

Золотухіна Інна Василівна, канд. техн. наук, доц., кафедра устаткування харчової і готельної індустрії ім. М. І. Беляєва, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-56, e-mail: zolotce5@gmail.com.

Золотухіна Інна Васильевна, канд. техн. наук, доц., кафедра обладнання харчової і готельної індустрії ім. М. І. Беляєва, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-56, e-mail: zolotce5@gmail.com.

Zolotukhina Inna, PhD, Associate Professor, Department Equipment for Food and Hotel Industry after M. I. Belyaeva, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-56, e-mail: zolotce5@gmail.com.

Беляєва Інна Михайлівна, доц., кафедра товарознавства та експертизи товарів, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: 0992029431; e-mail: Ceascinna@gmail.com.

Беляева Инна Михайловна, доц., кафедра товароведения и экспертизы товаров, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: 0992029431; e-mail: Ceascinna@gmail.com.

Byelyayeva Inna, Associate Professor, Department commodity research and examination of goods. Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: 0992029431; e-mail: Ceascinna@gmail.com.

DOI: 10.5281/zenodo.3592851

УДК 664.8.037.5:577.11/12:547.455.65.001.73

КРІОМЕХАНОХІМІЯ І КРІОМЕХАНОДЕСТРУКЦІЯ БІОПОЛІМЕРІВ У ХАРЧОВИХ НАНОТЕХНОЛОГІЯХ ПІД ЧАС ПЕРЕРОБКИ РОСЛИННОЇ ІНУЛІНОВІСНОЇ СИРОВИНИ В ОЗДОРОВЧІ ДОБАВКИ

**Р.Ю. Павлюк, В.В. Погарська, К.С. Балабай,
С.М. Лосєва, Н.П. Максимова**

Розроблено та науково обґрунтовано технологію заморожених і порошкоподібних дрібнодисперсних оздоровчих добавок з інулінновмісної сировини (топінамбура) з використанням як інновації кріомеханодеструкції та кріомеханохімії, що дозволяють інактивувати окиснювальні ферменти,

© Павлюк Р.Ю., Погарська В.В., Балабай К.С., Лосєва С.М., Максимова Н.П., 2019

трансформувати важкорозчинні біополімери (інулін, пектин, целюлозу, білок) у легкорозчинну форму, зберегти активні фітокомпоненти під час переробки топінамбура і використання отриманих із нього добавок у складі оздоровчих продуктів.

***Ключові слова:** топінамбур, дрібнодисперсні оздоровчі добавки, інуліновмісна сировина, кріомеханодеструкція, кріомеханохімія.*

КРИОМЕХАНОХИМИЯ И КРИОМЕХАНОДЕСТРУКЦИЯ БИОПОЛИМЕРОВ В ПИЩЕВЫХ НАНОТЕХНОЛОГИЯХ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ИНУЛИН- СОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫЕ ДОБАВКИ

**Р.Ю. Павлюк, В.В. Погарская, Е.С. Балабай,
С.М. Лосева, Н.Ф. Максимова**

Разработана и научно обоснована технология замороженных и порошкообразных мелкодисперсных оздоровительных добавок из инулинсодержащего сырья (топинамбура) с использованием в качестве инновации кріомеханодеструкции и кріомеханохимии, позволяющих инактивировать окислительные ферменты, трансформировать труднорастворимые биополимеры (инулин, пектин, целлюлозу, белок) в легкорастворимую форму, сохранить активные фитоконпоненты при переработке топинамбура и использовании полученных из него добавок в составе оздоровительных продуктов.

***Ключевые слова:** топинамбур, мелкодисперсные оздоровительные добавки, инулинсодержащее сырье, кріомеханодеструкция, кріомеханохимия.*

CRYOMECHANOCHEMISTRY AND CRYOMECHANO- DESTRUCTION OF BIOPOLYMERS IN FOOD NANOTECHNOLOGIES DURING THE PROCESSING OF PLANT INULIN-CONTAINING RAW MATERIALS INTO THE HEALTHY ADDITIVES

**R. Pavlyuk, V. Pogarskaya, K. Balabai,
S. Loseva, N. Maximova**

The technology of frozen and powdered fine-dispersed healthy additives from inulin-containing raw materials (topinambour) is developed and scientifically substantiated. It is based on the use of processes of cryomechanodestruction and cryomechanochemistry during the cryogenic "shock" freezing and fine-dispersed grinding, the common application of which leads to a partial destruction of biopolymers (inulin, cellulose), as well as protein, pectin substances to their individual monomers (fructose, sugars, α -amino acids, soluble pectin). Besides it these processes lead to simultaneous increase of mass fraction of biologically active phytocomponents

(phenolic compounds, tannins, L-ascorbic acid, etc.) and the inactivation of oxidative enzymes which allows keeping the high nutritional and biological value of the obtained additives and products with their use for the storage duration.

It is determined that the use of cryomechanodestruction and cryomechanochemistry during the cryogenic “shock” freezing and fine-dispersed grinding of topinambour makes it possible to preserve, remove additionally and transform biologically active phytochemicals (phenolic compounds, tannins, L-ascorbic acid, etc.) from the bound with biopolymers in nanocomplexes state to a free state. It allows obtaining the frozen and powdered additives, which contain 1,7–2,2 times more of these substances than the original (fresh) raw materials.

Thus, the new developed technology of deep processing of plant raw materials makes it possible to use its biological potential by the more fullest extent (45–55% more than when processing raw materials by other methods) during the production of a new generation of natural healthy products.

