

**GRINDING AND FRACTIONATION  
OF DRIED PLANT MATERIALS**

**ПОДРІБНЕННЯ ТА ФРАКЦІОНУВАННЯ  
СУШЕНИХ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ**

**Yurii Sniezhkin<sup>1</sup>**

**Raisa Shapar<sup>2</sup>**

**Olena Husarova<sup>3</sup>**

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-049-0-35>

**Abstract.** In the absence of large-scale pectin production in Ukraine, pectin-containing powders are an alternative source. They are used as natural additives in the manufacture of health products, due primarily to the presence of pectin, as well as other useful natural components of raw materials. *The purpose* of the work is to conduct research on the dispersion and fractionation of dried plant materials and to determine the energy-saving regimes of these processes. The task of the research is to develop optimal modes of dispersion of dried plant materials; determine the dependence of the micromill performance and power consumption on the rotation speed of the dispersant rotor; to establish the influence of the load on the sieve and the scattering time on the fractionation process. *Objects, equipment and research methods.* Dried pectin-containing apples and table beets were used as research objects. Studies of the dispersion process were performed on an micromill (8-MM), the coarse part was ground on a disintegrator (ДЕЗІ), the study of the dispersed composition of powders was carried out on the device 029. The paper analyzes the existing methods of grinding and equipment for its implementation. The analysis showed that percussion mills are the most suitable for grinding dried pectin-containing apples and table

---

<sup>1</sup> Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine  
<sup>2</sup> Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Leader Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine  
<sup>3</sup> Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

beets. The dispersed composition of pectin-containing powders is determined in the article. The influence of material loading on the sieve and scattering time on the yield of the fine fraction was investigated. It is proved that the scattering process is more influenced by the scattering time. The paper graphically shows the effect of rotor speed on the equivalent particle diameter and powder dispersion; differential and integral particle distribution curves depending on rotor speed and scattering time for apple and beet powders; the dependence of micromill productivity and power consumption on the speed of the disperser rotor, etc. The optimal operating speed of the rotor is 50 m/s. At this speed, energy consumption for grinding dried materials is minimal. It is proved that the fractionation process almost does not depend on the load on the sieve, but depends on the scattering time. It is impractical to increase the process duration over 3 minutes. Increasing the time to 4 minutes increases the mass of the fine fraction by only 2...5%. The yield of the fine fraction of powders according to the optimal modes of dispersion and separation is: apple – 65...68%, beet – 62...65%. The possibility of regrinding in order to increase the fine fraction yield is shown. *Conclusions.* According to the results of the research, the optimal dispersion regimes, the dependence of micromill productivity and power consumption on the dispersant rotor speed, as well as the effect of load on the sieve and scattering time of apple and beet powders on the fractionation process are determined. On the basis of the conducted researches energy-saving conditions of processes of dispersion and fractionation of pectin-containing powders and proper work of the corresponding equipment are defined.

### 1. Вступ

Одним з найбільш важливих факторів, що впливає на стан здоров'я людей, є харчування. Сучасний стиль і ритм життя, характер праці, зростання стресового навантаження зумовлює доцільність використання сушених фруктів і овочів, здебільшого у порошкоподібній формі, як натуральні добавки. Незважаючи на необхідність додаткового технологічного обладнання і додаткових енерговитрат на отримання харчових порошоків, така продукція має попит при виготовленні оздоровчих продуктів.

Агрегатний стан порошоків, їхня висока вологопоглинаюча здатність сприяє підвищенню швидкості біохімічних і дифузійних процесів за

рахунок збільшення поверхні контакту та взаємодії з іншими інгредієнтами та забезпечує максимальне витягання пектинових, барвних й інших біологічно активних речовин, тим самим виключаючи використання синтетичних барвників і наповнювачів у харчових виробках.

Структурно-механічні властивості сушеного рослинного матеріалу зумовлені складом вихідної сировини, типом і формами зв'язку вологи з матеріалом, механізмом її видалення під час зневоднення.

Величина залишкової вологості матеріалу істотно впливає на процес подрібнення зневодненого матеріалу. Згідно [1; 2] при досягненні матеріалом вологості  $W_3 = 10 \dots 12 \%$  при роздавлюванні зразки рослинного матеріалу сплющуються й одержати порошкоподібний продукт неможливо. При вологості  $W_3 = 6 \dots 8 \%$  зразки кришаться до порошкоподібної маси за мінімального руйнівного навантаження. Зневоднювання матеріалу до  $W_3 < 6 \%$  крім збільшення енерговитрат призводить до різкого збільшення міцності матеріалу і зростання величини руйнівного навантаження, що пояснюється появою значної кількості поверхневої енергії при видаленні адсорбційної вологи і тому матеріал, висушений до  $W_3 < 6 \%$ , вимагає суттєвого збільшення руйнівної сили.

Отже, оптимальна величина залишкової вологості для одержання харчових порошоків дорівнює  $6 \dots 8 \%$ . Це та вологість, коли матеріал втрачає пружньо-пластичні властивості та перетворюється в крихке тіло.

Для одержання порошкоподібного матеріалу висушений рослинний матеріал детермопластифікують (охолоджують), подрібнюють (диспергують) та фракціонують. З огляду на те, що по закінченню сушіння температура матеріалу дорівнює  $55 \dots 65^\circ\text{C}$ , сушені продукти набувають термопластичності за рахунок вмісту пектинових речовин і цукрів, а тому, при наступному здрібнюванні, схильні до злипання і налипання на робочі поверхні подрібнюючих пристроїв. Для уникнення термопластичності та забезпечення якісного подрібнення й фракціонування при мінімальних енерговитратах, нашими попередніми дослідженнями [3] обґрунтовано доцільність проведення процесу охолодження сушеного матеріалу та встановлено оптимальні параметри охолоджуваного повітря. Для детермопластифікації висушеного матеріалу в розроблених нами сушильних установках передбачено зону охолодження, в якій автоматично підтримуються необхідні параметри охолоджуваного повітря. Під час здрібнювання спостерігається

вивільнення значної кількості енергії, що нагріває матеріал і робочі деталі подрібнюючих пристроїв. Для запобігання цьому робочу камеру пристрою обладнано охолоджувальною сорочкою.

