

## CHAPTER «ENGINEERING SCIENCES»

### INTENSIFICATION OF HEAT AND MASS TRANSFER DURING THE CONVECTIVE DRYING OF APPLE TO LOW FINAL MOISTURE

### ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПІД ЧАС КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ЯБЛУК ДО НИЗЬКОЇ ЗАЛИШКОВОЇ ВОЛОГОСТІ

Olena Husarova<sup>1</sup>

Raisa Shapar<sup>2</sup>

Nataliia Sorokova<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-53-2-52>

**Abstract.** A new form of dried products for Ukrainian consumers is fruit and vegetable chips. Fruit or vegetable chips are thin lamina of fruits or vegetables obtained without frying. Fruit or vegetable chips obtained by drying to low residual moisture. Their characteristic is the lack in the composition of cholesterol, carcinogens and more. The purpose of the work is to intensify the heat and mass transfer during convective drying of apples while creating energy efficient heat production technology for chips. The article also analyzes various methods of preliminary processing of raw materials before drying (steam treatment, treatment in solutions of citric acid and sugar syrup). The paper presents the calculation of the duration of drying of apples by the method of Krasnikov V. The values

---

<sup>1</sup> Researcher, Department of Mass Transfer in Heat Technologies, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

<sup>2</sup> Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Leader Researcher, Department of Mass Transfer in Heat Technologies, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

<sup>3</sup> Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leader Researcher, Department of Mass Transfer in Heat Technologies Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

and the dependences of the Rebinder Rb number on the humidity of the sample for stationary and stage dehydration modes were calculated. In the work the numerical modelling of the process of drying of apples during the production of chips was performed. Physical and mathematical models were constructed for a layer of a colloidal capillary-porous body in the form of an unlimited plate which thickness is much smaller in length. Objects and methods of research. Objects of research were Renet Simirenko apples. Apples dehydration was carried out by the method of convective drying to a residual moisture content of no more than 6%. The duration of the apples' stay in a medium of a certain temperature and moisture content was monitored; the apples temperature in the course of drying process did not exceed the maximum permissible temperature of 60°C for thermally unstable raw materials. Drying experiments and the evaluation of apples quality were performed according to standard procedures. Conclusions. Analysis of modes and methods of pre-treatment of raw materials on drying kinetics and the organoleptic finished product showed that examined treatments provide a high degree of colour preservation of raw materials and accelerating the kinetics compared to untreated samples. We determined the optimal parameters of the drying agent and developed the stage-wise dehydration modes resulting in 20% reduction of process duration and providing high degree of preservation of pectin and other bioactive substances in chips. On the basis of generalization of the results of experimental studies, energy-efficient thermal technology of obtaining chips was developed, which is based on the method of rapid convective drying of scalded by steam apples in the modes of stage dehydration. Unlike the world's developments, the technology involves the production of natural chips without artificial preservatives and fillers with the maximum degree of preservation of natural components of raw materials, the recoverability of which is 85%.

### **1. Вступ**

Останні дані свідчать про те, що калорійні традиційні снеки все більше витісняються з ринку натуральними [1]. Натуральні чипси – доволі новий сушений продукт із високими органолептичними властивостями зневоднений до низької залишкової вологості. Такі чипси одержують із фруктів та овочів. Асортимент чипсів досить широкий,

і включає в себе чипси із яблук, груш, хурми, айви, бананів, буряка, моркви, батату, білих коренеплодів тощо.

Основними статтями витрат, що складають собівартість чипсів є вартість сировини, обладнання, оплата праці, витрати на тепловологу обробку перед сушінням та процес зневоднення, який є основним у технологічному циклі. На собівартість також впливає додавання смакових наповнювачів та консервантів, що передбачено багатьма технологіями [2; 3; 4].

В Україні відсутнє масове промислове виробництво чипсів, а наявні в торгівельній мережі імпортовані чипси надто дорогі. Зниження собівартості сушеної продукції можна досягнути за рахунок використання енергоефективної теплотехнології та вітчизняного обладнання без додавання смакових інгредієнтів. Отже, розроблення та вдосконалення теплотехнологій перероблення фруктів та овочів є актуальною задачею.

Процес сушіння рослинної сировини має суттєві відмінності від зневоднення класичних колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Так, під час сушіння фруктів температура матеріалу не повинна перевищувати величину гранично допустимої температури 60 °С. Інтенсифікація процесу та скорочення його тривалості неможливе за рахунок підвищення температури теплоносія. Перероблення рослинної сировини характеризується високою енергоємністю процесу, низьким к.к.д., підвищеними вимогами до якості кінцевого продукту та його безпечності. При розробці нових теплотехнологій перероблення фруктів необхідно вирішити комплексну задачу – забезпечити економічність процесу та збереженість корисних складових у кінцевому продукті.

Метою роботи є інтенсифікація тепломасообміну під час конвективного сушіння яблук при створенні енергоефективної теплотехнології одержання чипсів.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити та науково обґрунтувати вплив різних способів тепловологої обробки яблук на процес сушіння;
- встановити кінетичні закономірності процесу сушіння;
- отримати формулу для розрахунку тривалості зневоднення яблук;
- розробити фізичну та математичну моделі тепломасообміну процесу сушіння яблук;
- порівняти експериментальні кінетичні закономірності процесу сушіння яблук з теоретичними на базі математичного моделювання.

## 2. Об'єкти та методи досліджень

В якості об'єкту дослідження вибрано яблука сорту Ренет Симиренко, так як вони є популярними та розповсюдженими в Україні. Характерною відзнакою даного сорту є величина цукрово-кислотного індексу – 16...20 (відношення вмісту цукру до кислоти). Така величина оптимальна з точки зору технології зневоднення та органолептичних показників чипсів [5]. Яблука нарізали кружальцями завтовшки  $\delta = 3...4$  мм з видаленням насінневої камери.

Досліджено наступні способи тепловологої обробки яблук: гіротермічна, у водних розчинах 0,1%-ому, 1%-ому лимонної кислоти та у 10%-ому цукровому сиропі.

Експериментальні дослідження процесу сушіння оброблених яблук проводилось на конвективному сушильному стенді у режимі двостадійного зневоднення. Стенд обладнано автоматизованою системою збору та обробки інформації. Похибка вимірювання температури не перевищувала  $\pm 0,1$  °C, а маси  $\pm 0,001$  г [6].

