

УДК 621.59: 613.229:547.455.65

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.56170

РОЗРОБКА КРІОГЕННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ НАНОПОРОШКІВ ІЗ ТОПІНАМБУРУ З ВИКОРИСТАННЯМ РІДКОГО ТА ГАЗОПОДІБНОГО АЗОТУ

Р. Ю. Павлюк

Доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України, заслужений діяч науки і техніки України*

E-mail: ktprom@mail.ru

О. С. Бессараб

Кандидат технічних наук, професор, Заслужений працівник освіти України

Кафедра технології консервування

Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

E-mail: tk_nuft@i.ua

В. В. Погарська

Доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України*

E-mail: ktprom@mail.ru

К. С. Балабай*

E-mail: ktprom@mail.ru

С. М. Лосєва

Доцент*

*Кафедра технологій переробки плодів, овочів і молока Харківський державний університет харчування і торгівлі
вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051

Запропоновано та розроблено кріогенну технологію отримання нанопорошків із топінамбуру, яка відрізняється від традиційних застосуванням кріогенного «шокового» заморожування, низькотемпературного дрібнодисперсного подрібнення та сублімаційного сушіння. Нова технологія дозволяє більш повно вилучити біологічно активні речовини із зв'язаного з біополімерами наноасоціатів у вільний стан та зруйнувати полісахарид інулін на 45–55 % до окремих його мономерів – фруктози

Ключові слова: кріогенне заморожування, дрібнодисперсне подрібнення, сублімаційне сушіння, топінамбур, інулін, нанопорошки

Предложена и разработана кріогенная технология получения нанопорошков из топинамбура, которая отличается от традиционных применением кріогенного «шокового» замораживания, низкотемпературного, мелкодисперсного измельчения и сублимационной сушки. Новая технология позволяет более полно извлечь биологически активные вещества из связанного с биополимерами в наноассоциатах состояния в свободное и разрушить полисахарид инулин на 45–55 % до отдельных его мономеров – фруктозы

Ключевые слова: кріогенное замораживание, мелкодисперсное измельчение, сублимационная сушка, топинамбур, инулин, нанопорошки

1. Вступ

Робота присвячена розробці кріогенної технології нанопорошків із топінамбуру, виявленню закономірностей та механізму впливу кріогенного заморожування і процесів кріомеханодеструкції на біополімери інулін та білок, вивченню їх механолізу до окремих мономерів – фруктози та амінокислот та збереження біологічно активних речовин (БАР) отриманні нанопорошків за кріогенною технологією.

Глобальною проблемою, яка в даний час спостерігається в усіх країнах світу, є незбалансованість харчування і дефіцит в раціоні харчування повноцінних білків, вітамінів, мінеральних речовин і інших БАР, потреба в яких у населення України задовольняється всього на 50 % [1–3]. Крім того, на всій Землі спостерігається зниження імунітету населення, обумовлене загальним погіршенням екологічного становища, мало-

рухотим способом життя, зловживанням шкідливими звичками, впливом стресових подразників тощо [1–5]. У зв'язку з цим, актуальним є включення у добові раціони харчування функціональних оздоровчих продуктів (особливо із фруктів та овочів, а також комбінованих молочно-рослинних продуктів), які являються джерелами БАР та спрямовані на зміцнення здоров'я. Цій проблемі в даний час приділяється велика увага в роботах, як вітчизняних, так і закордонних вчених [4–8].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Інуліновмісна сировина, зокрема топінамбур, займає особливе місце серед рослинної сировини, яка використовується для виготовлення функціональних оздоровчих продуктів [9, 10]. В Україні традиційним джерелом інуліну є топінамбур та корінь цикорію. Іну-

лін є природним лінійним полісахаридом, основним структурним мономером якого є залишки фруктози, що з'єднані β -фруктозидними зв'язками. Прийнято вважати, що при споживанні продуктів харчування, збагачених інуліновмісною сировиною, з'являється можливість знижувати загальне вуглеводне навантаження на організм людини, що призводить до зниження глікемічного індексу і калорійності та значно посилює їх біологічну цінність [11].

Відомо, що при споживанні топінамбуру у свіжому вигляді та переробленого (у формі порошоків, борошна, пюре, сиропу та інших), інулін й олігофруктози, які входять до його складу та збудовані із залишків фруктози, що зв'язані β -фруктозидними зв'язками, не розщеплюється ферментами організму людини (ні в шлунку, ні в тонкому кишковнику) до фруктози. Тому, зазначені рослини фруктани при проходженні через ротову порожнину та шлунок зазнають лише незначного впливу. Цей факт було доведено вченими різних країн світу: Зізеніц і Зіберт, Німеччина (1987 р.), De Nederlandse Voedings-raad, Нідерланди (1987 р.), Бем'є і Паскаль, Франція (1990 р.), Британський Нітриціологічний фонд, Велика Британія (1990 р.) та Роберфройд, Бельгія (1993) [9-13]. Тобто рослинний інулін мало засвоюється організмом людини. Відомо також, що існуючі технології переробки топінамбуру в різні добавки у формі порошоків, паст, борошна, пюре, екстрактів з використанням паротермічної обробки, сушіння, не дозволяють частину інуліну перетворити в легкозасвоювану фруктозу.

