

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ЕКОЛОГІЯ

¹І. О. Гузьова, ²М. П. Пелех¹Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімічної інженерії²Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра СагайдачногоТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА АПАРАТУРНЕ ОФОРМЛЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО МЕТОДУ СУШІННЯ ЦУКАТІВ<https://doi.org/>

Розглянуто процес сушіння цукатів із груш, який відбувається профільтровуванням теплового агента в напрямку “перфорована перегородка – шар цукатів”. Отримано кінетичну криву сушіння та розрахований тепловий баланс процесу на основі диференційного рівняння нестационарного тепломасообміну. Доведено, що накопиченої під час сушіння теплової енергії в нижніх шарах цукатів буде достатньо для досушування верхніх шарів. Розраховано енергетичний ефект, отриманий від впровадження нового методу сушіння. Запропоновано та розраховано установку для енергоефективного методу сушіння цукатів.

Ключові слова: цукати, сушильне обладнання, тепломасообмін, енергоефективний метод, тепла енергія.

Вступ

Споживання продуктів рослинного походження має значний позитивний вплив на життя та здоров'я людини. Фрукти та овочі в свіжому вигляді мають короткий строк зберігання. У зв'язку з цим, в сучасному світі актуальною є тема розроблення та впровадження новітніх методів переробки сировини, а також створення новітнього обладнання для ефективних способів переробки.

Виробництво цукатів із фруктів та овочів має дві основні технологічні стадії: насичення сировини цукрозою та сушіння насиченої сировини. Сушіння є найенергозатратнішою стадією. Тому проблема інтенсифікації сушіння при збереженні якості готового продукту заслуговує на особливу увагу.

У сучасних виробництвах існує багато способів сушіння цукатів та методів їх вдосконалення. Найпоширенішими з них є видалення вологи з середини цукатів під дією електричного поля або комбінованим методом конвективно-електричним [1]. Також широко розповсюджені методи мікрохвильового сушіння [2], комбінованого мікрохвильового-конвективного сушіння [3]

та осматичного зневоднення [4]. Такі способи сушіння скорочують тривалість процесу порівняно з традиційним конвективним сушінням, проте вони є енергозатратними, особливо для цукатів, в яких міститься переважно зв'язана волога.

Обладнанням для сушіння цукатів є здебільшого камерні сушарки, в яких сировина сушиться у стаціонарному шарі [5]. В таких сушарках продукт не руйнується та не втрачає своєї форми. Для усунення проблеми прилипання продукту до стінок обладнання автори [6] пропонують корпуси сушарок та їхні внутрішні елементи виготовляти з низькоенергетичних матеріалів, а автори [7–8] для усунення витікання сиропу пропонують виготовляти дренажні піддони та дренажні рухомі стрічки. Проте недоліком камерних сушарок є тривалість та енергозатратність процесу.

Саме тому створення енергоефективних методів сушіння та новітнього обладнання для його реалізації є актуальним завданням.

Метою досліджень є: на основі теоретичних та експериментальних досліджень кінетики

та теплового балансу процесу сушіння цукатів із груш розробити енергоефективний метод сушіння, а також спроектувати та розрахувати обладнання для реалізації запропонованого методу.

Відповідно до поставленої мети, визначено завдання дослідження: отримати експериментальні дані кінетики сушіння цукатів із груш; розрахувати тепловий баланс на основі рівняння нестационарного тепломасоперенесення; на основі виконаних розрахунків підтвердження доцільності запропонованого методу сушіння; визначити енергозатрати запропонованого методу сушіння; спроектувати та розрахувати обладнання для запропонованого методу сушіння цукатів.

Матеріали та методи досліджень

Об'єктом дослідження були плоди груші сорту "Бере Боск". Плоди видовжено-грушоподібні. Шкірочка тонка, жовта з ніжно-золотистою іржистістю. М'якуш білий або з жовтуватим відтінком, соковитий, ніжний, маслянистий, солодкий, з легкою кисличкою та приємним мигдальним запахом, високих смакових якостей.

