

**RESEARCH ON THE IMPACT OF MODIFIED AND  
CONSTRUCTIVE PARAMETERS IN THE PROCESSING OF  
VISCOUS AND DISPERSION PRODUCTS IN APPARATUS  
ON THE ROTATIONAL THERMOSYPHON BASE**

O. Burdo, I. Bezbakh, O. Zykov, S. Shishov  
*Odessa National Academy of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Rotational thermosiphons  
Non-Newtonian fluids  
Disperse products*

---

**Article history:**

Received 06.11.2018  
Received in revised form  
05.12.2018  
Accepted 19.12.2018

---

**Corresponding author:**

O. Burdo  
**E-mail:**  
npnuht@ukr.net

**ABSTRACT**

---

A fundamentally new method of solving a complex scientific and technical problem is used — reduction of specific energy consumption during drying, thermal treatment of non-Newtonian fluids. Innovative designs of apparatuses for heat treatment, evaporation of non-Newtonian fluids, drying of disperse products are developed. The methodology was substantiated and experimental stands were created for complex studies of the process of evaporation of non-Newtonian fluids, drying of dispersed products in rotational thermosiphons-based machines. In the article the influence of structural and regime parameters on the kinetics of the evaporation process of food non-Newtonian fluids, drying of dispersed products in rotational thermosiphons-based apparatuses was investigated.

The objects of research are as the whole technological chain of production and energy-intensive equipment, as well as products that are processed. The results of research studies carried out on the experimental stands of the Department of Processes of Equipment and Energy Management Odessa National Academy of Food Technologies are presented. Experimental studies confirm that modern methods of effective heat transfer — rotational thermosiphons, as well as devices based on them, can become the technical basis for the improvement of drying, concentration, and heat treatment technologies. Experiments on evaporation are carried out on tomato mass, apple puree in a wide range of parameters. When drying dispersed products, thermograms, drying lines for wheat, amaranth, millet, cooked peas in an installation with rotational thermosiphons were obtained. The influence of regime parameters on the heat transfer coefficients was investigated. It was established that the intensity of the heat-mass transfer is significantly influenced by the speed of the condenser, the angle of its inclination and the physical properties of the product. It was established that the apparatus with rotational thermosiphons provides heat transfer coefficients 4 times higher than in modern apparatuses.

---

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2018-24-6-12

---

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ОБРОБЦІ В'ЯЗКИХ ТА ДИСПЕРСНИХ ПРОДУКТІВ В АПАРАТАХ НА БАЗІ РОТАЦІЙНИХ ТЕРМОСИФОНІВ**

**О.Г. Бурдо, І.В. Безбах, О.В. Зиков, С.В. Шишов**

*Одеська національна академія харчових технологій*

*У статті використано принципово новий спосіб вирішення складної науково-технічної проблеми — зменшення питомих витрат енергії при сушінні дисперсних продуктів, термообробці неньютонівських рідин. Розроблено інноваційні конструкції апаратів для термообробки, випарювання неньютонівських рідин, сушіння дисперсних продуктів. Обґрунтовано методики і створено експериментальні стенди для комплексних досліджень процесу випарювання неньютонівських рідин, сушіння дисперсних продуктів в апаратах на базі ротаційних термосифонів.*

*Досліджено вплив конструктивних і режимних параметрів на кінетику процесу випарювання харчових неньютонівських рідин, сушіння дисперсних продуктів в апаратах на базі ротаційних термосифонів. Наведено результати досліджень, що проведені на експериментальних стендах кафедри процесів обладнання та енергетичного менеджменту Одеської національної академії харчових технологій. Експериментальні дослідження підтверджують, що технічною базою для удосконалення технологій сушіння, концентрування, термообробки можуть стати сучасні способи ефективною теплопередачі — ротаційні термосифони, а також апарати на їх основі. Експерименти випарювання проведені на томатній масі, яблучному пюре в широкому діапазоні параметрів. При сушінні дисперсних продуктів отримано термограми, лінії сушіння для пшениці, амаранту, проса, вареного гороху в установці з ротаційним термосифоном. Досліджено вплив режимних параметрів на коефіцієнти тепловіддачі. Встановлено, що на інтенсивність тепло- і масопереносу суттєво впливає частота обертання конденсатора, кут його нахилу та фізичні властивості продукту. Встановлено, що апарат із ротаційним термосифоном забезпечує коефіцієнти теплопередачі в чотири рази вище, ніж у сучасних апаратах.*

**Ключові слова:** *ротаційні термосифони, неньютонівські рідини, дисперсні продукти.*

**Постановка проблеми.** Виробники продуктів харчування зіштовхуються із жорсткими регламентаціями щодо якості харчових продуктів, енерговитрат й екологічної безпеки підприємства [1—5]. Технології ключових операцій виробництва харчових продуктів — концентрування, термообробка, сушіння, відрізняються високою енергоемністю. На вітчизняному ринку імпорт сушених продуктів займає 95%, вітчизняні заводи-виробники практично відсутні [6].