**Мета роботи** полягає у проведенні дослідження диспергування та фракціонування сушених рослинних матеріалів і визначення енергозберігаючих режимів цих процесів.

Для досягнення мети необхідно вирішити **наступні завдання**:

- розробити оптимальні режими диспергування сушених рослинних матеріалів на прикладі пектиновмісних яблук і столових буряків;
- визначити залежність продуктивності мікромлина і споживаної потужності від швидкості обертання ротора диспергатора;
- встановити вплив навантаження на сито і часу розсіювання на процес фракціонування.

## **2. Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Відомо, що твердий матеріал можна подрібнити до часточок бажаного розміру роздавлюванням, розколюванням, розламуванням, різанням, розпилуванням, стиранням, ударом і різноманітним комбінуванням цих засобів [4; 5].

При виборі машин для подрібнення враховують дисперсність, яку необхідно одержати, розміри вихідного матеріалу, його структурно-механічні властивості (твердість, пластичність, міцність), температурні характеристики, реакційну спроможність і її зміну при подрібненні, а також можливий ступінь забруднення матеріалу продуктами зносу млина і тіл тощо [4].

Переважну частину матеріалів подрібнюють у млинах, в яких реалізується звичайна механічна руйнація. Їх порівняно просте конструктивне оформлення поєднується з надійністю й економічністю. Млини різняться також за призначенням: одні з них пристосовані для грубого здрібнювання, інші – для тонкого. Діапазон дисперсності, який досягається у кожній машині, звичайно буває великий, проте, враховуючи особливостей конструкції, кожному із них властива певна дисперсність матеріалу, при якій помел найбільше ефективний і економічний [4].

Подрібнення шляхом розколювання чи розламування відбувається під дією на тіло зосереджених навантажень. При цьому виникають місцеві напруги, які призводять до поділення тіла на частини. Подріб-

нювачі, які діють на принципі розколювання і розламування, ефективні при крупному і середньому здрібнюванні. Це шокові, конусні та зубовалкові дробарки.

У подрібнювачах роздавлюючої дії руйнація матеріалу відбувається при роздавлюванні між двома робочими поверхнями. Хоча в основу дії цих машин покладено такий самий спосіб здрібнювання, у конструктивному відношенні вони значно відрізняються. Головною їхньою відзнакою є положення робочих елементів і принцип створення зусиль, що роздавлюють: в одних ці зусилля створюються пружинами, в інших – відцентровими силами. До подрібнювачів роздавлюючої дії належать гладковалкові дробарки, а також роликово-кільцеві вертикальні та горизонтальні млини.

У подрібнювачах стираючо-роздавлюючої дії ефект досягається за рахунок стиску матеріалу між стискальними поверхнями й одночасно повороту однієї з поверхонь щодо іншої. До них належать жорна, бігуни, катково-тарілчасті, куле-кільцеві та бісерні млини [5].

У подрібнювачах ударного способу дії здрібнення матеріалу здійснюється внаслідок дії ударних навантажень. Ці навантаження виникають при падінні на матеріал тіл, що молотять, зіткненні матеріалу, що швидко летить, з нерухомою поверхнею, зіткненні матеріалу та тіл, що молотять, в польоті, зіткненні в польоті самих частинок одна з одною. До подрібнювачів ударного способу дії належать молоткові, відцентрові, відцентрово-кульові, барабанні, пневматичні та струминні млини.

Найчастішого застосування здобули чотири типи млинів: обертові кульові, вібраційні, ударні та струминні. Ефективність їхньої роботи, економічність та інтервал дисперсності, у якому вони дають найкращі показники, залежать від таких чинників, як матеріали стінок і тіл, що молотять, розміри і кількість куль, у випадку струминної – швидкість і запиленість газу, у випадку вібраційної – частота й амплітуда коливань тощо.

У загальних рисах із названих чотирьох типів млинів під час помелу абразивних матеріалів обертовий кульовий млин найбільш економічний, він дозволяє одержувати продукт такої ж тонкості, що й струминні млини [4]. Для дуже тонкого здрібнювання призначені вібраційні млини, але здрібнений матеріал у них забруднюється продуктами зносу тіл, що молотять. У струминному млині знос мінімальний, але

великі втрати матеріалу, який уноситься відпрацьованим газом. Млини ударної дії, так звані дезінтегратори, придатні для здрібнювання матеріалів, абразивність яких достатньо мала. Тому вони рекомендовані для подрібнення висушених рослинних матеріалів.

Аналіз існуючих методів подрібнення та млинів для його проведення показав, що для подрібнення висушених пектиновмісних яблук та столових буряків найбільш придатні млини ударного способу дії.

### 3. Об'єкти, обладнання та методи досліджень

Об'єктами досліджень обрано сушені пектиновмісні яблука та столові буряки з залишковою вологістю  $W_3 = 6...8\%$ .

Дослідження процесу диспергування проводили на мікрмлині 8-ММ, основним вузлом якого є робоча камера, у якій обертається ротор з укріпленими на ньому молотками. Для визначення оптимальних режимів проведення процесу диспергування за допомогою змінних шестірень змінювали швидкість обертання ротору.

Вплив швидкості ротора мікрмлини 8-ММ на споживану потужність  $N$  і продуктивність  $Q$  для сушених матеріалів вивчали за методикою, що описана в роботі [2]. Під час проведення диспергування фіксували масу подрібненого матеріалу, час подрібнення і потужність.

Для збільшення виходу дрібнодисперсної фракції крупнодисперсну частину додатково подрібнювали на дезінтеграторній установці ДЕЗІ. Подрібнення здійснювалось за рахунок ударної обробки матеріалу в діапазоні швидкостей зіткнень до 145 м/с (короткочасно до 200 м/с) шляхом зіткнення частинок матеріалу з пальцями швидкообертаючих дисків – роторів. Продуктивність дозатора регулювалась зміною швидкості обертання шнеку в інтервалі 30...130 об/хв.

Вивчення дисперсного складу порошоків здійснювали на приладі 029. Для аналізу дисперсного складу подрібнений порошок просіювали на комплекті сит, укріплених на столику, який здійснює зворотно-поступальний рух та зібраних у певній послідовності: зверху найкрупніше зі стороною квадрата 2,5 мм, а знизу – найдрібніше зі стороною квадрата 0,05 мм. Фракціонування здійснювали на ситах зібраних у послідовності: № сит – 2,5; 1,6; 1; 0,63; 0,4; 0,315; 0,25; 0,2; 0,16; 0,1; 0,063; 0,05 мм.

