

ОДЕСЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ  
ім. М.В.Ломоносова

На правах рукопису

  
ПОТАПОВ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 664.834

РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ СУШІННЯ ОВОЧІВ ЗМІШАНИМ ТЕРМОПІДВОДОМ

Спеціальність 05.16.12 – процеси, машини та агрегати  
харчової промисловості

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
дисертації на здобуття наукового ступеню  
кандидата технічних наук

Одеса – 1994

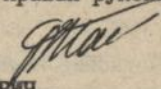
ЛНБ України ім.В.Стефаника



00801709 (P)

ОДЕСЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ  
ім. М.В.Ломоносова

На правах рукопису

  
ПОТАПОВ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 664.834

РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ СУШІННЯ ОВОЧІВ ЗМІШАНИМ ТЕПЛОПІДВОДОМ

Спеціальність 05.18.12 - процеси, машини та агрегати  
харчової промисловості

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
дисертації на здобуття наукового ступеню  
кандидата технічних наук

Одеса - 1994

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському технологічному інституті харчової промисловості ім. М.В. Ломоносова та в Харківському інституті громадського харчування.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Гришин Михайло Олександрович.

Науковий консультант: кандидат технічних наук, доцент  
Погожих Микола Іванович.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор  
Бурдо Олег Григорьевич;  
- кандидат технічних наук, доцент  
Чагаровський Вадим Петрович.

Провідна організація: Одеський комбінат харчових  
концентратів (м. Одеса).

Захист відбудеться "3" червня 1994 р. о 10<sup>30</sup> годині на  
засіданні спеціалізованої вченої Ради Д 068.35.01 в Одеському тех-  
нологічному інституті харчової промисловості ім. М.В. Ломоносова  
(270039, м. Одеса, вул. Свердлова, 112).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеського тех-  
нологічного інституту харчової промисловості ім. М.В. Ломоносова  
(270039, м. Одеса, вул. Свердлова, 112).

Автореферат розіслано "28" квітня 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої Ради  
докт. техн. наук, професор

Егоров Б.В.

ДВ - 29, 753  
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. На сучасному етапі розвитку овочесушильної промисловості все більшого значення набуває розробка та впровадження нових технологій, що дозволяють одержувати високопористі, швидковідновлювані сушені продукти та зменшити енерговитрати на їх виробництво.

На сьогоднішній час найбільш якісні сушені продукти одержують сублимаційним сушінням. Однак його використання для виробництва сушених овочів нерентабельно внаслідок дорожчезі процесу та дешевої сировини. Застосування високотемпературних способів теплового сушіння призведе до суттєвого погіршення якості овочів, особливо тих що вміщують цукор.

У раніш виконаних роботах було доведено, що сушіння зі змішаним теплопідводом (ЗТП-сушіння), що належить до конвективно-кондуктивного сушіння, дозволяє одержувати високопористі, швидковідновлювані картоплю та яблука. Але недостатність уявлень про фізику процесу ЗТП-сушіння стримує його впровадження для виробництва широкого асортименту продуктів та конструкторські розробки відповідного обладнання.

Мета роботи. Розробка науково обґрунтованих раціональних режимів сушіння овочів змішаним теплопідводом, що забезпечують одержання високоякісних, швидковідновлюваних сушених продуктів.

Для досягнення поставленої мети розв'язувались наступні завдання:

- виявити основні критичні умови та прийоми здійснення сушіння зі змішаним теплопідводом для широкого асортименту харчових матеріалів;
- провести експериментальний та теоретичний аналіз процесів тепломасообміну при ЗТП-сушінні та визначити їх основні рушійні сили;
- вивчити вплив на кінетику процесу ЗТП-сушіння параметрів сушильного агенту та технологічних умов проведення процесу;
- розробити математичну модель кінетики ЗТП-сушіння та одержати аналітичні залежності для інженерних розрахунків;
- вивчити основні показники якості досліджуваних харчових рослинних матеріалів, що одержано сушінням зі змішаним теплопідводом;
- визначити раціональні режими ЗТП-сушіння досліджуваних овочів;
- розробити технологічну схему виробництва сушеного гарбуза, що швидко відновлюється та конструкцію відповідного апарату;
- провести впровадження результатів досліджень до практики.

Об'єкти та методи досліджень. Основними об'єктами досліджень були обрані свіжі, бланшировані та сушені овочі: гарбуз, морква, буряк. Крім цього для визначення особливостей процесу ЗТП-сушіння було виконано окремі експерименти з іншими харчовими матеріалами рослинного та тваринного походження.

