

UDC 66.047.3.049.6

## INFLUENCE OF THE DRYING PROCESS OF JERUSALEM ARTICHOKE BY CRYOSUBLIMATION FRACTIONATION ON INULIN CONTENT

Victoria V. Evlach<sup>1,2</sup>, Volodymyr O. Potapov<sup>1</sup>, Inna S. Piliugina<sup>1,2</sup>,  
Olena V. Petrenko<sup>1</sup>, Dmytro V. Bilyi<sup>1\*</sup>, Oleksandr I. Osetskyi<sup>3</sup>, Stanislav S. Sevastianov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Biotechnology University, 44, Alchevskih St., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Sq., 61022, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup>Institute for Problems of Cryobiology and Cryomedicine of the National Academy of Sciences of Ukraine, 23, Pereyaslavska St., 61016, Kharkiv, Ukraine

Received 5 November 2024; accepted 3 December 2024; available online 25 January 2025

### Abstract

The main methods of commercial drying of vegetable raw materials are reviewed, their advantages and shortcomings are described. A new method of drying Jerusalem artichoke using cryosublimation fractionation has been proposed, the peculiarity of which is the ability to extract not only the dry fraction of the product, but also the extraction of steam evaporated from the product as a liquid fraction. An experimental study of the drying process of the chopped Jerusalem artichoke was carried out. The technological features of the drying process of cryosublimation fractionation have been analyzed. It was established that the obtained Jerusalem artichoke powder has high organoleptic characteristics, its moisture content is no more than  $4.0 \pm 0.1$  %. It was determined that 0.9 % of the initial amount of inulin in Jerusalem artichoke tubers passes into the liquid fraction. It has been shown that cryosublimation fractionation makes it possible to obtain biologically active substances or mixtures of substances of higher purity.

Keywords: jerusalem artichoke; *Helianthus tuberosus*, sublimation; low-temperature drying; fractionation, inulin.

## ВПЛИВ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТОПІНАМБУРА КРІОСУБЛІМАЦІЙНИМ ФРАКЦІОНУВАННЯМ НА ВМІСТ ІНУЛІНУ

Вікторія В. Євлаш<sup>1,2</sup>, Володимир О. Потапов<sup>1</sup>, Інна С. Пілюгіна<sup>1,2</sup>,  
Олена В. Петренко<sup>1</sup>, Дмитро В. Білий<sup>1</sup>, Олександр І. Осецький<sup>3</sup>, Станіслав С. Севаст'янов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Державний біотехнологічний університет, вул. Алчевських, 44, Харків 61002, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна

<sup>3</sup>Інститут проблем кріобіології та кріомедицини НАН України, вул. Переяславська, 23, Харків, 61016, Україна

### Анотація

Розглянуті основні методи промислового сушіння рослинної сировини, описані їх переваги та недоліки. Запропоновано новий спосіб сушіння топінамбура із застосуванням кріосублімаційного фракціонування, особливістю якого є можливість виділення не тільки сухої фракції продукту, а й переведення пари, що випаровується з продукту, у вигляд рідкої фракції. Проведене експериментальне дослідження процесу сушіння подрібненого топінамбура. Проаналізовано технологічні особливості процесу сушіння кріосублімаційним фракціонуванням. Встановлено, що отриманий порошок топінамбура має високі органолептичні показники, вміст води у ньому становить не більше  $4.0 \pm 0.1$  %. Визначено, що 0.9 % від початкової кількості інуліну у бульбах топінамбура переходить до рідинної фракції. Показано, що сублімація з фракціонуванням дає можливість отримати біологічноактивні речовини або суміші речовин більшої чистоти.

Ключові слова: топінамбур; *Helianthus tuberosus*, сублімація; низькотемпературна сушка; фракціонування; інулін.

\*Corresponding author: e-mail: tel.: +380631217875; e-mail: [jimmykraun@ukr.net](mailto:jimmykraun@ukr.net)

© 2024 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v32i4.316150

## Вступ

Продукти рослинного походження та окремі природні речовини відіграють важливу роль у багатьох сферах нашого життя. Деякі з них ми споживаємо з харчовими продуктами, включаючи харчові і біологічно активні добавки, які сприяють здоровому способу життя. Інші рослини продукти, використовуються у фармацевтичній індустрії в якості лікувально-профілактичних засобів та у виробництві різноманітних косметичних продуктів. Завдяки своїм цінним властивостям та корисному складу рослинна сировина є джерелом поживних компонентів, які можна виділити та ввести до складу харчових продуктів для збагачення біологічно активними речовинами.

Зростаюча популярність функціонального харчування з застосуванням рослинних прянощів спонукає виробників випускати низку інноваційних та привабливих продуктів. Останнім часом привертають увагу продукти з відповідним вмістом клітковини, макро- та мікроелементів. Харчові продукти, приготовлені з додаванням натуральних інгредієнтів, є багатим джерелом цих компонентів.

Топінамбур (*Helianthus tuberosus*) – один із харчових продуктів, який стає популярним в останні роки завдяки відносно легкому вирощуванню та високому вмісту інуліну. Так, вміст інуліну в пробах сухої речовини дев'яти зразків турецького топінанбура становить у середньому  $47.34 \pm 12.51$  %, у зразках свіжої бульби – 9.28 %. Вміст інуліну в бульбах сербського топінанбура коливається від 8.16 до 13.46 % свіжої маси [1, 2]. Вченими Таїланду доведено залежність врожаю топінанбура та виходу інуліну від температури та фотоперіоду. Показано, що вирощування топінанбура в період після дощів з низькою температурою та коротким фотоперіодом привело до більшого врожаю бульб та виходу інуліну. Крім того, на вміст інуліну в топінанбурі впливають умови та тривалість зберігання. Показано, що за зберігання у кагаті за середньої добової температури 17 °C топінамбур вже на десятий день починає гнити і на бульбах починають інтенсивно розвиватися плісняві грибки. На 15-тий день зберігання бульби топінанбура втрачають більше половини високомолекулярного інуліну, і його використання в якості сировини для одержання високомолекулярного інуліну доцільне тільки у свіжому вигляді [3; 4].