Аналіз стану зерносушильної техніки показує, що в 48% випадків експлуатуються шахтні агрегати вітчизняного виробництва [6]. ККД таких установок до 30%. Сушильні технології споживають в 2,5...3 рази більше енергії, ніж фізично необхідно. В Україні при виробництві концентратів щорічно випарюється від 1,0 млн т до 1,5 млн т води, що в грошовому еквіваленті становить 300—400 млн грн. Витрата енергії на випарювання становить від  $2,8 \cdot 10^6$  кДж на 1 т випаруваної води. Високі енерговитрати при обробці харчових продуктів зумовлюють необхідність розробки нових ефективних апаратів.

**Мета дослідження:** обґрунтувати методики і створити експериментальні стенди для комплексних досліджень процесу випарювання неньютонівських рідин (ННР), сушіння дисперсних продуктів в апаратах на базі ротаційних термосифонів (РТС), дослідити вплив конструктивних і режимних параметрів на кінетику процесу.

**Матеріали і методи.** Об'єктами досліджень є як весь технологічний ланцюжок виробництва й енергоємне встаткування, так і продукти, які обробляються. Наведено класифікацію оброблюваних продуктів як об'єктів досліджень (рис. 1).

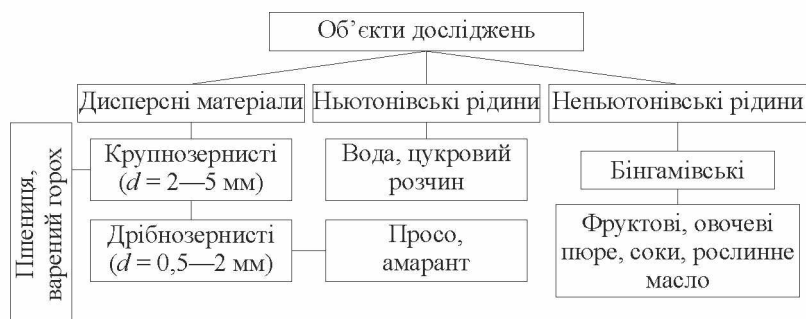
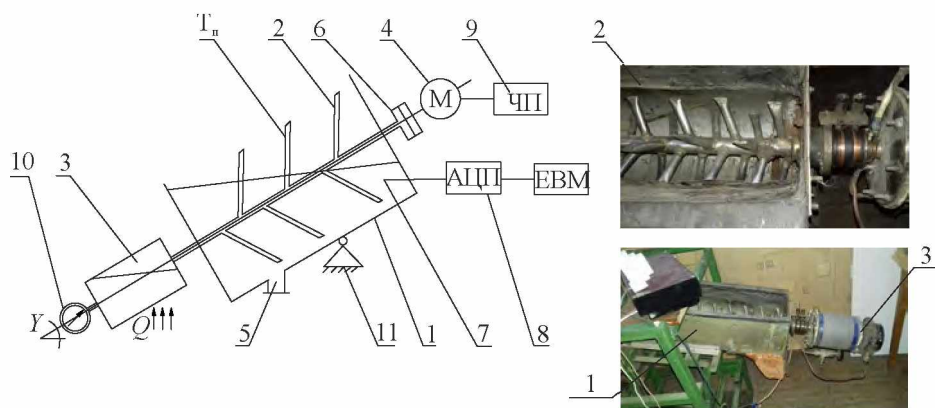


Рис. 1. Об'єкти досліджень

Розглянуто характеристики ННР, дисперсних продуктів як об'єктів дослідження. Для дисперсних зернових продуктів розглянуто граничні температури нагрівання, граничні вологості та інші технологічні параметри, які необхідно знати й дотримуватись при сушінні для того, щоб не зіпсувати продукт [7]. Для ННР розглянуто значення в'язкості та вплив швидкості й напруження зсуву на цю величину. Ці властивості ННР істотно впливають на теплообмін, тому потребують детального аналізу. Розроблено конструкції експериментальних стендів. Для дослідження процесів тепло- і масообміну при сушінні дисперсних продуктів в апараті на базі РТС розроблено експериментальну установку (рис. 2).