Дослідження процесу в режимі двостадійного зневоднення проводилось таким чином: на першій стадії температура теплоносія була рівною 80 °C, а на другій, при наближенні температури яблук до 55 °C, температуру теплоносія знижували до температури 60 °C [5]. Процес проводили до залишкової вологості яблук  $W^c = 6\%$ .

Аналіз процесу сушіння здійснювався на підставі побудованих кривих кінетики  $W^c = f(\tau)$  і швидкості  $dW^c / d\tau = f(W^c)$  зневоднення.

Для визначення відновлюваності чипсів використовувалась методика [7], для розрахунку тривалості зневоднення яблук та числа Ребіндера – експериментально-розрахункові методи досліджень [8].

Обробка експериментальних даних та розрахунки виконувались із застосуванням сучасних комп'ютерних програм "Sooshka2\_2" та Excel; для математичної моделі авторська програма на мові Fortran.

## 3. Вплив тепловологої обробки яблук на процес сушіння

З метою інтенсифікації масоперенесення при сушінні проводять тепловологу обробку рослинної сировини паром, водою або розчинами. У результаті такої обробки видаляється повітря, змінюється маса та об'єм матеріалу, збільшується клітинна проникність, інактивуються ферменти, гідролізується протопектин, покращується відновлюва-

ність. Для кожного конкретного виду сировини існує певна тривалість тепловологої обробки та сушіння, ефективність якої залежить від матеріалу, його ступеня зрілості та подрібнення [6].

На рис. 1 зображені криві кінетики та швидкості сушіння попередньо оброблених яблук різними способами. Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що всі досліджені способи обробки прискорюють процес зневоднення порівняно із свіжими (необробленими) зразками [9; 10].

Так, при обробці зразків у 10%-ому розчині цукрового сиропу суттєвого скорочення не спостерігається, тривалість процесу зменшується лише на 5%. Це можна пояснити закупоркою капілярів цукровим сиропом та утворенням плівки на поверхні об'єкту зневоднення.

Обробка яблук у 0,1%-ому та 1%-ому розчинах лимонної кислоти скорочує тривалість процесу порівняно із свіжими на 9% та 13% відповідно, із чого витікає, зниження кислотності середовища сприятливо впливає на клітинні оболонки, підвищуючи їхню проникність та інтенсивність процесу видалення вологи.

Тривалість зневоднення гіротермічно оброблених яблук є найменшою і скорочується на 20% порівняно із свіжими, що пов'язано з впливом даного способу обробки на тканини, який призводить до втрати біополімерами гідрофільних активних центрів та зниженню їх водоутримуючої здатності, тобто до перерозподілу фракцій води – зменшенню кількості зв'язаної води та збільшенню вільної [11]. Саме від кількості зв'язаної води залежить тривалість процесу, а, отже, енергетична складова процесу сушіння. Необхідний ефект досягається за температури яблук  $t = 85...95^{\circ}\text{C}$  із витримкою протягом 30...40 с [5].

При гіротермічній обробці найбільш повно зберігається природний склад сировини, в той час, як при обробці у розчинах відбувається перехід розчинних сухих речовин сировини (2...4%) у бланшувальний розчин [12].

Аналіз кривих швидкості сушіння (рис. 1, б) показав, що процес зневоднення протікає в періоді падаючої швидкості. Відсутність періоду постійної швидкості пояснюється умовами проведення процесу сушіння. Швидкість сушіння всіх оброблених зразків вища, ніж свіжих протягом процесу. Максимальна швидкість сушіння спостерігається для гіротермічно оброблених зразків, яка у 1,8 разів вища, ніж свіжих.

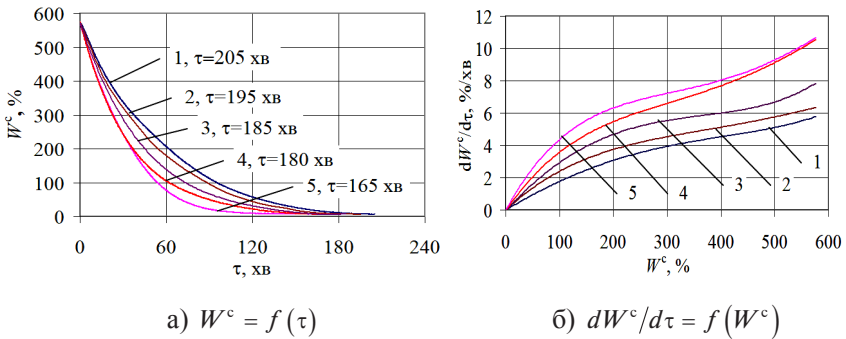


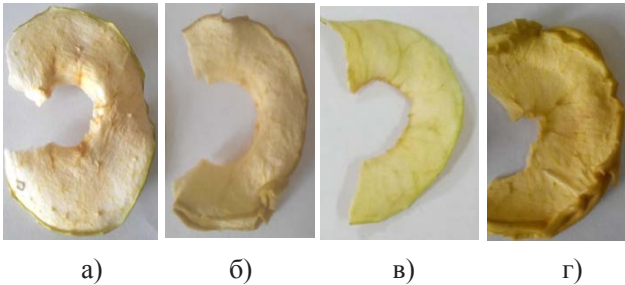
Рис. 1. Вплив способів тепловологої обробки яблук на кінетику (а) та швидкість (б) процесу сушіння,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с.п. [10]:

1 – свіжі яблука, 2 – оброблені у 10%-ому цукровому сиропі, 3 – оброблені у 0,1%-ому розчині лимонної кислоти, 4 – оброблені у 1%-ому розчині лимонної кислоти, 5 – гідротермічно оброблені

Дослідження показали, що розглянуті способи обробки вирівнюють та стабілізують колір оброблених яблук протягом тривалого часу. Колір зразків (рис. 2, г), оброблених у цукровому сиропі, після сушіння набув жовтуватого забарвлення, а колір зразків, оброблених у розчинах лимонної кислоти – висвітлився (рис. 1, в). Крім того, зразки втратили натуральний гармонійний смак притаманний свіжим яблукам. Найкращі органолептичні показники спостерігались для гідротермічно оброблених яблук – смак та запах властивий свіжим яблукам, світло-кремовий колір та хрустка структура (рис. 2, б).