Широкого використання в харчових технологіях знаходять добавки із топінанбура. Науковцями розроблено рецептуру заправки для салату зі зменшеним вмістом олії завдяки використанню порошку топінанбура [5]. Доведено, що введення порошку топінанбура до складу десерту дозволяє покращити його сенсорні властивості [6]. Використання порошку топінанбура в технології кексів дозволяє отримати вироби з високими показниками якості. Однак введення рослинної добавки знижує м'якість кексів та впливає на колір скоринки. Пастоподібний сир Рікотта, що містив пробіотики та інулін з топінанбура, мав стабільні фізико-хімічні показники якості протягом терміну зберігання, збільшеного до 28 діб [7]. Введення 10 % та 15 % топінанбура до складу морозива дозволило одержати вироби з високими показниками якості та підвищеними антиоксидантними властивостями [8].

Згідно з літературними даними, для вилучення фруктанів (інуліну та фруктоолігосахаридів) з топінанбура використовують різні методи. Показано, що в ході спиртового осадження вихід фруктанів складав 14.8–16.3, індекс білизни становив 66.9–67.3 [9]. Метод омичного нагріву забезпечує вищий вихід екстракції інуліну, ніж звичайний метод нагрівання. Крім того, підготовка зразка з використанням сухого помелу забезпечує вищий вихід екстракції та чистоту інуліну, ніж мокрий помел.

Доведено, що оптимальними умовами ультразвукової екстракції інуліну з топінанбура є: температура – 70 °C, pH – 7, час екстракції – 60 хв., співвідношення тверда речовина : розчинник 10 г : 100 мл. Вихід інуліну за даних умов складав 99.47 %. Визначено оптимальні умови для екстракції інуліну з порошку бульб топінанбура за допомогою методу мікрохвильової екстракції та часткового гідролізу очищеного інуліну для виробництва фруктоолігосахариду з використанням лимонної кислоти та мікрохвильової енергії [10]. Проведення екстракції інуліну з топінанбура під дією ультразвуку є більш ефективним порівняно з екстракцією в мікрохвильовій печі та екстракцією гарячою водою. Вихід інуліну за оптимальних умов УЗ-екстракції (температура 82 °C, час – 18 хв., ультразвукова потужність – 120 Вт) склав  $82.93 \pm 1.03$  % [11].

Слід зазначити, що фізико-хімічні властивості інуліну можна змінювати. Доведено, що обробка ультразвуком порошку топінамбура та очищеного інуліну з топінамбура приводить до збільшення вмісту відновлюючих цукрів, а також до зниження ступеня полімеризації інуліну [12].

Для отримання екстрактів з топінамбуру застосовують різноманітні методи сушіння, які мають свої переваги та недоліки під час формування основних показників якості рослинних добавок. Сушену сировину зазвичай виробляють кондуктивним, конвективним, інфрачервоним, мікрохвильовим, вакуумним, сублімаційним і змішаними способами [13]. Основним завданням у будь-якому способі сушіння є швидке видалення достатньої кількості вологи для зниження активності води до рівня, який пригнічує ріст мікроорганізмів і знижує швидкість ферментативних та неферментативних реакцій. Крім того, властивості висушеного продукту, в першу чергу відновлюваність у екстрагенті, впливає на вихід цільових компонентів у процесі екстракції. Розглянемо основні переваги та недоліки промислових методів сушіння рослинної сировини.

У кондуктивному сушінні теплота передається від нагрітої поверхні до матеріалу. Таким чином, унаслідок випаровування всередині матеріалу створюється тиск, який виводить внутрішню вологу назовні, а випаровування продовжується на поверхні. Такий процес має місце під час сушіння в звичайних пекарських шафах, він має низьку енергоефективність із негативним впливом на якість. За відсутності примусової циркуляції повітря за такого способу сушіння виникає нерівномірність вологовмісту в матеріалі за об'ємом. До недоліків цього процесу слід віднести подовжений час сушіння внаслідок зменшення коефіцієнта дифузії вологи, викликаного процесами усадки матеріалу, можливість термічного пошкодження висушеного продукту внаслідок високих температур від нагрітої поверхні [14; 15].

Під час конвективного сушіння гарячим повітрям пришвидшується процес видалення вологи, особливо у перший період сушіння у поверхневому шарі матеріалу. Використання таких сушарок приводить до отримання більш однорідних, гігієнічних і привабливих продуктів, які можна виробляти швидко. В той

самий час недоліками цього способу сушіння є низька енергоефективність, викликана додатковими енерговитратами на примусовий рух гарячого повітря, викиди відпрацьованого гарячого повітря в навколишнє середовище, низький коефіцієнт дифузії внаслідок протилежних напрямків перенесення теплоти і вологи всередині матеріалу та відповідно подовжений час сушіння у другому періоді сушіння [16; 17].