Експерименти проводились за періодичною схемою, продукт завантажували у корпус, проводили сушіння, після чого вивантажували. Варіювались режимні параметри: кут нахилу РТС  $\gamma$ ; частота обертів РТС,  $n$ ; тиск у конденсаторі РТС,  $P$ ; потужність, що підводиться (табл. 1). Початкова вологість продуктів вибиралась згідно з технологічними вимогами  $\omega_{\text{н}}$ , %. Зволоження зерна перед дослідженнями, розрахунки коефіцієнтів тепло- і масовіддачі проведено за стандартними методиками.



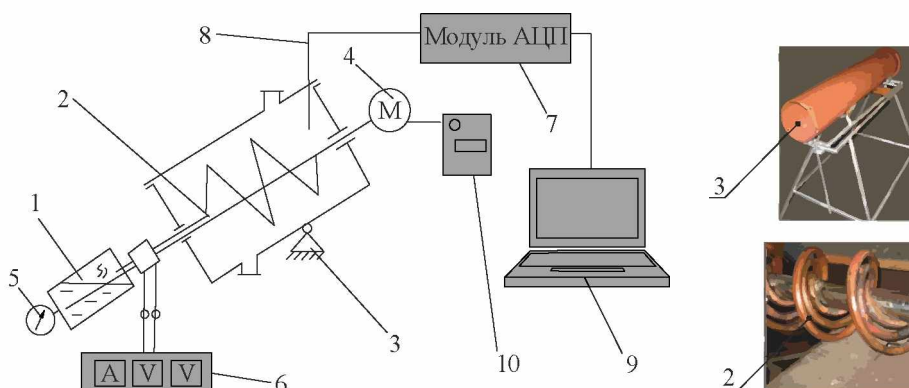
**Рис. 2. Конструкція експериментальної установки на базі РТС:**

1 — корпус; 2 — ротаційний термосифон; 3 — випарник; 4 — електродвигун;  
5 — патрубок; 6 — муфта; 7 — термопара; 8 — аналого-цифровий перетворювач;  
9 — частотний перетворювач; 10 — манометр; 11 — шарнір

*Таблиця 1. Діапазон вимірюваних величин*

| Продукт       | Нахил РТС, $\gamma$ | Частота обертів РТС, $n$ | Тиск у конденсаторі РТС, $P$ | Потужність, що підводиться | Вологість продуктів початкова, $\omega_{н}, \%$ |
|---------------|---------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|
|               | град.               | $\text{хв}^{-1}$         | МПа                          | кВт                        |                                                 |
| Пшениця       | 30...45             | 14...28                  | 0,05...0,15                  | 0,8...1,5                  | 20                                              |
| Варений горох |                     |                          |                              |                            | 25                                              |
| Амарант       |                     |                          |                              |                            | 20                                              |
| Просо         |                     |                          |                              |                            | 19                                              |

Для дослідження процесу випарювання харчових ННР розробили експериментальну установку (рис. 3).



**Рис. 3. Схема експериментальної установки:**

1 — парогенератор; 2 — конденсатор; 3 — корпус; 4 — двигун; 5 — манометр;  
6 — вимірювальний комплекс К-50; 7 — аналого-цифровий перетворювач (АЦП);  
8 — термопари; 9 — комп'ютер; 10 — частотний перетворювач

Вимірювання температури робили в окремих точках об'єму, після чого значення температури усереднювались. Експерименти проведені на томатній масі, яблучному пюре в широкому діапазоні параметрів (табл. 2). Дані первинних перетворювачів температури надходили на АЦП, перетворювалися в цифровий сигнал і вводилися в комп'ютер.

Таблиця 2. Умови експериментальних досліджень

| Продукт      | Кут нахилу РТС, $\gamma$ | Частота обертання РТС, $n$ | Тиск у конденсаторі РТС, $P$ | Потужність нагрівача, $N$ |
|--------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|
|              | градус                   | хв <sup>-1</sup>           | МПа                          | кВт                       |
| Яблучне пюре | 30...45                  | 2...28                     | 0,05...0,15                  | 0,8...1,5                 |
| Томатна маса |                          |                            |                              |                           |

Температуру теплоносія визначали за величиною тиску пари в конденсаторі РТС. Інтервал реєстрації даних — 600 с. Температура поверхні РТС при кипінні розчину підтримувалася постійною.

