний соленоїд, а в якості робочого тіла використовувався рідкоземельний метал гадоліній (Gd). Чистий гадоліній використовувався в цій якості не тільки Astronautics, але і НАСА, Navy та іншими лабораторіями, що обумовлено його магнітними властивостями, а саме – температурою Кюрі (близько 20 °С) і досить значним магнітокалоричним ефектом.

Величина МКЕ, отже й ефективність процесу охолодження магнітному холодильнику визначається властивостями магнітних робочих тіл. У 1997 році Лабораторія Еймса повідомила про відкриття у сполуках $Gd_5(SixGe_{1-x})_4$ гігантського магнітокалоричного ефекту. Температура магнітного впорядкування цих матеріалів може змінюватись у широких межах від 20 К до кімнатної температури завдяки зміні співвідношення вмісту кремнію (Si) та германію (Ge). Найбільш перспективними для використання як робочі тіла в даний час вважаються метал гадоліній, ряд інтерметалевих сполук на основі рідкісноземельних елементів, система сполук силіцидів-германідів $Gd_5(Ge-Si)_4$, а також $La(Fe-Si)_{13}$. Застосування цих матеріалів дозволяє розширити робочий інтервал температур холодильника та суттєво покращити його економічні показники.

Зауважимо, однак, що дослідницькі роботи з пошуку ефективних сплавів для робочих тіл магнітних холодильників були виконані провідними вченими, якими було проаналізовано численні можливі комбінації рідкісноземельних та магнітних металів та інших матеріалів з погляду пошуку оптимальних сплавів для реалізації магнітного

¹⁴ Astronautics. Trusted innovation. // Офіційний сайт. – URL: <https://www.astronautics.com> (дата звернення 01.03.2024).

охолодження у різних діапазонах температур¹⁵. Було виявлено, зокрема, що серед матеріалів з високими магнітокалоричними властивостями з'єднання Fe₄₉Rh₅₁ (сплав заліза з родієм) має найбільший питомий (тобто припадає на одиницю магнітного поля) магнітокалоричним ефектом. Розмір питомої МКЕ при цьому сполуки у кілька разів більше, ніж у сполуках силіцидів-германідів. Цей сплав не може бути використаний на практиці через його велику вартість, а також суттєвих гістерезисних ефектів у ньому, проте він може служити своєрідним еталоном, з яким слід порівнювати магнітокалоричні властивості досліджуваних матеріалів.

Журнал Science News повідомив про створення у США першого у світі побутового (тобто застосовного не тільки в наукових, а й у побутових цілях) холодильника¹⁶. Модель такого холодильника була виготовлена спільно Astronautics Corporation of America і Ames Laboratory і вперше продемонстрована на конференції Великої Вісімки в Детройті в травні 2002 року. Робочий прототип пропонованого побутового магнітного холодильника діє в області кімнатних температур і використовує як джерело поля постійний магніт. Говорячи про це революційне досягнення, професор Карл Шнайднер з Лабораторії Еймса зазначив: "Ми є свідками історичної події в розвитку техніки. У магнітних холодильних пристроях, що демонструвалися раніше, використовувалися великі надпровідні магніти, але в цьому новому магнітному холодильнику вперше застосований постійний магніт".

Пристрій отримав високу оцінку експертів та міністра енергетики США. Оцінки показують, що застосування магнітних холодильників дозволить зменшити загальне споживання енергії США на 5%. Планується, що магнітне охолодження зможе використовуватися в різних галузях людської діяльності – зокрема, в зріджувачах водню, охолоджуючих пристроях для високошвидкісних комп'ютерів і приладів на основі СКВІДів ((від англ. SQUID, superconducting quantum interference device – «надпровідний квантовий інтерферометр»; в буквальному перекладі з англійської squid – «кальмар») – надчутливі магнітометри, які використовуються для вимірювання досить слабких магнітних полів), кондиціонерах для житлових і виробничих приміщень,

¹⁵ Тишина Е.Н. Нове покоління холодильного обладнання метод магнітного охолодження. // Офіційний сайт. – URL: <https://en.shram.kiev.ua/top/invention/invention3/21.shtml> (дата звернення 15.03.2024).

