**Національна академія наук України**
**Інститут технічної теплофізики**

**Самойленко Катерина Миколаївна**
**Слободянюк Катерина Сергіївна**

# Енергоефективні тепломасообмінні процеси при сушінні комбінованих функціональних матеріалів

**Київ - 2021**

**Метою роботи** є теоретичне та експериментальне обґрунтування підвищення енергоефективності тепломасообмінних процесів при сушінні, з подальшою розробкою енергоефективних теплотехнологій переробки комбінованих функціональних матеріалів.

**Об'єкт дослідження –** процеси зневоднення комбінованих функціональних матеріалів (антиоксидантна рослинна сировина на основі столового буряку та фітоестрогенна рослинна сировина на основі сої) за рахунок конвективного сушіння з урахуванням антиоксидантних та фітоестрогенних властивостей матеріалу.

**Предмет дослідження –** антиоксидантна сировина на основі столового буряку, фітоестрогенна сировина на основі соєвих бобів, закономірності впливу режимів сушіння на інтенсифікацію і енергоефективність процесу та якісні характеристики комбінованих функціональних матеріалів.

**Наукова новизна одержаних результатів роботи**

- ***вперше*** досліджено вплив органічних кислот рослинної сировини на клітинну оболонку столового буряка, що дозволило зберегти бетанін в кінцевому продукті та знизити енерговитрати на процес;
- удосконалено спосіб підготовки фітоестрогенної сировини до зневоднення, який інактивує антихарчові компоненти сої та інтенсифікує процес сушіння;
- визначені параметри режиму зневоднення, які максимально зберігають біологічно активні речовини у комбінованих функціональних матеріалах;
- сформульовано основні положення фізичної та математичної чисельної моделі тепломасопереносу при конвективному сушінні функціональних матеріалів;
- ***вперше*** отримано зменшення теплоти випаровування води з антиоксидантної рослинної сировини за рахунок попередньої підготовки до сушіння;
- ***вперше*** визначені фактичні дані питомої теплоти випаровування фітоестрогенної рослинної сировини;
- встановлено, що в процесі зневоднення фітоестрогенної рослинної суміші відбувається реакція жирів з жиророзчинними каротиноїдами, яка вплинула на питому теплоту випаровування води із матеріалу;
- ***вперше*** визначено способи підвищення термостійкості комбінованих функціональних матеріалів.

## Практичне значення одержаних результатів роботи

- в результаті експериментального та теоретичного дослідження процесу тепломасообміну зневоднення комбінованих функціональних матеріалів з урахуванням властивостей матеріалу та режимів сушіння ***розроблено*** інноваційні теплотехнології та підібрано обладнання для отримання комбінованих функціональних порошків (антиоксидантних на основі столового буряка та фітоестрогенних на основі соєвих бобів), які **захищені** *4 Патентами України на Винахід*: *№ 102358* Спосіб одержання буряково-лимонного антиоксидантного барвника; *№ 109083* Лінія для виробництва композиційних антиоксидантних порошків з рослинної сировини; *№ 115741* «Спосіб одержання фітоестрогенного порошку з сої та шпинату»; *№ 120145* «Спосіб одержання соєво-бататного функціонального порошку».

- ***розроблено і затверджено*** нормативну документацію на виробництво нових видів антиоксидантних харчових порошків, яка була узгоджена з МОЗ України, пройшла державну перевірку і була зареєстрована ДП «Укрметртестстандарт» «Порошки антиоксидантні з рослинної сировини» ТУ У 10.3-05417118-045:2012).

- ***впроваджено (3 Акти впровадження):***

***1)*** у 2018 році на ТОВ «Їжа майбутнього»: *модернізовано* сушильну установку на тепловому насосі; *впроваджено* енергоефективні режими сушіння комбінованих функціональних матеріалів на модернізованій сушильній установці з тепловим насосом.

***2)*** у 2019 році на СПД «Everyday food» *впроваджено* технологію отримання і обладнання (сушильної установки на тепловому насосі) по переробці харчової сировини на сушену продукцію та порошки.

- очікуваний загальний річний ***економічний ефект*** від впровадження теплотехнології та обладнання однієї лінії отримання функціональних порошків складає 1075831 грн. при **терміні окупності** 1,07 року. Впровадження по одній лінії в кожній області України дасть фактичний економічний ефект біля 20 млн. грн.

- ***проведений аналіз*** співвідношення витрат на виготовлення порошку з комбінованих функціональних матеріалів показав, що основні витрати припадають на сировину - 41,7%, заробітну платню - 30,5% та енергетичні - 15,4%.

# ОСНОВНІ АНТИОКСИДАНТНІ ВЛАСТИВОСТІ СТОЛОВОГО БУРЯКА

**Антиоксиданти – що це?**

Це природні або ідентичні природним, поліфункціональні речовини, які приймають участь в різних ланках обміну речовин, синтезі та перетворенні біологічно активних метаболітів.

**Функції в організмі**

- покращує засвоєння білкових продуктів;
- приймає участь в синтезі холіну, який нормалізує функціонування печінки;
- при постійному вживанні сприяє стабілізації артеріального тиску, а також
- зміцнює судини;
- ризик інфарктів – знижується;
- блокує процес канцерогенезу і т.д.