Досліджувались також функціональні ячейки різноманітної геометричної форми та розмірів для вивчення їх впливу на процес ЗТП-сушіння.

Для вивчення особливостей тепло-масообміну було розроблено оригінальну методіку експериментального моделювання процесу ЗТП-сушіння.

Дослідження кінетики, динаміки ЗТП-сушіння та якості сушених овочів проводили загальноприйнятими методиками.

Статистична обробка експериментальних результатів та їх графічне оформлення здійснювались за допомогою спеціально розроблених комп'ютерних програм.

Наукова новизна. На підставі попередніх теоретичних уявлень та експериментальних досліджень доведено можливість використання ЗТП-сушіння для одержання високопористих, швидковідновлюваних харчових матеріалів, у тому числі при температурах 20...45°C.

Теоретично обґрунтовано та описано фізичну модель коливательного фільтраційного переносу, що виникає при ЗТП-сушінні.

Запропоновано математичну модель процесу ЗТП-сушіння, що ґрунтується на кінетичному рівнянні  $W=W_0/\exp(kt)^n$  з двома емпіричними коефіцієнтами:  $k$ ,  $n$ .

Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що критерію здійснення процесу ЗТП-сушіння відповідає нерівність:  $\bar{n} > 1$ .

На підставі математичної моделі та експериментальних досліджень якості сушених овочів визначено діапазон раціональних режимів процесу ЗТП-сушіння.

Практична цінність. На підставі проведених досліджень визначено технологічні прийоми та критичні умови одержання широкого асортименту високоякісних харчових матеріалів рослинного та тваринного походження сушінням зі змішаним теплопідводом.

Одержано формули для інженерних розрахунків промислової сушки зі змішаним теплопідводом.

Виконаними дослідженнями доведено, що одержані ЗТП-сушінням овочі не поступаються за якістю продуктам сублимаційного сушіння, а за економічними показниками набагато перевершують останні.

Розроблена конструкція сушарки та технологічна схема виробництва високопористого гарбуза для умов фермерських господарств.

Одержані аналітичні співвідношення та рекомендації було засотсовано при розробці промислової ЗТП-сушарки для Чернігівського овочесушильного заводу, яка виготовлена та випробується.

Високопористі, швидковідновлювані овочі, що вироблені за раціональними режимами ЗТП-сушіння, пройшли медико-біологічну експертизу в Українському науковому гігієнічному центрі.

#### На захист виносяться:

- результати експериментальних досліджень кінетики та динаміки ЗТП-сушіння овочів;
- математична модель процесу ЗТП-сушіння;
- визначення раціональних режимів процесу ЗТП-сушіння овочів;
- технологічна схема виробництва швидковідновлюваного гарбуза.

Апробація роботи. Основні положення дисертації доповідались на Всесоюзній науково-технічній конференції "Холод народному господарству" (Ленінград, 1991), на IV Всесоюзній науково-технічній конференції (Кемерово, 1991), на Міжнародній конференції "Тепло-масоперенос у технологічних процесах" (Юрмала, 1991), на Міжнародній конференції по сушінню II-го Міжнародного форуму з тепло-масообміну (Київ, 1992), на наукових конференціях Харківського інституту громадського харчування (Харків, 1990-1993), на кафедрі технології молока та сушіння харчових продуктів (Одеса, 1991-1993) та спільному засіданні кафедр Одеського технологічного інституту харчової промисловості ім. М.В.Ломоносова (Одеса 1994).

Публікації. По результатах досліджень опубліковано 6 робіт.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, шість глав, висновків та додатків. Викладена на 126 сторінках основного машинописного тексту, вміщує 39 рисунків та 17 таблиць, список використаної літератури із 147 джерел, серед яких 45 робіт закордонних авторів.

## З М І С Т   Р О Б О Т И

### I. Особливості механізму процесу ЗТП-сушіння.

Експерименти із ЗТП-сушіння низки харчових матеріалів показали, що цей спосіб критичен щодо виду сировини, умов та режимів сушіння. Так, наприклад, при сушінні у циліндричних ячейках 20...40% зразків або визнавали усадки при температурах менших 100°C, або розривались при температурах більших 100°C. В обох випадках процес

сушіння практично припинявся при середньому вологовмісті 50...100% та вкрай нерівномірному розподіленні вологості по об'єму.

