

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 664.048.5.022.63

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ В ХАРЧОВИХ
ТЕХНОЛОГІЯХ
APPLICATION OF THERMOMECHANICAL SYSTEMS IN FOOD TECHNOLOGIES

Безбах І. В., Воскресенська О. В.

Одеська національна академія харчових технологій, г. Одеса

Bezbach I.V., Voskresenskaya Ye. V.

Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

Copyright © 2016 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Анотація. Розглянуті недоліки устаткування для термомеханічної обробки харчових продуктів. Пропонуються шляхи рішення енергетичних проблем в технологіях термообробки харчових рідин, сушіння дисперсних продуктів. Представлені конструкції сушарок і апаратів для термообробки на базі термосифонів, що обертаються. Приведені результати експериментальних досліджень процесів сушіння, термообробки харчових продуктів в апаратах з термосифонами, що обертаються. Пропонуються моделі в числах подібності, для розрахунку процесів тепло- масопереносу при термообробці і сушінні харчових продуктів в перерахованих апаратах. Запропоновані критеріальні рівняння для проектування і оптимізації подібного класу машин. Запропоновані конструкції апаратів здатні забезпечити ефективний теплоперенос при обробці в'язких і дисперсних харчових продуктів при зменшенні енергетичних втрат до 30%.

Abstract. Consider defects the equipment for thermomechanical treatment of food products. The ways of solving of energy problems in technology heat treatment of food liquids, drying of dispersed products. Designs of dryers and apparatus for heat treatment on the basis of rotating thermosiphons. The results of experimental studies of the drying process, the heat treatment of foods in the machines with rotating thermosyphon. The models for the calculation of heat and mass transfer processes in heat treatment and drying of food products in these devices. Suggested criterial equations for the design and optimization of this class of machines. The proposed design of devices capable of providing effective heat transfer and in the processing of viscous foodstuffs dispersed while reducing the energy loss of up to 30%.

Ключові слова: термомеханічна обробка, енергія, харчові технології, моделювання.

Keywords: thermomechanical processing, energy, food technology, modeling.

Вступ. Устаткування, яке використовується в харчовій промисловості для механічної і термомеханічної обробки харчової сировини є одним з найбільш енерговитратних. Розглянуті достоїнства і недоліки термомеханічного устаткування для обробки дисперсних продуктів і неньютонівських рідин.

Основними проблемами, що виникають при тепловій обробці харчових неньютонівських рідин (ННР), є зміна якості продукту залежно від тривалості теплової дії; процес інтенсивного утворення накипу. Для вирішення проблем термообробки харчових ННР застосовують термомеханічні агрегати (ТМА). Слабким елементом ТМА є вузол ущільнення підведення пари і відведення конденсату. Герметизація вузла з'єднання ротора, що обертається, з нерухомим паропроводом і конденсатопроводом є технічно складним завданням.

Аналіз стану зерносушильної техніки на харчових підприємствах України показує, що в 48 % випадків експлуатуються шахтні агрегати вітчизняного виробництва. Шахтні конвективні зерносушарки мають ряд недоліків: невисокий ККД використання об'єму апарату; мале питоме знімання вологості; нерівномірність прогріву зернової маси; високі енерговитрати (5 МДж/кг і вище). Тому при модернізації підприємств деякі аграрії (до 15 %) збираються приділити увагу ділянкам сушіння, як одним з найбільш витратних у складі зерносушильних [1]. Набагато рідше (до 5%) на виробництвах використовуються сушарки, теплота в яких передається зерну від нагрітої поверхні. В якості нагрітої поверхні можуть використовуватися труби, що обігріваються зсередини паром або гарячою водою. Парові сушарки забезпечують високі коефіцієнти теплопередачі до зернового потоку 30...90 Вт/м² К. Недоліки конструкцій парових сушарок: складна апаратно-технічна реалізація, потрібні додаткові