**Результати і обговорення.** Наведені результати досліджень, що проведені на експериментальних стендах кафедри процесів обладнання та енергетичного менеджменту ОНАХТ. Отримано термограми при сушінні пшениці, амаранту, проса, вареного гороху в установці з РТС (рис. 4, 5).

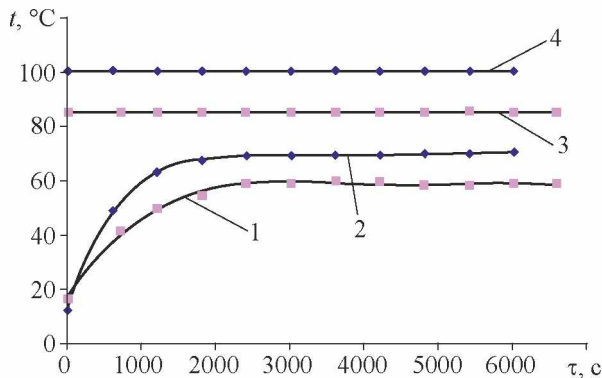
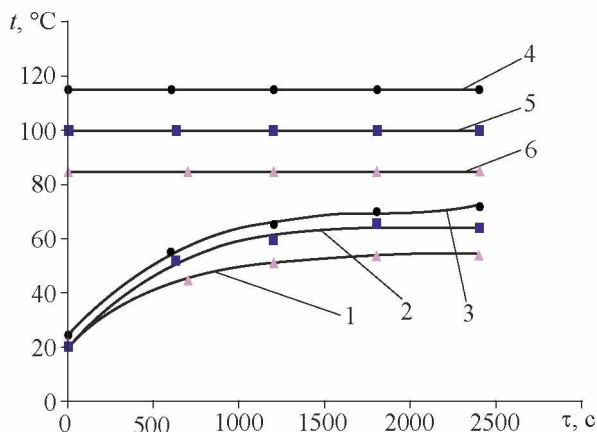


Рис. 4. Зміна температури вареного гороху та поверхні РТС:

1 — температура гороху,  $P = 0,05$  МПа; 2 — температура гороху,  $P = 0,1$  МПа;  
3 — температура поверхні РТС,  $P = 0,05$  МПа; 4 — температура поверхні РТС,  $P = 0,1$  МПа

На початку процесу в апараті із РТС відбувається інтенсивне пароутворення над поверхнею зерна. Температура зернового шару збільшується, що пов'язано зі зменшенням кількості вологи в зерні. Пшеницю сушили до стану нижчого за рівноважну вологість. Середня вологість повітря в лабораторії 80%. Середня температура зерна в експериментах 60...80°C. За таких умов рівноважна вологість зерна становить 14...16%. Період нагрівання для пшениці триває близько 1000 с для різних температур поверхні РТС. Після цього температура зерна стабілізується, графіки зміни температури набувають автотельного характеру (рис. 5). Температури зерна в деяких експериментах перевищують технологічно припустимі при сушінні пшениці. Так, при температурах конденсатора РТС 100...120°C відбувається перегрівання зерна вище 60°C, що пере-

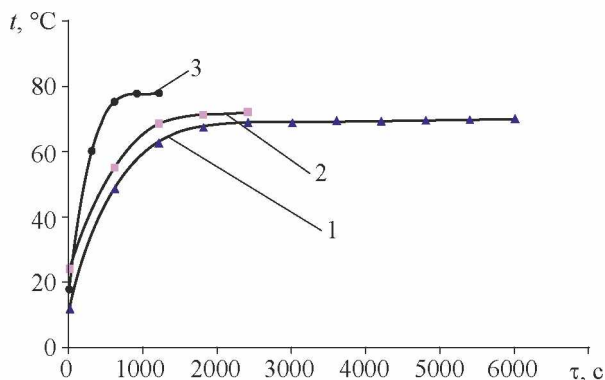
вищує технологічні вимоги. Такі режими обрані для того, щоб максимально розширити діапазон експериментальних значень, визначити можливості експериментальної установки.



**Рис. 5. Зміна температури пшениці та поверхні РТС:**

1 — температура пшениці,  $P = 0,05$  МПа; 2 — температура пшениці,  $P = 0,075$  МПа;  
3 — температура пшениці,  $P = 0,1$  МПа; 4 — температура поверхні РТС,  $P = 0,05$  МПа

Для зручності аналізу динаміки нагрівання різних зернопродуктів температурні криві при однаковій температурі поверхні РТС і частоті обертання нанесені на одну діаграму (рис. 6).