Тому виходячи з попередніх уявлень про механізм ЗТП-сушіння та вимог до умов виробництва було розроблено функціональні ячейки із еліпсоподібним перерізом та довільною довжиною, в яких для масообміну слугують вузькі зазори вздовж осі. Використання таких ячеек у поєднанні із спеціальною технологією підготовки сировини, що спрямована на утворення певної дисперсності в матеріалі, дозволило одержати високоякісні сушені продукти: сир, м'ясо, моркву, буряк, гарбуз, цибулю, солодкий перець, баклажани.

Слід відзначити, що вперше було одержано швидковідновлювані овочі при температурі сушіння 20...45°C, та високопористий сир тепловим сушінням.

За показниками якості продукти ЗТП-сушіння не поступались сублімаційним: кінцевий вологовміст 3...7%, відновлення за 3...8 хв. з коефіцієнтом 90...99%.

Для з'ясування особливостей ЗТП-сушіння проведено його експериментальне моделювання на капілярно-пористому тілі (КПТ).

Тверде КПТ неорганічного походження у формі паралелепіпеду було вологоізольовано з боку чотирьох менших граней, а до двох більших граней впритул торкались стінки електронагрівача. Тому волога могла видалятися з тіла тільки крізь малий зазор. Вода подавалась до центру КПТ крізь капіляр, а її витрачання контролювалось спеціальною вимірювально-розподільною системою. За допомогою термопар та самописця реєструвалась температура в шарах КПТ та в потоці сушильного агента.

Одержані термограми (рис.1) та кінетика зневоднення показали, що, по-перше, модельний процес ЗТП-сушіння мав періодичний характер при постійних зовнішніх умовах, а, по-друге, реєструєма інтенсивність сушіння  $j=170...270 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{г})$  була на порядок більша за ту, що забезпечувалась тепловим потоком від нагрівача.

Для пояснення цих результатів висунуто гіпотезу про існування коливательного фільтраційного переносу, який полягає в тому, що волога з тіла видаляється мікрооб'ємами під дією градієнту тиску, що періодично змінюється та виникає у переривчастій термодинамічній системі: зовнішнє середовище - ячейка з матеріалом.

Від'ємний градієнт тиску, що утворюється внаслідок локальної конденсації частини пари, призводить до проникнення сушильного агента усередину тіла. Це створює умови для інтенсивного випаровуван-

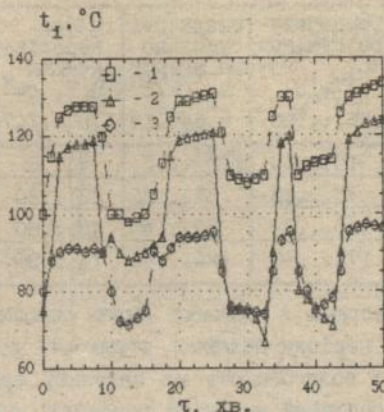
ня, внаслідок якого виникає додатний градієнту тиску, що сприяє видаленню з тіла газо-рідинної суміші.

- 1) Поверхня КПТ;
- 2) Середина КПТ;
- 3) Вихід із КПТ в потоці сушильного агента.

Режим сушіння:

$$t_c = 90^\circ\text{C}; v_c = 10 \text{ м/с};$$

Рис. 1. Кінетика змінювання температури при моделюванні процесу ЗТП-сушіння на капілярно-пористому тілі.



Такі процеси принципово змінюють картину зовнішнього масообміну за рахунок періодичного "відсосу" та "вдуву" у суміжний шар, що призводить до руйнування його ламінарної структури та утворення квазістійких вихрів турбулентності.

Очевидно, що коливательний фільтраційний перенос може існувати при умові синхронності:  $\tau_T \sim \tau_P$ , де  $\tau_T$  - характерний час існування турбулентного вихрю,  $\tau_P$  - час релаксації внутрішнього градієнту тиску. Означена умова є, певно, причиною критичності процесу ЗТП-сушіння, бо її виконання залежить як від зовнішніх умов, так і характеристик матеріалу, що зневоднюється.

Одержані розрахунками у модельному експерименті характеристики коливательного фільтраційного переносу - частота обміну 22...27 Гц, амплітуда градієнту тиску 500...800 Па/см, цілком відповідають сучасним уявленням про збурення типу викидів при обтіканні активної поверхні.

## 2. Кінетика та динаміка процесу ЗТП-сушіння овочів.

В експериментах з вивчення кінетики ЗТП-сушіння овочів в еліпсоподібних ячеекх було виявлено особливості, що не реєструвались при сушінні у циліндричних ячеекх. Криві сушіння мали S-подібну форму та відповідно два критичних вологовмісту. Період постійної швидкості сушіння не спостерігався.