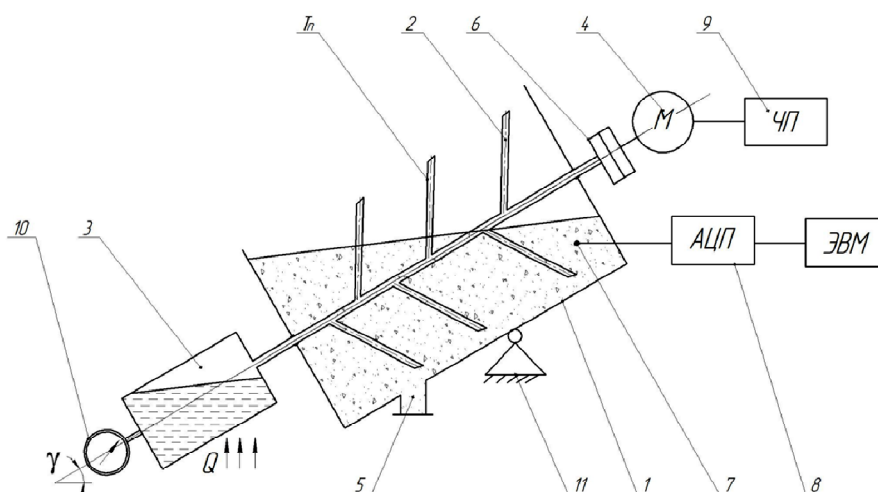
ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

пристрої для подання пари, відведення конденсату, утворення водяних пробок в трубках, низька міра перемішування зернового потоку.

Застосування ТМА на базі ротаційних термосифонів (РТС) в харчовій промисловості дозволяє реалізувати наступні шляхи зниження енерговитрат: скорочення ланцюжка трансформації енергії; поєднання в апараті декількох технологічних процесів; інтенсифікація тепломасообміну; ефективна доставка енергії до продукту; утилізація теплоти. Дія на в'язкий (дисперсний) продукт за допомогою РТС сприяє ефективному руйнуванню гідродинамічного і теплового пограничних шарів, що призводить до збільшення інтенсивності процесів перенесення. Можливо виділити декілька основних напрямів застосування апаратів на базі РТС. Це теплообмінники, випарні установки, сушарки для дисперсних продуктів.

Методи дослідження. Проведено експерименти по сушінню дисперсних продуктів, термообробці ННР в апараті з РТС. Апарат (рис. 1) складається з корпусу 1, усередині якого розміщений ротор 2, виконаний у вигляді термосифону, що обертається. Ротор 2 сполучений з випарником 3 і через муфту 6 з електродвигуном 4. Ротор 2 і випарник 3 є герметично закритою порожниною, частково заповненою теплоносієм. У нижній частині корпусу 1 виконаний патрубок 5 для розвантаження продукту і шарнір 11 для регулювання кута нахилу корпусу 1 [2,3].

Апарат працює таким чином. При підводі теплоти (Q) до випарника 3 теплоносій починає кипіти, пара, що утворюється, спрямовується в ротор 2, де конденсується на стінках, віддаючи теплоту фазового переходу продукту. Конденсат під дією гравітаційних сил рухається у випарник 3. Відбувається нагрівання, перемішування, або сушіння продукту, після чого продукт вивантажується через нижній патрубок в корпусі.



1 – корпус, 2 – ротор, виконаний у вигляді термосифону, що обертається. 3 – випарник, 4 – електродвигун, 5 – патрубок, 6 – муфта, 7 – термодатчик, 8 – аналого-цифровий перетворювач, 9 – частотний перетворювач, 10 – манометр, 11 – шарнір

Рис. 1 – Конструкція апарату з РТС

В процесі експерименту змінювали кут нахилу РТС (γ), частоту обертання РТС (n). Вимірювання температури здійснювали через певні проміжки часу за допомогою термодатчиків 7, поміщених в об'єм продукту. Термодатчики були під'єднані до аналого-цифрового комплексу 8. Частота обертів РТС вимірювалася за допомогою тахометра і регулювалася частотним перетворювачем 9. Під час експериментів тиск P у випарнику і конденсаторі РТС підтримувався постійним, таким чином поверхня конденсатора залишалася ізотермічною. Тиск пари теплоносія у РТС вимірювали за допомогою манометра 10.