При переробці топінамбуру в порошки, сиропи, пюре є ще одна значна проблема – це потемніння продукту в результаті дії окислювальних ферментів [9–14]. Йде пошук таких технологічних прийомів, які б дозволили інактивувати окислювальні ферменти та отримати кінцеві продукти високої якості [15–17]. Крім того, при використанні теплових методів обробки топінамбуру при отриманні різних продуктів із нього відбувається руйнування фруктози (від 10 до 20 %).

Відомо, що найбільш ефективними способами переробки рослинної сировини при отриманні пюре є швидке «шокове» заморожування, яке забезпечує найбільш високе збереження вітамінів та інших БАР [6, 14–19]. Однак при розморожуванні заморожених продуктів спостерігаються втрати клітинного соку і вітамінів, а гарантійні терміни зберігання замороженої продукції обмежені 6 місяцями. За кордоном широке застосування знайшло криогенне «шокове» заморожування, тобто заморожування з застосуванням криогенних рідин (рідкого азоту, рідкої вуглекислоти та ін.) [18, 19]. Аналіз даних літератури показав, що в Україні цей спосіб заморожування поки не знайшов свого застосування, не розроблені також криогенні технології і не вивчені біохімічні та фізико-хімічні процеси при отриманні заморожених пюре з рослинної сировини, зокрема з топінамбуру [6, 14].

На думку авторів статті, одним з інноваційних напрямків розвитку науки і техніки в міжнародній практиці є застосування способів дрібнодисперсного подрібнення, зокрема харчової рослинної сировини, що призводять до процесів механодеструкції (у тому числі криодеструкції), механоактивації і механохімії, які проявляються при збільшенні ступеня дисперсності подрібнених матеріалів, в результаті чого продукт набуває нових властивостей і знаходиться в наноструктурованій або нанорозмірній формі [6, 14, 20–24].

В даний час перспективні способи дрібнодисперсного подрібнення вже знайшли широке застосування в металургійній, текстильній, авіаційній, хімічній, будівельній галузі та ін. [4, 14, 21, 22]. У харчовій промисловості ці процеси не були вивчені взагалі.

У даній роботі при розробці криогенної технології отримання нанопорошків із топінамбуру як інновацію було запропоновано використовувати криогенне «шокове» заморожування з використанням рідкого та газоподібного азоту і низькотемпературне дрібнодисперсне подрібнення, що супроводжується процесами криодеструкції, механоактивації і механохімії. Комплексне використання дозволило розробити новий спосіб отримання консервованих добавок у формі дрібнодисперсного порошку сублімаційного сушіння з якісно новими, ніж у вихідній сировині, характеристиками та хімічним складом, які не можна отримати, використовуючи традиційні методи.

3. Мета і задачі досліджень

Метою роботи є розробка криогенної технології отримання нанопорошків із топінамбуру з використанням в якості інновації криогенного «шокового» заморожування, дрібнодисперсного механічного низькотемпературного подрібнення та сублімаційного сушіння, а також виявлення механізмів і закономірностей основних механохімічних та біохімічних процесів при отриманні нанопорошків.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- розробити криогенну технологію отримання нанопорошків із топінамбуру з використанням в якості інновації криогенного «шокового» заморожування з використанням рідкого та газоподібного азоту, низькотемпературного подрібнення та сублімаційного сушіння;
- вивчити основні механохімічні та біохімічні процеси, які відбуваються в рослинній сировині при використанні нових технологічних прийомів, зокрема:
 - вплив криогенного «шокового» заморожування, дрібнодисперсного подрібнення та сублімаційного сушіння на БАР та полісахариди, зокрема інулін, при отриманні нанопорошків із топінамбуру;
 - процес механолізу білка топінамбуру та трансформацію зв'язаних амінокислот у вільну форму при отриманні нанопорошків за криогенною технологією та розкрити механізм цього процесу;
 - інфрачервоні спектри зразків тонкодисперсних порошоків з топінамбуру з розміром частинок біля декількох мкм та порошоків традиційного подрібнення з розміром частинок 50...250 мкм;
 - хімічний склад нанопорошків із топінамбуру в порівнянні з аналогами та вихідною сировиною.