¹⁶ Science News. Science News of 2002. // Офіційний сайт. – URL: <https://www.sciencenews.org/article/science-news-year-2002> (дата звернення 25.03.2024).

охладжувальних системах для транспортних засобів, в побутових і т.п. Необхідно відзначити, що роботи з магнітних холодильних пристроїв фінансуються міністерством енергетики США вже протягом 20 років.

У створеному прототипі магнітного холодильника використовується колісна конструкція, що обертається. Вона складається з колеса, що містить сегменти з порошком гадолінію, а також потужного постійного магніту.

Конструкція спроектована таким чином, що колесо прокручується через робочий проміжок магніту, в якому сконцентровано магнітне поле. При вході сегмента з гадолінію в магнітне поле в гадолінії виникає магнітокалоричний ефект – він нагрівається. Це тепло відводиться теплообмінником, що охолоджується водою. Коли гадоліній виходить із зони магнітного поля, виникає магнітокалоричний ефект протилежного знаку і матеріал додатково охолоджується, охолоджуючи теплообмінник з другим потоком води, що циркулює в ньому. Цей потік і використовується для охолодження холодильної камери магнітного холодильника. Такий пристрій є компактним і працює фактично безшумно і без вібрацій, що вигідно відрізняє його від холодильників, що використовуються сьогодні, з парогазовим циклом¹⁷.

"Постійний магніт і робоче тіло у вигляді гадолінію не вимагають підведення енергії, – каже професор Карл Шнайднер з Ames Laboratory. Енергія необхідна для обертання колеса та забезпечення роботи водяних насосів".

Вперше цю технологію було апробовано ще у вересні 2001 року. В даний час йде робота над подальшим розширенням її можливостей: удосконалюється технологічний процес комерційного виробництва чистого гадолінію і необхідних його сполук, який дозволить досягти більшої величини МКЕ за менших витрат. Водночас, співробітники Лабораторії Еймса сконструювали постійний магніт, здатний створювати сильне магнітне поле¹⁸. Новий магніт створює поле вдвічі більше, ніж магніт у попередній конструкції магнітного холодильника (2001 р.), що дуже важливо, тому, що величина магнітного поля визначає такі параметри холодильника, як ефективність та вихідна потужність. На процес отримання з'єднання для робочого тіла $Gd_5(Si_2Ge_2)$ та конструкцію постійного магніту подано заявки на патент.

¹⁷ Тітлов О.С., Горикін С.Ф. Холодильне обладнання підприємств харчової промисловості: Навчальний посібник – Львів: Новий світ-2000, 2012. – С.186.

¹⁸ Дослідницький центр Еймса. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення 20.03.2024).

Всі магнітні холодильники можна розділити на два класи за типом магнітів, що використовуються: системи, що використовують надпровідні магніти і системи на постійних магнітах. Перші з них мають широкий діапазон робочих температур і відносно високою вихідною потужністю. Вони можуть використовуватися, наприклад, у системах кондиціонування великих приміщень та в обладнанні сховищ харчових продуктів. Охолоджувальні системи на постійних магнітах мають відносно обмежений температурний діапазон (не більше, ніж на 30°C за один цикл) і, в принципі, можуть застосовуватись у пристроях із середньою потужністю (до 100 Вт) – таких як автомобільний холодильник та портативний рефрижератор для пікніка. Але й ті, й інші мають цілу низку переваг над традиційними парогазовими холодильними системами.

Низька вплив на екологію. Робоче тіло є твердим і може бути легко ізольованим від навколишнього середовища. Metали, що застосовуються в якості робочих тіл, лантаніди малотоксичні, і можуть бути використані повторно після утилізації пристрою. Тепловідвідне середовище повинне мати лише низьку в'язкість і достатню теплопровідність, що добре відповідає властивостям води, гелію або повітря. Останні добре сумісні з довкіллям.