Keywords: *topinambour, fine-dispersed healthy additives, inulin-containing raw materials, cryomechanodestruction, cryomechanochemistry.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Актуальність теми пов'язана з необхідністю вирішення глобальної проблеми підвищення імунітету населення, зниження якого є наслідком загального погіршення екологічної ситуації в нашій країні й у світі [1; 2]. Підвищити імунітет можна шляхом регулярного споживання функціональних оздоровчих добавок і продуктів, які характеризуються значним вмістом біологічно активних фітокомпонентів рослинної сировини, що сприяють зміцненню захисних сил організму [3–5]. До таких речовин, крім вітамінів, каротиноїдів, фенольних сполук та інших фітокомпонентів рослинної сировини, належать пектинові речовини, інулін, харчові волокна та ін., які є неперетравлюваними компонентами їжі й виконують у шлунково-кишковому тракті організму людини дві захисні функції [6–9]. По-перше, виступають у ролі комплексоутворювачів та детоксикантів, що утворюють у шлунково-кишковому тракті нерозчинні комплекси з іонами важких металів та іншими видами шкідливих речовин, сприяють їх виведенню з організму людини, що важливо сьогодні, коли змінилася структура харчування і переважну більшість харчових продуктів виробляють із використанням значної кількості харчових добавок, наявність яких у продуктах може завдавати шкоди організму людини. По-друге, виконують функцію пребіотичних речовин – неперетравлюваних компонентів їжі, що стимулюють в організмі людини ріст і метаболічну активність однієї або декількох груп власних бактерій, сприяють підтриманню в шлунково-кишковому тракті рівноваги різних видів кишкової мікрофлори, від якої, за даними провідних

медичних установ, залежить стан здоров'я слизової оболонки кишечника і на 80% залежить імунітет людини [9; 10].

Перспективною сировиною для отримання функціональних оздоровчих продуктів та добавок, що мають пребіотичні властивості та сприяють зміцненню захисних сил організму, є топінамбур, який за останні десять років у таких країнах, як США, Канада, Бразилія, Франція, Білорусь входить до числа основних сільськогосподарських культур, що використовуються в харчовій, фармацевтичній та інших галузях промисловості як сировина для отримання продуктів оздоровчого та дієтичного харчування, фітопрепаратів, біоетанолу та інших видів продукції, що користується попитом на внутрішньому та зовнішніх ринках [11–15].

Цінність топінамбура для харчової промисловості визначається насамперед вуглеводним складом, оскільки сухі речовини бульб топінамбуру на 80% представлені пребіотиком інуліном, що є єдиним натуральним полісахаридом, який на 95% складається з нешкідливого для діабетиків цукру фруктози [11; 12]. Крім того, за вмістом вітамінів С, В₁, В₂, а також заліза, кремнію, цинку топінамбур перевершує моркву та буряк у три рази [12]. Труднощі під час переробки топінамбура полягають у тому, що за наявності кисню повітря під дією ферменту поліфенолоксидази відбувається окиснення фенольних сполук з утворенням темнозabarвлених речовин, що погіршує колір готового продукту. Крім того, існуючі технології переробки топінамбуру в різні добавки у формі порошків, паст із використанням паротермічної обробки, сушіння не дозволяють частину інуліну трансформувати до легкозасвоєваної фруктози [12–17]. Обробка ферментними препаратами дозволяє трансформувати біля 10% інуліну у фруктозу.

У зв'язку з цим актуальним є пошук технологічних прийомів та розробка технологій, які дозволяють отримати добавки та продукти з топінамбура високої якості. У цій роботі як інновацію під час розробки технології заморожених та порошкоподібних дрібнодисперсних добавок з інуліновмісної сировини (топінамбура) запропоновано використовувати криогенне «шокове» заморожування та дрібнодисперсне подрібнення, що є перспективними способами технологічної обробки сировини, застосування яких супроводжується процесами криодеструкції та механоактивації, що дозволило отримати добавки та оздоровчі продукти з їх використанням високої харчової та біологічної цінності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За результатами огляду літературних даних за останні 10 років установлено, що існуючі технології переробки топінамбура в різні види добавок у формі порошків, паст, борошна, пюре, екстрактів із використанням

паротермічної обробки, сушіння, екстракції не дозволяють перевести інулін у легкозасвоювану форму [12–17]. У зв'язку з цим актуальним є пошук технологічних прийомів, які дозволяють отримати добавки з топінамбура високої якості з максимальним збереженням БАР сировини і переведенням інуліну в легкозасвоювану форму. Проведений аналіз фахової літератури щодо технологій переробки топінамбура в заморожені дрібнодисперсні та порошкоподібні добавки із застосуванням криогенної обробки показав відсутність таких даних у періодичній літературі за останні 10 років [11–17].

У цій роботі запропоновано під час розробки технології дрібнодисперсних оздоровчих добавок у формі заморожених поре та порошків із топінамбура застосовувати більш глибоку переробку сировини, ніж прийнято сьогодні. Як інновацію використовували комплексний вплив на сировину криогенного «шокового» заморожування з більшими швидкостями до нижчих температур у продукті (до $-35...-40$ °C), ніж прийнято в міжнародній практиці, та низькотемпературного дрібнодисперсного подрібнення. Зазначені прийоми супроводжуються процесами криомеханодеструкції та криомеханохімії [18–20]. Під криомеханодеструкцією автори роботи мають на увазі новий технологічний прийом, який включає вплив заморожування та механічного подрібнення і призводить до деградації, руйнування, деструкції рослинних клітин, наноконплексів та наноасоціатів різних важкорозчинних речовин (інгредієнтів), які в них містяться. У результаті відбувається більш повне вилучення з сировини цінних компонентів. Зазначений технологічний прийом являється альтернативою ферментативній обробці рослинної сировини. Слід зазначити, що процеси криомеханодеструкції вже застосовуються в таких галузях промисловості, як хімічна, металургійна, текстильна, авіаційна, у Японії, Росії, Казахстані. Так, використання процесів крио- та механохімії дозволило розробити технології порошкової металургії, технології пластмас, що не дряпаються, технології текстильної продукції з водо- та брудовідштовхувальними властивостями. У харчовій промисловості, як в Україні, так і в міжнародній практиці, ці процеси майже не вивчені [21–24].