**Рис. 6. Порівняння температур та динаміки нагріву для різних зернових продуктів при  $T_n = 100^\circ\text{C}$  та  $n = 14$  об/хв.:** 1 — варений горох; 2 — пшениця; 3 — амарант

Період прогріву гороху триває близько 2000 с, зерна пшениці — 1000 с. Якщо порівняти з іншими зернопродуктами, то амарант прогрівається найбільш динамічно. Так, уже через 600 с настає автономність графіків. Якщо порівнювати з іншими зернопродуктами, то прогрів амаранту відбувається в 3,3 раза швидше ніж гороху, в 1,7 раза швидше, ніж пшениці, що пояснюється його теплофізичними властивостями, а також розміром зерен. При сушінні вареного гороху в апараті з РТС сполучаються два технологічних процеси — сушіння й плющення вареного гороху. Необхідно було перевірити ступінь

подрібнювання гороху й відповідність гранулометричного складу цього продукту технологічним вимогам (рис. 7).

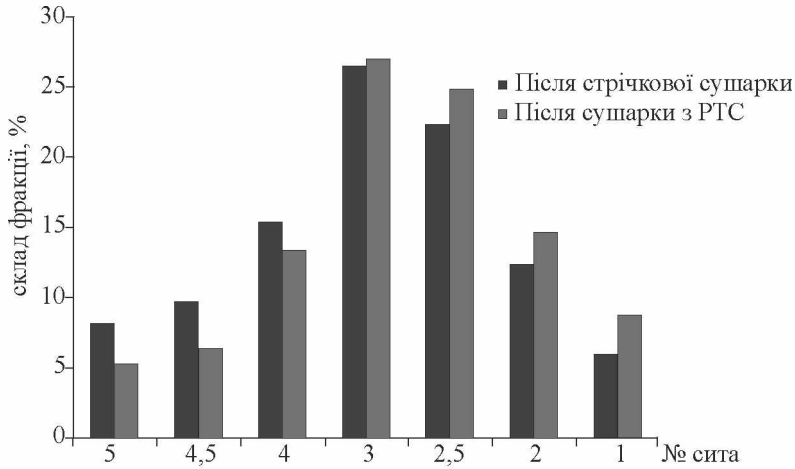


Рис. 7. Гранулометричний склад вареного гороху

Дослідження гранулометричного складу проведено за методом ситового аналізу — шляхом механічного розділення матеріалу на фракції із частинками визначеного розміру. Варіаційні криві (рис. 7) показують, що продукт після сушіння в апараті із РТС містить більший відсоток менших фракцій, що задовольняє технологічні потреби виробництва.

Досліджено вплив кута нахилу РТС, частоти обертання РТС, витрат властивостей продукту на інтенсивність тепловіддачі при випарюванні харчових ННР. Проведено комплексні експериментальні дослідження з випарювання яблучного пюре в апараті з РТС. Для зручності аналізу термограми й зміни сухих речовин (СР) від тривалості процесу побудовані в одній координатній сітці. Концентрація при випарюванні яблучного пюре при частоті обертання РТС  $n = 14$  об/хв і куті нахилу  $\gamma = 30^\circ$  збільшується, наближаючись до теоретичної границі (рис. 8а).