Висока ефективність. Магнітокалоричне нагрівання та охолодження – практично оборотні термодинамічні процеси, на відміну від процесу стиснення пари в робочому циклі парогазового холодильника. Теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження показують, що магнітні охолоджувальні установки характеризуються вищими коефіцієнтами корисної дії та економічністю¹⁹. Зокрема, в області кімнатних температур магнітні холодильники потенційно на 20-30% ефективніші, ніж у парогазовому циклі. Технологія магнітного охолодження у перспективі може бути дуже ефективною, що дозволить значно скоротити вартість таких установок.

Довгий термін експлуатації. Технологія передбачає використання малої кількості деталей, що рухаються, і низьких робочих частот в охолоджуючих пристроях, що значно скорочує їх знос.

Гнучкість технології. Можливе використання різних конструкцій магнітних холодильників, залежно від призначення.

¹⁹ Kosogor, A. Magnetocaloric Effect in Metamagnetic Shape Memory Alloy // Журнал нано– та електронної фізики. – 2020. – Т. 12, № 1. – 01018. – DOI: 10.21272/jnep.12(1).01018.

Корисні властивості заморожування. Магнітна технологія дозволяє проводити охолодження та заморожування різних речовин (вода, повітря, хімікати) з незначними змінами для кожного випадку. На відміну від цього, ефективний парогазовий цикл охолодження вимагає багатьох окремих ступенів або суміші різних робочих охолоджувачів для проведення такої ж процедури.

Швидкий прогрес у розвитку надпровідності та поліпшенні магнітних властивостей постійних магнітів. В даний час ціла низка відомих комерційних компаній успішно займаються поліпшенням властивостей магнітів NdFeB (найбільш ефективні постійні магніти) і працюють над їх конструкціями. Поряд з відомим прогресом у галузі надпровідності це дозволяє сподіватися на покращення якості магнітних холодильників та одночасне їх здешевлення²⁰.

Крім переваг магнітному охолодженню притаманні також певні недоліки. До них можна віднести: необхідність екранування магнітного джерела; відносно висока нині вартість джерел магнітного поля; обмежений інтервал зміни температури в одному циклі охолодження у системах на постійних магнітах (не більше 30°C).

Інноваційною технологією низькотемпературної обробки є також Electromagnetic Shock Freezing (ESF), що поєднує в собі дію низьких температур та електромагнітних хвиль²¹. Використання електромагнітних коливань призводить молекули води до обертання навколо власної осі, що запобігає їх кластеризації та формуванню кристалів льоду, що пов'язують клітинні стінки. Це повернення також штучно знижує температуру замерзання води приблизно до мінус 7°C, коли продукт досягає цієї температури, електричне поле відключається, і він промерзає наскрізь майже миттєво. При цьому холодильне обладнання з електромагнітним полем використовує на 30% менше енергії, ніж звичайні морозильні камери, а сам процес заморожування в кілька разів швидше, в залежності від типу продукту.

Після закінчення процесу заморожування структура харчового продукту не змінюється і в подальшому при обробці більш низькими температурами, що знижують активність ферментів, продукт

²⁰ NdFeB Magnet Manufacturer. // Офіційний сайт. – URL: <http://surl.li/skisq>. (дата звернення 30.03.2024).

²¹ Investigation of a Shock Freezing Concept with Additional Electromagnetic Field Exposure / Viktors Mironovs, Vadims Sokolovs, Vjaceslavs Zemcenkovs, Jekaterina Kuzmina, Viktorija Stankevica and Vjaceslavs Lapkovskis URL://www.researchgate.net/publication/376893433 (дата звернення 05.04.2024).