Ситовий аналіз здійснювали шляхом розташування зваженої проби на верхньому ситі, просіювання її через набір сит і визначення маси

залишку матеріалу на кожному з них відносно маси вихідної проби. У процесі дослідів змінювали навантаження на сито та час просіювання. За отриманими даними складали гранулометричну характеристику досліджуваного матеріалу [6–9].

#### 4. Дослідження процесу диспергування висушених яблук та буряків

Відповідно до [1; 6] велике значення при виборі конструкції та режиму роботи диспергатора має дисперсність висушеного матеріалу. Дисперсний склад є однією з найважливіших характеристик тонкоподрібнених матеріалів, які визначають їхні фізико-хімічні властивості, а отже, їхні технологічні якості та область практичного використання.

Порошкоподібний матеріал являє собою мікрогетерогенну систему та складається з часточок різної маси і форми: сферичної, витягнутої (ниткоподібні або призмоподібні), форми багатогранників. Величина часточок характеризується дисперсністю, яку можна виразити через функцію розподілу часточок за розмірами, або середньою величиною крупності часточок. Розподіл часточок за розмірами є найбільш повною дисперсною характеристикою порошків. Це справедливо для однорідних за складом, непористих та занадто шорсткуватих часточок правильної форми. Оскільки число часточок у порошках значне, для аналітичного опису розподілу часточок за розмірами використовують диференціальні та інтегральні рівняння.

Дисперсність матеріалу можна характеризувати як відношення поверхні тіла до його об'єму [2; 5–8], це термодинамічна величина, яка показує розвиток поверхні розділу двох фаз – твердої та газоподібної, (1),  $\text{м}^{-1}$ :

$$S_n = \frac{F_{1,2}}{V}, \quad (1)$$

де  $F_{1,2}$  – поверхня розподілу фаз,  $\text{м}^2$ ;  $V$  – об'єм дисперсної фази,  $\text{м}^3$ .

Досліди показали, що форма часточок бурякового та яблучного порошків значно відрізняється від сферичної. Виходячи з цього, при розрахунках розмір часточок неправильної форми замінявся діаметром сфери, еквівалентної часточці за об'ємом, за формулою 2 [10]:

$$d_e = \frac{100}{\sum \frac{b_i}{d_i}}, \quad (2)$$

де  $d_i$  – діаметри часточок неправильної форми, приведених до кулястої форми, мм;  $b_i$  – їхня частка, % до загальної кількості часточок.

Неправильність форми часточки враховують через коефіцієнт сферичності, (3):

$$\Psi = \frac{\pi d_e^2}{F}. \quad (3)$$

Коефіцієнт сферичності порошоків визначався експериментально [11]. Для бурякового та яблучного порошоків він дорівнює 0,25 і 0,3 відповідно. З урахуванням співвідношень (2 і 3) питома поверхня порошку визначалась як:

$$S_n = \frac{6}{\Psi d_e}, \text{ м}^{-1}. \quad (4)$$

На рис. 1 наведено результати досліджень, щодо впливу швидкості руху ударного органу диспергатора на величину еквівалентного діаметра та питому поверхню.

Як бачимо, збільшення швидкості ротора диспергатора з 20 до 70 м/с призводить до зменшення еквівалентного діаметру подрібнених часточок і збільшення дисперсності порошку з яблук на 30 %, буряків – на 35 %. Різниця дисперсності досліджуваних порошоків пояснюється різними структурно-механічними та хімічними властивостями.

Вплив швидкості ротора диспергатора на дисперсність яблучного та бурякового порошоків представлено на рис. 2 (а, б) у вигляді інтегральних кривих розподілу за фракціями, де по осі абсцис відкладено розміри отворів сита  $d$  в мм, а по осі ординат  $D(d)$  – процентний вміст часточок, розміри яких менші вказаного і  $R(d)$  – процентний вміст часточок, розміри яких більші вказаного.

$$R(d) = 100 - D(d), \% \quad (5)$$

Значенню  $R(d) = D(d) = 50$  % відповідає медіана розподілу часточок порошку за розмірами. При вирахуванні медіани інтервального варіаційного ряду спочатку знаходять інтервал, в якому знаходиться медіана.

Медіанному інтервалу відповідає перша з накопичених частот (відсотків) розмірів часточок порошку, який перевищує 50 %.

Всередині знайденого інтервалу медіана розраховується за формулою [12]:



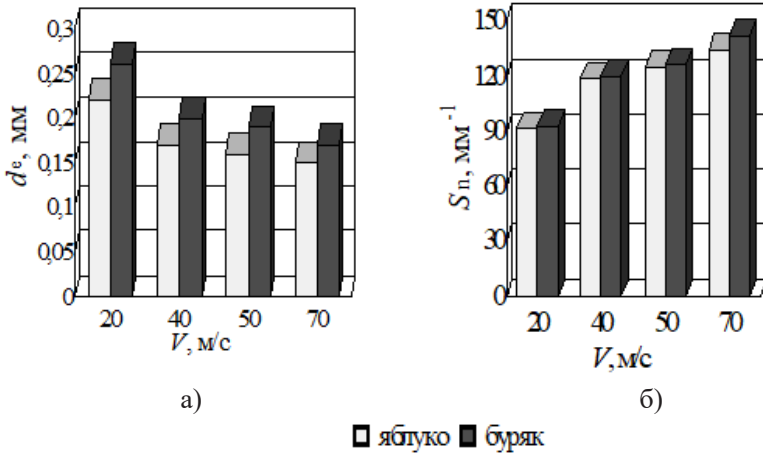


Рис. 1. Вплив швидкості ротору на еквівалентний діаметр часточок (а) та дисперсність порошків (б)

$$M_e = x_{M_{e\min}} + k \frac{0,5 \sum m - V_{M_{e-1}}}{m_{M_e}} \quad (6)$$

де  $x_{M_{e\min}}$  – нижня межа медіанного інтервалу;  $k = \Delta d$  – інтервальна різниця або величина інтервалу;  $V_{M_{e-1}}$  – накопичена частота або відсоток інтервалу, який передусє медіанному;  $0,5 \sum m = 50\%$  – половина суми всіх частот або відсотків;  $m_{M_e}$  – частота медіанного інтервалу.