Приготування цукатів здійснювали за технологією, наведеною в літературі [9]. З плодів груші нарізали скибки розміром 20x20x20 мм, витримували 3 години в розчині лимонної кислоти ($\text{pH} = 3$) за температури 25 °С, витримували в цукровому сиропі (70 % мас.) температурою 80 °С до повного його охолодження. Потім сироп зціджували, нагрівали до 80 °С і знову заливали ним цукати. Так повторювали три рази до повного насичення цукатів цукром. Під час насичення фіксували зміну концентрації цукру в цукаті в часі. Повне насичення відповідає часу, в момент якого концентрація цукру в цукатах стає незмінною. Після закінчення процесу цукати ставали прозорими на вигляд, з твердою консистенцією.

Приготовлені цукати температурою 80 °С, відділивши від рідкої фази, сушили. Скибки розкладалися в контейнері діаметром 0,1 м, виготовленому з фторопласту (рис. 1) на чотирьох перфорованих перегородках по 30 штук на кожну. Висота контейнера 0,12 м. Сушіння відбувалося профільтруванням гарячого теплового агента (100 °С) зі швидкістю 6 м/с, за методикою, наведеною в [10]. Тепловим агентом було повітря. Профільтрування відбувалося в на-

прямку "перфорована перегородка – шар цукатів" (рис. 1).

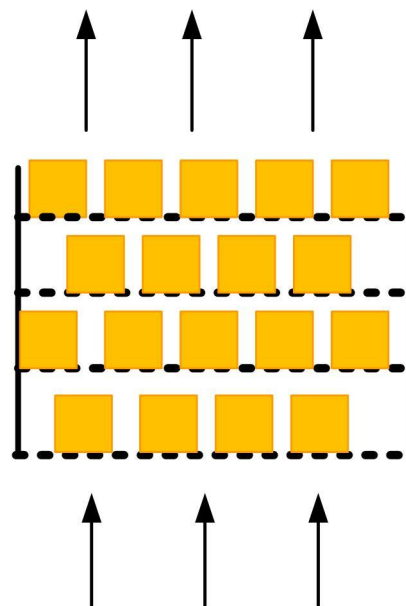


Рис. 1. Схема контейнера для сушіння цукатів

Через задані проміжки часу фіксували зміну ваги контейнера за допомогою електронної ваги AXIS-3000 з точністю до 0,01 г. Дослід тривав до досягнення цукатами вологості 25 %. Така вологість відповідає технічним умовам якості цукатів [9]. Над матеріалом і під перфорованою перегородкою встановлювали ХК-термомпари для вимірювання температури теплового агента за допомогою восьмиканалного інтелектуального перетворювача РТ-108. Після закінчення експерименту готові цукати з груш зберігали за умов кімнатної температури в сухій упаковці 6 місяців. Цукати мали тверду консистенцію, не виявили ознак плісняви та бродіння, не злипалися.

Результати досліджень та їх обговорення

Кінетична крива сушіння цукатів із груш масою 550 г за температури теплового агента $t=100$ °С наведена на рис. 2. З рис. 2 бачимо, що сушіння цукатів відбувається в другому періоді, тобто в періоді спадаючої швидкості сушіння. В такому разі з середини та поверхні цукатів видаляється зв'язана волога. Час сушіння до кінцевої вологості 25 % (мас.) триває 2700 с, при цьому випаровується 282 г вологи.

На рис. 3 зображено криву швидкості сушіння, що відповідає кінетичній кривій на рис.

2. Як бачимо з рис. 3, в досліджуваному матеріалі відсутній період інтенсивного поверхневого випаровування вільної вологи. Швидкість сушіння в такому випадку визначається швидкістю дифузії в середині матеріалу. В середині рослинної сировини відбувається перенесення вологи у вигляді рідини через пори і тріщини клітинних стінок у міжклітинний простір і далі на поверхню рослинного матеріалу. Таке масоперенесення рідини здійснюється внутрішньою молекулярною дифузиею. З поверхні скибок цукату волога випаровується в тепловий агент у вигляді пари.