Хімічна формула бетаніну

$C_{24}H_{27}N_2O_{13}$

**Столовий буряк -**

один із небагатьох культур, до складу якого входить бетанін – продукт ферментативного розпаду холіну, що відіграє важливу роль при обміні речовин в організмі людини.

Під час переробки руйнується понад 40-60 % бетаніну

**Ознаки дефіциту:**

Рак, серцево-судинні захворювання, зміна серцевого м'язу, неправильне перетравлення їжі, послаблення репродуктивної функції.

# СТАН ВИРОБНИЦТВА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ФІТОЕСТРОГЕННОЇ СИРОВИНИ

***В Україні, починаючи з 2000 року, соя перетворилася з аутсайдера в одну з основних олійних культур.***

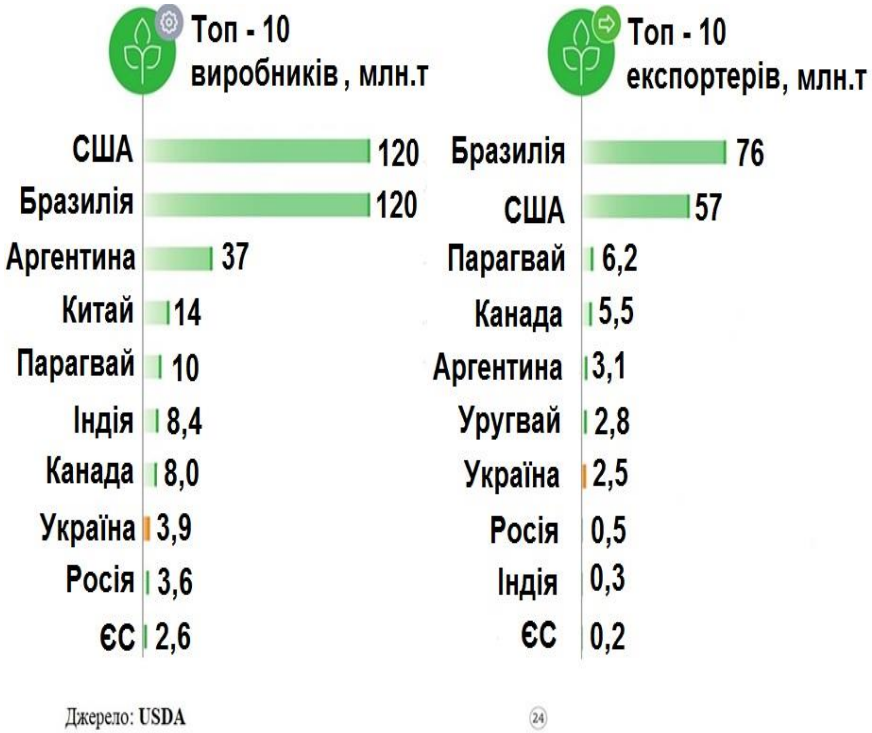



***Рис.1.*** Стан виробництва в світі

***Доведено, що коефіцієнт засвоюваності соєвих амінокислот еквівалентний коефіцієнту засвоюваності тваринного білка.***
***Японські вчені [1] рекомендують сою додавати в раціон харчування для досягнення здорового довголіття шляхом профілактики серцево-судинних захворювань у всьому світі.***

***Рис.2.*** Склад соєвого боба

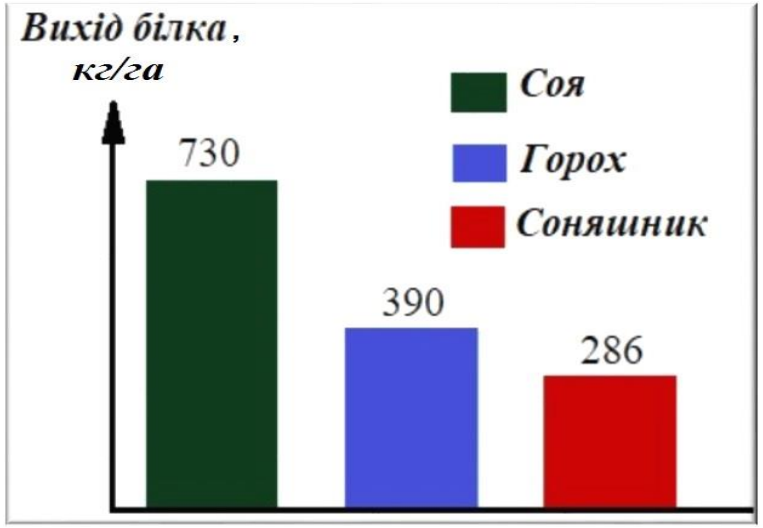



***Рис.3.*** Вихід білка


***1. Yukio Yamori, Miki Sagara and el.*** *Soy and fish as features of the Japanese diet and cardiovascular disease risks* ***. PLoS One. 2017; 12(10). Published online 2017 Oct 11. doi: 10.1371/journal.pone.0186533***

# РОЗРОБКА СТУПЕНЕВИХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ СУШІННЯ КОМБІНОВАНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОРОШКІВ

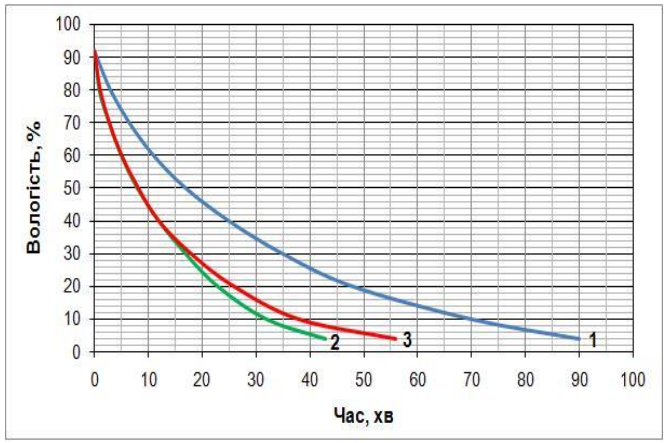



**Рис. 1.** Вплив ступінчатого режиму сушіння на кінетику процесу сушіння композиції буряк (пластина) – томат (3:1), V = 3,5 м/с, δ = 10 мм, d = 10 г/кг с. п.:
**1 – 60°С; 2 – 100°С; 3 – 100/60°С.**

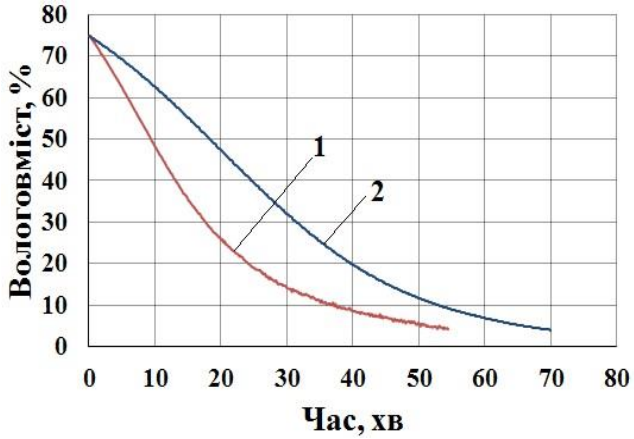



***Рис.2.*** Зміна вологовмісту соєво-шпинатної композиції(1:1) під впливом температури теплоносія 60ºС та 100/60 ºС.
δ = 15 мм, $W_п$ = 75%,$W^c_к$ = 4 %; v = 2,5 м/с, d = 10г/кг сухого повітря:
**1–100/60 ºС, 2 –60 ºС**.

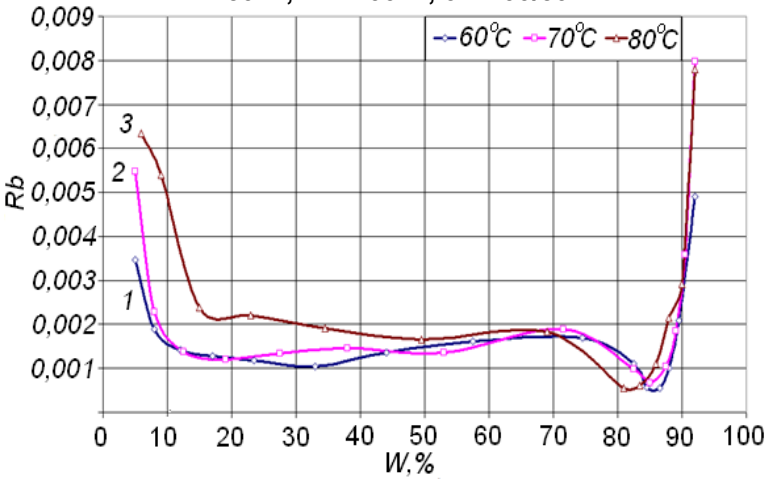



**Рис. 3.** Зміна числа Ребіндера від температури теплоносія в процесі зневоднення буряково-томатної композиції при V = 3,5 м/с, δ = 10 мм, d = 10 г/кг с. п: 1 – 60ºС, 2 – 70ºС, 3 – 80ºС.

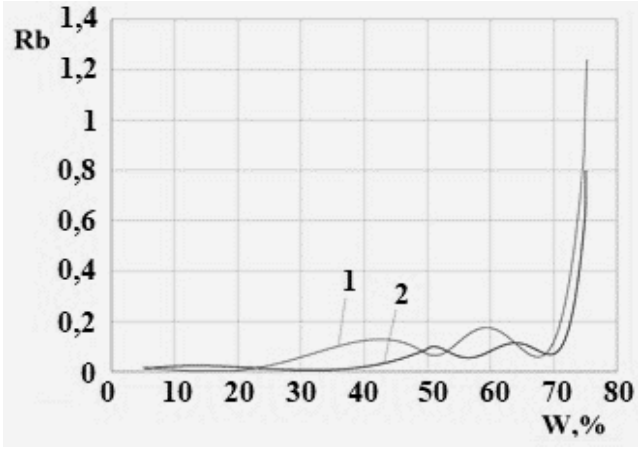
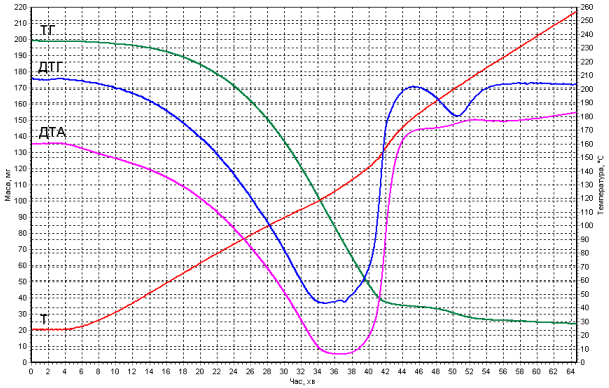