В якості об'єктів досліджень були вибрані крупнозерністі дисперсні продукти: пшениця, варений горох; дрібнозерністі: просо, амарант; ньютонівські рідини: томатна маса, яблучне пюре.

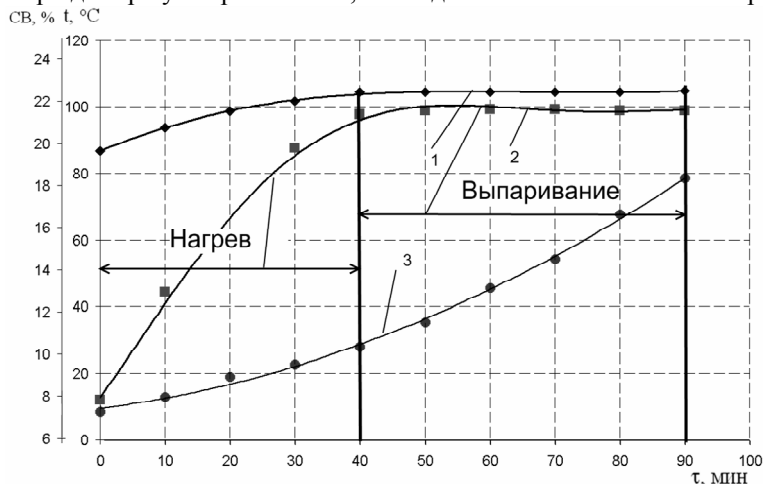
Зерно пшениці зволожували до стану сирого [4]. Початкова вологість зерна пшениці в досліді відповідає 22,5 %.

Початкова вологість дисперсних продуктів підтримувалася на рівні технологічних вимог. Кінцева вологість продуктів зазвичай вибиралася з таблиць як рівноважна для цих атмосферних умов. Температура поверхні конденсатора РТС підтримувалася такою, щоб не відбувалося перегрівання продукту вище за технологічні вимоги.

Результати досліджень. Проведені експерименти по випарюванню яблучного пюре в апараті з РТС. Концентрація при випарюванні яблучного пюре при частоті обертів РТС $n = 14$ об/хв, і куті нахилу $\gamma = 30^\circ$ збільшу-

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ється, наближаючись до теоретичної межі (рис. 2). Концентрація яблучного пюре збільшена з 7,3 до 18,4 % сухих речовин. Період нагріву розчину (рис. 2) до температури кипіння близько 40 хв. Розчин кипить при атмосферному тиску. Спостерігається випарювання води в період нагріву розчину до температури кипіння. Швидкість видалення води в період нагріву в 2 рази нижче, ніж під час інтенсивного кипіння розчину.



1 – температура поверхні РТС; 2 – температура продукту; 3 – концентрація сухих речовин
Рис. 2 – Зміна концентрації сухих речовин і термограми при випарюванні яблучного пюре,
 $n = 14 \text{ об/хв}$, $\gamma = 30^\circ$

Проведені експерименти по сушінню пшениці в апараті з РТС. В процесі нагріву зерна відбувається інтенсивне пароутворення на поверхні продукту, тому періоду прогрівання матеріалу на кривій сушіння не спостерігається.

У першому періоді швидкість сушіння змінюється в межах $0,0072 \dots 0,0056 \text{ \%}/\text{с}$, залежно від температури матеріалу. Тривалість першого періоду складає близько 1000 с. Далі швидкість сушіння падає приблизно в три рази і складає $0,0024 \dots 0,0017 \text{ \%}/\text{с}$.

Сушіння протікає в обмежених умовах – в щільному зерновому шарі. Тому постійно є присутньою поверхнева волога, що характерно для періоду постійної швидкості сушіння.

Вплив на швидкість сушіння робить зміна температури поверхні конденсатора РТС. Вологість зерна в серії дослідів знижується в середньому на 10 %, що відповідає стандартним зерносушаркам.