В таблиці 1 наведено тривалість ЗТП-сушіння по періодах у залежності від режимів та умов процесу на прикладі гарбуза.

Вплив режимів на тривалість ЗТП-сушіння гарбуза.

Тривалість сушіння по періодах, хв.	Температура сушіння $t_c, ^\circ\text{C}$ 55...105	Швидкість сушильного агента $v_c, \text{м/с}$ 5,5...13	Площа перерізу ячейки $F, \text{см}^2$ 1,3...1,7	Початковий вологовміст $W_0, \%$ 680...3000	Дисперсність (середній переріз частинок) $S, \text{мм}^2$ 1...7
$\tau_1$	15...5	10...5	4...5	3...6	5
$\tau_2$	45...13	35...20	22...30	20...28	22
$\tau_3$	115...32	80...40	48...60	49...58	57
$\Sigma\tau_1$	175...50	125...65	74...95	72...92	84

Характерним є сильний вплив швидкості сушильного агента на тривалість періоду падаючої швидкості сушіння, та незначний вплив початкового вологовмісту на загальну тривалість процесу. Це підтверджує особливий механізм взаємодії сушильного агента з вільною вологою у матеріалі, бо остання являється робочою речовиною для коливательного фільтраційного переносу. Тривалість ЗТП-сушіння пропорційна площі перерізу ячейки та не залежить від ступеню змільчення продукту (в дослідженому діапазоні цих параметрів).

При вивченні змінювання тиску у матеріалі під час ЗТП-сушіння знайдено, що при температурах сушіння 55...100 $^\circ\text{C}$  у матеріалі не виникає надмірного тиску. При температурах вищих за 100 $^\circ\text{C}$  реєструється невеликий надмірний тиск  $\approx 60$  Па, який швидко релаксує у першому періоді сушіння. Таким чином стаціонарний фільтраційний перенос не може являтися основною рушійною силою ЗТП-сушіння.

Одержані термограми при ЗТП-сушінні (рис.2) підтверджують наявність двох критичних точок та відсутність періоду постійної швидкості сушіння. Встановлено, що із зменшенням температури сушіння переважаючою стає тенденція пошарового зневоднення матеріалу. Це ілюструється даними розрахунків критерію фазового перетворення  $\varepsilon$  у критичних точках, де  $dt(W_k)/dt = 0$  (таблиця 2).

Згідно цих даних масова доля парообразної вологи зростає із зменшенням температури сушіння. Це пов'язано з тим, що при ЗТП-сушінні перенесення вологи визначається двома конкуруючими процесами: концентраційною дифузією у зону випаровування та коливательним фільтраційним переносом у зовнішнє середовище. При низьких температурах волога не встигає підводитись до зони випаровування, тому вологовміст центру зрезка практично не змінюється та матеріал сохне пошарово.

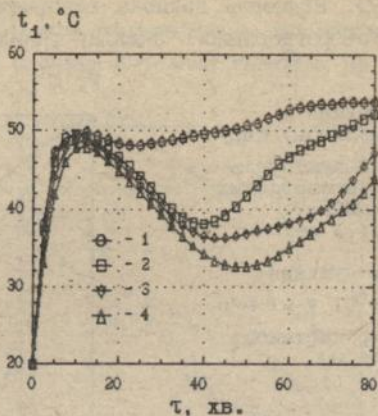
Радіальна  
координата шару:

- 1) 0 мм; 2) 1,7 мм;  
3) 3,4 мм; 4) 5,1 мм.

Режим сушіння:

$$t_c = 55^\circ\text{C}; \quad t_m = 25^\circ\text{C}; \\ v_c = 12 \text{ м/с}; \quad F = 1,4 \text{ см}^2.$$

Рис.2. Кінетика пошарового змінювання температури при ЗТП-сушінні в еліпсоподібній ячeyці.



Таблиця 2.

Критерій фазового перетворення у критичних точках ЗТП-сушіння гарбуза.

Температура сушильного агента, °C									
55		65		75		85		95	
W <sub>к</sub>	ε	W <sub>к</sub>	ε	W <sub>к</sub>	ε	W <sub>к</sub>	ε	W <sub>к</sub>	ε
770	0,077	800	0,079	820	0,065	830	0,042	860	0,051
180	1,12	200	1,08	250	0,72	250	0,45	260	0,48

### 3. Математична модель процесу ЗТП-сушіння.

Знайдено, що особливості кінетики процесу ЗТП-сушіння не описуються відомими математичними моделями. На рис.3 наведено типові криві сушіння гарбуза, що одержано зневодненням у кип'ячому шару та ЗТП-сушінням. Наведені криві мають принципово різний характер особливо у гігроскопічній області, де швидкість ЗТП-сушіння значно більша та різко спадає до нуля тільки на рівні мономолекулярної сорбції.