Технологія геліо-сушіння з використанням прямого сонячного випромінювання є різновидом інфрачервоного сушіння. Це природній і давно відомий людству спосіб сушіння, який і сьогодні є однією з найбільш простих та доступних альтернатив для зменшення втрат після збору врожаю. Технологія сонячного сушіння є одним із джерел відновлюваної енергії і є дуже привабливим варіантом для малих підприємств із обмеженими фінансовими ресурсами. Однак до недоліків цього способу слід віднести залежність від погодних умов, велику тривалість процесу у порівнянні з штучними способами сушіння, складність регулювання режимів сушіння, низьку продуктивність, погіршення смаку, кольору та зменшення поживних речовин зневоднених продуктів внаслідок дії ультрафіолетового сонячного випромінювання і тривалої взаємодії з киснем повітря [18; 19].

Обробка харчових продуктів ІЧ-променями має такі переваги: можливість скорочення тривалості процесу завдяки збільшенню потужності теплового потоку, розширення зони нагрівання та випаровування завдяки поглинанню променевої енергії граничним шаром матеріалу, мала інерційність обладнання з ІЧ-випромінювачами, можливість регулювання інтенсивності теплового потоку. Цей метод сушіння здійснюється без небажаних змін у структурі, таким чином покращується якість продукту, підвищуються його поживні властивості, знижуються витрати на виробництво. Ще однією перевагою ІЧ-сушіння є можливість сконцентрувати теплову енергію на об'єкті нагрівання, зводячи до мінімуму тепловтрати на нагрівання навколишнього середовища як у кондуктивному, так і в конвективному способах сушіння. Головною умовою одержання високоякісної продукції під час ІЧ-сушіння є рівномірний розподіл теплової енергії на поверхні виробу, який залежить від умов опромінювання в робочих камерах

сушарок. Через нерівномірність розподілу теплоти під час ІЧ-опромінювання виникають «опіки» виробу, що є одним із головних недоліків цього способу [20; 21].

Вакуумне сушіння дозволяє сушити матеріали в середовищі зі зниженим тиском, що знижує температуру кипіння та забезпечує кращий масообмін завдяки підвищеному градієнту тиску пари між внутрішньою та зовнішньою сторонами продукту. В купі із зниженою концентрацією кисню у вакуумній камері, цей метод забезпечує кращу якість висушеного продукту завдяки низьким температурам та меншій усадці матеріалу. В той самий час до його недоліків слід віднести необхідність застосування кондуктивного або ІЧ-теплопідведення з усіма проблемами, притаманними цим способам енергопідведення. Також використання низьких тисків спричиняє небажану дифузію легколетких ароматичних речовин. Вакуумні сушарки використовують більше енергії завдяки збільшеній тривалості процесу за умов використання невисоких температур для збереження якості продукту, а також використання вакуумних насосів та нагрівачів [22; 23].

Ефект мікрохвильового нагрівання в процесі сушіння заснований на взаємодії між електромагнітною енергією та полярними молекулами діелектричних матеріалів, до яких відносяться вологі продукти. Виникнення надлишкового тиску під дією внутрішніх джерел теплоти викликає фільтраційну дифузію води з внутрішніх шарів матеріалу до його поверхні, що значно інтенсифікує процес масообміну. Також завдяки селективному механізму дії надвисокочастотного поля на структуру води в матеріалі, підвищується коефіцієнт дифузії у другому періоді сушіння. Під час мікрохвильового сушіння (НВЧ-сушіння) має місце високий ступінь збереження поживних речовин, практично повністю знищується мікрофлора, за рахунок чого суттєво збільшується термін зберігання продукту. До переваг використання мікрохвильового сушіння слід віднести найменші питомі енерговитрати на теплове сушіння, високу швидкість нагріву за об'ємом, малу тривалість процесу, безінерційність нагрівання. В той самий час наявність нерівномірного розподілу мікрохвильового поля може призводити до перегріву сировини, механічного

пошкодження сировини під дією надлишкового тиску [24; 25].

Сушіння повітряним ударом, як і сушіння в киплячому шарі та сушіння розпилюванням, відносяться до різновиду конвективного сушіння. Відмінною рисою цих способів є застосування високої швидкості (вище 10 м/с) та температури нагрітого повітря (більше 100 °C), які створюються форсунками. Гаряче повітря стикається з поверхнею продукту з високою швидкістю, видаляє термічні прикордонні шари води та збільшує швидкість передачі теплоти. Температура в центрі продукту швидко підвищується до температури гарячого повітря, внаслідок чого виникає градієнт тиску та фільтраційний потік води з внутрішніх шарів. Ці способи сушіння значно скорочують тривалість процесу, і це – єдина перевага, яка полягає в дуже короткому часі перебігу небажаних хімічних і біохімічних реакцій у продукті, що висушується, та, відповідно, кращому збереженню його поживних властивостей. Водночас, недоліками цих способів є надзвичайні енерговитрати, спричинені високими швидкостями та температурами нагрітого повітря, а також механічні пошкодження продукту внаслідок кінетичної взаємодії з нагрітим повітрям, термічних та барометричних напружень [26; 27].

Процес акустичного сушіння полягає у прискоренні видалення води з матеріалу під дією звукового поля високої інтенсивності в діапазоні звукових і ультразвукових частот. Це не є самостійним способом сушіння, а тільки додатковим способом впливу на процеси тепло-масообміну під час сушіння. Факторами впливу акустичних хвиль є частота звуку, інтенсивність, звуковий тиск. Ці фактори в першу чергу впливають на зовнішній тепло-масообмін шляхом руйнування приграничного шару і, як наслідок, зменшенню його опору перенесенню теплоти та маси. Проникнення акустичних хвиль у матеріал викликають його нагрівання, що позитивно впливає на швидкість сушіння, особливо у першому періоді сушіння, а також підвищення рухливості молекул води у другому періоді сушіння. З точки зору збереження якості, цей спосіб не має особливих переваг. Водночас це дуже дорогий спосіб сушіння внаслідок вартості і складності обладнання. Його потрібно використовувати в поєднанні з іншими процесами обробки [28; 29].