4. Експериментальні дані розробки криогенної технології нанопорошків сублімаційного сушіння із топінамбуру та їх обробка

Харківським державним університетом харчування та торгівлі (Україна, м. Харків) у співдружності із фахівцями Національного університету харчових технологій (Україна, м. Київ) запропоновано та розроблено

кріогенну технологію отримання нанопорошків сублімаційного сушіння із топінambuру з використанням низькотемпературної обробки, зокрема кріогенного «шокового» заморожування та низькотемпературного механічного подрібнення. Роботу виконано з використанням сучасного обладнання: кріогенний програмний заморожувач з комп'ютерним забезпеченням, низькотемпературний подрібнювач (Франція), кріогенний подрібнювач, бінокулярний мікроскоп з програмним забезпеченням, відеокамерою та калібрувальною шкалою в мікрметровому та нанометровому діапазоні.

Дослідження проведено в ХДУХТ на кафедрі технологій переробки плодів, овочів і молока на базі 2-х науково-дослідних лабораторій: «Інноваційні кріо- та нанотехнології рослинних добавок та оздоровчих продуктів» і «Технології та біохімії фітоконцентратів».

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

Головним при розробці кріогенної технології нанопорошків із топінambuру з використанням заморожування, кріодеструкції та механодеструкції було повністю виключити теплову обробку сировини, провести механоліз і кріоліз інуліну у вільну фруктозу в розчинній формі, інактивувати окислювальні ферменти, максимально зберегти БАР та збільшити ступінь їх вилучення із наноконкомплексів з іншими біополімерами у вільний стан з сировини, а також повністю виключити використання синтетичних харчових добавок та отримати продукти високої якості.

Встановлено, що при кріогенному заморожуванні з використанням різних швидкостей охолодження до різних кінцевих температур в продукті, сублімаційному сушінні та при кріогенному дрібнодисперсному подрібненні топінambuру значна частина інуліну (45–55%) перетворюється в розчинну вільну фруктозу за рахунок неферментативного, некислотного руйнування β-фруктозних зв'язків в інуліні. Цей процес відбувається за рахунок механічного руйнування – механокрекінгу. Так, наприклад, у вихідній сировині – топінambuрі міститься 52,2–56,0 % інуліну в перерахунку на суху речовину, а після низькотемпературної обробки залишається 25,8–28,7 % інуліну в перерахунку на суху речовину, а 26,4–27,3 % його перетворюється у вільну фруктозу (рис. 1). Виявлено також, що одночасно відбувається деградація і деструкція целюлози та білку. Так, 43–45 % целюлози трансформується до її мономерів – глюкози, та 50 % білку руйнується до окремих вільних α-амінокислот.

Установлено також, що при «шоковому» заморожуванні та дрібнодисперсному подрібненні топінambuру, яке супроводжується процесами механо- та кріодеструкції, механоактивації відбувається не тільки збереження всіх БАР, таких як фенольні сполуки, аскорбінова кислота, дубильні речовини та ін., але й їх більш повне вилучення із зв'язаних з біополімерами наноконкомплексів або наноасоціатів стану і трансформація їх у вільний стан (їх кількість в порівнянні з вихідною сировиною збільшується в 1,7–2,2 рази), що дає змогу отримати продукт з принципово новим хімічним складом і високими споживчими властивостями.

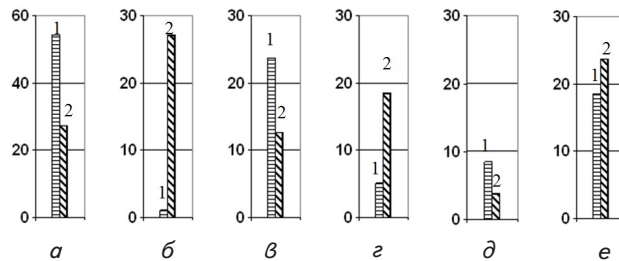


Рис. 1. Вплив заморожування та кріомеханодеструкції на масову частку інуліну (а) топінambuру, %, його трансформацію у вільну фруктозу (б), зв'язані амінокислоти білку (в), трансформацію їх у вільні амінокислоти (г) та на целюлозу (д) і її механоліз до цукрів при отриманні дрібнодисперсних порошкоподібних добавок (е); 1 – свіжий топінambuру, 2 – нанопорошок із топінambuру

Проведено порівняння амінокислотного складу білків у вільному та зв'язаному стані у вихідній інуліновмісній сировині (висушеному сублімаційним сушінням топінambuру) та нанопорошку із топінambuру. Встановлено, що в порівнянні із вихідною сировиною, при дрібнодисперсному подрібненні замороженої інуліновмісної сировини відбувається значне механічне руйнування (механоліз) молекул білка до окремих амінокислот, їх перехід із зв'язаного стану у вільний (табл. 1). Так, в нанопорошку із топінambuру масова частка зв'язаних амінокислот зменшується у 2 рази в порівнянні з вихідною сировиною (відповідно у вихідній сировині масова частка зв'язаних амінокислот становить 5,59 мг/100 г, а у нанопорошку із топінambuру – 2,44 мг/100 г). Зниження після дрібнодисперсного подрібнення масової частки амінокислот білку становить 56,4 %. Одночасно відбувається збільшення у 1,7–10 разів масової частки амінокислот, що знаходяться у вільному стані.