На підставі аналізу більш ніж 100 кривих ЗТП-сушіння гарбуза, моркви та буряка запропоновано наступне кінетичне рівняння:

$$W = W_0 \cdot e^{-(k\tau)^{\bar{n}}}, \quad (1)$$

де  $k$  — коефіцієнт сушіння,  $\bar{n}$  — середній коефіцієнт напруженості сушіння.

Коефіцієнт кореляції кінетичного рівняння становить

0,97...0,99. Відносна похибка визначення емпіричних коефіцієнтів за допомогою регресійного аналізу складає 3...6%.

- 1) - Сушіння в кип'ячому шару.
- 2) - ЗТП-сушіння в еліпсоподібних ячейках:  
 $F=1,4$  см.

Режим сушіння:

$t_c=85^\circ\text{C}$ ;  $v_c=7$  м/с.

Розмір частинок:  
 $15 \times 4 \times 1$  мм

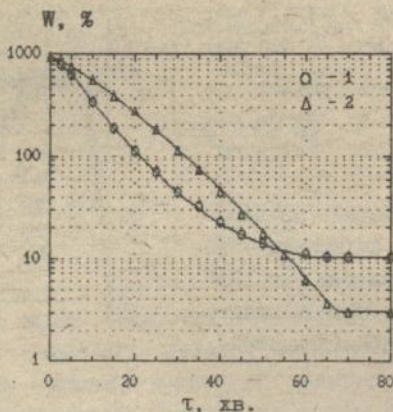


Рис.3. Порівняні криві сушіння гарбуза.

З рівняння (1) випливають формули для тривалості ЗТП-сушіння (2) та швидкості сушіння (3), (4):

$$\tau_c = \frac{1}{K} \left[ \ln \frac{W_0}{W} \right]^{1/\bar{n}} \quad (2);$$

$$\frac{dW}{d\tau} = W_0 k \bar{n} (k\tau)^{\bar{n}-1} e^{-(k\tau)^{\bar{n}}} \quad (3);$$

$$\frac{dW}{d\tau} = k \bar{n} \left[ \ln(W_0/W) \right]^{\frac{\bar{n}-1}{\bar{n}}} W. \quad (4)$$

Критичні точки на кривій сушіння визначаються за формулами:

$$W_{k1} = W_0 / \exp\left(\frac{\bar{n}-1}{\bar{n}}\right); \quad \tau_{k1} = \frac{1}{K} \cdot \left(\frac{\bar{n}-1}{\bar{n}}\right)^{1/\bar{n}};$$

$$W_{k2} = W_0 / \exp(\Gamma); \quad \tau_{k2} = \frac{1}{K} \Gamma^{1/\bar{n}}, \quad \text{де } \Gamma = 1 + \frac{1}{\bar{n}} \left[ \sqrt{\bar{n}^2 + \bar{n} - 1,75} - 0,5 \right].$$

Коефіцієнти запровадженого кінетичного рівняння мають певний фізичний сенс.

Виходячи з кінетичного рівняння (1), коефіцієнт напруженості сушіння дорівнює швидкості змінювання безрозмірного вологовмісту за безрозмірним часом:

$$n(\tau) = \frac{d\{\ln[\ln(u_0/u)]\}}{d\{\ln(k\tau)\}} = \frac{\tau}{u \cdot \ln(u_0/u)} \left| \frac{du}{d\tau} \right|, \quad (5)$$

де  $u$  вологовміст, кг/кг.

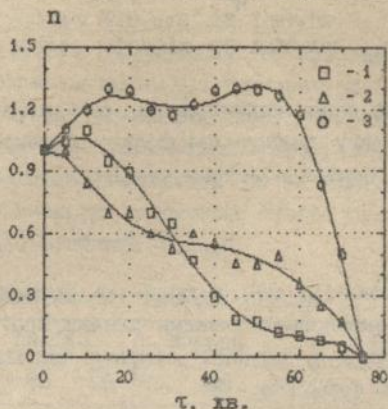
Кінетика змінювання коефіцієнту напруженості, що одержана за формулою (5), під час сушіння різними методами наведена на рис.4.