Сушка вибухом є різновидом процесу екструзії, де визначальними факторами є вплив високих температур та тиску на сировину. Під дією миттєвого скидання тиску, попередньо створеного в робочій камері такої сушарки, відбувається вибухове видалення вологи за дуже короткий час. Внаслідок короткої тривалості процесу зберігається більша частина поживних речовин у отриманих сушених продуктах. До недоліків способу слід віднести трудомісткість процесу, високий рівень енерговитрат та втрату цілісності продукту внаслідок вибуху, тому він не є універсальним щодо виду сировини [30; 31].

Сублімаційне сушіння – це комбінований процес заморожування та вакуумного сушіння. Вода з сировини сублімується шляхом прямого переходу з твердого стану в пару, минаючи рідкий стан, а потім відбувається десорбція води з «сухого» шару. Сублімація відбувається лише за тиску та температури, нижчих потрібної точки речовини. Вода в продуктах може бути у двох структурних станах: вільною водою або водою, зв'язаною з матрицею молекулярними силами. Вільна вода замерзає, а зв'язана – не замерзає. Тому у процесі сублімаційного сушіння на першому етапі продукт заморожується під атмосферним тиском, на другому етапі відбувається сублімація льоду за зниженого тиску, а на останньому етапі триває десорбція зв'язаної води продукту до необхідної кінцевої вологості [32; 33].

Метод сублімаційного сушіння на сьогоднішній час є найбільш високоякісним методом сушіння, який дозволяє зберегти висушену сировину майже у первинному стані. Це пов'язано з відсутністю усадки продукту, оскільки процес сублімації води відбувається у твердому стані. Низькі (негативні) температури під час заморожування та в період сублімації, відсутність кисню у камері пригнічує хімічні, біохімічні та мікробіологічні процеси. Тому смак, запах і вміст різних поживних речовин не змінюються, зберігаються органолептичні властивості сировини, її харчова та біологічна цінність. Сублімованим продуктам притаманні цілісна структура, достатня міцність, висока пористість, природний рівномірний колір, стерильність, відсутність пірогенів, відсутність сторонніх домішок, хімічна стабільність. Цей процес сушіння широко застосовується в першу чергу для

високорентабельної продукції: виробництва термолабільних фармацевтичних та біологічних препаратів, які є або нестабільними у водних розчинах протягом тривалого періоду зберігання, або стабільними в ході зберігання тільки в сухому стані.

Але зі всіх існуючих методів сушіння сублімація є найбільш енерговитратним процесом, що пов'язано з складними та малоінтенсивними процесами тепло-масообміну, які відбуваються за низьких температур та тисків. Процес заморожування, пов'язаний з утворенням кристалів льоду, може пошкоджувати клітини сировини, леткі сполуки можуть бути втрачені під час створення високого вакууму. Тому надзвичайно важливо прецизійно контролювати процеси тепло-масообміну під час сублімаційного сушіння, що робить його дуже кошторисним [34; 35].

Впливу способів сушіння на якість отриманого порошку топінамбуру та вмісту інуліну в ньому присвячена низка наукових досліджень [36; 37]. У цих роботах було вивчено вплив конвективного сушіння за помірних та високих температур, геліо-сушіння, мікрохвильового, вакуумного та сублімаційного сушіння. Загальний висновок, з якими погоджуються всі дослідники, полягає в тому, що основним фактором, який впливає на вихід інуліну з сировини, є температура сушіння та тривалість процесу. Збільшення як температури, так і тривалості процесу призводить до зменшення вмісту інуліну у висушеному порошку, а погіршення зовнішнього вигляду та внутрішньої структури порошку негативно впливає на подальший процес екстрагування інуліну.

Авторами дослідження [38] проведено порівняння процесів розпилювального та сублімаційного сушіння та встановлено, що інулін, висушений розпиленням, має цілісну та однорідну форму та розмір. Інулін, висушений заморожуванням, має флокульовану листову структуру. Крім того, розпилювальне сушіння приводить до вищого виходу інуліну на 18 %, нижчого вмісту води на 0.9 % та кращої структури поверхні. Наведені результати протирічать даним інших дослідників, які вказують, що сушіння гарячим повітрям за 55 °C, 65 °C і 75 °C дає збільшення виходу інуліну у порівнянні із сушінням перегрітою парою за температур 120 °C, 140 °C і 160 °C [39].

Враховуючи вищезазначене, нами було поставлено за мету дослідження з'ясувати вплив процесу сушіння топінамбура кріосублимаційним фракціонуванням на вміст інуліну.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- визначити вміст інуліну в топінамбурі;
- провести сушіння топінамбура методом кріосублимаційного фракціонування;
- визначити вміст інуліну в одержаному порошку топінамбура та рідинній фракції;
- оцінити вплив процесу сушіння топінамбура кріосублимаційним фракціонуванням на вміст інуліну.

### Експериментальна частина

Об'єкт дослідження – свіжі бульби топінамбура сорту «Скороспілка», вирощені у Харківській області.

Для сушіння сировини використовували метод кріосублимаційного фракціонування [40]. Цей процес полягає в сублімаційному сушінні замороженої сировини та наступному десублимаційному фракціонуванні за рахунок конденсації парів у десублиматорі за певної температури та вакууму. Свіжі бульби топінамбура масою 5 кг попередньо подрібнили до розміру частинок 50–100 мкм та заморозили в спеціальних лотках за атмосферного тиску до температури  $-18^{\circ}\text{C}$ . Лотки з замороженою сировиною завантажили в камеру субліматора (рис. 1) та охолодили до температури  $-20^{\circ}\text{C}$ , за якої за допомогою

вакуумних насосів тиск поступово знизили до 100 Па.