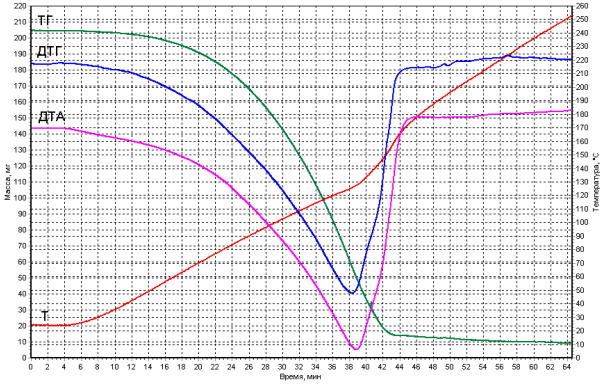

***Рис. 4.*** Зміна числа Ребіндера від температури теплоносія в процесі зневоднення соєво-шпинатної композиції: V= 2,5 м/с; d=10 г/кг с.п.; гранули розміром 4х2х3 мм: 1 – 100 ºС, 2 – 60 ºС.

***Розроблено*** енергоефективні режими сушіння: для антиоксидантної сировини, при цьому відбувається інтенсифікація процесу на **50 %** при максимальному збереженні бетаніну **95 %**, а також для фітоестрогенної сировини інтенсифікація процесу на **21 %** без критичних змін величини кислотного числа.

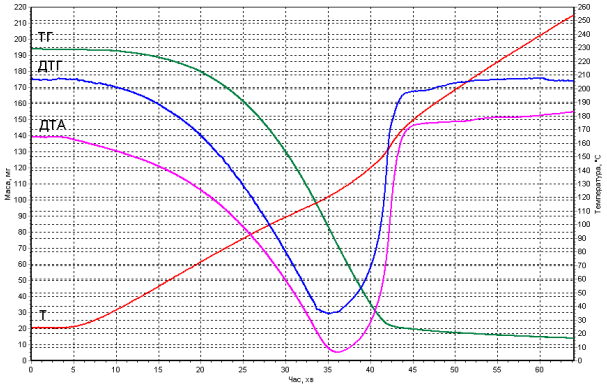
# ДЕРИВАТОГРАФІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНЕВОДНЕННЯ АНТИОКСИДАНТНОЇ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ




Столовий буряк




Ревінь

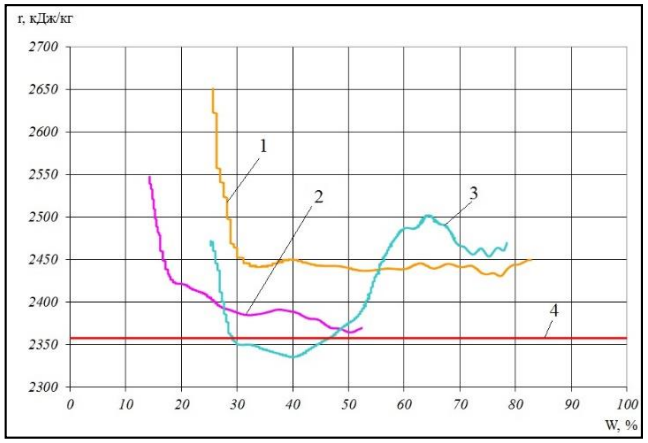



Столовий буряк-ревінь

| Матеріал | Вологість, % | Видалення води | | | | Термічна деструкція | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Інтервал, °С | Максимум швидкості, °С | Середня швидкість, %/с | Теплота, Дж/г | Інтервал, °С | Максимум швидкості, °С | Середня швидкість, %/с |
| **Столовий буряк** | 82,44 | 25–179 | 121 | 0,030 | 2631 | 179–257 | 202 | 0,028 |
| **Ревінь** | 93,45 | 25–178 | 126 | 0,034 | 2499 | 178–253 | - | 0,026 |
| **Суміш столового буряку з ревенем (2:1)** | 90,00 | 25–179 | 120 | 0,033 | 2276 | 179–254 | - | 0,025 |

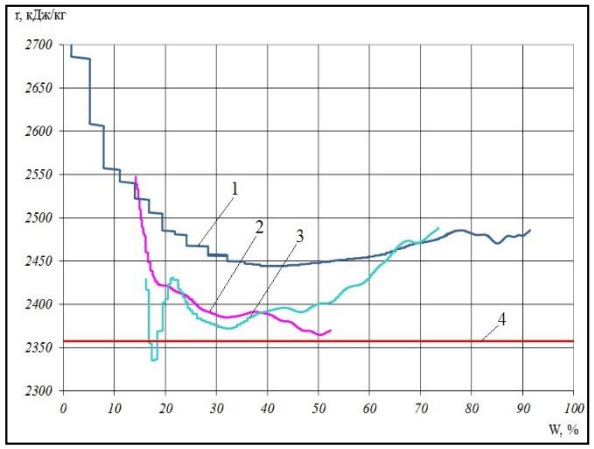
- Зневоднення суміші відбувається зі швидкістю, що на 10 % вища за середню швидкість зневоднення тканин столового буряку;
- середня питома теплота зневоднення суміші на 13,5 % нижча за теплоту зневоднення столового буряку і майже на 9 % менша теплоти зневоднення ревеню;
- термічна стійкість суміші перевищує термічну стійкість столового буряку.

# ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОТИ ВИПАРОВУВАННЯ АНТИОКСИДАНТОЇ ТА ФІТОЕСТРОГЕННОЇ СИРОВИНИ



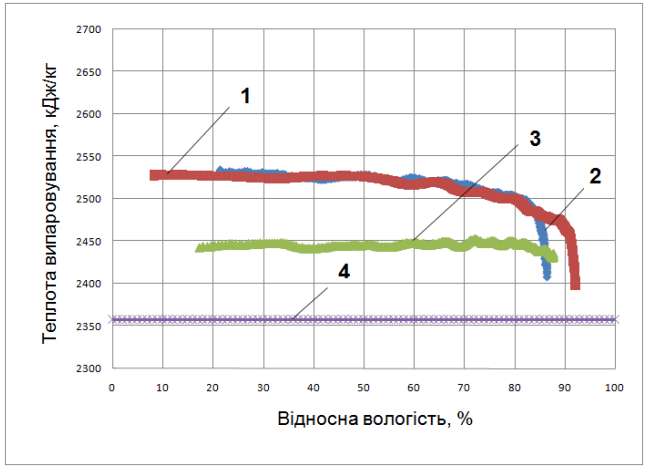

*t = 60 °C, v = 0,8 см/с, d = 10 г/кг*

***Рис. 1.*** *1 – морква; 2 –соя; 3 – соя – морква(1:1); 4 – вода*




*t = 60 °C, v = 0,8 см/с, d = 10 г/кг*

***Рис. 2****. 1 –шпинат; 2–соя; 3 – соя-шпинат (1:1); 4 – вода*



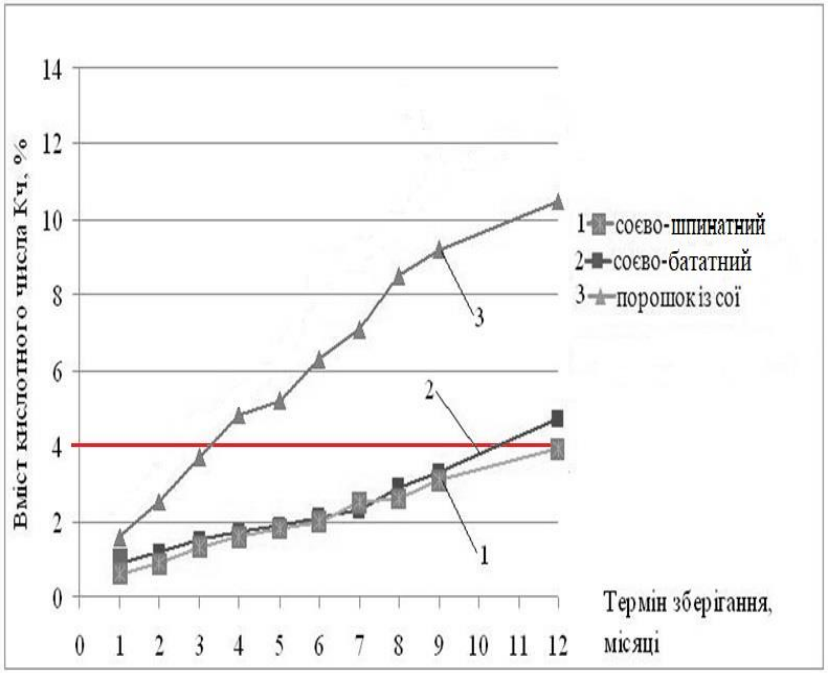

*t = 60 °C, v = 0,8 см/с, d = 10 г/кг*

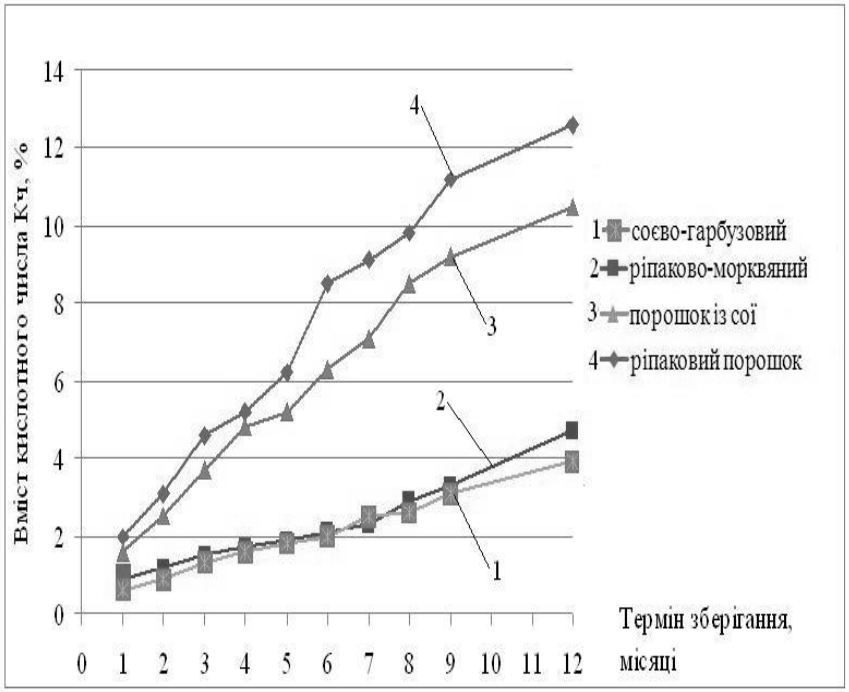
***Рис. 3****. 1 –ревінь; 2– буряк; 3 – буряк-ревінь (2:1); 4 – вода*

