

Котюк Тетяна Валеріївна, асп. кафедра технологій переробки плодів, овочів і молока, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktprom@ukr.net.

Котюк Татьяна Валериевна, асп. кафедра технологій переробки плодів, овочей і молока, Харьковський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktprom@ukr.net.

Kotyuk Tatyana, graduate student, department of recycling technologies of fruits, vegetables and milk, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-92; e-mail: ktprom@ukr.net.

Лосева Світлана Михайлівна, доц. кафедра технологій переробки плодів, овочів і молока, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktprom@ukr.net.

Лосева Светлана Михайловна, доц. кафедра технологій переробки плодів, овочей і молока, Харьковський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktprom@ukr.net.

Loseva Svitlana, assistant professor department of recycling technologies of fruits, vegetables and milk, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-92; e-mail: ktprom@ukr.net.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. Ф.В. Перцевим.
Отримано 15.10.2016. ХДУХТ, Харків.*

УДК 621.59: 613.229:547.455.65

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ МЕХАНОХІМІЇ ПІД ЧАС РОЗРОБКИ КРІОГЕННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НАНОПОРОШКІВ ІЗ ТОПНАМБУРА З ПРЕБІОТИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Р.Ю. Павлюк, В.В. Погарська, К.С. Балабай, В.А. Павлюк

Вивчено процеси механохімії під час розробки кріогенної технології отримання добавок у формі нанопорошків із топінамбура, яка заснована на глибокій переробці рослинної сировини і включає кріогенне «шокове» заморожування, кріомеханодеструкцію і сушіння. Показано, що комплексна дія вказаних технологічних процесів призводить до більш повного екстрагування із сировини біологічно активних речовин та руйнування біополімерів до мономерів.

© Павлюк Р.Ю., Погарська В.В., Балабай К.С., Павлюк В.А., 2016

Ключові слова: механохімія, кріомеханодеструкція, нанопорошки, топинамбур, кріогенне «шокове» заморожування, пробіотики.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНОХИМИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КРИОГЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ НАНОПОРОШКОВ ИЗ ТОПИНАМБУРА С ПРЕБИОТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Р.Ю. Павлюк, В.В. Погарская, Е.С. Балабай, В.А. Павлюк

Изучены процессы механохимии при разработке криогенной технологии получения добавок в форме нанопорошков из топинамбура, которая основана на глубокой переработке растительного сырья и включает криогенное «шоковое» замораживание, кріомеханодеструкцию и сушку. Показано, что комплексное воздействие указанных технологических процессов приводит к более полному извлечению из сырья биологически активных веществ и разрушению биополимеров до мономеров.

Ключевые слова: механохимия, кріомеханодеструкция, нанопорошки, топинамбур, криогенное «шоковое» замораживание, пробіотики.

THE STUDY OF MECHANOCHEMISTRY PROCESSES DURING THE DEVELOPMENT OF CRYOGENIC TECHNOLOGY OF NANOPOWDERS FROM TOPINAMBOUR WITH PREBIOTIC PROPERTIES

R. Pavlyuk, V. Pogarska, K. Balabai, V. Pavlyuk

The processes of mechanochemistry are studied during the development of cryogenic technology of obtaining additives in the form of Nano powders from topinambour with prebiotic properties.

The cryogenic technology differs from traditional technologies by the absence of steam-treatment and is based on deep processing of herbal raw materials. The technology includes cryogenic "shock" freezing, cryomechanodestruction and sublimation drying. It is shown that the complex effect of these processes leads to the destruction of biopolymers to monomers (45...55%) and to a more complete extraction of biologically active substances (1,8–2,3 times) from raw materials.

It is determined that Nano powders of topinambour exceed the world-known analogues by chemical composition, the record content of biologically active substances and dispersed sizes. In addition, a significant portion of the substances (biologically active substances and biopolymers) is in nanoscale form. It is shown that insoluble biopolymers of topinambour (proteins, inulin, cellulose, etc.) are transformed into the soluble form (45...55%) to the separated monomers (fructose, α -amino acids, glucose) in nanoscale form (molecules of α -amino acids, fructose and glucose with the dimensions of 0,8...1,0 nm).

It is determined that the influence regularities and mechanisms of fine-dispersed grinding on transformation of the tied amino acids in protein to free

soluble form due to mechanolysis of protein molecules (45...55% to the separated α -amino acids). It is discovered that mechanism of mechanodestruction of protein molecules and its Nano associates or Nano complexes with other biopolymers and biologically active substances is connected with mechanocracking.

Keywords: *mechanochemistry, cryomechanodestruction, Nano powders, topinambour, cryogenic "shock" freezing, probiotics.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Робота присвячена вивченню процесів механохімії під час розробки кріогенної технології отримання дрібнодисперсних добавок у формі нанопорошків із топінамбура з пребіотичними властивостями, яка заснована на глибокій переробці рослинної сировини. Як інновація застосована кріогенна обробка сировини з використанням рідкого та газоподібного азоту. Вона включає кріогенне «шокове» заморожування, низькотемпературне дрібнодисперсне подрібнення, сублимаційне сушіння, комплексне використання яких дозволяє отримати добавки з рекордним вмістом водорозчинних форм полісахариду – інуліну, зокрема фруктози, та фруктоолігосахаридів, а також розчинних форм білка – вільних α -амінокислот, простих пептидів, та з високим вмістом фенольних сполук, поліфенолів, вітамінів та ін.