залишається стабільним. Особливістю цієї технології також є відтермінування в часі процесу заморожування, коли продукт вже повністю заморожений і кристалізація льоду припинена. Продукт, заморожений за допомогою електромагнітної низькотемпературної обробки, може надалі зберігатися у звичайних морозильних камерах до 18 місяців при зберіганні в камері з температурою не нижче мінус 18°C, до 24 місяців при зберіганні при мінус 24°C і до 36 місяців при мінус 30°C. Керований процес одночасного зростання невеликих кристалів та їх рівномірний розподіл всередині об'єму продукту та їх «сніжинкоподібна» форма дозволяють зберегти цілісність і клітини, і зовнішньої оболонки продукту, що забезпечує значне збільшення термінів зберігання продуктів без погіршення їх споживчих властивостей та якостей.

Холодильне обладнання з ESF технологією відрізняється від стандартного наявністю спеціального пристрою, що виробляє електромагнітне поле та системи моніторингу та керування. Ця система не створює небезпеки для здоров'я людини, також як і земне магнітне поле. Вона генерує таку саму кількість енергії, як мобільний телефон.

Прогресивним рішенням низькотемпературних технологій обробки харчової сировини є кріоконсервування яке від звичайного процесу заморожування відрізняється наступним:

- процес кріоконсервування відбувається при більш низькій температурі охолоджуючого середовища, звичайне заморожування здійснюється при температурах охолоджуючого середовища, як правило, не нижче -50 °C;

- процес заморожування продуктів більш інтенсивний, за рахунок цього утворюються дрібні кристали льоду в міжтканинному просторі продукту та не ушкоджується його тканина. Завдяки цьому відзначається більш висока якість продукту, замороженого кріогенним шляхом порівняно з продуктом, замороженого звичайним способом, що виражається в кращих органолептичних, фізико-хімічних, біологічних та інших показниках.

На сьогодні кріогенний спосіб заморожування *харчових продуктів можливо здійснити шляхом занурення в кріорідину або зрошування ними, також можливо поєднання даних методів. З кріорідин частіше використовують азот завдяки його інертності, низькій нормальній температурі кипіння та гарним термодинамічним властивостям. У рідкому стані азот безбарвний, нетоксичний, тому при заморожуванні продуктів може використовуватись при безпосередньому контакті з*

харчовим продуктом. Основною перевагою є те, що він має надзвичайно низьку температуру кипіння (температура кипіння мінус 195,8°C) при контакті харчового продукту і холодоагентом не відбувається жодних реакцій, термін зберігання значно збільшується через утворення нейтральної атмосфери азоту, що не містить бактерій.

Заморожування харчових продуктів рідким азотом здійснюється способами занурення і зрошування. Спосіб занурення продукту в рідкий азот застосовується в основному для заморожування продуктів, що мають сферичну форму, або для продуктів іншої форми, призначених для подальшого подрібнення: це пояснюється виникненням внутрішнього напруження в продукті, що призводить до утворення тріщин. Негативним моментом занурення є можливість накопичення сконденсованого з повітря кисню у ванні з рідким азотом, що може призвести до самозаймання по мірі випаровування азоту²².

З метою зменшення витрати рідкого азоту для заморожування використовують метод зрошування продукту азотом, що виявився економічнішим, ніж занурення. Для цього використовують різного виду форсунки з великим конусом факела, які можуть здійснювати дрібнодисперсне розпилювання рідкого азоту. В установках періодичної дії порції продукту зрошуються кріорідиною протягом певного часу. Установки безперервної дії виготовляють тунельного або спіральнострічкового типу. Для ефективнішого використання кріорідини й отримання більш рівномірного температурного поля в продукті потоки продукту та кріорідини рухаються у протилежні.

Був розроблений цілий ряд апаратів такого типу: від невеликих на 50...100 кг апаратів періодичної дії фірми Messer до великих (400...1500 кг/год) апаратів безперервної дії (фірма Linde), CRYO-Quick (фірма Air Products), Union Carbide (фірма AGA) тощо.