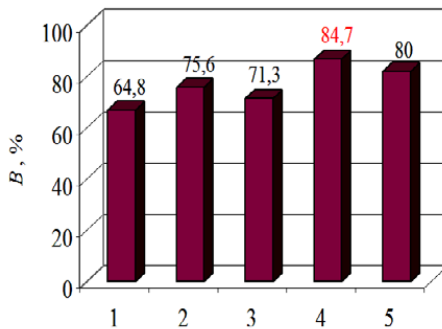
З метою визначення якості чипсів із яблук проведено дослідження по визначенню коефіцієнта набухання та відновлюваності (рис. 3).

Визначенню відновлюваності передують розрахунок коефіцієнта набухання, який показує відносне збільшення маси продукту після набухання та визначає здатність до відновлювання початкових властивостей матеріалу. Відновлюваність ( $B$ ) матеріалу є більш показовою величиною, яка безпосередньо показує наскільки вологість відновленого матеріалу наближається до вихідної, яка приймається за 100% [7]. Чим вищі значення відновлюваності, тим краща якість отриманого сушеного продукту, тим меншого негативного впливу він зазнав під час сушіння.



**Рис. 2. Вплив теплової обробки на органолептичні показники чипсів із яблука:**

а – свіже яблуко; б – гіротермічно оброблене; в – обробка у 1%-ому розчині лимонної кислоти; г – обробка у 10%-ому цукровому сиропі



**Рис. 3. Динаміка зміни відновлюваності чипсів залежно від способу теплової обробки:**

1 – у 10%-ому розчині цукрового сиропу; 2 – у 1%-ому розчині лимонної кислоти; 3 – у 0,1%-ому розчині лимонної кислоти; 4 – гіротермічна обробка; 5 – свіжі

Як бачимо з рис. 3, найбільші значення відновлюваності  $B = 84,7\%$  отримано для гіротермічно оброблених зразків. Проте, повного відновлювання чипсів не спостерігається. Це пов'язано з тим, що під час сушіння яблук відбувається усадка матеріалу, деформація структури паренхімних тканин, стискання вільних міжклітинних просторів по яким всмоктується вода. Через тепловий вплив відбувається необо-

ротна денатурація речовин, які у нормальному стані зв'язують воду та набухають [6; 9].

Як бачимо з наведених досліджень, гігротермічна обробка яблук інтенсифікує зневоднення у 1,8 разів порівняно зі свіжими, забезпечує отримання 100% натурального продукту без додавання додаткових смакових компонентів із високими органолептичними показниками. Скорочення тривалості зневоднення тотожно скороченню енерговитрат на процес. Усе вищевикладене доводить перевагу гігротермічної обробки.

#### 4. Розрахунок тривалості процесу сушіння яблук

Метою розрахунку було визначення тривалості процесу зневоднення під час виробництва чипсів із яблук.

Враховуючи, що процес сушіння є дуже складним і являє собою сукупність пов'язаних одне з одним явищ, які протікають всередині та на поверхні матеріалу, а також всередині сушильної камери, розрахунок тривалості сушіння ускладнений. Для розрахунків використовують наближені методи, які базуються на вивченні загальних закономірностей процесу, що зближує теорію та практику сушіння. Ці методи застосовують для широкого класу матеріалів із різною геометричною формою. Для розрахунку нами використано експериментально-розрахунковий метод Краснікова В.В. [8].

За отриманими експериментальними кривими зневоднення яблук побудовано узагальнену криву кінетики сушіння та представлено її в напівлогарифмічній системі координат  $W^c - N\tau$  (рис. 4), що дозволило визначити критичні вологості в точках перегину  $W_{кр}^c$ , відносні коефіцієнти сушіння та залежність (2) для визначення тривалості процесу.

Характер побудованої кривої підтвердив протікання процесу сушіння яблук у другому періоді падаючої швидкості. Другий період складається з трьох частин, на графіку добре видно точки перегину, які відповідають критичним вологостям.

Значення відносних коефіцієнтів сушіння  $\chi_2 = 13,9 \cdot 10^{-4}$  ( $530 \geq W^c \geq 125$ ),  $\chi_3 = 14,3 \cdot 10^{-4}$  ( $125 \geq W^c \geq 25$ ) та  $\chi_4 = 15,5 \cdot 10^{-4}$  ( $25 \geq W^c \geq 6$ ). Загальна тривалість  $\tau_3$  процесу сушіння яблук:

$$\tau_3 = \frac{1}{N_{\max}} \left( \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{п}^c}{W_{кр1}^c} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{кр1}^c}{W_{кр2}^c} + \frac{1}{\chi_4} \lg \frac{W_{кр2}^c}{W_{к}^c} \right), \quad (1)$$



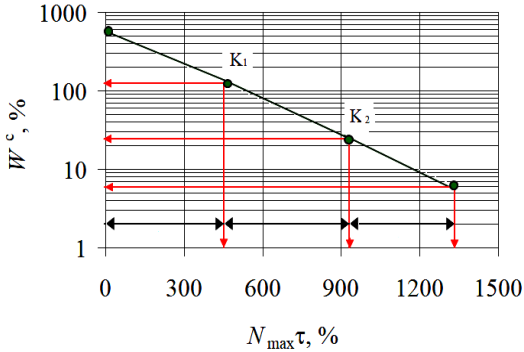


Рис. 4. Узагальнена крива кінетики процесу сушіння яблук

де  $N_{\max}$  – максимальна швидкість сушіння,  $W_{\text{п}}^c$ ,  $W_{\text{к}}^c$  – початкова та кінцева вологості матеріалу,  $W_{\text{кр1}}^c$ ,  $W_{\text{кр2}}^c$  – перша та друга критичні вологості у критичних точках  $K_1$ ,  $K_2$ . Значення критичних вологостей  $W_{\text{кр1}}^c = 125\%$  та  $W_{\text{кр2}}^c = 25\%$ .

Підставивши у вираз (1) всі шукані величини, отримано вираз для визначення загального часу сушіння яблук:

$$\tau_3 = \frac{1335}{N_{\max}} \quad (2)$$

Використовуючи отриману залежність (2), можна заздалегідь оцінити тривалість процесу сушіння яблук під час виробництва чипсів при зміні параметрів теплоносія.

### 5. Розрахунок числа Ребіндера, як критерію оптимізації процесу сушіння

Число Ребіндера визначає відношення кількості теплоти, яке пішло на нагрівання матеріалу до кількості теплоти витраченої на випаровування води з нього. Число Rb є основним критерієм сушіння, і його часто називають критерієм оптимізації процесу сушіння [13].