Актуальність розробки технологій, що дозволяють максимально зберегти біологічно активні речовини (БАР) вихідної сировини, викликана необхідністю вирішення глобальних проблем, які на сьогодні спостерігаються в більшості країн, а саме незбалансованість харчування та дефіцит у раціонах харчування вітамінів, повноцінних білків, мінеральних речовин та інших БАР, потреба в яких у населення України та в багатьох інших країнах задовольняється всього на 50% [1; 2]. Крім того, спостерігається зниження імунітету населення, зумовлене загальним погіршенням екологічного стану. У найбільш розвинених країнах світу проблему імунодефіциту вирішують шляхом уведення в раціони харчування оздоровчих продуктів і добавок, особливо із плодоовочевої сировини, які відрізняються високим вмістом БАР, що сприяють підвищенню імунітету. Особливе місце серед них, поряд з вітамінами антиоксидантного ряду (вітамінами С, Е, β -каротином), мінеральними речовинами займають фруктоолігосахариди, полісахариди, зокрема інулін, пектинові речовини, харчові волокна, хітозани та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз даних періодичної літератури за останні 10 років показав, що здоров'я людини залежить від стану її кишечника [2–4]. Відомо, що він складає 80% імунної системи. Підтримувати в організмі необхідну рівновагу кишкової мікрофлори допомагають функціональні оздоровчі продукти

з пробіотичними властивостями, що містять корисну мікрофлору в активному стані (квашена капуста, морква, буряк, кисломолочні напої (кефір, йогурт, простокваша) та інші ферментовані продукти) та продукти, до складу яких входять «пребіотики» – неперетравлювальні інгредієнти їжі, до числа яких належать фруктоолігосахариди, інулін, лактулоза, пектин, харчові волокна та інші [2–5]. Вони стимулюють в організмі людини розвиток, метаболічну та біологічну активність однієї або декількох груп власних бактерій, які складають кишкову мікрофлору людини, позитивно впливають на склад мікробіоценозу [4; 5].

Перспективною сировиною для отримання добавок з пребіотичними властивостями і їх застосування під час виготовлення продуктів оздоровчої дії є топінамбур [2; 6; 10; 11; 13]. В Україні він є традиційним джерелом інуліну, який є лінійним полісахаридом, основним структурним мономером якого є залишки фруктози, що з'єднані β -фруктозидними зв'язками. Цінність топінамбура для харчової промисловості визначається насамперед унікальним вуглеводним складом [7–9]. Слід зазначити, що сухі речовини бульб топінамбура на 80% представлені пребіотиком інуліном – єдиним натуральним полісахаридом, що на 95% складається з нешкідливого для діабетиків цукру фруктози [12; 13]. Топінамбур містить пектин, клітковину, білок, широкий спектр мінеральних речовин (калій, кальцій, марганець та ін.) та вітамінів (С, В₁, В₂ та ін.). Існуючі технології переробки топінамбура в різні добавки у формі порошків, паст, борошна, пюре, екстрактів із використанням паротермічної обробки, сушіння, екстракції не дозволяють частину інуліну перевести в легкозасвоювану форму [6]. У зв'язку з цим, актуальним є пошук таких технологічних прийомів, які б дозволили отримати добавки із топінамбура високої якості, що максимально б зберігали БАР сировини та дозволили б отримати інулін в легкозасвоюваній формі.

На сьогодні одним із перспективних напрямів в інтенсифікації технологічних процесів, на думку авторів, є більш глибока переробка харчової сировини, ніж прийнята, і розробка високих технологій із застосуванням як технологічного прийому дрібнодисперсного механічного подрібнення в комплексі з термообробкою або заморожуванням сировини, яке супроводжується процесами механоактивації, механодеструкції, криодеструкції, що призводять до явищ механохімії [14–16]. Механохімія – це новий науковий напрям, який вивчає хімічні перетворення речовин (інгредієнтів), які відбуваються під впливом механічного подрібнення (механічних сил) і є перспективним та розвивається в різних галузях промисловості (хімічній, металургійній, текстильній, авіаційній та ін.) в різних країнах світу і передусім в Японії, Росії, Казахстані та ін. У харчовій промисловості ці процеси майже не вивчені [17; 18].

Проведений аналіз даних періодичної наукової літератури за останні 10 років, які стосуються вивчення процесів механоактивації, кріомеханодеструкції, механохімії під час переробки рослинної сировини, у тому числі і топінамбура, з використанням кріообробки та дрібнодисперсного подрібнення в науковій літературі за винятком робіт, які були виконані в межах наукових шкіл професора Р.Ю. Павлюк та професора В.В. Погарської, відсутні [18–20]. У зв'язку з цим, вивчення закономірностей і механізмів впливу глибокої переробки сировини, яка заснована на використанні процесів механоактивації, механодеструкції на біополімери (білки, інулін – олігофруктозани, полісахариди (пектин, целюлоза) під час розробки технології отримання порошкоподібних добавок – пребіотиків у нанорозмірній формі із топінамбура є актуальним.