Залежність величини медіани від швидкості обертання ротора мікролину показано на рис. 3. Зі збільшенням швидкості ротора медіана знижується, що вказує на зростання ступеня подрібнення матеріалу.

Величина медіани для яблучного порошку майже співпадає з величиною медіани для бурякового порошку при  $V = 20$  м/с, але зі збільшенням швидкості ротора яблука подрібнюються краще, ніж буряки, бо їхня міцність менша.

Диференціальні криві розподілу маси порошку від розміру часточок наведено на рис. 4 (а, б).

На осі абсцис відкладене значення діаметрів часточок від щонайменшого до щонайбільшого, на осі ординат – функція розподілу маси, яка визначається за формулою (7):

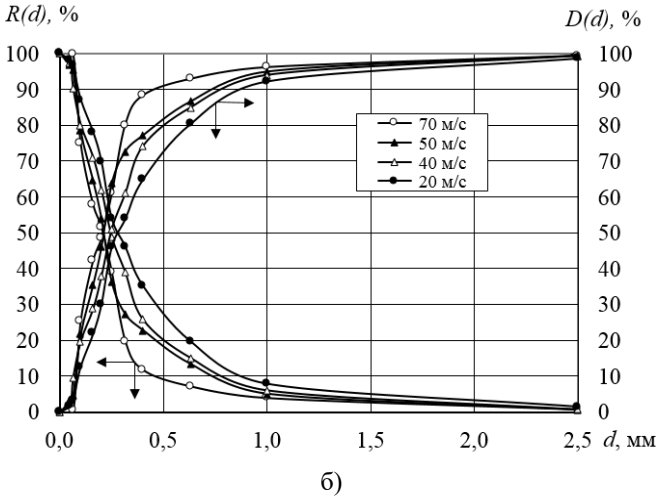
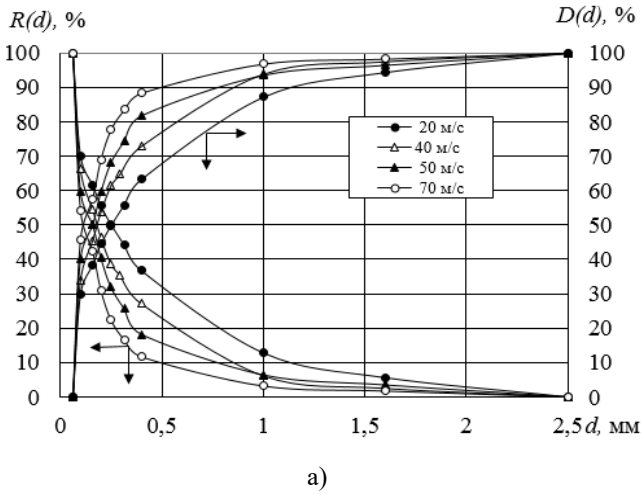
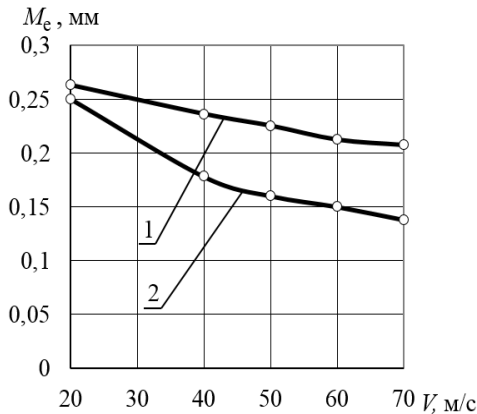


Рис. 2. Інтегральні криві розподілу часточок залежно від швидкості ротора:  
а) яблучний порошок; б) буряковий порошок

$$F = \frac{1}{M} \frac{\Delta m}{\Delta d}, \quad (7)$$

де  $M$  – загальна маса усіх часточок;  $\Delta m$  – маса часточок в інтервалі розмірів від  $d$  до  $d+\Delta d$ .



**Рис. 3. Залежність медіани від швидкості ротора:**

1 – буряковий порошок; 2 – яблучний порошок

Як бачимо, яблучний порошок незалежно від швидкості ротора має виразний максимум, який відповідає найімовірнішому діаметру часточок. Зі збільшенням швидкості обертання ротора диспергатора функція розподілу маси, яка відповідає найімовірнішому розподілу, збільшується, тобто подрібнення часток є більш рівномірним.

Максимальне його значення відповідає швидкості ротора 70 м/с, мінімальне – 20 м/с, максимум розподілу яблучного порошку припадає на 0,05 мм, бурякового – на 0,08 мм. Максимальне значення функції розподілу бурякового порошку значно нижче, ніж яблучного, але також відповідає швидкості ротора 70 м/с.

Криві функції розподілу при швидкості ротора 40 і 50 м/с настільки співпадають, що для кращої наочності на графічній ілюстрації не надані.

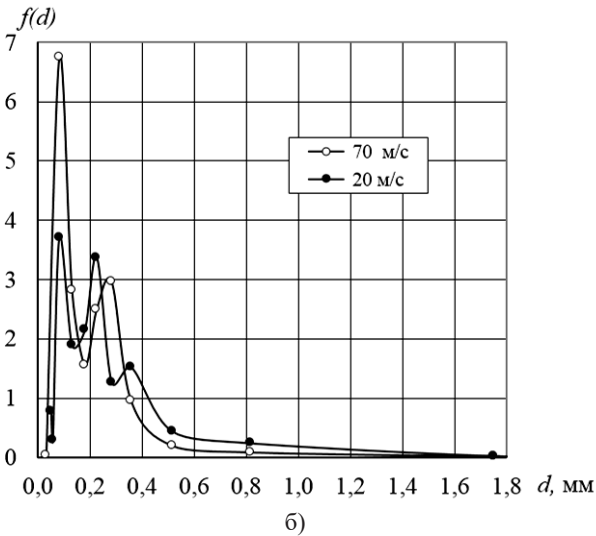
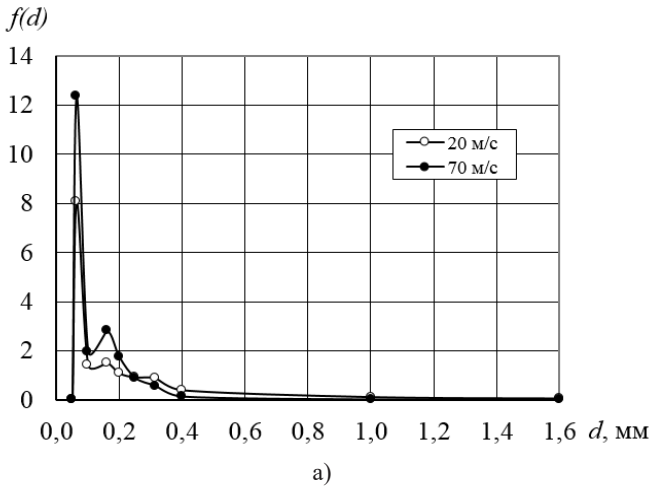