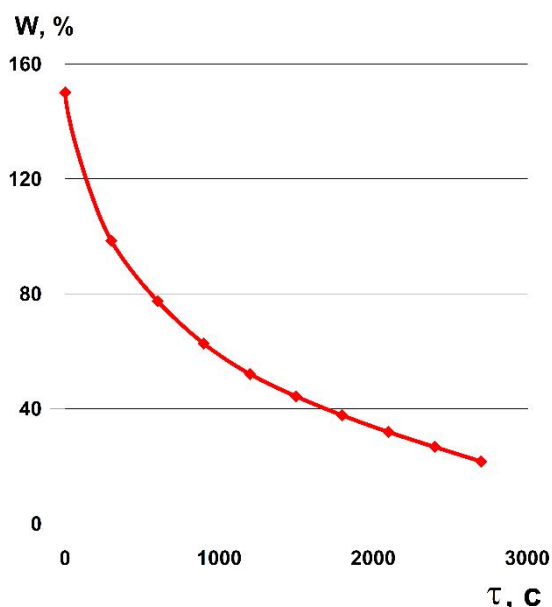


Рис. 2. Кінетична крива сушіння цукатів із груш

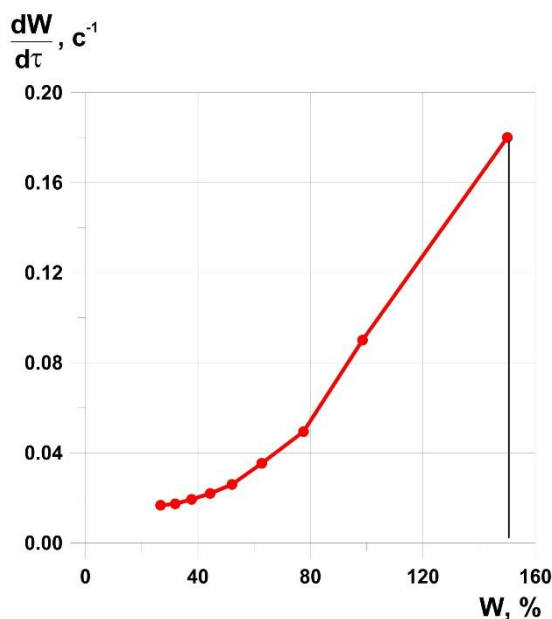


Рис. 3. Крива швидкості сушіння цукатів із груш

Як бачимо з рис. 2–3, процес сушіння цукатів є довготривалим і, як наслідок, енергозатратним. Саме тому автори статті запропонували спосіб зменшення енергетичних затрат у процесі сушіння цукатів із груш. З цією метою проведено аналіз витрат теплоти, що затрачається на процес сушіння.

Процес сушіння профільтовуванням теплового агента в напрямку “перфорована перегородка – шар цукатів” є складним нестационарним тепломасообмінним процесом, в якому параметри змінюються періодично і в координатах, і в часі [11–13].

Рівняння теплового балансу на елементарній ділянці dH у вигляді диференціального рівняння періодичного процесу фільтраційного сушіння в нерухомому шарі цукатів матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 S \cdot dH \cdot \rho_{cand} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot r \cdot d\tau &= \\
 = S \cdot dH \cdot \rho_{cand} \cdot \frac{\partial t_{cand}}{\partial \tau} \cdot c_{cand} \cdot d\tau + &(1) \\
 + S \cdot dH \cdot \rho_{t.a.} \cdot \frac{\partial t_{t.a.}}{\partial \tau} \cdot c_{t.a.} \cdot d\tau &
 \end{aligned}$$

де S – площа поперечного перерізу шару, m^2 ; dH – висота елементарної ділянки шару, m ; ρ_{cand} – густина цукатів, kg/m^3 ; $\frac{\partial W}{\partial \tau}$ – зміна вологовмісту теплового агента в часі за час $d\tau$; r – питома теплота пароутворення $Dж/kg$; $\frac{\partial t_{cand}}{\partial \tau}$ – зміна температури вологого цукату в часі за час $d\tau$; c_{cand} – теплоємність цукату $Dж/(kg \cdot K)$; $\rho_{t.a.}$ – густина теплового агента, kg/m^3 ; $\frac{\partial t_{t.a.}}{\partial \tau}$ – зміна температури теплового агента в часі за час $d\tau$; $c_{t.a.}$ – теплоємність теплового агента $Dж/(kg \cdot K)$.