Мета статті – вивчення процесів механохімії, а також закономірностей і механізмів під час розробки кріогенної технології нанопорошків із топінамбура з пребіотичними властивостями з використанням комплексної дії на сировину кріогенного «шокового» заморожування, сублімаційного сушіння та низькотемпературного дрібнодисперсного подрібнення, які можуть використовуватися як пребіотики під час виготовлення продуктів для оздоровчого харчування.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- вивчити процеси механохімії під час розробки кріогенної технології нанопорошків із топінамбура з пребіотичними властивостями під час використання комплексної дії на сировину кріогенного «шокового» заморожування, сушіння та дрібнодисперсного подрібнення, зокрема:

- вивчити вплив кріообробки сировини на зберігання та екстракцію БАР, трансформацію полісахариду інуліну до окремих мономерів – фруктози та фруктоолігосахаридів, целюлози – до глюкози;

- вивчити закономірності та механізми впливу дрібнодисперсного подрібнення на трансформацію зв'язаних амінокислот білка у вільну розчинну форму, на конформаційні зміни молекул білка та на співвідношення гідрофільних і гідрофобних залишків амінокислот білка;

- вивчити вміст біологічно активних та поживних речовин у нанопорошках із топінамбура порівняно з аналогами;

- науково обґрунтувати розробку кріогенної технології нанопорошків із топінамбура з рекордним вмістом легкозасвоюваних інгредієнтів, зокрема БАР.

Виклад основного матеріалу дослідження. Науковцями Харківського державного університету харчування та торгівлі (Україна, м. Харків) разом із фахівцями Національного університету харчових технологій (Україна, м. Київ) запропоновано та розроблено технологію нанопорошків із топінамбура з використанням рідкого та газоподібного азоту на стадії криогенного заморожування. Дослідження проведені в ХДУХТ на кафедрі технологій переробки плодів, овочів і молока на базі науково-дослідної лабораторії «Інноваційні крио- та нанотехнології рослинних добавок та оздоровчих продуктів», яка має сучасне обладнання: криогенний програмний заморожувач із комп'ютерним забезпеченням (виготовлений в експериментальному цеху Фізико-технічного інституту низьких температур НАН України), низькотемпературний подрібнювач (Франція), вакуумна сублимаційна сушарка (виготовлена в експериментальному підрозділі УкрНДІ проблем кріобіології та кріомедицини АМН України в експортному виконанні) та ін. Дослідження також проводилися на кафедрі технологій консервування в НУХТ.

Приведені наукові результати є продовженням роботи авторів «Створення та впровадження прогресивних технологій та ефективного обладнання нових функціональних оздоровчих харчових продуктів», яка в 2006 році була удостоєна Державної премії України в галузі науки і техніки [6].

Критерієм оцінювання процесів механохімії під час розроблення криогенної технології нанопорошків із топінамбура служило визначення хімічних речовин у рослинній вихідній сировині і готових добавках, зокрема:

- інуліну, фруктози, білка, зв'язаних і вільних амінокислот, загального пектину, протопектину, розчинних пектинових речовин, целюлози, органічних кислот та ін.

- L-аскорбінової кислоти, низькомолекулярних фенольних сполук (оксикоричних кислот), флавонолових глікозидів, катехинів), дубильних речовин.

За ступенем збереженості перелічених хімічних речовин і їх перетворень судили про інтенсивність протікання механохімічних процесів, які відбувалися під час глибокого оброблення сировини за допомогою криогенного «шокового» заморожування, дрібнодисперсного механічного подрібнення та сушіння.

Головним під час розроблення криогенної технології нанопорошків із топінамбура з використанням глибокої переробки сировини, зокрема криогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення було збільшити ступінь вилучення із сировини прихованих зв'язаних форм БАР з біополімерами у вільний

стан, трансформувати полісахариди, олігосахариди та білки в розчинну форму за рахунок криодеструкції та механоактивації, а також механолізу.

Встановлено, що внаслідок криогенного «шокового» заморожування, сублімаційного сушіння та дрібнодисперсного подрібнення топінамбура під час отримання нанопорошків відбувається не тільки повне зберігання БАР, таких як низькомолекулярні фенольні сполуки (оксикоричні кислоти, флавонолові глікозиди, поліфеноли – дубильні речовини, L-аскорбінова кислота), але й їх більш повне вилучення із прихованих зв'язаних форм із біополімерами (білками, полісахаридами, олігосахаридами з біополімерами та ін.) нанокмплесів та наноасоціатів і трансформація їх у вільний стан (рис.). Їх кількість порівняно із свіжим топінамбуром збільшується в 1,8...2,3 рази, що дає змогу отримати нанопорошки з принципово новим хімічним складом і високими споживчими властивостями порівняно з вихідною сировиною та аналогами отриманими за традиційними технологіями.