Величина числа Ребіндера залежить від температурного коефіцієнта сушіння  $b$ , питомої теплоємності вологого матеріалу  $c$  та питомої теплоти випаровування  $r$ , тобто від форм зв'язку води з матеріалом [6; 14]:

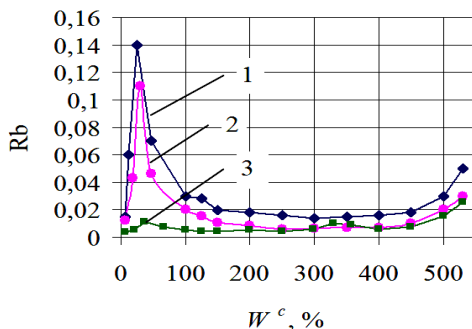
$$Rb = \frac{c}{r} \frac{d\bar{t}}{d\bar{U}} = 100 \frac{c}{r} \frac{d\bar{t}}{dW^c} = \frac{c}{r} b, \quad (3)$$

де  $\bar{t}$  – середня температура матеріалу,  $\bar{U}$  – середній питомий вологовміст матеріалу.

Процес необхідно проводити таким чином, щоб значення числа Ребіндера були мінімальними, тобто так, щоб уся підведена теплота витрачалась на випаровування вологи з матеріалу.

Значення числа Ребіндера розраховано для гіротермічно оброблених яблук, які зневоднювались за різних умов проведення процесу сушіння (рис. 5). Залежність числа Ребіндера має складний характер із характерними перегинами, які відповідають визначеним критичним вологостям і вказують на видалення різних видів вологи.

Як бачимо, збільшення температури сушильного агента (криві 1, 2) від 80 до 120°С призводить до збільшення числа Rb по абсолютному значенню. Величина числа Ребіндера для зразків, зневоднених за стадійних режимів (крива 3), порівняно зі зразками зневодненими за стаціонарних режимів (криві 1, 2), менші вже на початку процесу та суттєво знижуються наприкінці. Зниження числа Rb майже до нуля вкінці процесу свідчить про те, що уся підведена теплота використовується на випаровування вологи з яблук.



**Рис. 5.** Зміна числа Rb під час сушіння яблук при  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с.п.:  
 1 –  $t = 120^\circ\text{C}$ , 2 –  $t = 80^\circ\text{C}$ , 3 –  $t = 80\dots60^\circ\text{C}$

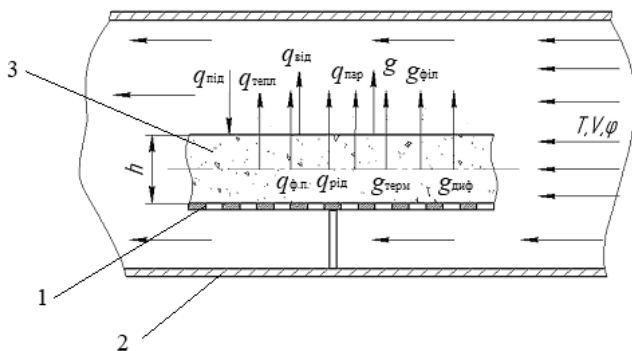
Така залежність числа Ребіндера доводить, що поєднання гіротермічної обробки яблук та стадійного режиму зневоднення є економічно доцільним та сприяє зниженню енергетичних витрат на процес сушіння.

## 6. Динаміка процесу сушіння яблук на базі математичного моделювання

### 6.1. Фізична та математична моделі тепломасообміну при сушінні

Яблука відносяться до класу колоїдних капілярно-пористих матеріалів, що представляють гетерогенну систему, яка включає тверду фазу, утворюючи пористий каркас, а також рідку, парову і повітряну фази, що частково заповнюють пори. У процесі сушіння об'єм таких матеріалів зменшується в декілька разів завдяки усадці каркасу, що має суттєвий вплив на динаміку тепломасоперенесення та фазових перетворень.

**Фізична модель процесу.** Математична модель повинна відображати фізичні процеси, що відбуваються в системі (рис. 6.) „сушильний агент – вологий пористий матеріал – перфорована решітка”.



**Рис. 6. Фізична модель процесу сушіння яблук:**

- 1 – перфорована решітка; 2 – сушильна камера;  
3 – шар колоїдного капілярно-пористого матеріалу

Відносно тонкий шар колоїдного капілярно-пористого матеріалу товщиною  $h$  обдувають теплоносієм із температурою  $T$ , швидкістю руху  $V$  і відносною вологістю  $\varphi$ . Природа матеріалу визначається його

теплофізичними властивостями. Вважаємо, що перфорована решітка майже не ускладнює контакт матеріалу з сушильним агентом. До зовнішніх поверхонь шару від сушильного агенту підводиться теплота  $q_{\text{під}}$ , яка йде на випаровування вологи і нагрівання матеріалу. З парою, що утворюється при випаровуванні і виходить назовні  $g$ , відводиться теплота  $q_{\text{від}}$ . Теплота  $q_{\text{під}}$  в пористому шарі включає теплопровідну складову  $q_{\text{тепл}}$ , складові, що враховують теплоту фазових перетворень  $q_{\text{ф.п.}}$ , перенесення теплоти при русі рідкої  $q_{\text{рід}}$  і парової  $q_{\text{п}}$  фаз. Величина  $g$  складається з термовологопровідної  $g_{\text{терм}}$ , дифузійної  $g_{\text{диф}}$  складових і складової, що враховує фільтраційне перенесення вологи  $g_{\text{фільтр}}$ .

**Математична модель процесу.** У [15] була побудована математична модель дифузійно-фільтраційного тепломасоперенесення, фазових перетворень та усадки при сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Вона може бути спрощена, оскільки яблука є термолабільним матеріалом і в процесі сушіння їх температура не перевищує гранично допустимого значення, яке нижче за 100 °С. При таких умовах основний механізм переносу є дифузійний і фільтраційним механізмом можна знехтувати [13]. У цьому випадку математична модель включає диференційне рівняння перенесення енергії (4), перенесення маси рідкої (5) та парової фаз (6):

$$c_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial x}) - r_{\text{еф}} I_v, \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_p}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (D_p (\frac{\partial U_p}{\partial x} + \delta_p \frac{\partial T}{\partial x})) - I_v - \frac{U_p}{(1 + \varepsilon_v)} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \tau}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial U_n}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (D_n (\frac{\partial U_n}{\partial x} + \delta_n \frac{\partial T}{\partial x})) + I_v - \frac{U_n}{(1 + \varepsilon_v)} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \tau}, \quad (6)$$

де  $c_{\text{еф}}$  – ефективна теплоємність, Дж/(кг · К);  $\tau$  – час, с;  $T$  – температура, К;  $\lambda_{\text{еф}}$  – ефективна теплопровідність, Вт/(мК);  $r_{\text{еф}}$  – ефективна питома теплота фазового переходу, яка враховує випаровування вільної та зв'язаної води, кДж/кг;  $I_v$  – інтенсивність випаровування рідини в одиничному об'ємі;  $U_n$  і  $U_p$  – об'ємні концентрації пари та рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $D_n$ ,  $D_p$  – ефективний коефіцієнт дифузії пари та рідини в порах матеріалу, м<sup>2</sup>/с;  $\delta_n$ ,  $\delta_p$  – відносні коефіцієнти термодифузії пари та рідини, кг/(м<sup>3</sup>·К);  $\varepsilon_v$  – відносна об'ємна деформація (усадка).