Рис. 4. Диференціальні криві розподілу часточок залежно від швидкості ротора:  
а) яблучний порошок; б) буряковий порошок

### 5. Визначення залежності продуктивності мікромлина і споживаної потужності від швидкості обертання ротора диспергатора

У дробильній камері над ротором постійно знаходиться маса матеріалу, що дробиться і під дією гравітаційних сил опускається на ротор. Ротор при кожному проході біла захоплює матеріал об'ємом [13]:

$$V = A \cdot L \cdot h ; \text{ м}^3, \quad (8)$$

де  $A$  – горизонтальна проекція дуги КС, м;  $L$  – довжина ротора, м;  $h$  – висота матеріалу, який диспергується, її визначають як шлях шматочків, що вільно падають за час повороту ротора мікромлина від одного біла до іншого, м.

При цьому продуктивність мікромлина вираховують за формулою (9), т/г:

$$Q = 3,6Vnz\gamma, \quad (9)$$

де  $n$  – число обертів ротора мікромлина, об/хв;  $z$  – кількість бил в мікромлині;  $\gamma$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>.

Потужність двигуна мікромлина відповідає емпіричній формулі (10), кВт, [13]:

$$N = (360...540)iQ, \quad (10)$$

де  $i$  – ступінь подрібнення матеріалу.

$$i = \frac{D_{\text{сеп}}}{d_{\text{сеп}}}, \quad (11)$$

де  $D_{\text{сеп}}$  – середній розмір часточок матеріалу до подрібнення, мм;  $d_{\text{сеп}}$  – середній розмір часточок матеріалу після подрібнення, мм.

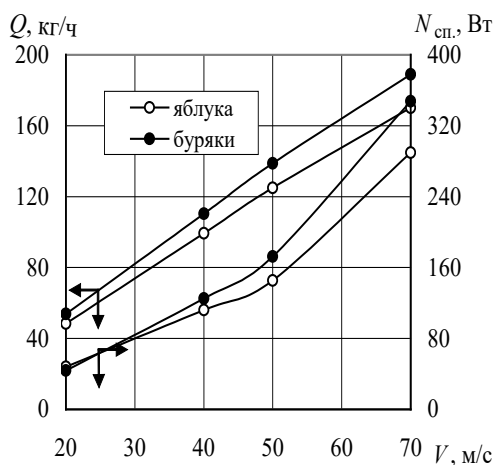
$$d_{\text{сеп}} = \frac{d_1 \cdot m_1 + d_2 \cdot m_2 + \dots + d_n \cdot m_n}{100}, \quad (12)$$

де  $d_1, d_2, \dots, d_n$  – середній розмір частинок матеріалу по фракціям, мм;  $m_1, m_2, \dots, m_n$  – кількість фракції, %.

У формулі (10) коефіцієнт в дужках залежить від міцності матеріалу.

Як було встановлено експериментально, для рослинних матеріалів (буряки, яблука, морква, соя тощо), що мають залишкову вологість 6...8 %, цей коефіцієнт дорівнює 360...370. З рис. 5 видно, що продуктивність мікромлина лінійно зростає зі збільшенням швидкості ротора, а значення споживаної потужності  $N$  інтенсивно зростає, почи-

наючи з  $V = 50$  м/с. При збільшенні швидкості ротора від 50 до 70 м/с продуктивність подрібнення яблук зростає на 25 %, столових буряків на 20 %, в той час як споживана потужність в обох випадках зростає майже вдвічі. Такі результати свідчать про те, що збільшення швидкості ротора мікротлина більше за 50 м/с недоцільно через великі витрати електроенергії. До того ж з рис. 2 впливає, що при змінюванні швидкості ротора від 50 до 70 м/с збільшується вихід дрібнодисперсного порошку всього на 5...10 % (залишок на ситі 0,25 знижується від 32 до 22 % для яблук і від 40 до 35 % для столових буряків).



**Рис. 5. Залежність продуктивності мікротлина і споживаної потужності від швидкості ротора диспергатора**

Отже, при диспергуванні висушених яблук та столових буряків у мікротлині 8-ММ ступінь подрібнення переважно залежить від швидкості ротора диспергатора. Зі збільшенням швидкості ротора продуктивність та ефективність подрібнення зростає, на що вказує зниження величини медіани і переміщення максимуму функції  $f(d)$  до менших значень  $d$ , але при цьому значно зростають витрати енергії на подрібнення.

Отже, оптимальною робочою швидкістю ротора під час подрібнення пектиновмісних матеріалів є швидкість 50 м/с.

## 6. Вплив навантаження на сито і часу розсіювання на процес фракціонування

Відповідно до [1; 2] подрібнені пектиновмісні порошки складаються з суміші часточок різних розмірів і форми, які визначають їхні фізико-хімічні та технологічні властивості. Наш досвід показав, що розміри часточок порошків, які використовують при виробництві продуктів харчування, мають бути не більшими за 0,25 мм [14].