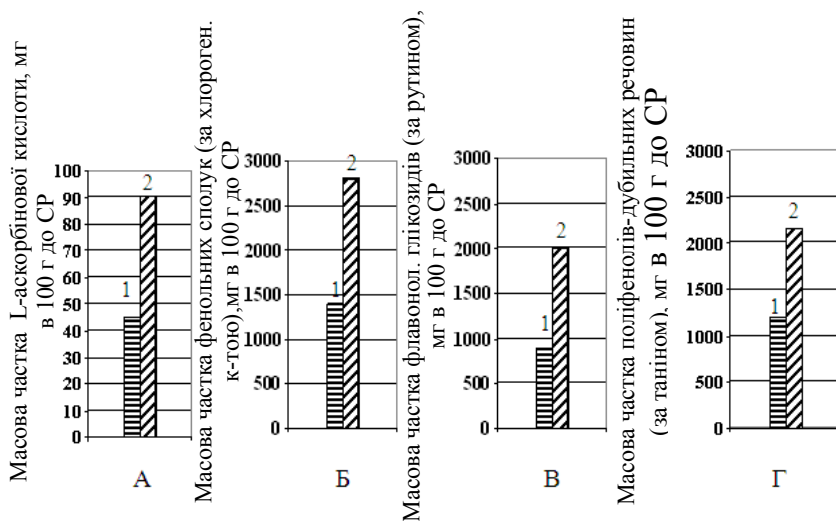


Рис. Вплив криогенного «шокового» заморожування, сублімаційного сушіння та дрібнодисперсного подрібнення на БАР під час отримання нанопорошків із топінамбура за криогенною технологією: 1 – топінамбур свіжий; 2 – дрібнодисперсний нанопорошок із топінамбура; А, Б, В, Г – масова частка L-аскорбінової кислоти, фенольних сполук (за хлорогеновою кислотою), флавонолових глікозидів та дубильних речовин (за таніном)

Встановлено, що під час криогенного заморожування, сушіння та низькотемпературного дрібнодисперсного подрібнення значна частина інуліну руйнується до фруктози та фруктоолігосахаридів на 45...55%, трансформується в розчинну легкозасвоювану форму. Цей процес відбувається за рахунок механокрекінгу – механічного руйнування β -фруктозних зв'язків в інуліні. Наприклад, у свіжому топінамбурі міститься 52,2...56,0% інуліну в перерахунку на суху речовину, а в нанопорошку залишається 26,4...27,3%.

Виявлено також, що одночасно відбувається механодеструкція, руйнування і трансформація білка, целюлози до окремих мономерів, зокрема білка – у вільні амінокислоти, целюлози – в цукри (табл. 1) на 43...50%. Так, встановлено, що в нанопорошку із топінамбура масова частка зв'язаних амінокислот в білку зменшується майже вдвічі і становить 3,7 г у 100 г, а у вихідній сировині – 6,7 г у 100 г, тобто відбувається зменшення молекулярної маси білка. Одночасно відбувається збільшення в 1,8...8 разів масової частки амінокислот, що знаходяться у вільному стані у вигляді надмолекулярних структур молекул білка.

Показано, що амінокислотний склад висушеного топінамбура і нанопорошків із нього знаходиться в різній формі. Так, в 100 г висушеного топінамбура загальний вміст амінокислот становить 8,02 г, із них 6,65 г представлені амінокислотами, що знаходяться у зв'язаному стані і 1,4 г у вільному стані (у вигляді надмолекулярних структур) (табл. 1). А в нанопорошку в 100 г міститься 9,1 г білка і 5,4 г представлені вільними амінокислотами, які знаходяться в легкорозчинній наноструктурованій формі і 3,7 г знаходяться у зв'язаному в білку стані. Показано, що під час дрібнодисперсного подрібнення частина білка в топінамбурі знаходиться у прихованій формі у зв'язаному стані з полісахаридами, мінеральними речовинами в складних наноконформаціях, які за рахунок механокріодеструкції частково руйнуються, що дає можливість частині білка трансформуватися у вільний стан, який і фіксується хімічними методами (масова частка білка у свіжому топінамбурі становить 8,0% в 100 г, а в криопорошку – 9,1 г в 100 г, тобто в прихованій формі знаходиться 1,1 г білка в 100 г продукту, що складає 14% від вихідного білка) (табл.1).

Такі порошки технологічні, розчиняються у воді і утворюють однорідну гомогенну суспензію, частинки нанопорошків не відчувуються під час споживання й утворюють гелієву структуру в водних розчинах.

Вивчення процесів механохімії, які відбуваються під час дрібнодисперсного подрібнення висушеного топінамбура, свідчать про те, що комплексна дія заморожування, сушіння та механічного

подрібнення призводить до руйнування біополімерів білка до окремих мономерів, конформаційних змін молекул, стирання молекул, зміни їх об'єму, зменшення молекулярної маси.

Відомо, що молекула білка складається із гідрофобного ядра та гідрофільних оболонки і форма молекул залежить від співвідношення гідрофільних і гідрофобних залишків амінокислот. Гідрофільні амінокислоти визначають колоїдні властивості білків і їх здатність утворювати гелі, що має велике значення у використанні рослинних порошків під час виготовлення різних харчових продуктів, зокрема під час виготовлення сухих сумішей для соків, напоїв, які внаслідок відновлення у воді повинні давати стабільну колоїдну суспензію, структуру, яка не повинна розшаровуватися.

Тому, під час дрібнодисперсного подрібнення паралельно із зменшенням масової частки зв'язаних амінокислот у біополімерах білка можуть відбуватися конформаційні зміни молекул білка, такі як перерозподіл співвідношення між гідрофільними і гідрофобними амінокислотними залишками. Це може призвести до змін не тільки об'єму, але і форми білкової молекули, залежно від того, які із амінокислотних залишків гідрофільні чи гідрофобні здебільшого залишилися у зв'язаному стані. У зв'язку з цим, у завдання роботи входило вивчення впливу дрібнодисперсного подрібнення на масову частку і співвідношення полярних (гідрофільних) і неполярних (гідрофобних) залишків амінокислот біополімерів білків висушеного топінамбура і нанопорошків із нього.