Аналіз періодичних наукових видань за останні 10 років показав, що дані щодо вивчення процесів криомеханодеструкції з використанням криогенної обробки та дрібнодисперсного подрібнення під час переробки рослинної сировини, в тому числі топінамбура, у науковій літературі, за винятком робіт авторів статті, відсутні [19–22]. У Харківському державному університеті харчування та торгівлі (м. Харків, Україна) фахівцями кафедри технологій переробки плодів, овочів і молока запропонована і розроблена технологія отримання заморожених і порошкоподібних дрібнодисперсних добавок із топінамбура з

використанням рідкого та газоподібного азоту. Уперше в міжнародній практиці було виявлено та показано, що під час комплексного впливу на сировину криогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного низькотемпературного подрібнення відбувається не тільки повне збереження всіх БАР, але й більш повне вилучення із сировини їх прихованих (зв'язаних) форм із біополімерами (білками, гетерополісахаридами) наноконкомплексів і наноасоціатів і трансформація у вільний стан. Масова частка БАР у 1,8–2,3 рази більше, ніж у вихідній сировині. Паралельно виявлено, що під час криогенної обробки та дрібнодисперсного подрібнення топінамбура відбувається часткове руйнування інуліну до його окремих мономерів – фруктози (на 45–55%), білка – до вільних амінокислот (на 43–55%), целюлози – до цукрів (на 43–55%). Це свідчить про руйнування важкорозчинних біополімерів та їх трансформацію в легкозасвоювану нанорозмірну форму. Проте в наведених статтях є тільки припущення щодо механізму впливу криогенної обробки та дрібнодисперсного подрібнення на наноконкомплекси біополімерів (білків і гетерополісахаридів). Не вивчені конформаційні зміни молекул білків, наноконкомплексів гетерополісахаридів разом із білками та їх трансформація в розчинну легкозасвоювану форму. Не досліджені процеси активації прихованих неактивних форм протопектину та їх трансформація в розчинну форму. Також не вивчений вплив зазначених процесів на ступінь засвоюваності добавок із топінамбура порівняно з традиційно виготовленими добавками з використанням сучасного методу біотестування. У зв'язку з цим вивчення закономірностей і механізмів впливу процесів глибокої переробки сировини, що засновані на використанні процесів кріомеханодеструкції та кріомеханохімії, на наноконкомплекси гетерополісахарид-білок, а також біополімери (білки, гетерополісахариди, зокрема пектин) під час розробки технології отримання заморожених та порошкоподібних дрібнодисперсних оздоровчих добавок із топінамбура в нанорозмірній формі є актуальним.

Ураховуючи вищесказане, теоретично цікавим і практично цінним є проведення фундаментальних досліджень можливості більш повного використання біологічного потенціалу вуглеводмісної сировини (зокрема, топінамбура), який характеризується значним вмістом важкорозчинних біополімерів (інуліну, пектинових речовин, целюлози, білка). Ці речовини утворюють між собою наноконкомплекси та наноасоціати. У зв'язку з цим їх відносять до неперетравлюваних компонентів їжі, які важко перевести в розчинну форму під час технологічної обробки. Для цього використовували комплексний вплив на сировину криогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення, які супроводжуються процесами кріомеханодеструкції та кріомеханохімії вихідної рослинної сировини.

Мета статті – наукове обґрунтування та розробка технології заморожених і порошкоподібних дрібнодисперсних оздоровчих добавок з інуліновмісної сировини (топінамбура) з використанням як інновації кріомеханодеструкції та кріомеханохімії, що дозволяють інактивувати окиснювальні ферменти, трансформувати важкорозчинні біополімери (інулін, пектин, целюлозу, білок) у легкозасвоювану форму, зберегти біологічно активні фітокомпоненти під час переробки топінambuра та використання отриманих із нього добавок у складі оздоровчих продуктів.

Виклад основного матеріалу дослідження. У Харківському державному університеті харчування та торгівлі (м. Харків, Україна) на кафедрі технологій переробки плодів, овочів і молока в лабораторії «Інноваційних кріо- і нанотехнологій рослинних добавок та оздоровчих продуктів» у співдружності з Харківським торговельно-економічним інститутом Київського національного торговельно-економічного університету (м. Харків, Україна) розроблено кріогенну технологію заморожених і порошкоподібних дрібнодисперсних добавок з інуліновмісної сировини та технологію оздоровчих продуктів з їх застосуванням.

Основними завданнями під час розробки технології оздоровчих добавок у формі пюре та порошоків були такі: повністю виключити теплову обробку сировини; провести кріомеханодеструкцію та трансформацію важкорозчинних біополімерів (інуліну, пектинових речовин, целюлози, білка) в легкозасвоювану форму; інактивувати окиснювальні ферменти; максимально зберегти біологічно активні фітокомпоненти та збільшити ступінь їх вилучення з сировини, зменшити використання синтетичних харчових інгредієнтів під час подальшої розробки оздоровчих продуктів.

До завдань роботи входило вивчення комплексу пребіотичних речовин і біологічно активних фітокомпонентів бульби топінambuра – сировини для отримання заморожених та порошкоподібних дрібнодисперсних добавок. Показано, що бульби топінambuра є джерелом комплексу неперетравлюваних компонентів їжі – пребіотичних речовин, склад яких представлений переважно інуліном, а також целюлозою, пектиновими речовинами, білком, загальна масова частка яких становить залежно від сорту 60–65% сухих речовин продукту, та джерелом біологічно активних фітокомпонентів (фенольних сполук, дубильних речовин, L-аскорбінової кислоти тощо) (табл. 1).