***Вперше*** в результаті калориметричних досліджень встановлено, що теплота випаровування води в антиоксидантній сировині менша, ніж вихідних компонентів.

***Вперше*** встановлено питому теплоту випаровування води з фітоестрогенної суміші. В результаті створення комбінованого продукту під час сушіння зареєстровано інтегральний тепловий ефект в процесі випаровування – реакція жирів з жиророзчинними каротиноїдами, яка вплинула на питому теплоту випаровування води із матеріалу.

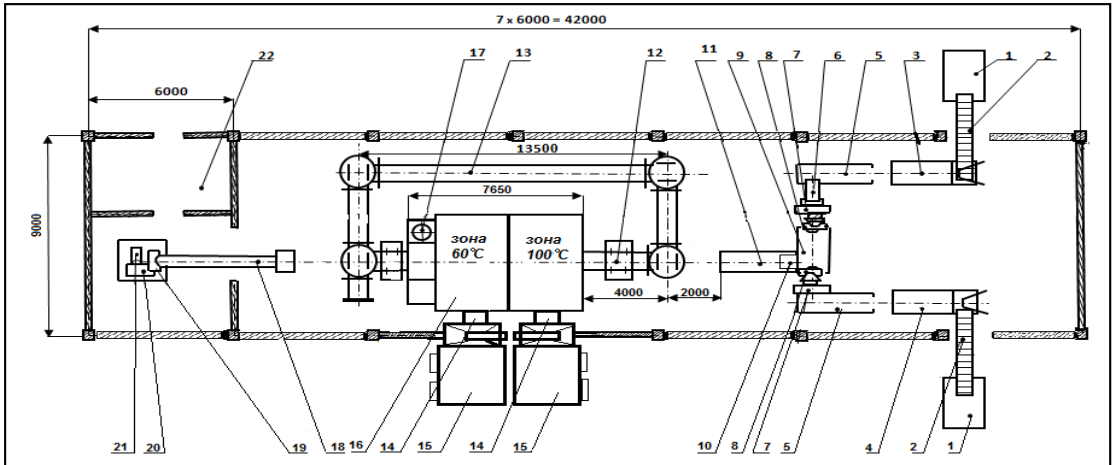
# ЗМІНА КИСЛОТНОГО ЧИСЛА ФІТОЕСТРОГЕННИХ ПОРОШКІВ В ПРОЦЕСІ ЗБЕРІГАННЯ




Високий вміст ліпідів мають фітоестрогенні порошки. В них достатньо високий вміст ω-3 лінолевої кислоти. Вони чутливі до окислення з утворенням вторинних продуктів, які надають порошкам небажаний смак і аромат. Для запобігання цих проблем використовують природні стабілізатори. Дослідження якості функціональних порошків при зберіганні на основі високо жирових рослинних компонентів проводились за допомогою визначення кислотного числа. При зберіганні монопорошків (поз. 3,4) через три місяці кислотне число вище норми (3 %), тоді як у комбінованих (поз. 1,2) становить всього 1,5 %.

# ІННОВАЦІЙНІ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ КОМБІНОВАНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОРОШКІВ




1 – ємність для приймання буряку та сировини з високим вмістом орг. кислот; 2 – транспортер елеваторний ТЕ; 3 – машина миюча барабанна Т1-КУ2-М; 4 – машина миюча вентиляторна КУМ-1; 5 – транспортер інспекційний ТСІ з магнітним сепаратор П - 100; 6 – машина для зняття шкірки буряку; 7 – машина для нарізання буряку та сировини з високим вмістом орг. кислот А9КР2В; 8 – дозатор ваговий МІ – 1540 – 91; 9 – лопатевий змішувач буряку та сировини з високим вмістом орг. кислот П – 500; 10 – розвідувач;11 - конвеєр стрічковий А9-КТФ для завантаження піддонів; 12 – візок з піддонів; 13 – колія рейкова; 14 – вентилятор; 15 – теплогенератор; 16 – сушарка 2-х зонна на теплогенераторі ТГ 1 ,5; 17 – зона охолодження; 18 – елеватор «Гусяча шия» А-6; 19 – мікромлин молотковий 10ММ; 20 – вібросита циліндричне РЗ-ВЦА; 21 – машина мішкозашивочна К4 – БУВ; 22 – склад готової продукції.