Встановлено, що гідрофільні і гідрофобні властивості висушеного топінамбура і нанопорошку із нього значно відрізнялися. Наприклад, масова частка гідрофільних залишків амінокислот у нанопорошках із топінамбура на 19,86% більша, ніж у вихідного висушеного топінамбура (відповідно масова частка гідрофільних залишків амінокислот у нанопорошку становила 45,22 г в 100 г білка, а в сировині – 36,24 г в 100 г) (табл. 2). Паралельно зменшувалася масова частка гідрофобних залишків у нанопорошку на 14,08% (відповідно масова частка гідрофобних залишків амінокислот у нанопорошку становила 54,78 г в 100 г білка і у вихідній сировині – 63,76 г в 100 г). Ступінь гідрофобності зв'язаних амінокислот білка (ΔF , кДж/моль) дрібнодисперсного порошку із топінамбура зменшувалася на 10,3% (табл. 2).

Показано також, що після дрібнодисперсного подрібнення співвідношення суми полярних до суми неполярних залишків у білкових глобулах у нанопорошку із топінамбура порівняно з вихідною сировиною збільшується з 0,14:0,21. Це свідчить про збільшення площі поверхні гідрофільної оболонки білкової глобули і про паралельне зменшення заповнення ядра глобули гідрофобними (неполярними) залишками.

Отримані результати дозволять по-новому уявити вплив глибокої переробки сировини з використанням як інтенсифікації процесу дрібнодисперсного механічного подрібнення на перетворення і трансформацію в розчинну наноформу біополімерів рослинної сировини.

Таблиця 1

Вплив криогенного заморожування та дрібнодисперсного подрібнення на трансформацію зв'язаних амінокислот білка у вільну форму під час отримання нанопорошку із топінамбура

Амінокислота	Масова частка амінокислот							
	у зв'язаному стані				у вільному стані			
	вихідна сировина (висушений топінамбур), мг в 100 г	нанопорошок із топінамбура, мг в 100 г	% до вихідної сировини	зменшення до вихідної сировини, разів	вихідна сировина (висушений топінамбур), мг в 100 г	нанопорошок із топінамбура, мг в 100 г	% до вихідної сировини	збільшення до вихідної сировини, разів
Аспарагінова кислота	470	236	50,2	1,9	330	600	180,5	1,8
Аланін	400	200	50,0	2,0	40	245	609,0	6,1
Глутамінова кислота	650	320	49,2	2,0	270	850	299,0	3,0
Аргінін	740	300	40,5	2,5	40	320	800,0	8,0
Треонін	200	100	50,0	2,0	90	240	248,0	2,5
Цистін	310	160	51,2	1,9	50	180	360,0	3,6
Серін	320	160	50,0	2,0	40	230	506,0	5,75
Гліцин	205	102	49,7	2,0	45	120	266,7	2,7
Лізин	480	250	52,0	1,9	60	390	650,0	6,5
Метіонін	462	200	43,2	2,3	30	230	766,7	7,7
Триптофан	605	300	49,5	2,0	30	200	666,7	6,7
Валін	300	155	51,6	1,9	60	310	516,7	5,2
Фенілаланін	632	310	49,0	2,0	80	380	475,0	4,8
Ізолейцин	420	210	50,0	2,0	60	220	366,7	3,7
Лейцин	400	205	51,2	1,9	40	230	575,0	5,8
Тирозин	420	210	50,0	2,0	50	240	480,0	4,8
Пролін	340	160	47,0	2,1	44	260	590,9	5,9
Гістидин	300	120	40,0	2,5	40	170	425,0	4,3
Сума	6654	3698	55,58	1,8	1399	5415	387,1	3,9

Таким чином, показано, що використання дрібнодисперсного механічного подрібнення під час отримання нанопорошків із топінамбура призводить до механодеструкції і руйнування біополімерів білка, інуліну, целюлози до окремих їх мономерів (від 45,0 до 55,0%).

На основі отриманих експериментальних даних була розроблена криогенна технологія нанопорошків із топінамбура, яка відрізняється від традиційних тим, що повністю виключає паротермічну обробку і заснована на глибокій переробці сировини з використанням криогенної переробки сировини з використанням рідкого та газоподібного азоту на стадії заморожування та дрібнодисперсного подрібнення з подальшим сублімаційним сушінням. Авторами отримано швидкорозчинні нанопорошки із топінамбура розміром частинок у 10...20 разів меншим, ніж у традиційних порошках та виготовлено Instant-продукти на їх основі (каротиноїдні вітамінізовані наносоки, нанонапої, кисломолочні кефіри, йогурти з пребіотичними властивостями).

Таблиця 2

Конформаційні зміни молекул білка топінамбура, зокрема співвідношення гідрофільних і гідрофобних залишків амінокислот та ступінь гідрофобності зв'язаних амінокислот білка під час комплексної дії криогенного «шокового» заморожування, сушіння та дрібнодисперсного подрібнення

Амінокислота	Масова частка амінокислот білка, %		ΔF, кДж/моль	Ступінь гідрофобності зв'язаних амінокислот білка (ΔF, кДж/моль)	
	висушеного топінамбура	дрібнодисперсного нанопорошку із топінамбура		висушеного топінамбура	дрібнодисперсного нанопорошку із топінамбура
1	2	3	4	5	6
Гідрофільні залишки амінокислот					
Аспарагінова кислота	8,90	12,00	2,23	20,11	26,76
Аланін	3,41	4,15	3,00	10,23	12,45
Глутамінова кислота	10,30	13,10	2,51	25,85	32,88
Аргінін	6,40	7,92	3,03	19,39	24,00
Треонін	2,00	2,35	1,86	3,72	4,37
Цистин	1,15	1,10	2,69	3,09	3,40
Серин	2,00	2,60	0,15	0,30	0,39
Гліцин	2,08	2,00	0,0	0,00	0,00
Сума:	36,24	45,22		82,69	104,25