- 1) Сушіння в кип'ячому шару. Стружка  $15 \times 4 \times 1$  мм.  
 2) Сушіння в кип'ячому шару. Кубики  $10 \times 10 \times 10$  мм.  
 3) ЗТП-сушіння в еліпсоподібних ячейках:  $F=1,4$  см.<sup>2</sup>  
 Стружка  $15 \times 4 \times 1$  мм.

Режим сушіння:

$$t_c = 85^\circ \text{C}; v_c = 7 \text{ м/с.}$$

Рис.4. Кінетика коефіцієнту напруженості сушіння для різних способів зневоднення гарбуза.



Виконаними дослідженнями доведено, що характер кінетики  $n(\tau)$  подібен до характеру змінювання масообмінного критерію Кірпічова ( $Ki_m$ ), який запроваджується з тим же фізичним сенсом.

Згідно рис.4 характер масопереносу суттєво різниться в залежності від способу сушіння. При сушінні в кип'ячому шару висока інтенсивність зневоднення підтримується тільки у першому періоді сушіння ( $n > 1$ ). Із заглибленням зони випаровування ефективність сушіння різко спадає внаслідок погіршення умов зовнішнього масообміну ( $n < 1$ ).

При ЗТП-сушінні завдяки інтенсивному зовнішньому масообміну внутрішній дифузійний перенос не встигає зрівнювати градієнт вологовмісту центр - поверхня зразка, внаслідок чого має місце пошарове зневоднення, при якому центр зразка зберігає практично початкову вологість до кінця сушіння.

Таким чином умовам здійснення ЗТП-сушіння необхідно вважати створення напруженого режиму масообміну, що відповідає нерівності:

$$\bar{n} > 1. \quad (6)$$

У припущенні  $n \sim Ki_m$  з формули (5) для коефіцієнту сушіння  $k$  одержано його визначення, що відрізняється від коефіцієнту сушіння, запровадженого А.В.Ликовим, множником, який залежить від режиму зневоднення:

$$k = A \frac{a_m}{R_v^2}, \quad \text{де } A = \frac{u_0}{u} \cdot \ln(u_0/u)^{\frac{\bar{n}-1}{\bar{n}}}. \quad (7)$$

де  $a_m$  - коефіцієнт дифузії вологи;  $R_v$  - характерний розмір тіла.

Такий сенс запровадження коефіцієнту сушіння дозволяє одержати методичку визначення деякого ефективного коефіцієнту дифузії вологи за даними кінетики сушіння:

$$a_{m\bar{n}} = R_v^2 \cdot k \cdot \frac{u_0}{u} \cdot \ln(u_0/u)^{\frac{\bar{n}-1}{\bar{n}}} \quad (8)$$

Залежності, що одержано за формулою (8), добре корелюють з відомими експериментальними даними про змінювання коефіцієнту дифузії вологи у процесі сушіння овочів та описуються наступною емпіричною формулою:

$$a_{m\bar{n}} = a_{m\bar{n}0} (Bv + Cv^2 + Dv^3) \cdot \left(\frac{T}{293}\right)^{6.9}, \quad (9)$$

де  $T$  - температура сушіння, К.

Сталі величини емпіричної залежності (9) наведено нижче:

	$a_{m\bar{n}0}, \text{ м}^2/\text{с}$	B	C	D
1. Гарбуз	$7,93 \cdot 10^{-10}$	0,15	-0,006	0,0001
2. Буряк	$6,67 \cdot 10^{-10}$	0,54	-0,117	0,0140
3. Морква	$5,61 \cdot 10^{-10}$	0,31	-0,046	0,0049

На підставі експериментальних досліджень та запровадженої математичної моделі запропановано емпіричні залежності для коефіцієнтів кінетичного рівняння, що справедливі у дослідженому діапазоні режимних параметрів:

$$n = 3,7 \cdot (Gu \cdot Re)^{-0.19} \quad (10); \quad \frac{kF}{a_{m\bar{n}}} = 50 \cdot Gu^{1.9} \cdot Re^{0.5} \quad (11),$$

де  $Re$  - критерій Рейнольдса,  $Gu$  - критерій Гухмана,  $a_{m\bar{n}}$  ( $\text{м}^2/\text{с}^2$ ) дорівнює для гарбуза -  $2,4 \cdot 10^{-9}$ , буряка -  $2,2 \cdot 10^{-9}$ , моркви -  $2,0 \cdot 10^{-9}$ .

Виходячи з критерію здійснення ЗТП-сушіння (6), визначено діапазон допустимих режимних параметрів даного процесу:

$$180 < Gu \cdot Re < 990. \quad (12)$$

Таким чином, науково обґрунтовані рівняння (10)...(12)

сумісно з рівнянням тривалості ЗТП-сушіння (2) дозволяють виконувати інженерні розрахунки ЗТП-сушарок.