Заморожування в гранульованому діоксиді вуглецю. При швидкому заморожуванні харчових продуктів твердою фазою діоксиду вуглецю (CO₂) утворюється снігова шуба. Сухий сніг як холодоносіє стерильний, не має запаху та смаку, пригнічує розвиток мікроорганізмів, не допускає контакту кисню повітря з продуктами. Використання гранульованого діоксиду вуглецю є перспективним, оскільки його можна застосовувати як для упакованих харчових продуктів, так і для плодів, нарізаних

²² Масліков М.М. Криогенні технології у харчовій промисловості. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/ffbe5048-d487-4763-921b-7235511bd652/content>. (дата звернення 15.03.2024).

овочів, при цьому температура заморожування в інтервалі від -18 до -79 °C залежно від продукту. При поглинанні CO_2 поверхнею продукту утворюється вугільна кислота H_2CO_3 , яка при розморожуванні та подальшій тепловій обробці випаровується, але якості продукту не погіршується. Швидкість заморожування залежить від фізико-хімічних характеристик продуктів та упаковки, від масового коефіцієнта, способу контакту з гранулами та прийнятої технологічної температури заморожування.

Головним недоліком заморожування криогенним способом є високі видатки на закупівлю кріорідин. Також підвищена швидкість заморожування може призвести до виникнення внутрішніх напружень у продукті, що призводять до порушення його структури і появи тріщин. Тому доцільно використовувати пару азоту, що утворюється під час заморожування продукту, для попереднього охолодження та вирівнювання температур за об'ємом продукту.

Для зменшення витрати кріорідину також застосовують комбіноване заморожування. Спочатку продукт обробляють кріорідиною, щоб на поверхні утворилася щільна кірка льоду, яка перешкоджатиме випаровуванню вологи, а потім доморожують у швидкоморозильному тунельному апараті з інтенсивним рухом повітря. Такий спосіб дозволяє отримати заморожений продукт порівняно високої якості з меншими експлуатаційними видатками.

ВИСНОВКИ

Було розглянуто інноваційні технології в галузі холодильного зберігання харчової продукції.

Наведено інноваційну технологію Acoustic Extra Freezing (AEF), розглянуто її переваги та недоліки. До основних переваг відносяться: збереження структури продукту, збільшення терміну зберігання продукту, високі органолептичні властивості та поживна цінність. До недоліків можна віднести: виникнення теплового ефекту на поверхні зразків, що знижує швидкість охолодження, необхідність ретельного підбору режиму впливу, велику роль відіграє походження сировини та продукції.

Розглянуто технологію магнітного охолодження, яка заснована на здатності будь-якого магнітного матеріалу змінювати свою температуру та ентропію під впливом магнітного поля. Це так званий магнітокалоричний ефект (МКЕ). Холодильні апарати, які використовують даний ефект володіють наступними перевагами: низька

екологічна безпека, висока ефективність, довгий термін експлуатації, гнучкість технології, корисні властивості заморожування. Крім переваг магнітному охолодженню притаманні також певні недоліки. До них можна віднести: необхідність екранування магнітного джерела; відносно висока нині вартість джерел магнітного поля; обмежений інтервал зміни температури в одному циклі охолодження у системах на постійних магнітах (не більше 30°C).

Розглянуто інноваційну технологію низькотемпературної обробки – Electromagnetic Shock Freezing (ESF), що поєднує в собі дію низьких температур та електромагнітних хвиль. Холодильне обладнання з ESF технологією відрізняється від стандартного наявністю спеціального пристрою, що виробляє електромагнітне поле та системи моніторингу та керування. Ця система не створює небезпеки для здоров'я людини, також як і земне магнітне поле. Вона генерує таку саму кількість енергії, як мобільний телефон.