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6
Гідрофобні залишки амінокислот					
Лізин	8,67	9,13	6,24	54,10	56,97
Метіонін	4,77	5,09	5,44	25,95	27,69
Триптофан	0,88	1,21	12,6	11,09	15,25
Валін	3,77	3,94	7,02	26,47	27,66
Фенілаланін	6,36	7,05	11,08	70,47	78,11
Ізолейцин	8,31	5,72	12,42	103,21	71,04
Лейцин	7,48	5,71	10,10	75,55	57,67
Тирозин	9,37	6,14	12,03	112,72	73,86
Пролін	2,52	2,80	10,86	27,36	30,41
Гістидин	11,63	7,99	5,87	68,27	46,90
Сума:	63,76	54,78		575,19	485,56
Гідрофобні та гідрофільні залишки амінокислот					
Сума:	100,0	100,0		657,88	589,81

Примітка. Співвідношення суми гідрофільних до суми гідрофобних залишків амінокислот становить 0,14:0,21.

Встановлено, що нанопорошки із топінambuра за хімічним складом, вмістом БАР і дисперсним станом кращі за відомі світові аналоги (табл. 3). По-перше, вони мають принципово новий хімічний склад порівняно з отриманими за традиційною технологією. Значна частина речовин знаходиться в нанорозчинній формі. Наприклад, важкорозчинні біополімери (білки, інулін, целюлоза) топінambuра трансформувалися на 45,0...55,0% у розчинну форму у вигляді окремих мономерів (фруктози, вільних α -амінокислот, глюкози), які мають нанорозмірну форму. Відомо, що молекули α -амінокислот, які містяться в продуктах рослинного і тваринного походження знаходяться по розміру в діапазоні від 0,42 нм (у гліцина) до 1,0 нм (у триптофана), останні амінокислоти займають проміжне положення. Розміри молекул фруктози і глюкози становлять 0,8...1,0 нм. Розміри молекул білків складають 40,0...200,0 нм, асоціати або нанок комплекси біополімерів від 200,0...800,0 нм [6]. Розміри низькомолекулярних БАР, таких як L-аскорбінова кислота, складає 1,1 нм, фенольні сполуки – 1,2 нм та ін. [6]. По-друге, нанопорошки відрізняються від аналогів високим вмістом фруктози (до 25,0%) і фруктоолігосахаридів. По-третє, вони відрізняються високим вмістом низькомолекулярних фенольних сполук (в 5 разів більше, ніж в аналогах). Так, масова частка фенольних сполук в нанопорошках складала 2800,0 мг в 100 г, в аналогах – 520,0...640,0 мг в 100 г. Масова частка флавонолових глікозидів в нанопорошках в 9...10 разів більше, ніж в аналогах, а дубильних речовинах – в 2,5...6 разів (табл. 3).

Таблиця 3

Вміст біологічно активних та пребіотичних речовин (інуліну, пектину, білка, фенольних та поліфенольних сполук) у нанопорошках із топінамбура порівняно з аналогами (n=3)

Найменування показника	Нанопорошки із топінамбура	Аналог – порошок із топінамбура конвективного вакуум-імпульсного (КВІ) сушіння	Аналог – порошок із топінамбура конвективного сушіння
Інулін, %	25,6±1,5	9,75±0,1	20,1±1,3
Фруктоза%	25,6±1,5	0,0	0,0
Білок, %	9,1±0,2	8,9±0,1	8,5±0,1
Пектин, %	8,5±0,1	9,2±0,1	8,0±0,1
Загальний цукор, %	23,7±1,4	10,2±0,2	12,6±0,2
Вітамін С, мг в 100 г	78,2±2,4	16,4±1,1	12,2±0,3
Фенольні сполуки (за хлорогеновою кислотою), мг в 100 г	2800,0±12,4	640,0±10,2	520,0±12,4
Флавонолові глікозиди (за рутином), мг в 100 г	1800,0±12,4	200,0±5,2	162,0±2,6
Дубильні речовини, мг в 100 г	2160±14,0	840,0±10,2	360,0±11,7
Зольність, %	6,8±0,2	6,0±0,2	5,9±0,1

Таким чином, використання криогенного заморожування, сублимаційного сушіння та дрібнодисперсного подрібнення дозволяє отримати якісно нові порошки із топінамбура з рекордним вмістом БАР у легкозасвоюваній наноформі, які неможливо отримати за допомогою традиційних методів переробки рослинної сировини. Відповідно до хімічного складу нові добавки – нанопорошки із топінамбура мають потенційну пребіотичну, імуномодулюючу, протипухлинну та детоксикуючу дію.

Нова технологія пройшла апробацію в виробничих умовах у НПП «КРІАС» (м. Харків) та НПП «ФІПАР» (м. Харків). Розроблено нормативну документацію (ТУ У 15.3-01566330-304 та ТІ) на нанопорошки із топінамбура. На їх основі розроблено нові види оздоровчих продуктів (сухі швидкорозчинні фруктові Instant-нанонапої, сухі соки, кондитерські вироби, нові види наноморозива, біокефіри і біоюгурти з пребіотичними властивостями та ін.).