Таблиця 1

**Комплекс пребіотичних речовин і біологічно активних
фітокомпонентів свіжого топінамбура – сировини для отримання
дрібнодисперсних оздоровчих добавок**

Найменування показника	Свіжий топінамбур	
	сорт Інтерес	сорт Скороспілка
Сухі речовини, %	28,2±1,2	24,5±1,2
Білок, %	1,2±0,05	1,0±0,05
Загальний цукор, %	4,4±0,1	4,3±0,1
Інулін, %	12,8±0,5	9,8±0,5
Фруктоза, %	–	–
Загальний пектин, %	1,9±0,02	1,2±0,01
Протопектин, %	0,7±0,01	0,5±0,01
Розчинний пектин, %	1,2±0,01	0,7±0,01
Целюлоза, %	2,0±0,04	1,9±0,04
L-аскорбінова кислота, мг в 100 г	10,3±0,1	9,6±0,1
Фенольні сполуки (за хлорогеновою кислотю), мг в 100 г	350,0±5,7	340,0±5,5
Флавонолові глікозиди (за рутином), мг в 100 г	240,0±4,8	225,5±4,6
Дубильні речовини, мг в 100 г	300,0±6,4	280,7±6,5
Органічні кислоти, %	0,40±0,01	0,35±0,01
Зольність, %	1,6±0,02	1,3±0,02

Одним із важливих чинників, що позначаються на ступені збереження якості вихідної сировини під час її переробки, є активність окиснювальних ферментів – пероксидази та поліфенолоксидази. Традиційно в промисловості з метою їх інактивації використовують бланшування гострою парою, короткочасне занурення в киплячу рідину, витримування в сольовому або кислотному розчині, ультрафіолетове опромінювання, пастеризацію, стерилізацію тощо. Проте зазначені способи пов'язані з впливом тепла і призводять до значних втрат (20–80%) аскорбінової кислоти та інших біологічно активних фітокомпонентів. У роботі цю проблему було вирішено шляхом використання криогенного «шокового» заморожування за допомогою рідкого азоту.

Вивчено вплив заморожування до температури всередині продукту мінус 18 °С традиційним способом у морозильній камері та криогенним способом із застосуванням рідкого азоту на активність окиснювальних ферментів топінамбура, визначено умови заморожування, за яких

відбувається інактивація окиснювальних ферментів. Кріогенне «шокове» заморожування здійснювали в заморожувачі з програмним забезпеченням за допомогою рідкого азоту зі швидкістю заморожування від 1 °С/хв до 10 °С/хв до кінцевої температури всередині продукту в діапазоні від мінус 18 °С до мінус 40 °С за температури в камері від мінус 60 °С до мінус 80 °С. Швидкість заморожування регулювали шляхом зміни інтенсивності подачі рідкого азоту до морозильної камери, а також зміни температури в камері та товщини нарізання дослідного зразка.

Модельними дослідженнями встановлено, що заморожування до температури мінус 18 °С традиційним способом у морозильній камері та кріогенним способом із застосуванням рідкого азоту приводить до збільшення порівняно зі свіжою сировиною активності окиснювальних ферментів топінамбура в 1,3–1,4 разу (табл. 2).

Показано, що застосування кріогенного «шокового» заморожування до температури всередині продукту в діапазоні від мінус 32 °С до мінус 35 °С та нижче приводить до повної інактивації ферментів, активність яких не відновлюється під час подальшого дрібнодисперсного подрібнення та зберігання і перешкоджає потемнінню продукту.

Механізм процесу пов'язаний із кріомеханохімією та значною кріомеханодеструкцією білкових молекул ферментів та їх активних центрів і незворотною денатурацією ферментів. Отримані дані були враховані під час розробки технології заморожених та порошкоподібних дрібнодисперсних добавок.

Таблиця 2

Вплив швидкості, кінцевої температури заморожування та дрібнодисперсного подрібнення на активність окиснювальних ферментів топінамбура

Бульби топінамбура	Активність			
	пероксидази		поліфенол-оксидази	
	мл 0,01 N йоду до СР	% до вих.	мл 0,01 N йоду до СР	% до вих.
1	2	3	4	5
Нарізані на шматочки (вихідна сировина)	350,0	100,0	56,0	100,0
Нарізані на шматочки, традиційно заморожені в морозильній камері до мінус 18 °С	490,0	140,0	72,0	128,6

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5
Нарізані на шматочки, традиційно заморожені в морозильній камері до мінус 18 °С та дрібнодисперсно подрібнені	1365,0	390,0	233,4	416,8
Нарізані на шматочки, заморожені (з використанням рідкого азота) до мінус 35 °С зі швидкістю 5 °С/хв та дрібнодисперсно подрібнені	0	0	0	0

Досліджено вплив процесів кріомеханодеструкції та кріомеханохімії під час кріогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення на деструкцію інуліну та інших гетерополісахаридів – целюлози, пектинових речовин топінамбура. Установлено, що застосування процесів кріомеханодеструкції та кріомеханохімії під час кріогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення приводить до деструкції 50–55% полісахариду інуліну до окремих його мономерів – легкозасвоюваної фруктози. Виявлено, що паралельно відбувається деструкція і деградація целюлози. Половина її кількості трансформується до мономерів – глюкози (рис. 1).