#### 4. Раціональні режими ЗТП-сушіння овочів.

Велика інтенсивність процесу ЗТП-сушіння та особливості його динаміки, а саме низька середньоінтегральна температура та поширене зневоднення обумовлюють високі показники якості сушених овочів, що не поступаються показникам для сублімаційних продуктів.

Як свідчать експериментальні результати із ЗТП-сушіння в широкому інтервалі температур найкращі показники якості було одержано при температурах 75...95°C (таблиця 3).

Таблиця 3.  
Основні показники якості сушених овочів.

	Гарбуз			Морква			Буряк		
Температура сушіння, °C	75	85	95	75	85	95	75	85	95
Кінцевий вологовміст, %	4,7	4,3	3,8	5,0	4,8	4,2	5,1	5,0	4,7
Коефіцієнт відновлення, %	99	99	75	95	78	59	95	92	70
Час набухання, хв.	5	5	10	7	10	10	7	10	10
Втрати вітамінів, % :									
вітамін С	13	14	35	16	9	25	17	15	-
β-каротін	0,7	3,0	5,4	0,5	1,7	3,9	0...1,0	-	-

Вказаний діапазон температур задовільно корелює з мінімальним інтегральним температурним впливом на продукт під час сушіння  $\theta$ , що визначається за формулою:

$$\theta = \int_0^{\tau_c} \bar{t}(\tau) d\tau, \quad (13)$$

де  $\bar{t}$  – середньооб'ємна температура продукту.

Для визначення раціональних режимів враховувались як інтегральний температурний вплив, що приймався за критерій якості сушеного продукту, так і енерговитрати, котрі при ЗТП-сушінні можна визначити за формулою конвективного теплообміну:

$$Q = \alpha F_s (t_c - \bar{t}) \tau_c, \quad (14)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну;  $F_s$  – площа поверхні ячійки.

З відомого співвідношення для коефіцієнту конвективного теплообміну та рівняння тривалості ЗТП-сушіння (2), одержано:

$$Q = A \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.43} \cdot F_g(t_c - \bar{t}) \frac{[\ln(W_0/W_k)]^{1/\bar{n}}}{K}, \quad (15)$$

де  $\lambda$  - теплопровідність сушильного агенту;  $d$  - характерний розмір ячейки;  $A$  - коефіцієнт, що залежить від числа  $\text{Re}$ ;  $\text{Pr}$  - теплообмінний критерій Прандтля.

Комплексні залежності для  $\theta(t_c, v_c)$  та  $Q(t_c, v_c)$ , що розраховані згідно (13), (15) на підставі експериментальних даних, зображено на рис.5.

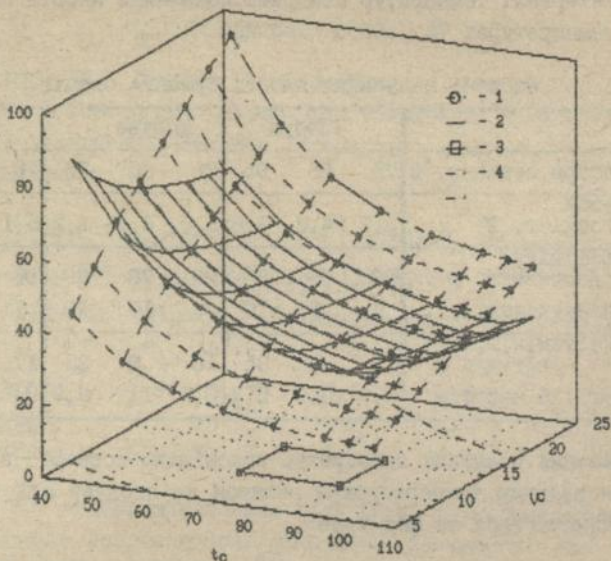


Рис.5. Комплексна залежність відносних енерговитрат та критерію якості продукту при ЗТП-сушінні.

- 1) - Енерговитрати (у відносних одиницях);
- 2) - Критерій інтегрального температурного впливу (у відносних одиницях);
- 3) - Область раціональних режимних параметрів;
- 4) - Область допустимих режимних параметрів;

Область перетину поверхнів критерію інтегрального температурного впливу та відносних енерговитрат визначає діапазон раціональних режимів ЗТП-сушіння овочів, який відповідає температурам сушильного агенту 70...90°C та швидкості його руху 10...15 м/с.