Новим у математичній моделі є те, що у рівнянні (4) використано ефективну питому теплоту фазового переходу  $r_{\text{эф}}$ , визначену експериментально, яка враховує випаровування вільної та зв'язаної води для свіжих та бланшованих парюю яблук, що дозволило підвищити точність розрахунку.

Ефективний коефіцієнт дифузії рідини  $D_p$  в порах матеріалу знаходиться по формулі Нікітенко М.І. [16]:  $D_p = \gamma_{Dp} [\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}$ , а для пари і повітря, відповідно до молекулярно-кінетичної теорії газу,  $D_n = D_{\text{пов}} = \gamma_{Dn} T^{3/2} / P_r$ , де  $\gamma_{Dp}$  і  $\gamma_{Dn}$  – дифузійні коефіцієнти;  $A_D$  – енергія активації в процесі дифузії, Дж.

Тиск  $P_r$  газової суміші в порах матеріалу представляється сумою парціальних тисків пари  $P_n$  і повітря  $P_{\text{пов}}$ :

$$P_r = P_n + P_{\text{пов}}. \quad (7)$$

При дифузійному механізмі тепломасоперенесення тиск парогазового середовища в порах тіла дорівнює тиску навколишнього середовища  $P_t$  (теплоносія), і парціальний тиск повітря в порах:

$$P_{\text{пов}} = P_r - P_n. \quad (8)$$

Парціальний тиск пари знаходиться із рівняння стану для розріджених газів:  $P_n = \rho_n RT / \mu_n$ , де густина пари  $\rho_n = U_n / \Psi_r$ ;  $\mu_n$  – молярна маса пари, кг/моль.

Об'ємна частка в матеріалі, що зайнята газовою фазою:  $\Psi_r = 1 - \Psi_t - \Psi_p$ , де  $\Psi_t = 1 - \Pi$  – об'ємна частка твердої фази,  $\Psi_p = U_p / \rho_p$  – об'ємна частка рідкої фази,  $\rho_p$  – густина рідкої фази. Тоді густина повітря  $\rho_{\text{пов}} = P_{\text{пов}} \mu_{\text{пов}} / (RT)$ , де  $\rho_{\text{пов}}$  – молярна маса повітря, кг/моль, а об'ємна концентрація  $U_{\text{пов}} = \rho_{\text{пов}} \Psi_r$ .

Інтенсивність випаровування рідини на зовнішній поверхні шару знаходиться як різниця потоків рідини, що випаровується і пари, що конденсується, по формулі Нікітенко М.І. [15]:

$$I = \gamma_c \left\{ \Phi_n|_{x=0} \left( \exp \left[ A / (RT|_{x=0}) \right] - 1 \right)^{-1} - \Phi_B \left( \exp \left[ A / (RT_t) \right] - 1 \right)^{-1} \right\}. \quad (9)$$

Тут  $\gamma_c = \varepsilon \rho \delta^* / 4$ , кг/м<sup>2</sup>с – поверхневий коефіцієнт інтенсивності випаровування,  $\varepsilon$  – коефіцієнт випромінювання, 1/с;  $\delta^*$  – товщина шару конденсату, у якому відбувається випаровування;  $\bar{\delta} = \delta / \delta^*$  при  $0 < \delta < \delta^*$  і  $\bar{\delta} = 1$  при  $\delta > \delta^*$ ,  $\delta$  – товщина шару конденсату;  $\Phi_n$  – вологість паропові-

тряної суміші в порах, якій згідно ізотермі сорбції відповідає концентрація  $U_p$  в даній точці тіла [16];  $A$  – енергія активації, Дж;  $R$  – універсальна газова стала, Дж/(кмоль  $\cdot$  К);  $T_r$  і  $\varphi_r$  – параметри зовнішнього парогазового середовища (теплоносія);  $x$  – нормаль поверхні пластини.

За умови локальної термодинамічної рівноваги фаз, коли температури фаз в даній точці тіла є рівними, вираз для інтенсивності випаровування в одиничному об'ємі тіла впливає з (11):

$$I_v = \gamma_c [\exp(A / RT) - 1]^{-1} (\varphi_r - \varphi) S . \quad (10)$$

Тут  $S$  – площа контакту рідкої та газової фаз в неповністю заповнених рідиною порах одиничного об'єму тіла, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\varphi = P_n / P_n^*$  – відносна вологість газу в порах тіла при даній температурі. Тиск насичення визначався по формулі Нікітенко М.І. [16]  $P_n^* = N_p \sqrt{T} [\exp(A / RT) - 1]^{-1}$ , де  $N_p = \text{const}$ , результати якої добре узгоджуються з табличними даними.

Для визначення площі  $S$  контакту рідкої і газової фаз в порах одиничного об'єму тіла, які не повністю заповнені рідиною, в роботі [15] отримана формула (за умови, що  $\varphi = \varphi_r$ ):

$$S = \frac{2\sqrt{1 - \varphi_r}}{\rho_p \delta^*} \frac{\partial U_p}{\partial \varphi_r} . \quad (11)$$

Похідна  $\partial U_p / \partial \varphi_r$  знаходиться з рівняння ізотерми десорбції. Дані по рівноважній вологості  $W_p^c$  для яблук взято з власних експериментальних даних,  $U_p = 0,01 W_p^c \rho_r$ .