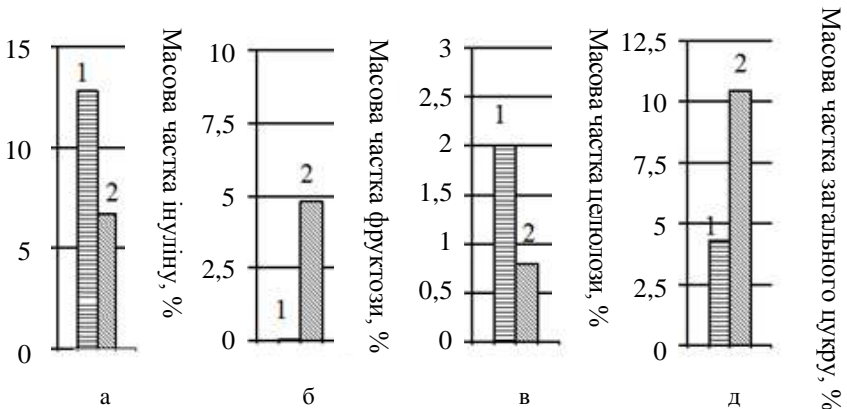


Рис. 1. Вплив кріогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення топінамбура на масову частку: а – інуліну; б – фруктози; в – целюлози; д – загального цукру; 1 – топінамбур свіжий; 2 – заморожена дрібнодисперсна добавка

У рослинній сировині пектинові речовини перебувають у неактивній формі, тому мають низькі желюючі й адсорбційні властивості. Установлено, що під час криогенної обробки топінамбура (за рахунок процесів криомеханодеструкції та криомеханохімії) відбувається більш повне переведення (у 3,0–3,5 разу від загальної кількості) пектинових речовин із зв'язаного з іншими біополімерами стану у вільний. При цьому відбувається часткова трансформація протопектину в розчинний пектин і в кінцевому продукті (пюре) масова частка розчинного пектину становить 50–70% від загальної кількості пектинових речовин (рис. 2).

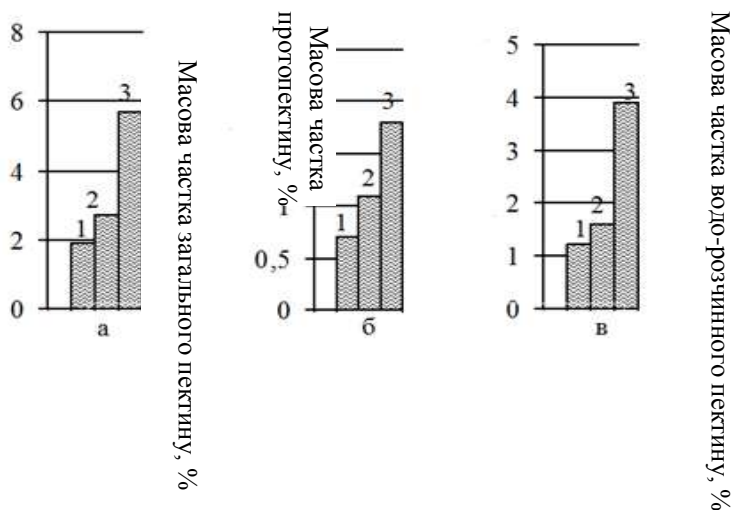


Рис. 2. Вплив криогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення на пектинові речовини топінамбура, де а – загальний пектин; б – протопектин; в – розчинний пектин; 1 – топінамбур свіжий; 2 – заморожені шматочки; 3 – заморожена дрібнодисперсна добавка

Вивчено також вплив процесів криогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення на білки та трансформацію амінокислот білка топінамбура із зв'язаного стану у вільний під час отримання добавок із нього (табл. 3).

Установлено, що порівняно з вихідною сировиною під час дрібнодисперсного подрібнення замороженої інуліновмісної сировини відбувається значна дезагрегація, деструкція та механоліз молекул білка, що виявляється у зменшенні приблизно на 45–55% масової частки амінокислот білка, які перебувають знаходяться у зв'язаному стані, за

рахунок їх переходу у вільний стан. Виявлено, що при цьому відбуваються конформаційні зміни молекул білка: збільшення діаметра молекул і діаметра ядра, зменшення заповнення ядра гідрофобними залишками внаслідок утворення надмолекулярних структур.

Таблиця 3

Вплив процесів кріомеханодеструкції та кріомеханохімії під час криогенного «шокового» заморожування і дрібнодисперсного подрібнення на перерозподіл амінокислот білка у зв'язаному та вільному стані

Амінокислота	Масова частка амінокислот							
	у зв'язаному стані				у вільному стані			
	вих. сировина (свіжий топінамбур), мг в 100 г	заморожена дрібно-дисперсна добавка з топінамбура, мг в 100 г	% до вих. сировини	зменшення до вих. сировини, разів	вих. сировина (свіжий топінамбур), мг в 100 г	заморожена дрібно-дисперсна добавка з топінамбура, мг в 100 г	% до вих. сировини	збільшення до вих. сировини, разів
Аспаргінова кислота	44,3	24,2	54,6	1,8	22,5	42,6	189,3	1,9
Аланін	45,0	23,9	53,1	1,9	21,9	43,0	196,3	1,9
Глутамінова кислота	53,2	29,7	55,8	1,8	21,2	44,7	210,8	2,1
Аргінін	49,4	27,9	56,4	1,8	20,7	42,2	203,8	2,0
Треонін	37,5	20,6	54,9	1,8	17,9	34,8	194,4	1,9
Цистин	36,7	19,5	53,1	1,9	20,1	37,3	185,6	1,8
Серин	45,5	22,7	49,8	2,0	20,0	42,8	214,0	2,1
Гліцин	34,3	18,2	53,0	1,9	17,4	33,5	192,5	1,9
Лізін	48,2	28,6	59,3	1,7	26,7	46,3	173,4	1,7
Метіонін	55,2	24,9	45,1	2,2	23,9	54,2	226,7	2,3
Триптофан	52,0	28,4	54,5	1,8	28,7	52,3	182,2	1,8
Валін	47,5	27,2	57,3	1,7	26,6	46,9	176,3	1,8
Фенілаланін	52,4	28,0	53,4	1,9	28,4	52,8	185,9	1,9
Ізолейцин	50,3	27,9	55,5	1,8	27,7	50,1	180,9	1,8
Лейцин	51,1	24,8	48,5	2,1	24,5	50,8	207,3	2,1
Тирозин	40,2	18,9	47,0	2,1	19,3	40,6	210,4	2,1
Пролін	41,3	20,7	50,1	1,9	22,8	43,4	190,4	1,9
Гістидин	45,3	23,7	52,3	1,9	21,7	43,3	199,5	2,0
Разом	829,4	439,8	52,9	1,8	412,0	801,6	199,5	1,9