Результати розрахунків зміни кількості теплоти теплового агента ($Q_{T.a.}$), кількості теплоти, накопиченої шаром груші ($Q_{шару}$) та кількості теплоти, витраченої на випаровування вологи ($Q_{вип}$) в часі (τ) для цукатів із груш за рівнянням (1), наведеним у таблиці.

Як бачимо з таблиці, на момент часу 1800 с маємо кількість енергії, накопиченої шаром груші – $Q_{шару} = 62,64$ кДж, тоді як на випаро-

вування вологи до досягнення матеріалом кінцевої вологості 25 % необхідно $Q_{\text{вип}} = 28.82 + 25.82 = 54.64$ кДж. Це означає, що на момент часу 1800 с, кількості енергії, накопиченої шаром груші буде достатньо для випаровування такої кількості вологи, яку необхідно видалити за наступні 500 с.

Зміна кількості теплоти в часі для цукатів із груш

τ , с	$Q_{\text{шару}}$, кДж	$Q_{\text{вип}}$, кДж	$Q_{\text{т.а.}}$, кДж
0	139.3	0	0
300	119.58	259.65	214.64
600	93.38	104.66	55.0
900	76.28	73.71	41.59
1200	70.61	52.72	40.24
1500	66.61	38.72	29.51
1800	62.64	32.72	24.15
2100	58.45	28.82	20.12
2400	54.994	25.82	17.44

З огляду на зональний механізм сушіння, бачимо, що зона масообміну переміщається в напрямку руху теплового агента. Через певні проміжки часу з'являється шар матеріалу, який не бере участі в тепломасообмінному процесі і акумулює в собі теплову енергію.

Враховуючи це, доцільно використати акумульовану енергію висушеного шару для досушування вологого матеріалу поданням холодного теплового агента. Так, внаслідок такої організації процесу буде змога зекономити частину теплової енергії та скоротити час сушіння цукатів.

Саме тому автори запропонували після досягнення часу сушіння 1800 с подати холодний агент з температурою 20 °С і проводити сушіння до кінцевої вологості холодним агентом. У такий спосіб сушіння економія теплоти теплового агента, як видно з табл. 1, становитиме: $Q_{\text{т.а.}} = 20.12 + 17.44 = 37.56$ кДж.

Визначимо кількість енергії на одиницю маси випарованої вологи, яку дає змогу зекономити запропонований автором енергозберігаючий метод сушіння:

$$q = \frac{Q_{\text{т.а.}}}{m_{\text{води}}} = \frac{37.56}{0.282} = 133.2 \text{ кДж/кг}_{\text{води}}. \quad (2)$$

Так припинення подачі гарячого теплового агента в певний момент часу, та охолодження нижніх шарів цукатів холодним агентом і

одночасне досушування верхніх шарів цукатів дасть змогу скоротити енергетичні затрати на процес на 133,2 кДж/кг_{води}.

Запропонований авторами спосіб сушіння дає змогу прогнозувати енергетичні затрати при проектних розрахунках сушильного обладнання.

Розрахуємо установку, запропоновану авторами статті [14] для сушіння рослинної сировини. Схему установки зображено на рис. 4.