Таким чином, встановлено, що в порівнянні з вихідною сировиною (висушеною сублімаційним сушінням топінambuром) при дрібнодисперсному подрібненні замороженої інуліновмісної сировини відбувається дезагрегація, деструкція та механоліз біополімерів білку, який проявляється у зменшенні приблизно на 45–50 % масової частки амінокислот білку, що знаходяться у зв'язаному стані, за рахунок трансформації амінокислот у вільну форму.

Так, в 100 г висушеного топінambuру загальний вміст амінокислот становить 6,8 мг, з них 5,59 мг представлений амінокислотами, що знаходяться в зв'язаному стані та 1,21 мг – у вільному. А в 100 г нанопорошку при загальному вмісті амінокислот 6,8 мг, 2,44 мг представлений амінокислотами, що знаходяться в зв'язаному стані та 4,36 мг – у вільному.

Отримані за допомогою хімічних методів наукові результати були підтверджені при використанні методів спектрального аналізу. На рис. 2 наведено ІЧ-спектри виготовлених дрібнодисперсних порошків, а в табл. 2 представлена пояснювальна інформація до рис. 2, в якій наведено відомості про основні валентні коливання функціональних груп дрібнодисперсних порошків (–OH, –NH, –SH, –C=O, –C–O, –COOH, –S=S, –C=N, –CH₃) та цифрові значення частот характерних для їх коливаль.

Таблиця 1

Вплив криогенного заморожування та дрібнодисперсного подрібнення на трансформацію амінокислот із зв'язаного стану у вільний при отриманні нанопорошку із топінambuру

Амінокислота	Масова частка амінокислот					
	у зв'язаному стані			у вільному стані		
	Вихідна сировина (висушений топінambuру), мг в 100 г	Нанопорошок із топінambuру, мг в 100 г	% до вихідної сировини	Вихідна сировина (висушений топінambuру), мг в 100 г	Нанопорошок із топінambuру, мг в 100 г	% до вихідної сировини
Аспарагінова кислота	0,47	0,24	51,1	0,33	0,56	169,7
Треонін	0,20	0,10	50,0	0,09	0,19	211,1
Серин	0,32	0,16	50,0	0,04	0,2	500,0
Глутамінова кислота	1,33	0,14	10,5	0,27	1,46	540,7
Пролін	0,34	0,16	47,1	0,02	0,2	1000,0
Цистин+Гліцин	0,31	0,18	58,1	0,05	0,18	360,0
Аланін	0,40	0,22	55,0	0,04	0,22	550,0
Валін	0,30	0,17	56,7	0,06	0,19	316,7
Метіонін	0,12	0,08	66,7	0,03	0,07	233,3
Ізолейцин	0,42	0,25	61,0	0,06	0,22	366,7
Лейцин	0,40	0,21	52,5	0,04	0,23	575,0
Тирозин	0,12	0,07	58,3	0,03	0,08	266,7
Фенілаланін	0,20	0,11	55,0	0,02	0,11	550,0
Гістидин	0,11	0,06	54,5	0,04	0,09	225,0
Лізин	0,48	0,25	52,1	0,06	0,29	483,3
Аргінін	0,07	0,04	57,1	0,04	0,07	175,0
Сума	5,59	2,44	43,6	1,21	4,36	360,3

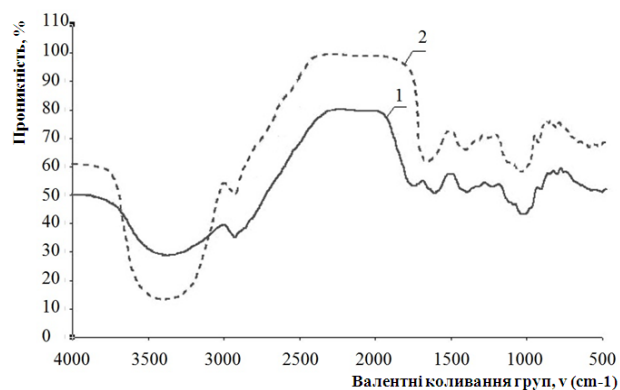


Рис. 2. Порівняння ІЧ-спектрів виготовлених дрібнодисперсних порошоків: 1 – висушений сублімаційним сушінням топінambuру; 2 – нанопорошок із топінambuру