Відносна об'ємна деформація  $\varepsilon_v$  визначається на основі рівняння термоконцентраційного деформування Нікітенко М.І. [15], яке для тіл найпростішої конфігурації вирішено аналітично. Для пластини  $0 < x_1 < h$ , деформований стан якої пов'язаний із симетричною неоднорідністю полів концентрації компонентів і температури уздовж осі  $x_1$ , аналітичне рішення має вигляд [17]:

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \frac{1}{2\delta} \int_0^{2\delta} N dx , \quad \varepsilon_{11} = \frac{1 + \nu_{II}}{1 - \nu_{II}} N - \frac{2\nu_{II}}{1 - \nu_{II}} \varepsilon_{22} , \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = 0 .$$

$$\varepsilon_v = (1 + \varepsilon_{11})(1 + \varepsilon_{22})(1 + \varepsilon_{33}) - 1 . \quad (12)$$

Тут  $N$  – термоконцентраційна функція, Н/м<sup>2</sup> [15],  $N = \beta_T (T - T_0) + \sum \beta_\psi (\omega_\psi - \omega_{\psi 0})$ , де  $\beta_T = (\partial x / \partial T) / x$  – коефіцієнт лінійного термічного розширення, 1/К;  $\beta_\psi = (\partial x / \partial \omega_\psi) / x$  – коефіцієнт

лінійної усадки при зміні масовмісту  $\omega\psi$  компоненту  $\psi$  ( $\psi = p, n, пов$ ),  $1/K$ ;  $\nu_{II}$  – коефіцієнт Пуасона.

Для системи (4) – (6) повинні бути задані граничні умови:

– на осі симетрії мають місце умови симетрії полів  $T, U_\chi, w_\chi, (\chi = p, n)$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_p}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_n}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (13)$$

– на зовнішній поверхні  $x = \delta$  ( $\delta = h/2$ ) шару задаються умови 3-го роду

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} &= \alpha (T_\tau - T \Big|_{x=\delta}) - r_{\text{еф}} I, \\ D_p \left( \frac{\partial U_p}{\partial x} \Big|_{x=\delta} + \delta_p \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} \right) &= I, \\ -D_n \left( \frac{\partial U_n}{\partial x} \Big|_{x=\delta} + \delta_n \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} \right) &= -\gamma_{\text{пс}} (U_n \Big|_{x=\delta} - \rho_{\text{пс}} \psi_n). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Тут  $\gamma_{\text{пс}}$  – коефіцієнт зовнішнього паробміну, м/с,  $\rho_{\text{пс}}$  – парціальна густина пари в теплоносії,  $\psi_n$  – об’ємна частка пари,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>К).

Математична модель є істотно нелінійною і розв’язати її можливо лише чисельним методом. Було розроблено метод, що базується на явній тришаровій різницевої схемі М.І. Нікітенко [15] та процедурі розчеплення алгоритму по фізичним факторам. Перевагою даною схеми є її простота, оскільки вона є явною, а також можливість обирати довільні кроки різницевої сітки, як для неявної схеми. Згідно цієї схеми, на нерівномірній різницевої сітці  $x_{i+1}^n = x_i^n + h_i^n$ , ( $i=0,1,\dots,l$ ),  $\tau_n = nl$ , ( $n = 0,1,\dots, l > 0$ ) апроксимація рівняння переносу рідини (5):

$$\begin{aligned} (1 + \Omega_p) \frac{\tilde{U}_{p,i}^{n+1} - U_{p,i}^n}{l} - \Omega_p \frac{U_{p,i}^n - U_{p,i}^{n-1}}{l} &= \\ = \frac{\left[ (D_{p,i+1}^n + D_{p,i}^n)(U_{p,i+1}^n - U_{p,i}^n) - (D_{p,i}^n + D_{p,i-1}^n)(U_{p,i}^n - U_{p,i-1}^n) \right]}{2h_i^2} - I_v \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{U_{p,i}^{n+1} - U_{p,i}^n}{l} = \frac{\tilde{U}_{p,i}^{n+1}}{1 + \tilde{\varepsilon}_v^{n+1}} \frac{\tilde{\varepsilon}_v^{n+1} - \varepsilon_v^n}{l}, \quad (16)$$

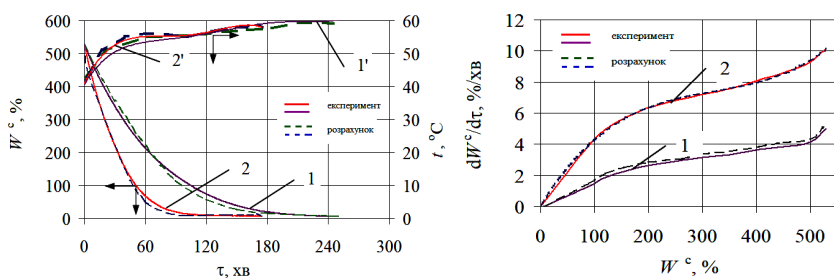
де  $\Omega_p > 0$  – ваговий параметр. Таким же чином апроксимується диференційне рівняння переносу пари (6). Рівняння переносу енергії (4), що не містить функцію  $\varepsilon_v$ , апроксимується рівнянням, аналогічним

(15). Різницеві рівняння мають похибку апроксимації:  $l + h_t^2$ , і необхідні умови стійкості  $l \leq \frac{h_t^2}{2a}(1 + 2\Omega)$ , де  $a$  приймає значення  $a = \lambda_{\text{эф}} / c_{\text{эф}}\rho$ ,  $D_p$  та  $D_n$  відповідно для рівнянь (4), (5), (6).

## 6.2. Порівняння теоретичних та експериментальних закономірностей процесу сушіння

Результати чисельного моделювання процесу сушіння свіжих та бланшованих парою яблук за різних режимів та їх порівняння з експериментальними даними наведено на рис. 7.

Порівнюючи отримані на рис. 7 розрахункові та експериментальні залежності  $t = f(\tau)$ ,  $W^c = f(\tau)$  та  $dW^c / d\tau = f(W^c)$  бачимо, що повного співпадіння даних не спостерігається.



а)  $t = f(\tau)$ ,  $W^c = f(\tau)$

б)  $dW^c / d\tau = f(W^c)$

**Рис. 7. Зіставлення експериментальних та розрахункових залежностей зміни середньої температури зразка, вологості яблук (а) та швидкості сушіння яблук (б) під час зневоднення при  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с.п.:**

1, 1' – свіжі яблука,  $t = 60$  °С, 2, 2' – бланшовані яблука  $t = 80 \dots 60$  °С

Це можна пояснити тим, що при складанні математичної моделі не можливо врахувати всі параметри та умови ведення процесу зневоднення яблук через його складність.