Висновки. У результаті проведених досліджень:

– встановлено, що внаслідок глибокої переробки рослинної сировини, зокрема топінамбура, яка заснована на комплексній дії

кріогенного «шокового» заморожування, сублімаційного сушіння і дрібно-дисперсного подрібнення під час отримання нанопорошків, відбуваються процеси кріодеструкції, механодеструкції і механохімії, які призводять до більш повного екстрагування із сировини БАР (у 1,8...2,3 разу більше, ніж знаходиться у вихідній сировині) та руйнування біополімерів (інуліну, білків) до їх мономерів (на 45–55%);

– запропонована та розроблена кріогенна нанотехнологія дрібнодисперсних порошків із топінамбура з пребіотичними властивостями, яка заснована на глибокій переробці сировини і відрізняється від традиційних тим, що виключає паротермічну обробку сировини і включає кріогенне «шокове» заморожування, сублімаційне сушіння і дрібнодисперсне подрібнення;

– встановлено, що нанопорошки із топінамбура за хімічним складом, вмістом БАР і дисперсним складом кращі за відомі світові аналоги. Крім того, значна частина речовин (як БАР, так і біополімерів) знаходиться в нанорозмірній формі. Показано, що нерозчинні біополімери (білки, інулін, целюлоза та ін.) топінамбура трансформуються на 45...55% в розчинну форму до окремих мономерів (фруктози, α -амінокислот, глюкози), які є нанорозмірні (молекули α -амінокислот, фруктози та глюкози мають розміри в інтервалі 0,8...1,0 нм;

– встановлено закономірності і механізми впливу дрібно-дисперсного подрібнення на трансформацію зв'язаних амінокислот білка у вільну розчинну форму за рахунок механолізу молекул білка (на 45...55% до окремих α -амінокислот). Розкрито механізм механодеструкції молекул білка та його наноасоціатів і наноконкомплексів з іншими біополімерами і БАР, пов'язаний із механокрекінгом.

Список джерел інформації / Reference

1. FAO/WHO/UNU (2013), "Dietary protein quality evaluation in human nutrition. Report of an FAO Expert Consultation", *Food and agriculture organization of the united nations*, Rome, vol. 92, p. 57.

2. Капрельянц Л. В. Пребиотики: химия, технология, применение: монография / Л. В. Капрельянц. – К. : ЭнтерПринт, 2015. – 252 с.

Kaprelyants, L. (2015), *Prebiotics: chemistry, technology, application: Monography [Prebiotiki: himiya, tehnologiya, primenenie: monografija]*, EnterPrint, Kyiv, 252 p.

3. Gibson, G., Roberfroid, M. (2008), *Handbook of Prebiotics*, CRS Press, London, vol. 4, pp. 22-42.

4. Sousa M., Santos E., Sgarbeeri V. (2011), "The importance of prebiotics in functional food and clinical practical", *Food and Nutritional Science*, vol. 2, pp.133-144.

5. Roberfroid, M. (2000), "Fructo-oligosaccharide malabsorption: benefit for gastrointestinal functions", *Curr Opinion Gastroenterology*, vol. 16, pp.173-177.

6. Павлюк Р. Ю. Крiо- и механохимия в пищевых технологиях: монография / Р. Ю. Павлюк, В. В. Погарская, В. А. Павлюк та ин., ; Харьк. гос. ун-т питания и торговли; Харьк. торг.-эконом. ин-т Киевск. нац. торг.-эконом. ун-та. – X. : Факт, 2015. – 255 с.

Pavlyuk, R., Pogarskaya, V., Pavlyuk, V., Radchenko, L., Yur'eva, O., Maksimova, N. (2015), *Cryo- and Mechanochemistry in the food technology: monography* [Крiо- i mehanohimija v pishhevyyh tehnologijah: monografija], Fact, Kharkiv, 255 p.

7. Galland, L. (2014), "Functional Foods: Health Effects and Clinical Applications", *Reference Module in Biomedical Sciences, from Encyclopedia of Human Nutrition (Third Edition)*, pp. 366-371.

8. Tur, J.A., Bibiloni, M.M. (2015), "Functional Foods", *Reference Module in Food Science, from Encyclopedia of Food and Health*, pp. 157-161.

9. Radovanovic, A., Stojceska, V., Plunkett, A., Jankovic, S., Milovanovic, D., Cupara, S. (2015), "The use of dry Jerusalem artichoke as a functional nutrient in developing extruded food with low glycemic index", *Food Chemistry*, vol. 177, pp. 81-88.

10. Afoakwah, N.A., Dong, Y., Zhao, Y., Xiong, Z., Owusu, J., Wang, Y., Zhang, J. (2015), "Characterization of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) powder and its application in emulsion-type sausage", *LWT – Food Science and Technology*, vol. 64, is. 1, pp. 74-81.

11. Bach, V., Clausen, M., Edelenbos, M. (2015), "Production of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) and Impact on Inulin and Phenolic Compounds", *Processing and Impact on Active Components in Food*, vol. 12, pp. 97-102.

12. Диетические свойства инулина и олигофруктозы Beneo™ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.beneo.com/Homepage/>

"Dietary properties of inulin and oligofructose Beneo™", available at: <http://www.beneo.com/Homepage/>.