Отже, необхідно відділити фракцію порошку з розміром часточок менше 0,25 мм – це дрібнодисперсна частина порошку, і розмір часточок більше 0,25 мм – крупнодисперсна фракція. Аналіз дисперсного складу показує, що порошок з яблук, розмір яких менший за 0,25 мм являє собою м'якоть плодів, більше 0,25 мм – залишки м'якоти, шкірочки, підшкірний шар, насіння, насінні гнізда. Дрібнодисперсна фракція порошків із столових буряків складається з м'якої частини коренеплоду, крупнодисперсна з щільних за своєю структурою часточок коренеплоду. Отже, дисперсний аналіз є обов'язковим методом контролю процесів подрібнення для подальшого використання порошкоподібних продуктів.

Результати експериментальних досліджень показують, що і для яблучного, і для бурякового порошків навантаження на сито суттєвого впливу на розподіл часточок за розмірами не чинить. Як бачимо, інтегральні (а) та диференціальні криві (на рис. 6) практично співпадають при змінюванні навантаження на сито від 100 г ( $g = 3,18 \text{ кг/м}^2$ ) до 200 г ( $g = 6,36 \text{ кг/м}^2$ ).

Аналізуючи результати фракціонування залежно від тривалості просіювання, слід зазначити, що як для яблучного, так і для бурякового порошків закономірність впливу тривалості процесу на розподіл часточок за розмірами аналогічна.

На рис. 7 представлено інтегральні криві розподілу яблучного порошку залежно від часу розсіювання. Зі збільшенням часу розсіювання більша маса дрібнодисперсного порошку попадає на нижні сита і на інтегральних кривих медіана переміщується в бік меншого діаметру, що наочно наведено на рис. 8.

У перші 100 секунд величина медіани швидко зменшується, але потім змінювання медіани значно уповільнюється і виходить на горизонтальну лінію. На диференціальних кривих (рис. 9) зі збільшенням

часу розсіювання максимум функції  $f(d)$  переміщується до менших значень  $d$ . Як для яблучного, так і для бурякового порошоків спостерігається яскравий максимум функції  $f(d)$ , який припадає на розмір часток  $d = 0,1$  мм, що підтверджує дані, наведені на рис. 4.

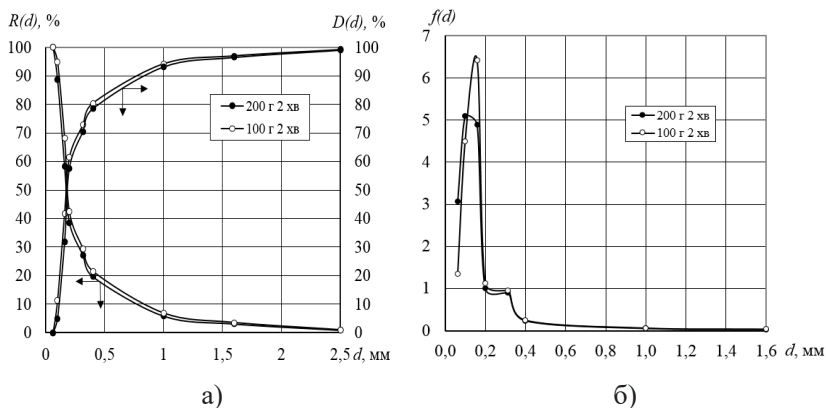


Рис. 6. Інтегральні (а) і диференціальні (б) розподілу часточок

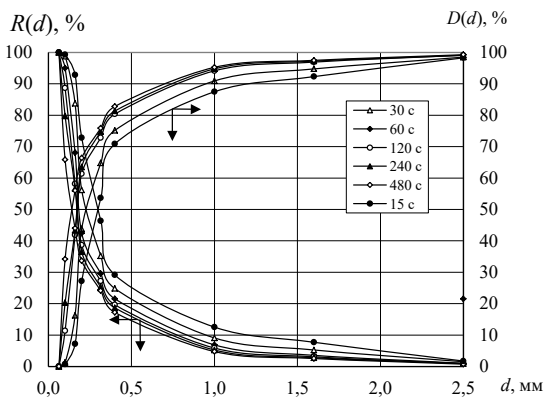
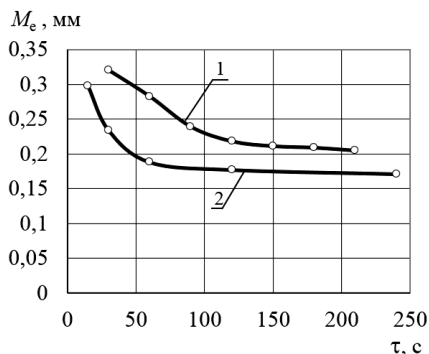


Рис. 7. Інтегральні криві розподілу часточок яблучного порошку залежно від часу розсіювання



Отже, процес фракціонування майже не залежить від навантаження на сито, а залежить від часу розсіювання. Але й збільшувати тривалість процесу понад 3 хв недоцільно, бо якщо час розсіювання збільшити від 2 до 4 хвилин, то маса дрібнодисперсної фракції збільшиться лише на 2...5 % (залишок на ситі 0,25 знижується, зокрема від 27 до 25 % для яблучного порошку і відповідно з 34 до 29 % для бурякового).



**Рис. 8.** Залежність медіани від часу розсіювання:

1 – буряковий порошок; 2 – яблучний порошок

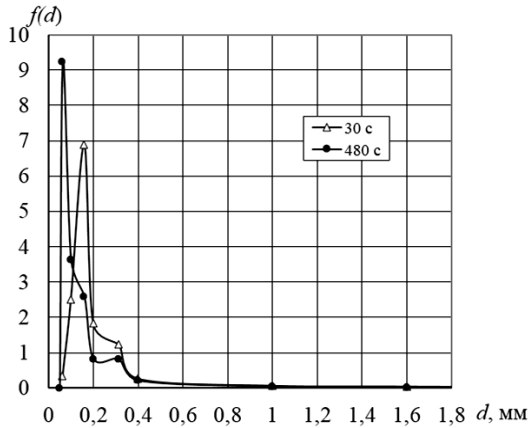
Вихід дрібнодисперсної фракції порошоків за оптимальними режимами диспергування і фракціонування складає: для яблучного – 65...68 %; для бурякового – 62...65 %.

Крупнодисперсну фракцію порошоків піддають повторному диспергуванню, у тому числі за допомогою дезінтеграторної установки ДЕЗІ, таким чином досягаючи максимального виходу дрібнодисперсної фракції.