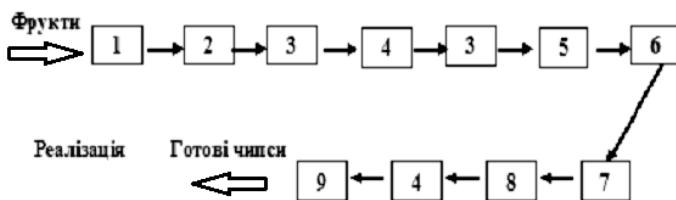
Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними не перевищує допустимі 5%. Гарне узгодження експериментальних та отриманих за моделлю розрахункових даних свідчить про адекватну математичну модель.



Дану математичну модель дифузійного тепломасоперенесення, фазових перетворень та усадки при сушінні можна використовувати при плануванні режимів ведення процесу зневоднення яблук при виробництві чипсів без тривалих та дорогих експериментів.

### 7. Енергоефективна ресурсозберігаюча теплотехнологія одержання чипсів

На підставі узагальнення результатів експериментальних досліджень розроблена енергоефективна ресурсозберігаюча теплотехнологія одержання чипсів в основу якої покладено метод швидкісного конвективного сушіння гігротермічно оброблених яблук у режимах стадійного зневоднення (рис. 8).



**Рис. 8. Технологічна схема одержання чипсів із яблук:**

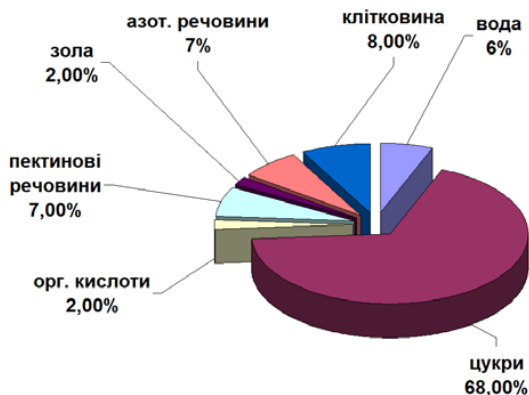
- 1 – бункер; 2 – ванна для замочування; 3 – мийна машина;
- 4 – інспекційний транспортер; 5 – машина для різки;
- 6 – апарат для гігротермічної обробки; 7 – сушильна установка;
- 8 – апарат для охолодження; 9 – пакувальне обладнання

Забезпечення якісних характеристик чипсів відбувається на кожному етапі виробництва, відповідно до умов підготовки сировини до сушіння з дотриманням режимів обробки та стадійних режимів зневоднення, а також умов пакування та зберігання чипсів. Недотримання режимів призводить до збільшення тривалості зневоднення і відповідно енергетичної складової процесу та погіршує якість чипсів.

Щоб уникнути псування готового продукту, упаковані чипси із яблук рекомендується зберігати в приміщеннях при відносній вологості повітря не більше 75%, температурі – не більше 20 °С із додержанням санітарних правил відповідно до розроблених технічних умов

ТУ У 10.3-05417118–053:2016 „Чипси фруктові, овочеві” протягом 12 місяців із дати виробництва.

Хімічний склад чипсів, зображений на рис. 9, свідчить про збереження цінних складових вихідної сировини. Високий вміст пектинових речовин у чипсах із яблук дозволяє віднести їх до пектиновмісних продуктів.



**Рис. 9. Хімічний склад чипсів із яблук на 100 г С.Р. [10]**  
Енергетична цінність (калорійність) 100 г чипсів із яблук не менше 754 кДж

Вживання таких продуктів підсилює захисні сили організму і сприяє його оздоровленню, вони набувають лікувально-профілактичної та направленої дії і можуть споживатися регулярно без обмеження в часі [6; 10].

Наявність вуглеводів в чипсах, як однієї з найважливіших складових повноцінного раціону харчування людини, забезпечує організм енергією та підтриманням оптимального рівня цукру в крові.

## 8. Висновки

У роботі з метою інтенсифікації тепломасообміну досліджено закономірності кінетики сушіння гігротермічно оброблених яблук у режимах стадійного зневоднення. На підставі отриманих результатів та їх узагальнення розроблено енергоефективну ресурсозберігаючу теплотехнологію виробництва чипсів із яблук, яка забезпечує отри-

мання натурального продукту без смакових добавок, ароматизаторів і стабілізаторів. Інноваційність результатів досліджень підтверджено 5 патентами України.

Під час виконання поставлених завдань було одержано наступні результати:

1. Досліджено вплив різних способів тепловологої обробки яблук на процес сушіння, органолептичні показники чипсів та їх відновлюваність. Дослідження доводять перевагу гігротермічної обробки.

2. Аналіз кінетичних закономірностей процесу сушіння яблук показав, що стадійні режими зневоднення гігротермічно оброблених яблук збільшують швидкість зневоднення у 1,8 разів та скорочують тривалість до 20% .

3. На підставі досліджень кінетики вологообміну отримано формулу для розрахунку тривалості процесу сушіння яблук при одержанні чипсів. Побудовано залежності числа Ребіндера за різних режимів, характер яких доводить доцільність поєднання стадійного режиму зневоднення та гігротермічної обробки яблук.

4. Розроблено фізичну та математичну моделі дифузійно-фільтраційного тепломасоперенесення, фазових перетворень та усадки при сушінні яблук.

5. Порівняння експериментальних та розрахункових температурних кривих, кривих кінетики та швидкості сушіння доводить адекватність розробленої математичної моделі. Розбіжність між кривими не перевищує 5%.

### Список літератури:

1. Страшинська Л.В., Ніколаєнко І.В. Маркетингові аспекти розвитку ринку снєків в Україні. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Том 23. № 1. С. 75–84.
2. Zhao Guoying (2015). CN. Patent No.104305041A.
3. Plocharski, W., Konopacka, D. (2002). *PL. Patent No. WO 2002074102*.
4. Спосіб производства пищевого продукта из яблок: пат. 10964 Беларусь: МПК<sup>8</sup> А23L 1/212, А23В 7/005. № а20060519; заявл. 26.05.2006; опубл. 30.08.2008.
5. Спосіб виробництва чипсів з яблук з цукрово-кислотним індексом 16...20: пат. № 123213 Україна: МПК А23В 7/02; F26В 3/04; F 26В 3/02; А23L 19/00. № а201600007; заявл. 04.01.2016; опубл. 26.02.2018. Бюл. № 4.
6. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини : монографія. НАН України, Ін-т техн. теплофізики. Київ: СІК ГРУП Україна, 2018. 228 с.