Наступним завданням роботи було вивчення впливу процесів кріомеханодеструкції та кріомеханохімії під час кріогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення на збереження біологічно активних фітокомпонентів (фенольних сполук, дубильних речовин, L-аскорбінової кислоти тощо) топінамбура. Установлено, що використання процесів кріомеханодеструкції та кріомеханохімії під час кріогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення топінамбура дає можливість зберегти, додатково вилучити та трансформувати біологічно активні фітокомпоненти (фенольні сполуки, дубильні речовини, L-аскорбінову кислоту тощо) із зв'язаного в наноконформаціях із біополімерами стану у вільний і отримати заморожені та порошкоподібні дрібнодисперсні добавки, масова частка зазначених речовин у яких вище в 1,7–2,2 рази, ніж у вихідній (свіжій) сировині (табл. 4). Це можна пояснити процесами кріомеханодеструкції та механокрекінгу, які приводять до руйнування водневих зв'язків та індукційної взаємодії між низькомолекулярними біологічно активними фітокомпонентами та біополімерами.

Таблиця 4

Вміст пребіотичних і біологічно активних фітокомпонентів у заморожених та порошкоподібних дрібнодисперсних оздоровчих добавках із топінамбура (n=3, P≥0,95)

Найменування показника	Дрібнодисперсна добавка з топінамбура	
	заморожена	порошкоподібна
Вуглеводи, в тому числі:	17,1	73,6
інулін, %	6,7	25,6
загальний цукор, %	10,4	22,4
фруктоза, %	4,8	25,6
Білок, %	1,2	5,6
Целюлоза, %	0,8	3,6
Пектин, %	5,7	28,5
L-аскорбінова кислота, мг в 100 г	19,8	78,2
Фенольні сполуки (за хлорогеновою кислотою), мг в 100 г	700,0	2800,0
Флавонолові глікозиди (за рутином), мг в 100 г	460,0	1800,0
Дубильні речовини (за таніном), мг в 100 г	540,0	2160,0
Зольність, %	1,6	6,8
Сухі речовини, %	28,2	94,5
Органічні кислоти, %	0,6	1,0

Отримані закономірності були підтверджені методом спектроскопічного аналізу під час вивчення ІЧ-спектрів заморожених дрібнодисперсних добавок та вихідної (свіжої) сировини. Показано, що в області частот, характерних для валентних коливань функціональних ОН-груп, у заморожених дрібнодисперсних добавках спостерігається зменшення інтенсивності ІЧ-спектрів. Це свідчить про руйнування міжмолекулярних та внутрішньомолекулярних водневих зв'язків, деструкцію комплексів біополімерів та низькомолекулярних речовин, дезагрегацію та механоліз пектинових речовин, білку, целюлози або їх асоціатів та наноконкомплексів.

На підставі одержаних результатів розроблено кріогенну технологію заморожених та порошкоподібних дрібнодисперсних оздоровчих добавок із топінамбура, яка включає комплексний вплив на сировину кріогенного «шокового» заморожування (від мінус 32 °С до мінус 35 °С) та дрібнодисперсного подрібнення.

Від традиційних технологій відрізняється використанням більш високої швидкості та нижчої кінцевої температури заморожування з використанням рідкого та газоподібного азоту, а також застосуванням дрібнодисперсного подрібнення заморожених продуктів до частин, розміри яких у декілька разів менше, ніж у традиційних добавках. Експериментально визначені та обґрунтовані раціональні параметри технології, розроблені технологічні схеми, підібране обладнання. Технологія отримання порошкоподібних добавок включає кріогенне «шокове» заморожування нарізаного на пластини топінамбура, сублімаційне сушіння та дрібнодисперсне подрібнення.

Показано, що нові кріозаморожені та порошкоподібні дрібнодисперсні оздоровчі добавки можна розглядати як джерело пребіотичних речовин (інуліну, пектинових речовин, целюлози, білка), а також біологічно активних фітокомпонентів рослинної сировини, що сприяють підвищенню імунітету (L-аскорбінової кислоти, фенольних сполук, флавонолових глікозидів, дубильних речовин тощо), якість яких майже не змінюється впродовж 12 місяців (табл. 4).

Установлено, що нові добавки за вмістом пребіотичних речовин та біологічно активних фітокомпонентів перевершують якість відомих аналогів.

На нові добавки з топінамбура розроблена та затверджена нормативна документація (ТУ), проведена апробація у промислових умовах ТОВ «ФМ Хладопром». Ці добавки були використані під час розробки технологій нових оздоровчих продуктів (комбінованих кисломолочних напоїв та порошкоподібних Instant-нанопаїв).

Висновки. Доведено, що процеси кріомеханодеструкції та кріомеханохімії під час кріогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення топінамбура приводять до руйнування та часткової трансформації інуліну та інших важкорозчинних гетерополісахаридів топінамбура до їх мономерів (40–50% інуліну – до фруктози, 45–55% целюлози – до глюкози).

Установлено, що під час кріогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення топінамбура внаслідок процесів кріомеханодеструкції та кріомеханохімії відбувається більш повне вилучення (у 3,0–3,5 разу) загальної кількості пектинових речовин із зв'язаного з іншими біополімерами стану у вільний та часткова трансформація (на 30–50%) протопектину в розчинний пектин.