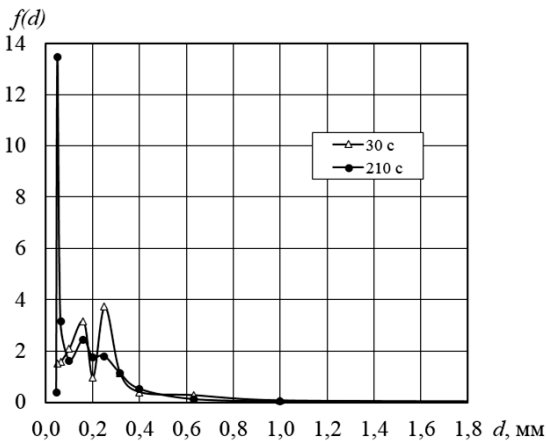
Залишки крупнодисперсної фракції із столових буряків доцільно використовувати для виробництва барвників натуральних червоних [15–17].

Крупнодисперсна фракція яблучного порошку, поряд із застосуванням повторного диспергування, під час якого вона розмелюється поступово до часточок розмірами менше за 0,25 мм і тим самим переходить до харчових порошоків, є цінною сировиною для промислового виробництва пектину [16; 18–20].

Перевага такої сировини полягає в тому, що у сушених продуктах уповільнюються мікробіологічні та фізико-хімічні процеси, внаслідок чого її можна зберігати, при цьому, кількість і якість пектинових речовин під час зберігання практично не змінюється [20; 21].



а)



б)

Рис. 9. Диференціальні криві розподілу часточок залежно від часу розсіювання: а) яблучний порошок; б) буряковий порошок

Як бачимо, спостерігається реальна можливість достатньо повного використання всіх фракційних складових сушених пектиновмісних матеріалів.

### 7. Висновки

За результатами проведених досліджень встановлено оптимальні режими диспергування порошків, залежність продуктивності мікромлина і споживаної потужності від швидкості обертання ротора диспергатора, вплив навантаження на сито і часу розсіювання на процес фракціонування, на підставі яких визначено енергозберігаючі умови проведення процесів і належної роботи обладнання.

Під час проведення досліджень нами встановлено:

1. З підвищенням швидкості обертання ротора диспергатора функція розподілу маси, яка відповідає найімовірнішому розподілу, збільшується. Максимальне значення розподілу маси відповідає швидкості ротора 70 м/с, мінімальне – 20 м/с, максимум розподілу яблучного порошку припадає на 0,05 мм, бурякового – на 0,08 мм.

2. Оптимальною робочою швидкістю ротора під час подрібнення пектиновмісних матеріалів є швидкість 50 м/с. За такою швидкістю витрати енергії на подрібнення сушених матеріалів мінімальні.

3. Процес фракціонування майже не залежить від навантаження на сито, а залежить від часу розсіювання. Збільшувати тривалість процесу понад 3 хв недоцільно. Збільшення часу до 4 хвилин збільшує масу дрібнодисперсної фракції лише на 2...5 %. Вихід дрібнодисперсної фракції порошків за оптимальними режимами диспергування і сепарації складає: яблучного – 65...68 %, бурякового – 62...65 %.

Показана можливість повторного подрібнення з метою збільшення виходу дрібнодисперсної фракції. При правильно організованому процесі фракціонування можна досягти мінімальних втрат фракційних складових сушених пектиновмісних матеріалів та забезпечити реальну можливість достатньо повного використання усіх фракцій [16].

### Список літератури:

1. Снежкин Ю.Ф. Научные основы разработки ресурсосберегающих технологий производства фруктово-овощных порошков : дис. ... докт. техн. наук : 05.14.04:05.18.12. Киев : ИТТФ НАН Украины, 1993. 600 с.

2. Снежкин Ю.Ф., Боряк Л.А., Шапарь Р.А., Дабижа Н.А. Особенности диспергирования композиционных материалов. *Пром. теплотехника*. Киев, 2001. Т. 23. № 6. С. 68–73.
3. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Воспітанніков Г.К. Особливості теплотехнології переробки плодовоовочевої сировини на сушену продукцію. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2011. Вип. 39. Т. 2. С. 140–143.
4. Ходаков Г.С. Физика измельчения. Москва : Наука, 1972. 308 с.
5. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. Москва : Химия, 1977. 368 с.
6. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. Москва : Химия, 1970. 430 с.
7. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Изд. 3, перераб. Львов : Химия, 1987. 264 с.
8. Dekker R.F.H., Richards G.N. Determination of pectin substances in plant material. *T. Sci. of Food*. 1972. V. 23. P. 474–483.
9. Baudelaire E.D. Grinding for food powder production. *Handbook of Food Powders: Processes and Properties Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*. Editor(s): Bhesh Bhandari, Nidhi Bansal, Min Zhang, Pierre Schuck Woodhead Publishing, 2013. P. 132–149. ISBN 9780857095138. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.132>
10. Теплотехнический справочник / Под общ. ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. В 2-х т. 2-е изд. Москва : Энергия, 1976. 886 с.
11. Бабуха Г.Л., Рабинович М.И. Механика и теплообмен потоков полидисперсной газозвеси. Киев : Наукова думка, 1969. 218 с.
12. Венецкий И.Г., Венецкая В.И. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе. *Справочник*. Москва : Статистика, 1979, 447 с.
13. Бауман В.А., Калушанцев Б.В., Мартынов В.Д. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. Москва : Машиностроение, 1981. 324 с.
14. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Хавін О.О., Чалаєв Д.М. Досвід використання натуральних порошоків з рослинної сировини у молочних продуктах. *Пром. теплотехника*, приложение к № 4, 2002. С. 57–59.
15. Ван Муорик С.В. Современные тенденции развития промышленности пищевых добавок и ингредиентов. *Пищевые ингредиенты – сырье и добавки*. 2004. № 1. С. 20–22.
16. 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. ISBN 978-617-7457-69-4
17. Шапар Р.О., Гусарова О.В. Натуральні добавки із рослинної сировини. Матеріали міжн. наук.-практ. конф. “Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека”, 19-20 листопада 2020 р. Київ : НУХТ, 2020 р. С. 14 – 16.
18. Walter R.H. The Chemistry and Technology of Pectin. Academic Press Inc., Harcourt Brace Jovanovich, Publishers. 1991. 67 p.