Таблиця 2

Відомості про основні валентні коливання функціональних груп дрібнодисперсних порошоків ($-\text{OH}$, $-\text{NH}$, $-\text{SH}$, $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{C}-\text{O}$, $-\text{COOH}$, $-\text{S}=\text{S}$, $-\text{C}=\text{N}$, $-\text{CH}_3$), та цифрові значення частот характерних для їх коливань

Валентні коливання груп, cm^{-1}				
OH	NH	SH	$\text{S}-\text{H}$	$\text{C}=\text{O}$
3645...2500	3500...3300	3350...2850	2600...2550	1750...1720
Валентні коливання груп, cm^{-1}				
$\text{C}-\text{O}-$	COOH	$\text{S}=\text{S}$	$\text{C}=\text{N}$	CH_3
1300...1000	1750...1700	50...4500	1230...1030	1470...1355

Показано, що в області частот при $\nu=3000\text{...}3650\text{ cm}^{-1}$, характерних для валентних коливань функціональ-

них OH -груп, в криогенних нанопорошках, на відміну від висушеного сублімаційним сушінням топінambuру, спостерігається зменшення інтенсивності ІЧ-спектрів, що свідчить про руйнування водневих зв'язків в різних наноконформаціях сполук біополімерів з БАР, а також в самих біополімерах. При цьому, відбувається більш повне екстрагування останніх, які трансформуються у вільний стан, визначаються і фіксуються за допомогою хімічних методів досліджень. Показано також, що в області частот $2900\text{...}2000\text{ cm}^{-1}$, характерних для валентних коливань $-\text{NH}_2$ і $-\text{NH}$ груп амінокислот, а також в області $\nu=1700\text{...}1000\text{ cm}^{-1}$, характерних для валентних коливань $-\text{C}=\text{O}$ груп спиртів, амінокислот, ефірів, спостерігається збільшення інтенсивності спектрів поглинання в отриманих нанопорошках із топінambuру порівняно з контрольним зразком, що свідчить про збільшення α -амінокислот, ефірів, спиртів, ароматичних речовин терпеноїдної природи.

Таким чином, ІЧ-спектри підтверджують наукові результати, отримані хімічними методами.

На основі отриманих експериментальних даних була розроблена нова холодильна нанотехнологія переробки топінambuру у нанопорошки, яка відрізняється від традиційних тим, що виключає повністю теплову обробку продукту та заснована на використанні холодильної обробки сировини на стадії підготовки топінambuру, криогенного «щоккового» заморожування та низькотемпературного дрібнодисперсного подрібнення з подальшим сублімаційним сушінням (рис. 3).

Нова технологія дає можливість отримати добавки із топінambuру у вигляді дрібнодисперсних нанопорошків з розміром частинок в десятки разів менші, ніж при традиційному подрібненні. Їх якість за вмістом фруктози у вільному стані та БАР, які вилучені із зв'язаного стану, перевершує вітчизняні та закордонні аналоги.