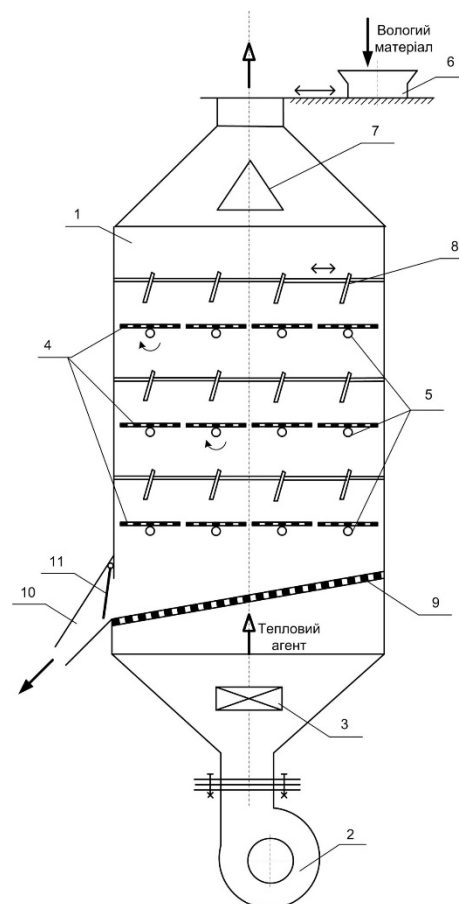


Рис. 4. Установка для сушіння цукатів:
 1 – сушильна камера; 2 – вентилятор; 3 – калорифер;
 4 – поярусно розташовані перфоровані секції;
 5 – осі; 6 – завантажувальний засіб; 7 – розподільчий конус;
 8 – вирівнювач; 9 – перфорована пластина;
 10 – розвантажувальний засіб; 11 – підпружинена заслінка

Цукати завантажуються через бункер 6 на нижній (перший по ходу руху теплового агента) ярус окремих перфорованих секцій 4. У цей момент верхні лотки знаходяться під кутом до площини. Коли перший ярус повністю завантажений вологим матеріалом, другий ярус займає горизонтальне положення і на нього починає

завантажуватися наступна порція вологого матеріалу. Так аналогічно до останнього ярусу. Коли сушильна камера 1 повністю заповнена вологим матеріалом, вмикається вентилятор 2 для підведення теплового агента та калорифер 3 для його нагріву. Тепловий агент рухається знизу вгору, крізь перфоровану пластину 9 та яруси окремих перфорованих секцій 4, на яких розміщений вологий матеріал та виходить через завантажувальний засіб 6. Так відбувається зональний процес сушіння.

У початковий момент часу контакту теплового агента з скибками цукатів на нижньому ярусі температура падає до температури мокрого термометра. Тобто, в такий момент рушійна сила процесу сушіння є максимальною.

Коли матеріал, що знаходиться на нижньому ярусі досягає своєї кінцевої вологості й його температура наближена до температури теплового агента, починається подача холодного агента після відімкнення калорифера 3. Після досягнення матеріалу на нижньому ярусі температури холодного агента (20 °С), окремі секції, що знаходяться на осях 5, обертаються навколо своєї осі і матеріал зсипається з секцій на перфоровану пластину 9, з якої висипається через розвантажувальний засіб 10, оснащений підпружиненою заслінкою 11. В той момент часу, коли окремо розташовані секції нижнього ярусу зайняли горизонтальне положення, на них зсипається вологий матеріал із верхнього ярусу і починається подача гарячого теплового агента (100 °С).

Процес повторюється, поки не звільниться останній ярус, на який в той самий момент часу завантажуватиметься вологий матеріал із завантажувального засобу 6. Над перфорованими лотками з періодичною частотою працюють вирівнювачі 8, що створюють зворотньопоступальний рух. Вирівнювачі регулюються по висоті між ярусами залежно від сировини, що сушиться.

Установку розраховують на 40 кг сировини, що відповідає повному її завантаженню.

Площу поперечного перетину сушарки розраховуємо за рівнянням:

$$S = \frac{L}{\rho_{\text{ср}} \cdot w} = \frac{4.4}{0.9 \cdot 6} = 0.8 \text{ м}^2$$

Враховуючи те, що сушарка має прямокутне січення конструктивно приймаємо:

$$S = 0.8 \times 1 \text{ м}.$$

Розрахуємо число отворів перфорованої секції:

$$n = S \cdot F_c / d_0^2 = 0.8^2 \cdot 0.1 / (5 \cdot 10^{-3})^2 = 2560$$

Зважаючи на розміри частинок цукатів, приймаємо [9, 14]:

$F_c = 0.1$ – доля живого перерізу решітки; $d_0 = 5$ мм – діаметр отворів у розподільчій решітці.