Рис. 1. Схема технологічної лінії для виробництва комбінованих функціональних порошків

**Технічна характеристика обладнання технологічної лінії ЛТО-2 для комбінованих функціональних порошків**

| Назва показників | Одиниця виміру | Лінія ЛТО - 2 |
|---|---|---|
| Продуктивність по сировині | т/год | 0,23 – 0,25 |
| Продуктивність по сухому продукту | т/год. | 0,04 – 0,45 |
| Встановлена потужність | кВт | 30 |
| Витрати енергії на випаровування вологи | кДж/кг | 3600 - 4200 |
| Кількість обслуговуючого персоналу | чол. | 4 - 5 |

В існуючій лінії на отримання моносировини витрачається 1 т / 1 т.у.п.

В розробленій технологічній лінії отримання функціональних продуктів витрати енергоносіїв становлять 1 т / 0,6 т.у.п.

# ПОРІВНЯННЯ ПИТОМИХ ВИТРАТ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В ТУНЕЛЬНИХ СУШАРКАХ

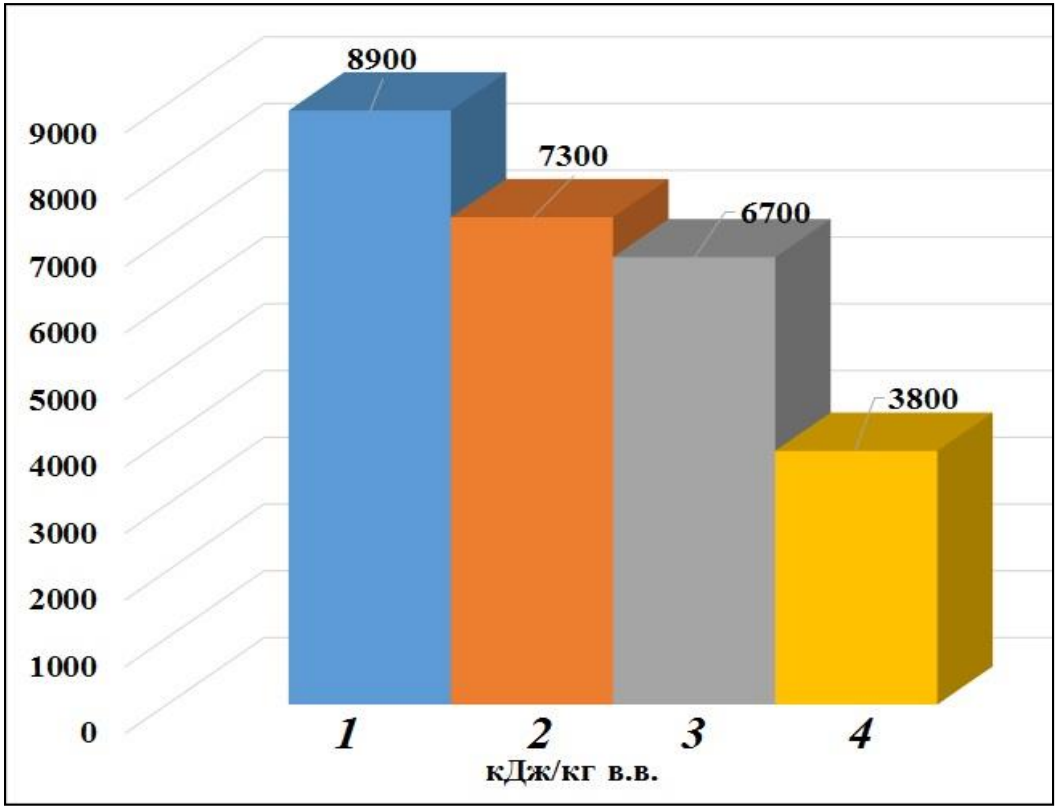



Рис.1 Питомі витрати теплової енергії в тунельних сушарках при сушінні овочів та фруктів: 1 – «МНІІП – 1»; 2 – «Б6-КФ», Росія; 3 – «Чачак», Сербія; 4 – СУМ – 2, ІТТФ, Україна.

В розроблених теплотехнологіях питомі витрати теплової енергії на процес сушіння не перевищували **3800 кДж/кг випареної вологи**, що є найкращим показником серед відомих аналогів.

# ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ

Розроблені теплотехнології та обладнання впроваджені на ТОВ «Їжа майбутнього» та СПД «Everyday food» .

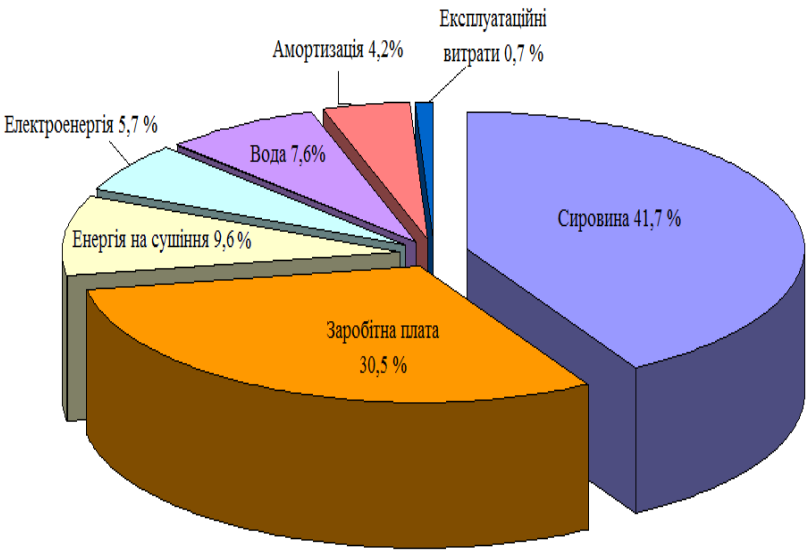



*Рис. 1. Співвідношення витрат на виробництво порошку з комбінованих функціональних матеріалів енергоефективною підготовкою сировини*