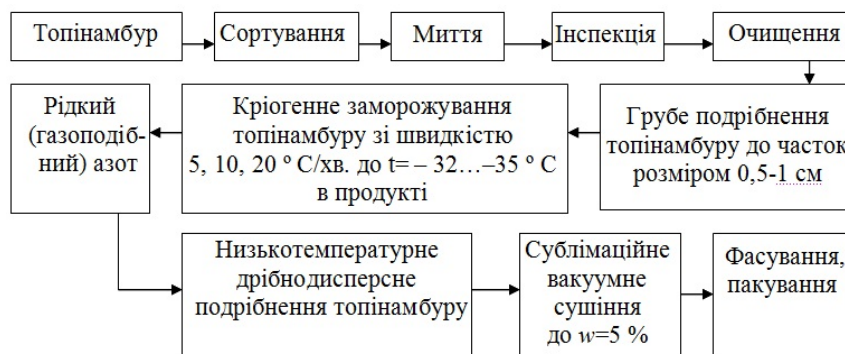


Рис. 3. Технологічна схема отримання нанопорошків із топінанмбуру

Таблиця 3

Вміст БАР та харчових речовин в нанопорошку із топінанмбуру

Найменування показника	Топінанбур свіжий		Нанопорошок із топінанмбуру	
	масова частка компонента в розрахунку на повітряно-суху речовину	масова частка компонента в розрахунку на абсолютно суху речовину	масова частка компонента в розрахунку на повітряно-суху речовину	масова частка компонента в розрахунку на абсолютно суху речовину
Вуглеводи, в тому числі:	17,1±0,5	72,5±2,1	73,6±0,5	77,9±0,5
інулін, %	12,8 ±0,5	54,2±2,1	25,6±1,5	27,1±1,6
загальний цукор, %	4,4±0,1	18,6±0,4	22,4±1,4	23,7±1,5
фруктоза, %	–	–	25,6±1,5	27,1±1,6
Білок, %	1,2±0,01	6,8±0,04	6,8±0,5	6,8±0,5
Целюлоза, %	2,0±0,1	8,5±0,4	3,6±0,1	3,8±0,1
Пектин, %	0,4±0,01	1,7±0,04	3,8±0,2	4,0±0,2
L-аскорбінова кислота, мг в 100 г	10,3±0,1	43,6±0,4	78,2±2,4	82,8±2,5
Фенольні сполуки (за хлорогеновою кислотою), мг в 100 г	350,0±5,7	1483,1±24,2	2800,0±15,8	2963,0±16,7
Флавонолові глікозиди (за рутином), мг в 100 г	240,0±4,8	1016,9±20,3	1800,0±12,4	1904,8±13,1
Дубильні речовини (за таніном), мг в 100 г	300,0±6,4	1271,2±27,1	2160,0±14,0	2285,7±14,8
Зольність, %	1,6±0,1	6,8±0,4	6,8±0,2	7,2±0,2
Сухі речовини, %	23,6±1,2	–	94,5±0,1	–
Органічні кислоти, %	0,3±0,01	1,3±0,04	1,5±0,1	1,6±0,4

Встановлено, що нові нанопорошки із топінанмбуру, отримані за холодильними технологіями, суттєво відрізняються від свіжого топінанмбуру (табл. 3). Вони відрізняються високим вмістом фруктози у вільному стані. Так, в 100 г нового нанопорошку із топінанмбуру масова частка фруктози складає 25–26 %, а кількість біополімерів, таких як інулін, білок, целюлоза зменшилась майже вдвічі в порівнянні з вихідною сировиною (при розрахунку на суху речовину). Показано також, що нанопорошки відрізняються високим вмістом БАР, такими як фенольні сполуки, дубильні речовини та інші з Р-вітамінною активністю та з антиоксидантними властивостями. Так, у свіжому топінанбурі масова частка низькомолекулярних фенольних сполук (за хлорогеновою кислотою) складає 350,0±5,7 мг в 100 г, флавонолових глікозидів (за рутином) 240,0±4,8 мг в 100 г, а в нанопорошку відповідно 2800,0±15,8 мг в 100 г та 1800,0±12,4 мг в 100 г. Аналогічні закономірності стосуються і поліфенольних сполук (відповідно 300,0±6,4 у свіжій сировині та 2160,0±14,0 мг в 100 г в нанопорошку із топінанмбуру. Таким чином, використання кріогенного заморожування, низькотемпературного подрібнення та сублимаційного сушіння, дозволяє отримати якісно нові нанопорошки із топінанмбуру, які неможливо отримати традиційними методами.

Одержані результати стали основою при розробці нових технологій отримання дрібнодисперсних порошків із топінанмбуру для оздоровчого харчування із інуліном в легкозасвоюваній формі (до 50–55 % в формі вільної фруктози). Відповідно до хімічного складу, нові продукти мають потенційну імуномодулюючу, протипухлинну та детоксикуючу дію. Нові технології пройшли апробацію у виробничих умовах в НПП «КРІАС». Розроблено нормативну документацію на дрібнодисперсне пюре і порошок із топінанмбуру. На їх основі розроблені нові види оздоровчих продуктів (сиркові десерти, нанонапої, нові види наноморозива, швидкокорозчинні фруктові «інстант» нанонапої, соки, кондитерські вироби та ін.).

5. Обговорення результатів дослідження впливу кріогенного заморожування на біополімери інулін, білок та целюлозу і збереження БАР при отриманні нанопорошків за кріогенною технологією

Розроблена кріогенна технологія отримання нанопорошків із топінанмбуру дозволяє зруйнувати полісахарид інулін на 45–55 % до окремих його мономерів – фруктози у вільному легкозасвоюваному стані і таку ж кількість молекул білку зруйнувати до окремих амінокислот та перевести їх із зв'язаного стану у вільний. Крім того, новий спосіб глибокої переробки рослинної сировини дає змогу провести механоліз целюлози до цукрів (її кількість в дрібнодисперсних порошкоподібних добавках зменшилась майже вдвічі порівняно із свіжим топінанбуром в розрахунку на абсолютно суху речовину).

Також, використання таких технологічних прийомів, як «шокове» заморожування із застосуванням рідкого або газоподібного азоту, низькотемпературне дрібнодисперсне подрібнення та сублімаційне сушіння, дають можливість не лише зберегти всі БАР але й більш повно вилучити їх із зв'язаного із біополімерами у наноконформаціях стану і сприяти їх трансформації у вільний (порівняно з вихідною сировиною кількість БАР зростає у 1,7–2,2 рази). Таким чином, вищеописаний спосіб дозволяє краще використовувати біологічний потенціал рослинної сировини, що може бути корисним не тільки в різних галузях харчової промисловості, а також в фармацевтичній сфері при отриманні натуральних фармпрепаратів та косметичній при отриманні натуральних наповнювачів до косметичних засобів.