Кількість перфорованих секцій в одному ярусі приймаємо конструктивно виходячи з площі поперечного перерізу сушарки:

$$S = 0.8 \times 1 \text{ м}$$

кількість перфорованих секцій	4 шт
відстань між секціями	4 мм
ширина однієї секції	195 мм

Розташування перфорованих секцій в одному ярусі зображено на рис. 4.

Згідно з оглядом літературних джерел [9, 14] більше 4–5 ярусів приймати недоцільно у зв'язку з тим, що це призведе до ускладнення конструкції та нерівномірності сушіння.

За умов наявності перфорованої пластини 9 (рис. 4) приймаємо кількість ярусів 4 шт.

За умов дотримання правил масштабних переходів відстань між ярусами розраховуємо:

$$\frac{0.8}{h} = \frac{0.1}{0.03}$$

$$h = 250 \text{ мм}$$

За наявністю вирівнювачів 8 (рис. 4) приймаємо

$$h = 2 \cdot 250 \text{ мм} = 500 \text{ мм}$$

Висота від першого до четвертого ярусу з врахуванням кута нахилу перфорованої пластини 9 (рис. 4), а також відстані до встановлення днищ сушарки:

$$H = 6 \cdot 500 \text{ мм} = 3000 \text{ мм} = 3 \text{ м}$$

Отже, отримуємо основні конструктивні розміри розробленої авторами сушарки:

Кількість ярусів	4 шт
Відстань між ярусами	500 мм
Загальна висота робочої частини сушарки	3 м
Площа поперечного сушарки	0,8x1 м

Розрахуємо кількість теплоти, яку можливо заощадити в запропонованій установці під час сушіння цукатів із груш, згідно із запропонованим авторами способом сушіння. За рівнянням (2), на 40 кг цукатів із груш отримаємо:

$$Q = q \cdot 40 = 133.2 \cdot 40 = 5328 \text{ кДж}.$$

Висновки

Для вдосконалення виробництва цукатів запропонований спосіб сушіння в стаціонарному шарі в напрямку “перфорована перегородка – шар цукатів”. Отримані кінетичні криві сушіння цукатів із груш вказують на наявність у них лише зв’язаної вологи і, як наслідок, на довготривалість процесу. Для зменшення енергозатрат під час сушіння цукатів з груш запропонований новий метод сушіння, який полягає в тому, що до кінцевого вологовмісту сушиться частина шару, акумульованої теплоти якої достатньо для досушування всього шару. На основі рівняння нестационарного тепломасообміну виконані розрахунки зміни кількості теплоти теплового агента, кількості теплоти, накопиченої шаром груші та кількості теплоти, витраченої на випаровування вологи в часі. На основі розрахунків доведено, що припинення подачі гарячого теплового агента в момент часу 1800 с та охолодження нижніх шарів цукатів холодним агентом і одночасне досушування верхніх шарів цукатів дасть змогу скоротити енергетичні затрати на процес на 37,56 кДж. Кількість питомої заощадженої енергії при цьому становить 133,2 кДж/кг_{води}.

Проведений конструктивний розрахунок установки, для енергоефективного методу сушіння цукатів. Також розраховано кількість теплоти ($Q = 5328$ кДж), яку можливо заощадити в запропонованій установці під час сушіння 40 кг цукатів із груш, за запропонованим авторами способом сушіння.