## В И С Н О В К И.

1. Аналіз сучасних способів вироблення швидковідновлюваних сушених овочів показав, що сушіння зі змішаним теплопідводом являється найбільш перспективним для промислового впровадження.

2. Встановлено, що процес ЗТП-сушіння є критичним щодо режимів його здійснення та виду харчової сировини.

Показано, що одними з визначаючих факторів являються технологія підготовки сировини, та форма функціональних ячesk.

Розроблено конструкцію функціональних ячesk для здійснення ЗТП-сушіння в умовах промислового виробництва.

3. Доведено можливість одержання широкого асортименту високопористих, швидковідновлюваних овочів тепловим сушінням, у тому числі при температурах 20...45°C.

4. Вперше запропоновано, теоретично обґрунтовано та описано фізичну модель коливательного фільтраційного переносу, що виникає при ЗТП-сушінні.

5. Запропоновано математичну модель процесу ЗТП-сушіння у вигляді кінетичного рівняння:  $W=W_0/\exp(k\tau)^{\bar{n}}$ , що містить два емпіричних коефіцієнти:  $k$ ,  $\bar{n}$ .

Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що критерію здійснення ЗТП-сушіння відповідає нерівність:  $\bar{n} > 1$ .

Одержано залежності, що пов'язують коефіцієнти кінетичного рівняння з безрозмірними критеріями тепло-масообміну, на підставі котрих запропоновано формули для інженерних розрахунків промислових ЗТП-сушарок.

6. Визначено раціональні умови та режими ЗТП-сушіння, що дозволяють одержувати сушені овочі, які за якістю не поступаються сублимаційним продуктам та потребують мінімальних енерговитрат.

7. Розроблено конструкцію апарату та технологічну схему виробництва високопористого, швидковідновлюваного гарбуза для умов фермерських господарств.

Одержані рекомендації та розрахунки було запроваджено при розробці та виготовленні дослідної ЗТП-сушарки для Чернігівського овочесушильного заводу та на Харківському науково-технологічному комплексі.

Вироблені за рекомендованими раціональними режимами сушені овочі пройшли медико-біологічну експертизу в Українському науковому гігієнічному центрі, де одержано дозвіл на їх реалізацію в підприємствах громадського харчування.

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних роботах.

1. Комбинированный сухой продукт на основе молочного белка/ Гришин М.А., Жуков В.В., Ковалов В.Н., Погожих Н.И., Потапов В.А. // Тез. докл. IV Всесоюзной конф. (Раздел IIIб), Кемерово, 1991.- С. 84-85.
2. Гришин М.А., Погожих Н.И., Потапов В.А. Тепловая сушка творога// Прогрессивные технологии и формирование рыночных отношений в общественном питании: Сб. научн. тр. ХИОП.- Харьков, 1992.- С.57-60.
3. Исследование качественных показателей сушеных мясных полуфабрикатов высокой степени готовности/ Гришин М.А., Погожих Н.И., Шубина Л.Ю., Потапов В.А. // Прогрессивные технологии и формирование рыночных отношений в общественном питании: Сб. научн. тр. ХИОП.- Харьков, 1992.- С.99-102.
4. Формирование структуры материала в процессе сушки/ Гришин М.А., Жуков В.В., Погожих Н.И., Потапов В.А.// Тез. докл. Международной конф. по сушке (Секция 8) 2-го Международного Форума по тепло- и массообмену. - Киев, 1992.- С.63-65.
5. Погожих Н.И., Потапов В.А. Экспериментальное моделирование сушки капиллярно-пористых тел со смешанным теплоподводом// Перспективы развития общественного питания: Сб. науч. тр. ХИОП,- Харьков, 1993.- С.40-42.
6. Research of the drying process of materials by mixed heat transfer/ Grishin M.A., Zhukov V.V., Pogozhikh N.I., Potapov V.A. // Abstracts of Reports International conference "Heat and Mass Transfer in Technological Processes.- Jurchala, 1991.- P.13-15.

Автор вдячний В.В.Жукову за допомогу в організації ряду експериментальних досліджень та корисні поради під час роботи над дисертацією.

---

Підписано до друку 4.04.1994 р.

Формат 60x84 1/16. Обсяг 0,7 уч.вид. арк.

Тираж 100 прим. Зак.10.

---

Ротапринт Інституту монокристалів

Харків, пр. Леніна, 60

30-70-97

ВІСНИК М. В. СТАРАНИКА  
АН України



AB 29.753

**AB 29.753**