Розвитком і подовженням досліджень в даному напрямку є розширення асортименту оздоровчих продуктів з використанням запропонованих нанопорошків із топінambuру та вивчення конформаційних змін біополімерів, проведення мікробіологічних, спектроскопічних, хроматографічних досліджень при дрібнодисперсному криогенному подрібненні інуліновмісної сировини.

6. Висновки

В результаті проведених досліджень:

– запропоновано та розроблено інноваційну криогенну технологію переробки топінambuру у нанопорошки, яка відрізняється від традиційних тим, що виключає повністю теплову обробку сировини та заснована на використанні криогенного «шокового» заморожування та низькотемпературного дрібнодисперсного подрібнення з подальшим сублімаційним сушінням;

– встановлено, що при «шоковому» заморожуванні та дрібнодисперсному подрібненні топінambuру, яке супроводжується процесами механо- та

криодеструкції, механоактивації вдалося зруйнувати 45–55 % інуліну до вільної фруктози, а також не лише зберегти всі БАР, такі як фенольні сполуки, аскорбінова кислота, дубильні речовини тощо, але й максимально вилучити їх із зв'язаного з біополімерами у наноконформаціях або наноасоціатах стану і трансформувати їх у вільний стан;

– встановлено, що в порівнянні із вихідною сировиною, при дрібнодисперсному подрібненні замороженої інуліновмісної сировини відбувається значне (в 2 рази) механічне руйнування (механоліз) молекул білка до окремих амінокислот, їх перехід із зв'язаного стану у вільний;

– проведено порівняння ІЧ-спектрів криогенних нанопорошків та порошку виготовленого за традиційною технологією, що підтвердило результати, отримані до цього за допомогою хімічних методів. Зокрема, підтверджено, що розроблені криогенні нанопорошки відрізняються від традиційних високим вмістом БАР, а також підвищеною кількістю α -амінокислот, ефірів, спиртів, ароматичних речовин терпеноїдної природи тощо за рахунок їх більш ефективного екстрагування із наноконформацій з іншими біополімерами сировини та переведення із зв'язаного стану у вільний;

– встановлено, що використання таких інновацій при переробці топінambuру у нанопорошки, як криогенне заморожування, низькотемпературне подрібнення та сублімаційне сушіння, дозволяє отримати якісно новий продукт, який неможливо отримати, використовуючи традиційні методи переробки рослинної сировини. Так, хімічний склад розроблених нанопорошків відрізняється високим вмістом фруктози у вільному стані ($25,6 \pm 1,5$ мг в 100 г) та високим вмістом БАР, такими як фенольні сполуки ($2800,0 \pm 15,8$ мг в 100 г), флавонолові глікозиди ($1800,0 \pm 12,4$), дубильні речовини ($2160,0 \pm 14,0$) та інші.

Література

1. FAO/WHO/UNU. Глобальная стратегия по питанию, физической активности и здоровью – 2004 [Текст]. – Резолюция WHA.55.23 принята 57 сессией Всемирной ассамблеи здравоохранения (ВАЗ), World Health Organization, Женева, 2004.
2. FAO/WHO/UNU. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. Report of an FAO Expert Consultation [Text] // Food and agriculture organization of the united nations Rome. – 2013. – Vol. 92–57.
3. Тутельян, В. А. Научные основы здорового питания [Текст] / В. А. Тутельян, А. Н. Разумов, А. И. Вялков и др. – М.: Издательство «Панорама». Наука и практика, 2010. – 816 с.
4. Сімахіна, Г. О. Інноваційні технології та продукти оздоровчого харчування [Текст] / Г. О. Сімахіна, А. І. Українець. – К.: НУХТ, 2010. – 295 с.
5. Нечаев, А. П. Пищевая химия [Текст] / А. П. Нечаев. – Санкт-Петербург: Издательство «ГИОРД», 2007. – 635 с.
6. Павлюк, Р. Ю. Криомеханохимия в нанотехнологиях пищевых продуктов. Серия «Новое в технологиях переработки растительного сырья» [Текст]: монография / Р. Ю. Павлюк, В. В. Погарская, В. А. Павлюк, А. А. Берестова, Н. Ф. Максимова. – Х.: ХГУПТ, 2015. – 218 с.
7. Tur, J.A., Bibiloni, M.M. Functional Foods [Text] / J.A. Tur, M.M. Bibiloni // Reference Module in Food Science, from Encyclopedia of Food and Health. – 2015. – P. 157–161. doi: 10.1016/b978-0-12-384947-2.00340-8
8. Galland, L. Functional Foods: Health Effects and Clinical Applications [Text] / L. Galland // Reference Module in Biomedical Sciences, from Encyclopedia of Human Nutrition (Third Edition). – 2014. – P. 366–371. doi: 10.1016/b978-0-12-375083-9.00130-6
9. Bach, V. Production of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) and Impact on Inulin and Phenolic Compounds [Text] / V. Bach, M. Clausen, M. Edelenbos // Processing and Impact on Active Components in Food. – 2015. – Ch. 12 – P. 97–102. doi: 10.1016/b978-0-12-404699-3.00012-3