Процес фракціонування починався шляхом підведення теплоти від інфрачервоних нагрівачів до піддонів з сировиною за зниженого вакууму, який відповідає потрібній точці води. Ця теплота приводила до процесу сублімації замороженого продукту. Пара, утворена в процесі, конденсувалась на кріогенних панелях десублиматора. Поверхню десублиматора підтримували за температури  $-70^{\circ}\text{C}$ . Завдяки низькій температурі десублиматора, де відбувалося охолодження нижче температури замороженого продукту, високолетучі молекулярні комплекси випаровувалися із замороженої сировини і осаджувалися на панелях десублиматора. Різниця тисків водяної пари біля замороженого продукту та на панелях десублиматора викликала транспортування води до десублиматора. Протягом всього процесу видалення вологи контролювали поступовим підвищенням температури продукту до  $+40^{\circ}\text{C}$ , одночасно залишок води видалявся шляхом десорбції. Під час цього етапу вакуумним насосом створювали умови для низького тиску, необхідні для видалення розчинників. Наприкінці кріосублимаційного фракціонування розпочали відтаювання панелей десублиматора, де рідка фракція зливалась з десублиматора в приймальну ємність. Об'єм рідинної фракції дорівнював 3.5 л. Слід зазначити, що в сублімаційній камері залишалась суха фракція сировини для подальшої переробки або екстрагування. Маса сухої фракції становила 892.386 г.

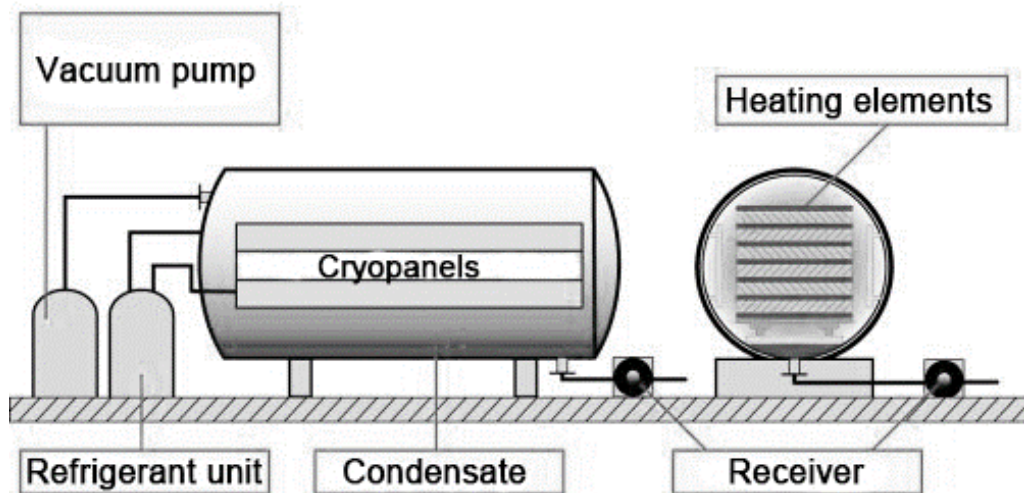


Fig. 1. Schematic diagram of a sublimation plant  
Рис. 1. Принципова схема сублімаційної установки

Визначення вмісту води у бульбах топінамбура та сухій фракції проводили згідно з ДСТУ 7804:2015 «Продукти перероблення фруктів та овочів».

*Методи визначання сухих речовин або води.*

Вміст інуліну в свіжих бульбах топінамбура сорту «Скороспілка», сухій та рідинній фракціях, отриманих кріосублімаційним фракціонуванням, визначали спектрофотометричним методом. Для приготування стандартного розчину в колбу на 100 см<sup>3</sup> вносили 0.0100 г інуліну, доводили до позначки дистильованою водою та перемішували. В п'ять конічних колб на 50 см<sup>3</sup> вносили по 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 см<sup>3</sup> стандартного розчину інуліну відповідно і додавали по 19.5 см<sup>3</sup> 77 %-го розчину сульфатної кислоти. Через 10 хвилин вміст колб охолоджували льодом, додавали 0.28 см<sup>3</sup> 10 %-го розчину тимолу в етиловому спирті, вводили 2.5 см<sup>3</sup> води і нагрівали 20 хв за температури 100 °С. Розчини охолоджували льодом. Вміст колб кількісно переносили в мірні колби на 25 см<sup>3</sup>, доводили до позначки дистильованою водою. Через 25 хв визначали оптичну густину розчинів на спектрофотометрі СФ-46 за довжини хвилі 513 нм, використовуючи кювети з товщиною шару 10<sup>-2</sup> м. За результатами вимірювань будували калібрувальний графік.

Для визначення вмісту інуліну в рідинній фракції, отриманій кріосублімаційним фракціонуванням, використовували 0.8 см<sup>3</sup> розчину. Визначення вмісту інуліну проводили за методикою, описаною вище. Кожний аналіз виконували у п'ятикратній повторюваності. Статистичну обробку результатів проводили за стандартними методиками.

Для визначення вмісту інуліну у порошку брали наважку кількістю 0.5 г з точністю до 0.001 г, додавали 500 см<sup>3</sup> дистильованої води, витримували 10 хв на водяній бані. Розчин фільтрували і використовували 0.5 см<sup>3</sup> його для визначення вмісту інуліну за методикою, описаною вище. Кожний аналіз виконували у п'ятикратній повторюваності. Статистичну обробку результатів проводили за стандартними методиками.