19. Донченко Л.В., Фирсов Г.Г. Пектин: основные свойства, производство и применение. Москва : ДеЛи принт, 2007. 276 с.

20. Шапар Р.О., Сорокова Н.М., Гусарова О.В. Ресурсо- та енергозбереження у переробленні термолабільних рослинних матеріалів на сушені продукти. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія : технічні науки*. 2020. Т. 31(70). Ч. 2. № 3. С. 79–84. DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-2/14>

21. Шапар Р.О., Гусарова О.В. Вплив тепловологої обробки на кінетику сушіння пектиновмісних матеріалів. *Наукові праці ОНАХТ*. 2019. Т. 83. № 1. С. 62–66. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1419>

### References:

1. Snezhkin Yu.F. (1993) *Nauchnyie osnovy razrabotki resursosbergayuschih tehnologiy proizvodstva fruktovo-ovoschnykh poroshkov* [Scientific basis for the development of resource-saving technologies for the production of fruit and vegetable powders]. (Doctoral Thesis), Kiev: ITTF NAS of Ukraine, 600 p.

2. Snezhkin Yu.F., Boryak L.A., Shapar R.A., Dabizha N.A. (2001) Osobennosti dispergirovaniya kompozitsionnykh materialov [Features of the dispersion of composite materials]. *Industrial heating technology*, vol. 23, no. 6, pp. 68–73.

3. Sniezkin Yu.F., Shapar R.O., Vospitannikov H.K. (2011) Osoblyvosti teplotekhnologii pererobky plodoovochevoi syrovyny na sushenu produktsiui [Special features of heat technology for processing fruit-and-ovc syruvini for dried products]. *Science works ONAFT*. Odesa, no. 39, vol. 2, pp. 140–143.

4. Hodakov G.S. (1972) *Fizika izmelcheniya* [Grinding physics]. Moscow: Nauka, 308 p.

5. Cidenko P.M. (1977) *Izmelchenie v himicheskoy promyshlennosti* [Grinding in the chemical industry]. Moscow: Chemistry, 368 p.

6. Lyikov M.V. (1970) *Sushka v himicheskoy promyshlennosti* [Drying in the chemical industry]. Moscow: Chemistry, 430 p.

7. Kouzov P.A. (1987) *Osnovyi analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyiley i iz-melchennykh materialov* [Fundamentals of the analysis of the dispersed composition of industrial dusts and crushed materials]. Ed. 3, rev. Lviv: Chemistry, 264 pp.

8. Dekker R.F.H., Richards G.N. (1972) Determination of pectin substances in plant material. *T. Sci. of Food*, vol. 23, pp. 474–483.

9. Baudelaire E.D. (2013) Grinding for food powder production. *Handbook of Food Powders: Processes and Properties Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*. Woodhead Publishing, pp. 132–149. ISBN 9780857095138. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.132>

10. Yureneva V.N., Lebedeva P.D. (ed.) (1976) *Teplotekhnicheskiiy spravochnik* [Heat engineering reference book]. In 2 volumes, 2nd ed. Moscow: Energy, 886 p.

11. Babuha G.L., Rabinovich M.I. (1969) *Mehanika i teploobmen potokov polidispersnoy gazovzvesi* [Mechanics and heat transfer of flows of a polydisperse gas suspension]. Kiev: Naukova Dumka, 218 p.

12. Venetskiy I.G., Venetskaya V.I. (1979) *Osnovnyie matematiko-statisticheskie ponyatiya i formulyi v ekonomicheskom analize. Spravochnik* [Basic mathematical and statistical concepts and formulas in economic analysis. Directory]. Moscow: Statistics, 447 p.

13. Bauman V.A., Kalushantsev B.V., Martynov V.D. (1981) *Mehanicheskoe oborudovanie predpriyatiy stroitelnykh materialov, izdeliy i konstruktsiy* [Mechanical equipment for enterprises of building materials, products and structures]. Moscow: Mechanical Engineering, 324 p.

14. Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O., Khavin O.O., Chalaiev D.M. (2002) Dosvid vykorystannia naturalnykh poroshkiv z roslynnoi syrovyny u molochnykh produktakh [Experience of using natural powders from vegetable raw materials in dairy products]. *Industrial heating technology, application to*, no. 4, pp. 57–59.

15. Van Muorik S.V. (2004) Sovremennyye tendentsii razvitiya promyishlennosti pischevykh dobavok i ingredientov [Current trends in the industry of food additives and ingredients]. *Food ingredients – raw materials and additives*, no. 1, pp. 20–22.

16. Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O. (2018). *Teplomasoobminni 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.

17. Shapar R.O., Husarova O.V. (2020) Naturalni dobavky iz roslynnoi syrovyny [Natural additives from vegetable raw materials]. *Materials int. scientific-practical conf. "Health foods and dietary supplements: technology, quality and safety"*. (Ukraine, Kyiv, November 19-20, 2020), Kyiv: NUFT, pp. 14–16.

18. Walter R.H. (1991) *The Chemistry and Technology of Pectin*. Academic Press Inc., Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, 67 p.

19. Donchenko L.V., Firsov G.G. (2007) *Pektin: osnovnyie svoystva, proizvodstvo i primenenie* [Pectin: basic properties, production and application]. Moscow: DeLi print, 276 p.

20. Shapar R.O., Sorokova N.M., Husarova O.V. (2020) Resurso- ta enerhozberezhennia u pereroblenni termolabilnykh roslynnykh materialiv na susheni produkty [Resource and energy saving in the processing of thermolabile plant materials into dried products]. *Scientific notes of TNU named after VI Vernadsky. Series: technical sciences*, vol. 31(70), part 2, no. 3, pp. 79–84. DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-2/14>

21. Shapar R.O., Husarova O.V. (2019) Vplyv teplovolohei obrobky na kinyetiku sushinnia pektynovmisnykh materialiv [Influence of heat-moisture treatment on drying kinetics of pectin-containing materials]. *Scientific Works ONAFT*, vol. 83, no. 1, pp. 62–66. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1419>