10. Afoakwah, N. A. Characterization of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) powder and its application in emulsion-type sausage [Text] / N. A. Afoakwah, Y. Dong, Y. Zhao, Z. Xiong, J. Owusu, Y. Wang, J. Zhang // *LWT – Food Science and Technology*. – 2015. – Vol. 64, Issue 1. – P. 74–81. doi: 10.1016/j.lwt.2015.05.030
11. Radovanovic, A. The use of dry Jerusalem artichoke as a functional nutrient in developing extruded food with low glycemic index [Text] / A. Radovanovic, V. Stojceska, A. Plunkett, S. Jankovic, D. Milovanovic, S. Cupara // *Food Chemistry*. – 2015. – Vol. 177. – P. 81–88. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.12.096
12. Диетические свойства инулина и олигофруктозы Beneo™ – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.beneo.com/Homepage/>
13. Kolida, S., Tuohy, K., Gibson, G. Prebiotic effects of inulin and oligofructose [Text] / S. Kolida, K. Tuohy, G. Gibson. // *The British journal of nutrition*. – 2002. – Vol. 87, Suppl. 2. – P. 193–197.
14. Павлюк, Р. Ю. Розробка нанотехнології дрібнодисперсних добавок з використанням криомеханічної модифікації [Текст] / Р. Ю. Павлюк, В. В. Погарська, О. С. Бессараб, К. С. Балабай, А. О. Борисова, С. М. Лосева // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – Т. 6, № 10 (72) – С. 54–57. doi: 10.15587/1729-4061.2014.32607
15. Черненко, А. В. Перспективные направления в технологии переработки топинамбура [Текст] / А. В. Черненко, М. К. Алтуньян, Н. А. Кубышкина // *Известия вузов. Пищевая технология*. – 2010. – № 5-6. – С. 39–41.
16. Пат. 2444908 РФ. Способ комплексной переработки клубней топинамбура [Электронный ресурс] / Никитин П. В., Новикова И. Л. – 2008. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/244/2444908.html>
17. Пат. 2467070 РФ, МПК С13К 11/00, А23Л 1/212 Способ получения концентрированной пасты из топинамбура [Текст] / Магомедов Г. О., Магомедов М. Г., Астрединова В. В., Мусаев Н. И. и др. – заявитель и патентообладатель ВГТА. – № 2011112624/13; заявл. 01.04.2011; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32.
18. Tu, J. Effects of different freezing methods on the quality and microstructure of lotus (*Nelumbo nucifera*) root [Text] / J. Tu, M. Zhang, B. Xu, H. Liu // *International Journal of Refrigeration*. – 2015. – Vol. 52. – P. 59–65. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.12.015
19. James, S. J. Chilling and Freezing [Text] / S.J. James, C. James // *Food Safety Management*. – 2014. – Ch. 20. – P. 481–510. doi: 10.1016/b978-0-12-381504-0.00020-2
20. Shi, L. Grinding of maize: The effects of fine grinding on compositional, functional and physicochemical properties of maize flour [Text] / L. Shi, W. Li, J. Sun, Y. Qiu, X. Wei, G. Luan, Y. Hu, E. Tatsumi // *Journal of Cereal Science*. – 2016. – Vol. 68. – P. 25–30. doi: 10.1016/j.jcs.2015.11.004
21. Boldyrev, V. V. Mechanochemical modification and synthesis of drugs [Text] / V. V. Boldyrev // *Journal of Materials Science*. – 2004. – Vol. 39, Issue 16/17. – P. 5117–5120. doi: 10.1023/b:jmsc.0000039193.69784.1d
22. Balaz, P. Mechanochemistry in technology: from minerals to nanomaterials and drugs [Text] / P. Balaz, M. Balaz, Z. Bujnakova // *Chemical Engineering & Technology*. – 2014. – Vol. 37, Issue 5. – P. 747–756. doi: 10.1002/ceat.201300669
23. Zhao, X. Effect of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activity of red grape pomace powders [Text] / X. Zhao, H. Zhu, G. Zhang, W. Tang // *Powder Technology*. – 2015. – Vol. 286. – P. 838–844. doi: 10.1016/j.powtec.2015.09.025
24. Balaz, P. Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering [Text] / P. Balaz. – Woodhead Publishing Limited. – 2010. – 400 p.