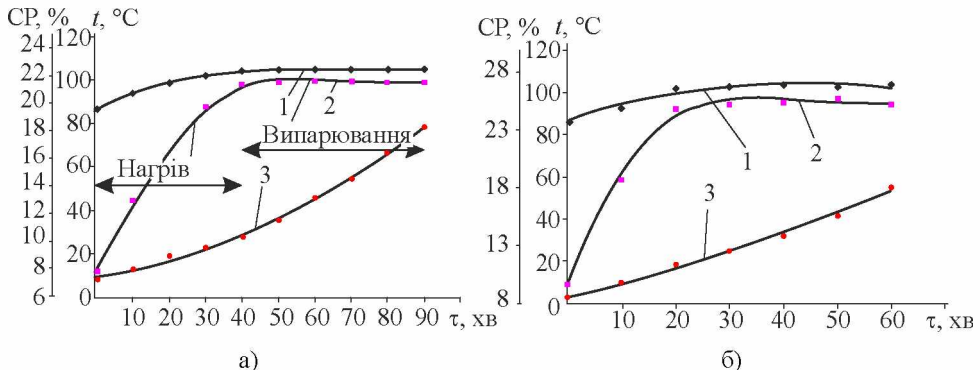


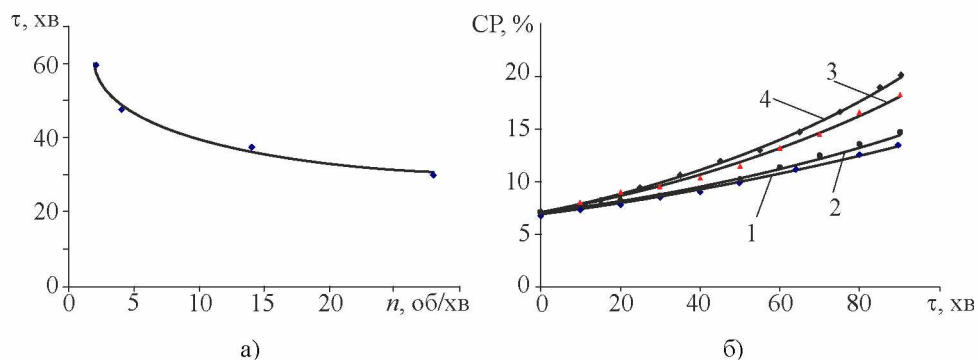
Рис. 8. Зміна вмісту СР і термограми при випарюванні яблучного пюре,  $n = 14$  об/хв:

а)  $\gamma = 30^\circ$ , б)  $\gamma = 45^\circ$ ; 1 — температура поверхні РТС; 2 — температура продукту; 3 — концентрація сухих речовин

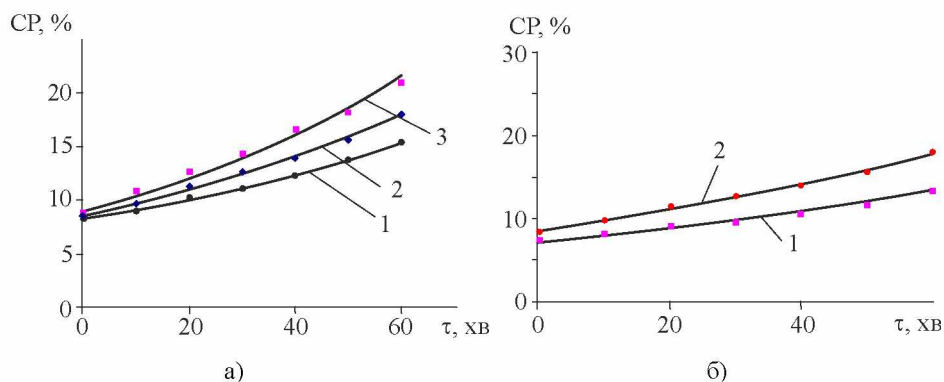
При зміні кута нахилу РТС з  $\gamma = 30^\circ$  до  $\gamma=45^\circ$  період нагрівання розчину до температури кипіння при інших рівних параметрах зменшується вдвічі (рис. 8б). При збільшенні кута нахилу РТС поліпшуються внутрішні гідродинамічні умови для повернення конденсату у випарник РТС. Відповідно, зменшується термічний опір стінки конденсатора. Коефіцієнт теплопередачі зростає.

Вплив частоти обертання РТС на тривалість нагрівання яблучного пюре до температури кипіння при куті нахилу  $30^\circ$  показано на рис. 9. Зміна частоти обертання в 14 разів прискорює процес нагрівання вдвічі.

Інтенсивне руйнування приграничного теплового шару безпосередньо поверхнею теплопередачі призводить до зменшення зовнішнього термічного опору. Зростає коефіцієнт теплопередачі залежно від частоти обертання РТС. Теплота в розчин передається більш ефективно. Інтенсифікація процесу теплообміну впливає не на температуру кипіння розчину, а на швидкість випарювання води з розчину.