### Результати та їх обговорення

Рідинна фракція, отримана кріосублімаційним фракціонуванням представляла собою безбарвну прозору рідину, без запаху. Суха фракція – розсипчатий

білий порошок без комків, з легким приємним ароматом топінамбура.

Інулін (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub> – це полісахарид природного походження, який представляє собою ланцюжок з декількох залишків фруктози фуранозної форми (β, D – фруктофураноза) та одного залишку глюкози в піранозній формі (β, D – глюкопіраноза), сполучених між собою β-2,1-глікозидними зв'язками. При дії концентрованої сульфатної кислоти на інулін перебігає гідроліз з утворенням D-фруктози, яка в результаті дегідратації перетворюється на 5-оксиметилфурфурол. Дана речовина у присутності сульфатної кислоти утворює з тимолом продукт конденсації червоного кольору, який поглинає світло за довжини хвилі 513 нм (рис. 2).

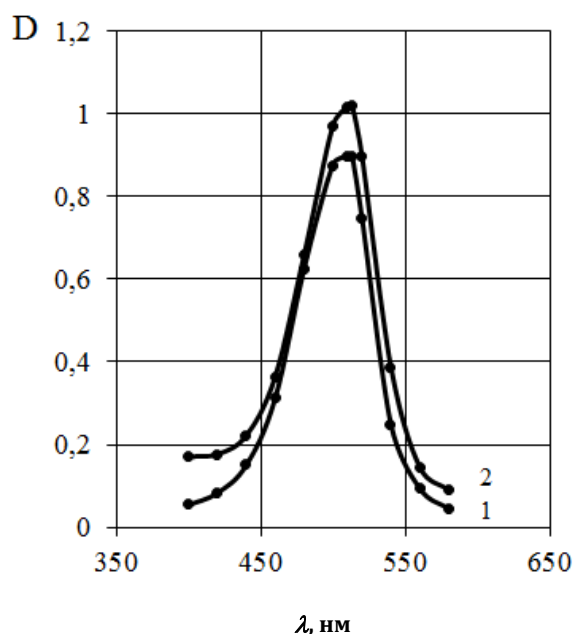


Fig. 2. Absorption spectra of the reaction products of the studied solution with thymol in a strongly acidic medium: 1 - aqueous solution of inulin (control); 2 - liquid fraction obtained by cryosublimation fractionation

Рис. 2. Спектри поглинання продуктів реакції досліджуваного розчину з тимолом у сильноокислому середовищі: 1 – водний розчину інуліну (контроль); 2 – рідинна фракція отримана кріосублімаційним фракціонуванням

Результати визначення вмісту води та інуліну у досліджуваних зразках наведено у таблиці.

Встановлено, що вміст вуглеводного комплексу у рідинній фракції становив 0.124±0.004 г/л.

## Moisture and inulin content in the studied samples (n=5, P=0.95)

Table

## Вміст вологи та інуліну у досліджуваних зразках (n=5, P=0,95)

Таблиця

Зразок	Вміст вологи, %	Вміст інуліну, %	Вміст інуліну в перерахунку на суху речовину, %
Свіжий топінамбур сорту «Скороспілка»	75,3±1,2	9,7±0,5	39,3
Суха фракція (порошок)	4,0±0,1	54,3 ± 1,6*	56,6*

\* сумарний вміст інуліну та фруктози. Згідно літературних даних [58, 59] під впливом низьких температур відбувається часткове руйнування інуліну до фруктози.

Виходячи з цих даних, приблизно 0.9 % від початкового вмісту інуліну в бульбах топінамбура втрачається з сублімованою парою, що не може спричинити суттєвого зменшення виходу інуліну в сухій фракції. Крім того, дане дослідження доводить, що сублімація фракціонуванням дозволяє вловлювати більшість летких сполук, які можна відбирати в процесі конденсації пари на стінках десубліматорів з наступним поділом на фракції певної молекулярної маси. Це пояснюється існуючою залежністю коефіцієнту дифузії від енергії активації фазового переходу для сублімації молекул, які мають певну енергію зв'язку. Для подолання більшого енергетичного бар'єру треба або знизити тиск у субліматорі, або збільшити температуру матеріалу, що зневоднюється. Саме це передбачає технологія кріосублімаційного фракціонування біоматеріалів. Експериментальним шляхом показано ефективно вилучення з досліджуваного топінамбуру фракції, що містить необхідну концентрацію інуліну, який можна використовувати у вигляді харчової або лікувально-профілактичної добавки в харчовій і фармацевтичній індустрії.

### Висновки

Проведено всебічний аналіз сучасних методів промислового сушіння рослинної сировини з акцентом на їх перевагах, недоліках та сферах застосування. Зокрема, великі перспективи має метод кріосублімаційного фракціонування, який дає можливість отримати речовини або суміші

речовин більшої чистоти. Це пов'язано з тим, що, використовуючи низький тиск у поєднанні з підвищеними температурами, можна сублімувати більше корисних речовин без втрати аромату та вмісту біологічно активних речовин у порівнянні з іншими методами сушіння рослинної сировини.

Проведено експериментальне дослідження, яке дозволило встановити оптимальні параметри процесу сушіння подрібненого топінамбура за даною технологією. Отримані результати свідчать про високу ефективність запропонованого методу: отриманий порошок топінамбура характеризується низьким вмістом вологи (не більше 4.0±0.1 %), відмінними органолептичними властивостями та збереженням цінних біологічно активних речовин.