Виявлено, що під час кріогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення відбувається деструкція молекул білка до окремих мономерів (амінокислот) та часткова трансформація амінокислот із зв'язаної форми у вільну (на 45–55%) під час отримання заморожених та порошкоподібних дрібнодисперсних добавок.

Доведено, що використання процесів кріомеханодеструкції та кріомеханохімії під час кріогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення топінамбура дозволяє зберегти, додатково вилучити та трансформувати біологічно активні фітокомпоненти (фенольні сполуки, дубильні речовини, L-аскорбінову кислоту та ін.) із зв'язаного в наноконформаціях із біополімерами стану у вільний та отримати заморожені й порошкоподібні дрібнодисперсні добавки, масова частка зазначених речовин у яких більше в 1,7–2,2 разу, ніж у вихідній (свіжій) сировині. Збільшення масової частки фітокомпонентів підтверджено методом ІЧ-спектроскопії.

Розроблено технологію заморожених та порошкоподібних дрібнодисперсних оздоровчих добавок з інуліновмісної сировини (топінамбура) з використанням кріомеханодеструкції та кріомеханохімії під час кріогенного «шокового» заморожування та дрібнодисперсного подрібнення, комплексне застосування яких дозволяє інактивувати окиснювальні ферменти, зберегти та збільшити порівняно зі свіжою сировиною харчову та біологічну цінність отриманих добавок; обґрунтовано технологічні процеси та параметри, розроблено технологічні схеми виробництва, досліджено якість одержаних продуктів під час отримання та зберігання, розроблено для них нормативну документацію (ТУ), проведено апробацію в промислових умовах.

Список джерел інформації / References

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, pp. 1-57.

2. Глобальная стратегия ВОЗ по питанию, физической активности и здоровью: Руководство для стран по мониторингу и оценке осуществления – Женева : ВОЗ, 2009. – 47 с.

WHO (2009), *Global Strategy on Nutrition, Physical Activity and Health: A Guide for Countries to Monitor and Evaluate Implementation*, Geneva, 47 p.

3. Гуліч М. П. Раціональне харчування та здоровий спосіб життя – основні чинники збереження здоров'я / М. П. Гуліч // Проблеми старения и долголетия. – 2011. – Т. 20, № 2. – С. 128–132.

Gulich, M. (2011), “Balanced diet and healthy lifestyle – major factors of health preservation”, *Problems of aging and longevity* [“Ratsionalne kharchuvannia ta zdorovyi sposib zhyttia – osnovni chynnyky zberezhennia zdorovia”], *Problemi starenia y dolholetia*, Vol. 20, No. 2, pp. 128-132.

4. И. А. Селиванская. Современное питание и функциональные продукты / И. А. Селиванская // Зернові продукти і комбікорми. – 2014. – № 3 (55). – С. 23–26.

Selivanskaya, I. (2014), “Modern food and functional products”, *Grain products and feed* [“Sovremennoe pytanye y funktsyonalnye produkty”], *Zernovi produkty i kombikormy*, No. 3(55), pp. 23-26.

5. 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.

6. Duncan, S.H., Flint, H.J. (2013), “Probiotics and prebiotics and health in ageing populations”, *Maturitas*, Vol. 75, Iss. 1, pp. 44-50.

7. Duncan, B. (2013), “Prebiotics, Probiotics and Health Promotion: An Overview”, *Bio-active Food as Dietary Interventions for Gastrointestinal Disease*, Part. 29, pp. 449-463.

8. 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.

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

Kaprelyants, L. (2015), *Prebiotics: chemistry, technology and application: monography* [Prebiotiki: himija, tehnologija, primenienie], EnterPrint, Kiev, 252 p.

10. Floch, M.H., Clin, J., et al. (2015), “Recommendations for probiotic use-2015 update: proceedings and consensus opinion”, *Gastroenterol.*, Vol. 49, pp. 69-73.

11. Топинамбур – культура многоцелевого использования/ Старовойтов В. И., Старовойтова О. А., Звягинцев П. С., Лазунин Ю. Т. // Пищевая промышленность. – 2013. – № 4. – С. 22–25.

Starovoytov, V., Starovoytova, O., Zvyagintsev, P., Lazunin, Yu. (2013), “Topinambur – culture of multipurpose use” [“Топинамбур – kultura mnohotshelevoho yspolzovaniya”], *Food industry*, No. 4, pp. 22-25.

12. Топинамбур – ценное сырье для производства БАД и продуктов специализированного назначения / Шаззо Р. И., Тугуз И. М., Лисовой В. В., Екутеч Р. И. // Известия вузов. Пищевая технология. – 2012. – № 217. – 18 с.

Shazzo, R., Tuguz, I., Lisova V., Ekutech R. (2012), “Topinambour – valuable raw materials for the production of BAS and products of specialized

purpose” [“Топинамбур – тсенное sirie dlia proizvodstva BAD y produktov spetsyalyzovannoho naznacheniya”], *News of universities, Food technology*, No. 217, 18 p.

13. Калашнова Т. В. Безотходная переработка клубней топинамбура. Инновационные технологии в пищевой промышленности / Т. В. Калашнова, М. И. Курлаева. – Пятигорск, 2008. – С. 171–175.

Kalashnova, T., Kurlaeva, M. (2008), *Waste-free processing of girasol tubers. Innovative technologies in the food industry [Bezotkhodnaia pererabotka klubnei topynambura]*, Pyatigorsk, pp. 171-175.

14. Ермош Л. Г. Обоснование способа производства муки из топинамбура высокой пищевой ценности / Л. Г. Ермош, И. П. Березовикова // Сибирский вестник сельскохозяйственных наук. – 2012. – № 2. – С. 96–101.