7. Силич А.А., Зозулевич Б.В., Поповский В.Г. Сушка плодов и винограда в туннельных сушилках. Москва : Легкая и пищевая пр-ть, 1982. с. 80.
8. Красников В.В. Кондуктивная сушка. Москва : Энергия, 1973. 288 с.
9. Гусарова О.В. Вплив видів бланшування яблук на процес зневоднення під час виробництва чипсів. *Збірник наукових праць «Прогресивні технології та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі»*. 2018. № 1(27). С. 147–156. DOI: <http://doi:10.5281/zenodo.1306519>
10. Шапар Р.О., Гусарова О.В. Вплив тепловологої обробки на кінетику сушіння пектиновмісних матеріалів. *Наукові праці ОНАХТ*, 2019. № 83(1). С. 62–66. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1419>
11. Михайлик В.А., Дмитренко Н.В., Михайлик Т.А. Влияние термического воздействия на состояние воды в растительных тканях. *Промышленная теплотехника*, 2007. Т. 29. № 7. С. 212–217.
12. Королев А.А. Разработка технологии плодоовощных чипсов : автор. дис...канд. техн. наук: 05.18.01 / ГНУ ВНИИ консервной и овощесушильной промышленности. Москва, 2013. 24 с.
13. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. Москва-Ленинград : Государственное энергетическое издательство, 1956. 464 с.
14. Ребиндер П.А. О формах связи влаги с материалом в процессе сушки. *Труды Всесоюзного совещания по интенсификации процессов и улучшения качества материалов*. Москва : Профиздат, 1958. С. 14–15.
15. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н., Кольчик Ю.Н. Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена. Киев : Наукова думка, 2014. 744 с.
16. Никитенко Н.И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах. *Инженерно-физический журнал*. 2000. Т. 23. № 4. С. 851–860.
17. Сорокова Н.М. Моделювання тепло-і масопереносу при зневодненні пористих тіл з метою оптимізації процесу сушіння : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.14.06 / ІТТФ НАН України. Київ, 2004. 20 с.

### References:

1. Strashynska, L.V. & Nikolaienko, I.V. (2017). Marketynhovi aspekty rozvytku rynku snekiv v Ukraini [Marketing aspects of snack market development in Ukraine]. *Naukovi pratsi NUKhT*. 23(1), pp. 75–84.
2. Zhao Guoying. (2015). CN. Patent No.104305041A.
3. Plocharski, W., Konopacka, D. (2002). PL. Patent No. WO 2002074102.
4. Arnaut, S. A., Lovkis, Z. V. (2006). BLR. Patent No. 10964.
5. Sniezhkin, Yu. F., Shapar, R. O. & Husarova, O. V. (2018). *UA. Patent No. 123213*.
6. Sniezhkin, Yu. F., & Shapar, R. O. (2018). *Teplomassoobminni tekhnologii pererobky pektynovmisnoi syrovyny: monohrafiia* [Heat and mass transfer technologies of processing of pectin-containing raw materials: monograph]. NAN Ukrainy, In-t tekhn. teplofizyky. Kyiv: “SIK HRUP Ukraina”, 228 p.

7. Silich, A. A., Zozulevich, B. V., & Popovskii, V. G. (1982). *Sushka plodov i vinograda v tunnelnykh sushilkakh* [Drying fruits and grapes in tunnel dryers]. Moskva: "Legkaia i pishchevaia pr-t", 80 p.

8. Krasnikov, V. V. (1973). *Konduktivnaia sushka* [Conductive Drying]. Moskva: "Energiia", 288 p.

9. Husarova, O. V. (2018). Vplyv vydiv blanshuvannia yabluk na protses znevodnennia pid chas vyrobnytstva chypsiv [Influence of types of blanching of apples on the process of dehydration during the production of chips]. *Zbirnyk naukovykh prats „Prohresyvni tekhnika ta tekhnologii kharchovykh vyrobnytstv restoranoho hospodarstva i torhivli*", no. 1(27). pp. 147–156. DOI: <http://doi:10.5281/zenodo.1306519>

10. Shapar, R. O., & Husarova, O. V. (2019). Vplyv teplovolohoi obrobky na kinytyku sushinnia pektynovmisnykh materialiv [Influence of Heat and Moisture Treatment on the Kinetics of Drying Pectin-Containing Product]. *Naukovi pratsi ONAKhT*, no. 83(1), pp. 62–66. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1419>

11. Mikhailik, V. A., Dmitrenko, N. V., & Mikhailik, T. A. (2007). Vliianie termichesko-go vozdeistviia na sostoiianie vody v rastitelnykh tkaniakh [The effect of thermal effects on the state of water in plant tissues]. *Promyshlennaia teplotekhnika*, no. 29(7), pp. 212–217.

12. Korolev, A. A. (2013). *Razrabotka tekhnologi plodoovoshchnykh chipsov* [Development of technology for fruit and vegetable chips]: avtor dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.18.01. GNU VNII konservnoi i ovoshchesushilnoi promyshlennosti. Moskva, 24 p.

13. Lykov, A. V. (1956). *Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki* [Heat and mass transfer in drying processes]. Moskva-Leningrad: "Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo", 464 p.

14. Rebinder, P. A. (1958). O formakh sviazi vlagi s materialom v protsesse sushki [About forms of moisture and material bonding during drying]. *Trudy Vsesoiuznogo soveshchaniia po intensifikatsii protsessov i uluchsheniia kachestva materialov*. Moskva: "Profizdat".

15. Nikitenko, N. I., Snezhkin, Iu. F., Sorokova, N. N., & Kolchik, Iu. N. (2014). *Molekuliarno-radiatsionnaia teoriia i metody rascheta teplo- i massobmena* [Molecular radiation theory and methods for calculating heat and mass transfer]. Kiev: "Naukova dumka", 744 p.

16. Nikitenko, N. I. (2000). Problemy radiatsionnoi teorii teplo- i massoprenosa v tverdykh i zhidkikh sredakh [Problems of the radiation theory of heat and mass transfer in solid and liquid media]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, no. 23(4), pp. 851–860.

17. Sorokova, N. M. (2004). *Modeliuvannia teplo-i masoprenosu pry znevodnenni porystykh til z metoiu optymizatsii protsesu sushinnia* [Modelling of heat and mass transfer during dehydration of porous bodies in order to optimize the drying process]: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.06. ITTF NAN Ukrainy. Kyiv, 20 p.