Встановлено, що близько 0.9 % інуліну з початкової кількості, що міститься в бульбах топінамбура, переходить у рідку фазу, отриману з конденсованої пари в процесі сублімаційного сушіння. Це відкриває перспективи для подальшого використання отриманих фракцій як цінних харчових добавок або компонентів для виробництва функціональних продуктів.

У зв'язку з нинішніми тенденціями до зниження питомих енерговитрат холодильного обладнання та його доступності, використання метода кріосублімаційного фракціонування в харчовій промисловості, ймовірно, зросте та стане більш економічно доцільним у найближчому майбутньому.

### References

- [1] Hanci, F., Tuncer, G., Kuzu, C. (2020). Inulin Based Characterization of Turkish Jerusalem Artichokes. *Journal of Bangladesh Agricultural University*, 18(3), 551–556. <https://doi.org/551-556/10.5455/JBAU.96310>.
- [2] Brkljača, J., Bodroža-Solarov, M., Krulj, J., Terzić, S., Mikić, A., Jeromela, A. (2014). Quantification of Inulin Content in Selected Accessions of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). *Helia*. 37(60), 105–112. <https://doi.org/105-112/10.1515/helia-2014-0009>
- [3] Sennoi, R., Puttha, R.. (2021). Inulin content of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers stored at 5 °C in a refrigerator for different durations. *Australian Journal of Crop Science*. 15(12), 1395–1398.



- <https://doi.org/1395-1398.10.21475/ajcs.21.15.12.p3158>.
- [4] Morita, A., Hara, T., Joh, T. (2022). Decomposition and effect as prebiotics of inulin in Jerusalem artichoke tubers during storage. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*. 69(6), 313–319. <https://doi.org/313-319.10.3136/nskkk.69.313>.
- [5] Charoenphun, N., Puttha, R., Srean, P., Parametthanuwat, T., Wongsaj, J. (2024). Enhancing Healthy Salad Dressing Quality with Inulin from Jerusalem Artichoke Powder and Calamondin Peel Essential Oil. *Current Applied Science and Technology*, 24(5), 1–18. <https://doi.org/e0259350>.
- [6] Adel, K. M., Ali, H., Ahmed, E., Sary, H. (2021). Influence of Jerusalem Artichoke as Inulin Rich Component on Ice Milk Characteristics. *World Journal of Dairy & Food Sciences*. 16(1), 1–6. <https://doi.org/1-06.10.5829/idosi.wjdfs.2021.01.06>.
- [7] Rubel, A., Iraporda, C., Manrique, G., Genovese, D. (2022). Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) inulin as a suitable bioactive ingredient to incorporate into spreadable ricotta cheese for the delivery of probiotic. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. 28(8), 100325. <https://doi.org/100325.10.1016/j.bcdf.2022.100325>.
- [8] Gündoğdu, Engin. (2024). Determination of physicochemical and antioxidant properties of icecream produced with the addition of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 14(3), 958-969. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1520541>.
- [9] Díaz, A., García, M., Dini, C. (2022). Jerusalem artichoke flour as food ingredient and as source of fructooligosaccharides and inulin. *Journal of Food Composition and Analysis*. 114(1). <https://doi.org/104863.10.1016/j.jfca.2022.104863>.
- [10] Abood, A. (2020). Microwave-assisted extraction of inulin from Jerusalem artichoke and partial acid hydrolyses. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*. 51(1), 401–410. <https://doi.org/401-410.10.36103/ijas.v51i1.939>.
- [11] Yang, L., Zhang, H., Huang, J., Zhao, Y., Zhu, D., Liu, H. (2019). Optimization of ultrasonic-assisted extraction of inulin from Jerusalem artichoke. *E3S Web of Conferences*. 78(2007), 1–4. <https://doi.org/78.02007.10.1051/e3sconf/20197802007>.
- [12] Xu, H., Gunenc, A., Hosseinian, F. (2021). Ultrasound affects physical and chemical properties of Jerusalem artichoke and chicory inulin. *Journal of Food Biochemistry*. 46(8), 1–10. doi: 46.10.1111/jfbc.13934.
- [13] Sokołowska, D., Grotkiewicz, K. (2020). Initial treatment, sublimation drying and storage time of sweet pepper crisps. microbiological quality – part 2. *Agricultural Engineering*. 24(1), 69–78. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2020-0007>.
- [14] Huang, Y. (2013). *Impact of Banana (Musa acuminata) ripening on resistant and non-resistant starch using hot-air and microwave drying*, A thesis at Department of Bioresource Engineering, McGill University, Montreal, Canada.
- [15] Brennand, C. P. (1994). *Home drying of food*, Utah State University extension, All Archive Publications, Merrill – crazier Library. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03416-8>
- [16] Johnson, P-N. T., Brennan G., Addo-Yobo, F. Y. (1998). Air-drying Characteristics of Plantain (*MusaAAB*). *Journal of Food Engineering*, 31, 233–242.
- [17] Boudrioua, N., Giampaoli, P. and Bonazzi, C. (2003) Changes in aromatic components of banana during ripening and air drying, *LWT – Food science and technology*, 33, 633–642 [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(03\)00083-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(03)00083-5)
- [18] Wiriya, P., Paiboon, T. and Somchart, S. (2009). Effect of drying air temperature and chemical pretreatments on quality of dried chilli. *International Food Research Journal*, 16, 4–7. <https://doi.org/10.12691/ajfn-6-5-2>
- [19] Praveenkumar, D. G., Umesh-Hebber, H., Ramesh, M. N. (2006). Suitability of thin layer models for infrared-hot air drying of onion slices. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 39(6), 700–705. <https://doi.org/700-705/10.1016/j.lwt.2005.03.021>.
- [20] Sulistiyanti, S. R., Setyawan, F. X. A. and Susanto, A. (2009). Histogram characteristics of infrared images captured by a modified digital camera, *International Journal of electronic engineering research*, 1(4), 329–336.
- [21] Pawar, S. B. and Pratape, V. M. (2017). Fundamentals of infrared heating and its application in drying of food materials: A review, *Journal of food process engineering*, 40(1), 1–15. <https://doi.org/12308/10.1111/jfpe.12308>
- [22] Parikh, D. (2015). Vacuum drying: *Basics and application*, *chemical engineering*, 122(4), 48–54.
- [23] Larrosa, A. P. Q., Comitre, A. A., Vaz, L. B. and Pinto, L. A. A. (2017). Influence of air temperature on physical characteristics and bioactive compounds in vacuum drying of arthrospira spirulina, *Journal of food process engineering*, 40(2), 1–19. <https://doi.org/12359/10.1111/jfpe.12359>
- [24] Potapov, V., Zhila, V. (2024). [Theoretical and practical aspects of stagnation of microchicken and infrared vipromining in food technologies: monograph]. Kharkiv: State Biotechnological University. (in Ukrainian).
- [25] McGurk, S. J., Martin, C. F. Brandani, S., Sweatman, M. B.? Fan, X. (2017). Microwave swing regeneration of aqueous monoethanolamine for post – combustion CO<sub>2</sub> capture, *Applied energy*, 195, 126–133. <https://doi.org/126-133/10.1016/j.apenergy.2017.02.012>
- [26] Xiao, H., Gao, Z., Hai Lin, H. and Yang, W. (2010). Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes, *Journal of Food Process Engineering*, 33(5), 899–918. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00314.x>.
- [27] Anderson B.A., Singh, R.P. (2006). Modeling the thawing of frozen foods using air impingement technology. *Int. J. Refrig.* 29, 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.05.003>
- [28] Seya, K., Otsuka, T. (1980) Acoustic drying, *Japanese journal of applied physics*, 20(3), 165–168.
- [29] Kouchakzadeh, A. (2013). The effect of acoustic and solar energy on drying process of Pistachios, *Energy conversion and management*, 67, 351–356. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.12.003>
- [30] Sullivan, J. F. and Craig Jr, J. C. (1984). *The development of explosion puffing*, Food and agriculture organization (FAO) of the united nation.
- [31] Kozempel, M. F., Sullivan, J. F., Craig, Jr, J. C., Konstance, R. P. (2008) Explosion puffing of fruits and vegetables, *Journal of food science*, 53(3), 772–773. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb04708.x>
- [32] Khairnar, S., Kini, R., Harwalkar, M., Salunkhe, K., Chaudhari, S. R. (2013) A review on freeze drying