Прогресивним рішенням низькотемпературних технологій обробки харчової сировини є кріоконсервування яке від звичайного процесу заморожування відрізняється наступним: процес кріоконсервування відбувається при більш низькій температурі охолоджуючого середовища, процес заморожування продуктів більш інтенсивний, завдяки чому відзначається більш висока якість продукту, що виражається в кращих органолептичних, фізико-хімічних, біологічних та інших показниках. Головним недоліком заморожування кріогенним способом є високі видатки на закупівлю кріорідин. Крім того підвищена швидкість заморожування може призвести до виникнення внутрішніх напружень у продукті, що призводять до порушення його структури і появи тріщин.

Таким чином, розглянуті технології є перспективними і потребують подальшого дослідження з метою усунення існуючих недоліків. І в подальшому, сподіваємось вони будуть знаходити все більше впровадження і внесуть свою частку в вирішення питання забезпечення продуктами харчування населення світу.

АНОТАЦІЯ

Приріст населення на планеті, проблема глобального потепління, і як наслідки мінливі та екстремальні кліматичні явища, світова пандемія COVID-19, військові конфлікти в світі в цілому, і війна в Україні, як окремий випадок, все це визначає дефіцит у загальносвітовому виробництві продуктів харчування. На сьогоднішній день в світі частина

населення не в змозі забезпечити себе необхідним раціоном харчування. В той же час щорічно втрачається велика частка продуктів харчування, що виробляються у світі. З цієї кількості не менше 50% – це продукти, що швидко псуються, збереження яких можливе за допомогою низьких температур.

Поряд з відомими шляхами вирішення вказаної проблеми, можливо також застосування нових інноваційних способів отримання холоду.

До таких технологій відносяться: інноваційна технологія Acoustic Extra Freezing (AEF), що поєднує в собі дію низьких температур та акустичних хвиль, технологія магнітного охолодження, яка заснована на магнітокалоричному ефекті (МКЕ), який полягає в здатності будь-якого магнітного матеріалу змінювати свою температуру та ентропію під впливом магнітного поля, інноваційна технологія низькотемпературної обробки – Electromagnetic Shock Freezing (ESF), що поєднує в собі дію низьких температур та електромагнітних хвиль.

Дані технології є інноваційними. І хоча над дослідженнями їх працюють вчені багатьох країн, вони все таки на сьогоднішній день залишаються мало вивченими та поки що не знайшли широкого поширення з низки причин.

Сподіваємось, що в ближньому майбутньому, недоліки вказаних технологій будуть зведені до мінімуму, а вони знайдуть широке впровадження в харчову промисловість. Впровадження даних технологій внесе свою частку в вирішення питання збереження харчових продуктів, зменшить частку харчової продукції, яка втрачається.

Література

1. Положення справ в області продовольчої безпеки і харчування у світі // Офіційний сайт. – URL: <https://www.fao.org/3/cc3017ru/online/state-food-security-and-nutrition-2023/food-security-nutrition-indicators.html> (дата звернення 25.03.2024).

2. ФАО, МФСР, ЮНИСЕФ, ВПП и ВОЗ. 2022. Доповідь. Стан продовольчої безпеки та харчування у світі, 2022. Переорієнтація продовольчої та сільськогосподарської політики, щоб зробити здорове харчування більш доступним. Рим, ФАО. // Офіційний сайт. – URL: <https://doi.org/10.4060/cc0639en> (дата звернення 27.03.2024)

3. FAO. 2023. Global food security challenges and its drivers: conflicts and wars in Ukraine and other countries, slowdowns and downturns, and climate change. Council, Hundred and Seventy-second Session, Rome,

24–28 April 2023. CL 172/5. Rome. // Офіційний сайт. – URL: www.fao.org/3/nl652en/nl652en.pdf (дата звернення 29.03.2024)

4. Шутюк В.В., Бессараб О.С., Душак О.В., Ємцев В.І. Холодильні технології: навчальний посібник. Київ: НУХТ, 2022. 172 с.

5. Семенюк Д.П., Петренко О.В. Холодильне обладнання: підручник. Харків: Світ книг, 2021. 633 с.

6. Shi Z. et al. The effects of ultrasonic treatment on the freezing rate, physicochemical quality, and microstructure of the back muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). LWT. Academic Press, 2019. Vol. 111. P. 305–308.