Ermosh, L., Berезovikova, I. (2012), “Justification of the method for the production of flour from Jerusalem artichoke of high nutritional value” [“Obosnovanie sposoba proizvodstva muki iz topinambura vyisokoy pischevoy tsennosti”], *Siberian Bulletin of Agricultural Sciences*, No. 2, pp. 96-101.

15. Касянчук В. Д. Ефективність переробки топинамбура на продукцію лікувально-профілактичного призначення / В. Д. Касянчук // Науковий інформаційний вісник «Економіка». – 2015. – № 11. – С. 353–356.

Kasiyanchuk, V. (2015), “Effectiveness of conversion of topinambur to the production of preventive and prophylactic designation” [“Efektyvnist pererobky topinambura na produktsiiu likuvalno-profilaktychnoho pryznachennia”], *Science-and-information newsletter “Economy”*, No. 11, pp. 353-356.

16. Розробка криогенної технології нанопорошків із топинамбуру з використанням рідкого та газоподібного азоту / Павлюк Р. Ю. та ін. // Восточно-Европейський журнал передових технологій. – 2015. – № 6/10 (78). – С. 4–10.

Pavlyuk, R., et al. (2015), “The development of cryogenic technology of nanopowders from topinambour with the use of liquid and gaseous nitrogen” [“Rozrobka kriohennoi tekhnolohii nanoporoshkiv iz topinamburu z vykorystanniam rikdoho ta hazopodibnoho azotu”], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 6/10(78), pp. 4-10.

17. Розробка нанотехнології дрібнодисперсних добавок з використанням криомеханічної модифікації / Павлюк Р. Ю., Погарська В. В., Бессараб О. С., Балабай К. С. та ін. // Восточно-Европейський журнал передових технологій. – 2014. – № 6/10 (72). – С. 54–57.

Pavlyuk, R., Pogarskaya, V., Bessarab, O., Balabai, K. et al. (2014), “Development of nanotechnology of fine-dispersed additives using cryomechanical modification” [“Rozrobka nanotekhnolohii dribnodispersnykh dobavok z vykorystanniam kriomekhanichnoi modyfikatsii”], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 6/10(72), pp. 54-57.

18. Кріо- і механохімія в харчових технологіях : монографія / Павлюк Р. Ю., Погарська В. В., Юр’єва О. О. та ін. – Харків : Факт, 2015. – 256 с.

Pavlyuk, R., Pogarskaya, V., Yurieva, O., et al. (2015), *Cryogenic and mechanical chemistry in food technologies: monography [Krio- i mehanohimija v harchovyh tehnologijah]*, Fact, Kharkiv, 255 p.

19. Pavlyuk R., et al. (2016), “The effect of cryomechanodestruction on activation of heteropolysaccharide-protein nanocomplexes during the development of nanotechnologies of herbal additives”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 4/11(82), pp. 20-28.

20. Pavlyuk R., et al. “The influence of mechanolysis on the activation of nanocomplexes of heteropolysaccharides and proteins of plant biosystems in developing of nanotechnologies”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 3/11(81), pp. 33-40.

21. Pavlyuk, R., Pogarskaya, V., Balabai, E., Pogarskiy, A., Stukonozhenko, T. (2019), “Development of nanotechnologies of curd desserts, fruit and vegetable additives for their preparation as brewing agents, structures and colorants”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3/11(99), pp. 13-22.

22. Вивчення впливу низькотемпературної обробки та криодеструкції на збереження БАР та трансформацію інуліну при розробці оздоровчих добавок із топінамбуру / Павлюк Р. Ю. та ін. // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць. – Х. : ХДУХТ, 2014. – Вип. 2 (20). – С. 135–140.

Pavlyuk, R., et al. (2014), “The study of the influence of low-temperature processing and cryodestruction on the conservation of BAS and transformation of inulin in the development of health supplements of Jerusalem artichoke” [“Vyvchennia vplyvu nyzkotemperaturnoi obrobky ta kriodestruktsii na zberezhennia BAR ta transformatsii inulinu pry rozrobsi ozdorovchykh dobavok iz topinamburu”], *Progressive food technology and technology of the restaurant industry and trade: Coll. Sciences. thesises*, KSUFTT, Kharkiv, Vol. 2(20), pp. 135-140.

23. Барамбойм Н. К. Механохимия высокомолекулярных соединений : монография / Н. К. Барамбойм. – М. : Химия, 1978. – 385 с.

Baramboyim, N. (1978), *Mechanochemistry of macromolecular compounds: monography* [Механохимия visokomolekuliarnih soedinenii], Chemistry, Moscow, 385 p.

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

Павлюк Раїса Юрійвна, 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: ktrpom@ukr.net.

Павлюк Раїса 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: ktrpom@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 Technologies of Processing of Fruits, Vegetables and Milk, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkov, 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 та 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.

Pogarskaya Viktorya, Doctor of Technical Sciences, Professor, the State Prize Laureate of Ukraine, Department of Technologies of 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: ktrppom@ukr.net.

Балабай Катерина Сергіївна, канд. техн. наук, 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: ktrppom@ukr.net.

Балабай Екатерина Сергеевна, канд. техн. наук, доц., кафедра технологій 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 Kateryna, PhD in Technical Sciences, Professor Assistant, Department of Technologies of 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: ktrppom@ukr.net.

Лосева Світлана Михайлівна, зав. лаб., 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.

Лосева Светлана Михайловна, зав. лаб., кафедра технологій 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.

Loseva Svitlana, Chief of Laboratory, Department of Technologies of 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.

Максимова Надія Пилипівна, 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: ktppom@ukr.net.

Максимова Надежда Филипповна, доц., кафедра технологій переробки плодів, овочей і молока, Харьковський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочковская, 333, г. Харьков, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-92; e-mail: ktppom@ukr.net.

Maximova Nadija, Professor Assistant, Department of Technologies of 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.

DOI: 10.5281/zenodo.3592853