**Рис. 9. Вплив частоти обертання РТС:** а) на тривалість нагрівання яблучного пюре до температури кипіння,  $\gamma = 30^\circ$ ; б) на зміну вмісту СР яблучного пюре,  $\gamma = 30^\circ$ :  
1 —  $n = 2$  об/хв; 2 —  $n = 4$  об/хв; 3 —  $n = 14$  об/хв; 4 —  $n = 28$  об/хв



**Рис. 10. Вплив режимних параметрів на зміну вмісту СР яблучного пюре:**

а) вплив частоти обертання РТС,  $\gamma = 45^\circ$ : 1 —  $n = 4$  об/хв; 2 —  $n = 14$  об/хв; 3 —  $n = 28$  об/хв.; б) вплив кута нахилу РТС,  $n = 14$  об/хв: 1 —  $\gamma = 30^\circ$ ; 2 —  $\gamma = 45^\circ$

Залежність зміни швидкості сухих речовин від частоти обертання показана на рис. 10а. Порівняно з кутом нахилу РТС  $\gamma = 30^\circ$  при  $\gamma = 45^\circ$  інтенсивність

випарювання зростає (рис. 10б). Збільшення кута нахилу з  $30^\circ$  до  $45^\circ$  призводить до підвищення сухих речовин у продукті на 36%. Швидкість випарювання води з розчину зростає при збільшенні частоти обертання і кута нахилу РТС (рис. 10). Проведено дослідження з випарювання томатної маси в апараті з РТС. Максимальна концентрація сягала 18,5% СР. Концентрація змінюється за експонентною залежністю (рис. 11).

Період нагрівання томатної маси до температури кипіння близько 30 хв, після чого відбувається випарювання води з поверхні. Томатна маса випаровується при атмосферному тиску. Спостерігається випарювання води в період нагрівання розчину до температури кипіння. Швидкість видалення води в період нагрівання нижча, ніж під час інтенсивного кипіння розчину. При зміні кута нахилу РТС з  $\gamma = 30^\circ$  до  $\gamma = 45^\circ$  період нагрівання томатної маси до температури кипіння при інших рівних параметрах зменшується до 30 хв (рис. 11).

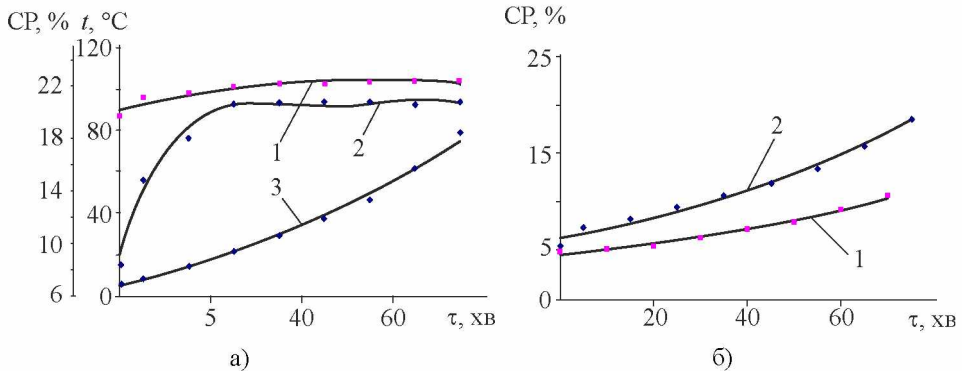


Рис. 11. Вплив режимних параметрів на зміну вмісту СР томатної маси:

а) термограми,  $n = 28$  об/хв,  $\gamma = 45^\circ$ : 1 — температура поверхні РТС; 2 — температура продукту; 3 — концентрація сухих речовин; б) вплив частоти обертання РТС,  $\gamma = 30^\circ$ : 1 —  $n = 4$  об/хв; 2 —  $n = 28$  об/хв

При обробці томатної маси підвищення частоти обертання конденсатора в 7 разів призводить до підвищення вмісту сухих речовин у продукті в 1,7 раза.

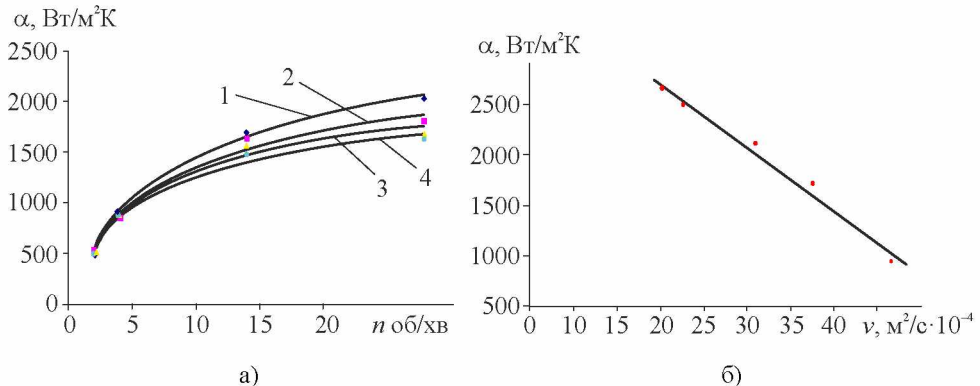


Рис. 12. Вплив на коефіцієнт тепловіддачі від конденсатора РТС до продукту при випарюванні яблучного поре:

а) частоти обертання: 1 — 10,5%, 2 — 11,5%, 3 — 14,5%, 4 — 17,5% СР; б) в'язкості продукту

Визначено коефіцієнти тепловіддачі до продукту ( $\alpha$ ) при випарюванні томатної маси, яблучного пюре (рис. 12). Для досліджуваних рідин спостерігається ріст  $\alpha$  зі збільшенням частоти обертання РТС, що пов'язано з руйнуванням теплового граничного шару безпосередньо поверхнею теплопередачі; зі збільшенням кута нахилу РТС, що зв'язано з поліпшенням гідродинамічних умов усередині конденсатора РТС. Збільшення концентрації розчину призводить до збільшення його в'язкості й зменшення  $\alpha$ .

### **Висновки**

1. Експериментальні дослідження підтверджують, що технічною базою для удосконалення технологій сушіння, концентрування, термообробки можуть стати сучасні способи ефективної теплопередачі РТС, а також апарати на їх основі.

2. Обґрунтовано методики і створено експериментальні стенди для комплексних досліджень процесу випарювання ННР в апаратах на базі РТС, досліджено вплив режимних параметрів на коефіцієнти тепловіддачі. Встановлено, що на інтенсивність теплопереносу суттєво впливає частота обертання конденсатора, кут його нахилу та фізичні властивості продукту. З підвищенням в'язкості продукту ефективність апаратів із РТС (порівняно з традиційними) зростає. Встановлено, що апарат із РТС забезпечує коефіцієнти теплопередачі, при обробці харчових рідин з в'язкістю від 0,8 до 1,5 Па·с, у діапазоні 500...2600 Вт/м<sup>2</sup>·К, що в чотири рази вище, ніж у сучасних апаратах.

3. Обґрунтовано методики і створено експериментальні стенди для комплексних досліджень процесу сушіння дисперсних продуктів в апаратах на базі РТС, досліджено вплив режимних параметрів на коефіцієнти масовіддачі. Зростання швидкості обертання РТС вдвічі призводить до підвищення коефіцієнта масовіддачі на 40%, підвищення температури поверхні термосифону на 10°C, до зростання коефіцієнта масовіддачі  $\beta$  на 8%.

### **Література**

1. Nada Smigic, Ilija Djekic, Margarida Liz Martins, Ada Rocha, Nikoleta Sidiropoulou, Eleni P. Ka-logianni, The level of food safety knowledge in food establishments in three European countries. *Food Control*, Vol. 63, May 2016, P. 187—194, ISSN 0956-7135.

2. Chaminda N. Walpita, Patrick Sorgeloos, Iddya Karunasagar, K.K.D.S. Ranaweera, Mieke Uytten-daele, Elien De Boeck, Liesbeth Jaacsens, International Conference of Sabaragamuwa University of Sri Lanka 2015 (ICSUSL 2015) Challenges in Food Safety as Part of Food Security: Lessons Learnt on Food Safety in a Globalized World. *Procedia Food Science*, Vol. 6, 2016, P. 16—22, ISSN 2211-601X.

3. Pereira R.N., Vicente A.A. Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing. *Food Research International*, Vol. 43, Is.7, August 2010, P. 1936—1943, ISSN 0963-9969.

4. Nevenka Hrovatin, Nives Dolsak, Jelena Zoric, Factors impacting investments in energy efficiency and clean technologies: empirical evidence from Slovenian manufacturing firms. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 127, 20 July 2016, P. 475—486, ISSN 0959-6526.

5. Steven Meyers, Bastian Schmitt, Mae Chester-Jones, Barbara Sturm, Energy efficiency, carbon emissions, and measures towards their improvement in the food and beverage sector for six European countries. *Energy*, Vol. 104, 1 June 2016, P. 266—283, ISSN 0360-5442.

6. Сучасний стан галузей економіки України: проблеми та шляхи вирішення: моногр. / за ред. І.І. Савенко, І.О. Седікової. Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. 433 с.

7. Bezbah I.V., Burdo O.G. Rotating heat pipes in devices for heat treatment of the food-stuffs. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, Is. 4, March 2008, P. 341—343.