- process of pharmaceuticals, *International Journal of research in pharmacy and science*, 4(1), 76–94.
- [33] Kasper, J. C., Friess, W. (2011) The freezing step in lyophilization: Physico-chemical fundamentals, freezing methods and consequences on process performance and quality attributes of biopharmaceuticals, *European Journal of Pharmacy Biopharm*, 78(2), 248–263. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2011.03.010>
- [34] 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*. 9(10), 1–27. <https://doi.org/10.3390/foods9101488>
- [35] Abdizhapparova, B., Potapov, V., Khanzharov, N., Shingissov, A., Khanzharova, B. (2022). Determination of heat transfer mechanisms during vacuum drying of solid-moist and liquid-viscous materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(11 (120)), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268241>
- [36] Ahmad, S., Nema, P.K., Bashir, K. (2018). Effect of different drying techniques on physicochemical, thermal, and functional properties of seera. *Dry. Technol.*, 36, 1284–1291. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1399904>
- [37] Puyanda, I.R., Uriyapongson, S., Uriyapongson, J. (2020). Influence of drying method on qualities of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tuber harvested in Northeastern Thailand. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*. 42(6), 1279–1285.
- [38] Zhu, Z., Wu, M., Cai, J., Li, S., Marszałek, K., Lorenzo, J., M., Barba, F. (2019). Optimization of Spray-Drying Process of Jerusalem artichoke Extract for Inulin Production. *Molecules*. 24(9), 1674. <https://doi.org/10.3390/molecules24091674>
- [39] Khuenpet, K., Jittanit, W., Sirisansaneeyakul, S. (2015). Comparison of Hot Air and Superheated Steam Drying of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) Tubers and Inulin Powder Production. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 58(4), 1113–1125. <https://doi.org/10.13031/trans.58.11020>
- [40] Osetskiiy, A., Grischenko, V., Snurnikov, A., Shabanov, I., Babijchuk G. (2006). Cryosublimation Fractionating of Biological Material. Problems of Cryobiology. *Problems of Cryobiology*, 16(2), 230–240.
- [41] Pavlyuk, R., Poharska, V., Bessarab, O. (2014)/ The use of low-temperature processing and cryodestruction to save bar and the transformation of inulin during the development of healthy additives from Jerusalem artichoke. *Progressive equipment and technologies for food production, catering and trade*, 2(20), 40–51. (in Ukrainian).
- [42] Pavlyuk, R., Pogarska, V., Balabay, K., Loseva, S., Maksymova, N. (2019). [Cryomechanochemistry and cryomechanodestruction of biopolymers in food nanotechnologies during the processing of plant inulin-containing raw materials into health supplements]. *Progressive Techniques and Technologies of Food Production in Restaurant and Trade*, 2(30), 192–211. (in Ukrainian).