7. Martínez-Ramos T., Corona-Jiménez E., Ruiz-López I. I. Analysis of ultrasound-assisted convective heating/cooling process: Development and application of a Nusselt equation. Ultrasonics Sonochemistry. Elsevier B. V., 2021. Vol. 74.

8. Aef technology acoustic extra freezing // Офіційний сайт. – URL: <https://www.aeftrade.eu> (дата звернення 25.03.2024).

9. Kiani H., Sun D. W. Numerical simulation of heat transfer and phase change during freezing of potatoes with different shapes at the presence or absence of ultrasound irradiation. Heat and Mass Transfer. [Waerme– und Stoffuebertragung]. Springer Verlag, 2018. Vol. 54, no 3. P. 885–894.

10. Zhu Z. et al. Effects of micro-nano bubbles on the nucleation and crystal growth of sucrose and maltodextrin solutions during ultrasound-assisted freezing process. LWT. Academic Press, 2018. Vol. 92. P. 404–411.

11. Zhu Z. et al. Freezing Efficiency and Quality Attributes as Affected by Voids in Plant Tissues During Ultrasound-Assisted Immersion Freezing. Food and Bioprocess Technology. Springer New York LLC, 2018. Vol. 11, no 9. P. 1615–1626.

12. Warburg E. Magnetische untersuchungen. Ann. Phys, 1881. V. 249. № 5. P. 141–164.

13. Стріха М.М. Методичний посібник до курсу «Розвиток фізичних теорій» для студентів факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем. К.:ВЦ «Київський університет», 2021. 454 с.

14. Astronautics. Trusted innovation. // Офіційний сайт. – URL: <https://www.astronautics.com> (дата звернення 01.03.2024).

15. Тишина Е.Н. Нове покоління холодильного обладнання метод магнітного охолодження. // Офіційний сайт. – URL: <https://en.shram.kiev.ua/top/invention/invention3/21.shtml> (дата звернення 15.03.2024).

16. Science News. Science News of 2002. // Офіційний сайт. – URL: <https://www.sciencenews.org/article/science-news-year-2002> (дата звернення 25.03.2024).

17. Тітлов О.С., Горикін С.Ф. Холодильне обладнання підприємств харчової промисловості: Навчальний посібник. Львів: Новий світ-2000, 2012. 286 с.

18. Дослідницький центр Еймса. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення 20.03.2024).

19. Kosogor, A. Magnetocaloric Effect in Metamagnetic Shape Memory Alloy // Журнал нано- та електронної фізики. – 2020. – Т. 12, № 1. – 01018. – DOI: 10.21272/jnep.12(1).01018.

20. NdFeB Magnet Manufacturer. // Офіційний сайт. – URL: <http://surl.li/sklsq>. (дата звернення 30.03.2024).

21. Investigation of a Shock Freezing Concept with Additional Electromagnetic Field Exposure / Viktors Mironovs, Vadims Sokolovs, Vjaceslavs Zemcenkovs, Jekaterina Kuzmina, Viktorija Stankevica and Vjaceslavs Lapkovskis URL://www.researchgate.net/publication/376893433 (дата звернення 05.04.2024).

22. Масліков М.М. Кріогенні технології у харчовій промисловості. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/ffbe5048-d487-4763-921b-7235511bd652/content>. (дата звернення 15.03.2024).

Information about the authors:

Petrenko Olena Volodymyrivna,

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Integrated Electrical

Technologies and Power Engineering

State Biotechnological University

44, Alchevskykh str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Semeniuk Dmytro Pavlovych,

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Integrated Electrical

Technologies and Power Engineering

State Biotechnological University

44, Alchevskykh str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Smilyk Maksym Mykhailovych,

Assistant at the Department of Integrated Electrical Technologies

and Power Engineering

State Biotechnological University

44, Alchevskykh str., Kharkiv, 61002, Ukraine