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів наукової роботи

Даний акт складено про впровадження результатів наукової роботи згідно з договором про науково-технічне співробітництво від 19 січня 2017 р. Інституту технічної теплофізики НАН України та ТОВ «Їжа майбутнього».

| Найменування впровадженого результату | Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект |
|---|---|
| Впровадження енергоефективних режимів сушіння колодних капілярно – пористих матеріалів на модернізованій сушильної установки на тепловому насосі, згідно з договором про науково-технічне співробітництво від 19 січня 2017 р. впроваджені на ТОВ «Їжа майбутнього». | 1. Апробовано розроблені енергоефективні режими сушіння. Отримано висушену рослинну сировину з кінцевою вологістю 6 – 8%, зменшено час сушіння і енерговитрати на 30% в порівнянні з існуючими. 2. Досліджено якість висушеної сировини. Визначено ступінь водопоглинання після сушіння. |

Директор ТОВ «Їжа майбутнього» Т.М.Сухін "_17_" жовтня 2018 р.

Гол.наук.співроб., д-р техн.наук відділу ТМПТ ПТФ НАНУ Ж.О.Петрова

Аспірант ПТФ НАН України К.С. Слободянюк "_17_" жовтня 2018 р.

МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ ДЕРЖАВНА САНІТАРНО-ЕПІДЕМІОЛОГІЧНА СЛУЖБА

Висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи

Державна установа "Інститут гігієни та медицини праці НАМН України" 02660, м.Київ, вул.Попудренка, 50, тел. (044) 514-56-70

Начальник лабораторії Ю.Ф. Сиженко

Завідуючий лабораторією Н.Ю. Ковальчук

Висновок дійсний до: 19.12.2014р.

Заступник голови експертної ради Пилипенко Н.С.

# ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

**1.** ***Вперше*** досліджено вплив органічних кислот рослинної сировини на клітинну оболонку столового буряка, що дало можливість розробити енергоефективну підготовку антиоксидантної композиції на основі столового буряку з різними компонентами до сушіння, а саме знизити енергозатрати на 85 % на цьому етапі.

**2.** Удосконалена попередня підготовка фітоестрогенної сировини до сушіння дала можливість зменшити енерговитрати на цьому етапі на 20-25 %.

**3.** Розроблено енергоефективні режими сушіння: антиоксидантної сировини, при якому відбувається інтенсифікація процесу на 50 % при максимальному збереженні бетаніну 95 % для антиоксидантної сировини, а також інтенсифікація процесу на 21 % без критичних змін величини кислотного числа для фітоестрогенної сировини.

**4.** Сформульовано основні положення фізичної та математичної чисельної моделі тепломасообмінних процесів під час сушіння функціональної сировини. Порівняння результатів чисельного моделювання з даними розрахунків показало їх задовільне узгодження. З аналізу результатів чисельного моделювання, а також за результатами порівняння розрахунків з даними експерименту встановлено, що запропонована чисельна модель максимально наближено описує процес конвективного сушіння антиоксидантної та фітоестрогенної сировини і може бути використана для розрахунку режимних параметрів процесу сушіння.

**5.** ***Вперше*** дериватографічними дослідженнями доведено, що термічна стійкість антиоксидантної композиції вища за термічну стійкість складових компонентів. Середня питома теплота зневоднення суміші на 13,5 % нижча за теплоту зневоднення столового буряку і майже на 9% менша теплоти зневоднення ревеню.

# ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

**6.** ***Вперше*** в результаті калориметричних досліджень встановлено, що теплота випаровування води в антиоксидантній сировині менша, ніж вихідних компонентів.

**7.** ***Вперше*** встановлено питому теплоту випаровування води з фітоестрогенної суміші. В результаті створення комбінованого продукту під час сушіння зареєстровано інтегральний тепловий ефект в процесі випаровування – реакція жирів з жиророзчинними каротиноїдами, яка вплинула на питому теплоту випаровування води із матеріалу.

**8.** Визначено водоутримуючу здатність сухих порошкоподібних комбінованих функціональних матеріалів. Встановлено, що отриманий продукт відновлюється в 2 рази швидше за еталон.

**9.** Розроблено ресурсоенергозберігаючі теплотехнології та технологічні лінії для отримання комбінованих функціональних порошків, які захищені *4* Патентами України на Винахід.

**10**. Очікуваний загальний річний економічний ефект від впровадження теплотехнології та однієї технологічної лінії для отримання функціональних порошків складає 1075831 грн. при терміні окупності 1,07 року.

Впровадження розробленої теплотехнології та технологічної лінії в кожній області України дасть фактичний економічний ефект біля 20 млн. грн.

***Дякую за увагу!***