13. Kolida, S., Tuohy, K., Gibson, G. (2002), "Prebiotic effects of inulin and oligofructose", *The British journal of nutrition*, vol. 87, pp. 193-197.

14. Tu, J., Zhang, M., Xu, B., Liu, H. (2015), "Effects of different freezing methods on the quality and microstructure of lotus (*Nelumbo nucifera*) root", *International Journal of Refrigeration*, pp. 59-65.

15. James, S.J., James, C. (2014), "Chilling and Freezing", *Food Safety Management*, vol. 20, pp. 481-510.

16. Shi, L., Li, W., Sun, J., Qiu, Y., Wei, X., Luan, G., Hu, Y., Tatsumi, E. (2016), "Grinding of maize: The effects of fine grinding on compositional, functional and physicochemical properties of maize flour", *Journal of Cereal Science*, vol. 68, pp. 25-30.

17. Balaz, P. (2010), "Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering", *Woodhead Publishing Limited*, pp. 400.

18. Balaz, P., Balaz, M., Bujnakova, Z. (2014), "Mechanochemistry in technology: from minerals to nanomaterials and drugs", *Chemical Engineering & Technology*, vol. 37, pp. 747-756.

19. Zhao, X., Zhu, H., Zhang, G., Tang, W. (2015), "Effect of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activity of red grape pomace powders", *Powder Technology*, vol. 286, pp. 838-844.

20. Boldyrev, V.V. (2004), "Mechanochemical modification and synthesis of drugs", *Journal of Materials Science*, vol. 39, is. 16/17, pp. 5117-5120.

Павлюк Раїса Юрїївна, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України, Заслужений діяч науки і техніки України, кафедра технологій переробки плодів, овочів і молока, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktrppom@ukr.net.

Павлюк Раиса Юрьевна, д-р техн. наук, проф., лауреат Государственной премии Украины, Заслуженный деятель науки и техники Украины, кафедра технологий переработки плодов, овощей и молока, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktrppom@ukr.net.

Pavlyuk Raisa, doctor of technical sciences, professor, the State Prize laureate of Ukraine, Honored figure of Science and Technology in Ukraine, Department of Technology Processing of Fruits, Vegetables and Milk, Kharkov State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-92; e-mail: ktrppom@ukr.net.

Погарська Вікторія Вадимівна, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України, кафедра технологій переробки плодів, овочів і молока, Харківський державний університет харчування і торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktrppom@ukr.net.

Погарская Виктория Вадимовна, д-р техн. наук, проф., лауреат Государственной премии Украины, кафедра технологий переработки плодов, овощей и молока, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktrppom@ukr.net.

Viktoriya Pogarska, doctor of technical sciences, professor, the State Prize laureate of Ukraine, Department of Technology Processing of Fruits, Vegetables and Milk, Kharkov State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-92; e-mail: ktrppom@ukr.net.

Балабай Катерина Сергїївна, асист., кафедра технологій переробки плодів, овочів і молока, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktrppom@ukr.net.

Балабай Екатерина Сергеевна, ассист., кафедра технологий переработки плодов, овощей и молока, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktrppom@ukr.net.

Balabai Katerina, assistant, Department of Technology Processing of Fruits, Vegetables and Milk, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-92; e-mail: ktppom@ukr.net.

Павлюк Вадим Антонович, д-р фіз.-мат. наук, проф., кафедра технології і організації ресторанного бізнесу, Харківський торгівельно-економічний інститут Київського Національного торгівельно-економічного університету. Адреса: пров. Отакара Яроша, 8, м. Харків, Україна, 61045. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktppom@ukr.net.

Павлюк Вадим Антонович, д-р фіз.-мат. наук, проф., кафедра технологии и организации ресторанного бизнеса, Харьковский торгово-экономический институт Киевского Национального торгово-экономического университета. Адрес: пер. Отакара Яроша, 8, г. Харьков, Украина, 61045. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktppom@ukr.net.

Pavlyuk Vadim, doctor of ph.-m. sciences, professor, Department of technology and organization of restaurant business, Kharkiv Trade and Economics Institute of Kyiv National University of Trade and Economics. Address: Otakara Jarosha alley, 8, Kharkiv, Ukraine, 61045. Tel.: (057)349-45-92; e-mail: ktppom@ukr.net.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. В.М. Михайловим.
Отримано 15.10.2016. ХДУХТ, Харків.*

УДК 664. (684+696,3) 0,45

ВИКОРИСТАННЯ ШРОТУ ІЗ ПЛОДІВ РОЗТОРОПШІ ПЛЯМИСТОЇ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПИРОГІВ ЗНИЖЕНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЦІННОСТІ

В.В. Власенко, В.М. Криворук

Досліджено фізико-хімічні і функціонально-технологічні властивості шроту із плодів розторопші. Проведено аналіз перспективи розробки композиції дієтичних добавок для виробництва борошняних кулінарних виробів. Проаналізовано можливість покращення харчової цінності пирогів за рахунок додавання шроту із плодів розторопші. Обґрунтовано використання дієтичної добавки в технології приготування пирога з дріжджового тіста в кількості 8% від маси сировини. Зокрема, порівняно з контролем, у виробах із добавкою 8% вміст вологи був вищий на 4,7%, а показник унікання – нижчий на 13,9%, пористість – нижча на 5,0%, коефіцієнт підйому пирога дещо зменшився, а крихкість зростає до 3,5%.

© Власенко В.В., Криворук В.М., 2016