References

1. Chanpreet Singh, Nitin Saluja & Rajeev Kamal Sharma. (2019). A computation-driven, energy-efficient and hybrid of microwave and conventional drying process for fast gooseberry candy production. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 53(4), 259-275. <https://doi.org/10.1080/08327823.2019.1677431>
2. Waraporn Klinbun & Phadungsak Rattanadecho. (2019). Effects of power input and food aspect ratio on microwave thawing process of frozen food in commercial oven. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 53(4), 225–242. <https://doi.org/10.1080/08327823.2019.1677430>
3. O. Alves-Filho & Y. H. Roos. (2007). Advances in Multi-Purpose Drying Operations with Phase and State

Transitions. *Drying Technology*, 24(3), 383–396. <https://doi.org/10.1080/07373930600564357>

4. Catherine Bonauï, Elisabeth Dumoulin, Anne-Lucie Raoult-Wack, Z. Berk, J. J. Bimbenet, F. Courtois, G. Trystram & J. Vasseur. (2007). Food Drying and Dewatering. *Drying Technology*, 14(9), 2135–2170.

<https://doi.org/10.1080/07373939608917199>

5. Atamanyuk, V., Huzova, I., Gnativ, Z., Mykychak B. (2016). Selection of optimal method of forming a layer of candied fruits during filtration drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11(83)), 10–15.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81409>

6. Blesh Bhandari & Tony Howes. (2007). Relating the Stickiness Property of Foods Undergoing Drying and Dried Products to their Surface Energetics. *Drying Technology*, 23(4), 781–797. doi: 10.1081/drt-200054194

7. William L. Kerr & Audrey Varner. (Published online: 30 May 2019). Chemical and physical properties of vacuum-dried red beetroot (*Beta vulgaris*) powders compared to other drying methods. *Drying Technology*.

doi: 10.1080/07373937.2019.1619573

8. Z. Hardy & V. A. Jideani. (2017). Foam-mat drying technology. A review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12), 2560–2572.

doi: 10.1080/10408398.2015.1020359

9. Malezhyk I. F., Dubkovetskyi I. V., Bandurenko H. M., Strelchenko L. V. (2015). Deklaratsiinyi patent na korysnu model №103371. Sposib vyrobnytstva yabluchnykh tsukativ. Ukraina [in Ukrainian].

10. Atamaniuk V. M., Ya. M. Humnytskyi (2013). Naukovi osnovy filtratsiynoho sushinnia dyspersnykh materialiv. Monohrafiia. Lviv: Vyavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 276 s. [in Ukrainian].

11. Atamanyuk, V., Huzova, I., Gnativ, Z. (2018). Intensification of Drying Process During Activated Carbon Regeneration. *Chemistry & Chemical Technology*, 12(2), 263–271.

<https://doi.org/10.23939/chcht12.02.263>

12. Matsuska, O., Paranyak, R., Gumnitskii, Y. (2010). Adsorption of wastewater components by natural sorbents. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 32(4), 218–222.

<https://doi.org/10.3103/s1063455x10040053>

13. Sabadash, V., Gumnitsky, Y., Mylyanyk, A., Romaniuk, L. (2017) Simultaneous Sorption of Copper and Chromium Cations to Wastewater Treatment. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(1), 129–132 [in Ukrainian].

<https://doi.org/10.15421/40270129> Actions

14. Atamaniuk V. M., Huzova I. O., Humnytskyi Ya M., Symak D. M. (2014). Patent Ukrainy na korysnu model № 86857. Ustanovka dlia sushinnia roslynnoi syrovyny. Ukraina [in Ukrainian].

I. O. Гузьова, М. П. Пелех

¹I. O. Huzova, ²M. P. Pelekh

¹Lviv Polytechnic National University,

Department of Chemical Engineering

²Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy

**THEORETIC SUBSTANTIATION AND APPARATUS DESIGN
FOR THE ENERGY-SAVING METHOD DURING CANDIED FRUITS DRYING**

The drying process of candied pears was researched. The process is a filtration of a heat agent in the direction of “perforated septum – candied fruit layer”. A kinetic drying curve, based on the differential equation of dynamics heat and mass transfer, was obtained and the heat balance of the process was calculated. The following was proved: the accumulated thermal energy in the lower layers of candied fruit is enough to dry the upper layers. The energy effect is calculated; it is obtained from the introduction of a new drying method. Equipment for the implementation of the energy-saving method of drying candied fruit is calculated.

Key words: candied fruits, drying equipment, heat transfer, energy-saving method, thermal energy.