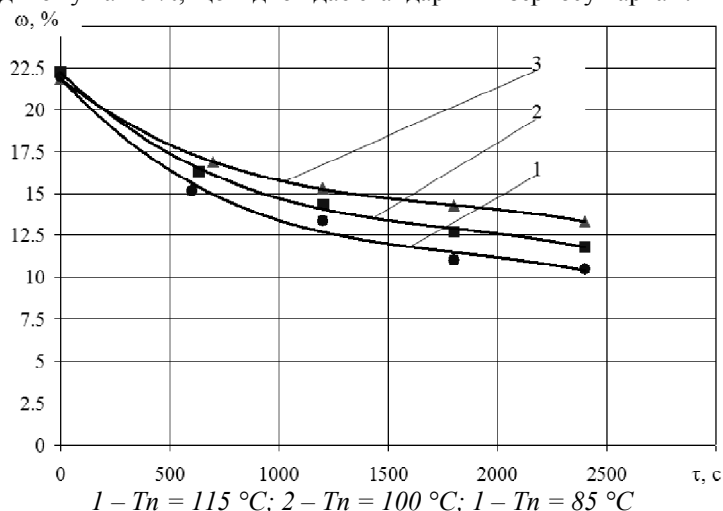


Рис. 3 – Криві сушіння зерна пшениці при різних температурах поверхні конденсатора T_n

Узагальнення результатів. Вид критеріальних рівнянь для узагальнення експериментальних даних отримано при використанні методу аналізу розмірності [5]. При узагальненні результатів по сушінню дисперсних продуктів в апараті з РТС отримано рівняння виду:

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

$$Nu_m = 8.1 \cdot 10^{-9} \cdot Pe^{0.5} \cdot \left(\frac{T_n}{T_3}\right)^{0.4} \quad (1),$$

де:

Nu_m – число Нусельта дифузійне;

Pe – число Пекле теплове;

$\left(\frac{T_n}{T_3}\right)$ – симплекс температур.

База експериментальних даних по кінетиці сушіння пшениці в сушарці з РТС задовільно узагальнюється критеріальним рівнянням. З погрішністю не більше 15 % рівняння (1) дозволяє розрахувати коефіцієнт масовіддачі

дачі β в межах $1,2 \cdot 10^3 \leq Pe \leq 1,3 \cdot 10^4$, і параметричного комплексу $2,1 \leq \left(\frac{T_n}{T_3}\right) \leq 4$.

Висновки. Встановлено, що на інтенсивність теплопереносу при обробці ННР в апараті з РТС істотно впливає частота обертання конденсатора, кут його нахилу і фізичні властивості продукту. З підвищенням в'язкості продукту ефективність апаратів з РТС (в порівнянні з традиційними) зростає. Встановлено, що апарат з РТС забезпечує коефіцієнти теплопередачі, при обробці харчових рідин з в'язкістю від 0,8 до 1,5 Па·с; в діапазоні 500...2600 Вт/м²·К.

Встановлено, що при випарюванні яблучного пюре в апараті з РТС, збільшення частоти обертання конденсатора в 7 разів призводить до підвищення вмісту сухих речовин до 33 %, а коефіцієнта тепловіддачі в 4,4 разу. При обробці томатної маси підвищення частоти обертання конденсатора в 7 разів призводить до підвищення вмісту сухих речовин в 1,7 разів. Збільшення кута нахилу РТС з 30° до 45° призводить до підвищення вмісту сухих речовин в продукті до 36 %, а коефіцієнта тепловіддачі в 1,3 разу.

Істотний вплив на коефіцієнт масовіддачі при сушінні дисперсних продуктів має частота обертання і температура поверхні РТС. Зростання швидкості обертання РТС в 2 рази призводить до підвищення коефіцієнта масовіддачі на 40%, підвищення температури поверхні термосифону на 10 °С призводить до зростання коефіцієнта масовіддачі β на 8 %.

Запропоновані конструкції апаратів з РТС здатні забезпечити ефективний теплоперенос при обробці в'язких і дисперсних харчових продуктів при зменшенні енергетичних втрат до 30 %.

Література

1. Современное состояние и тенденции развития мощностей по хранению зерна в хозяйствах Украины, Журнал «Хранение и переработка зерна»: <http://hipzmag.com>
2. Бурдо, О.Г. Эволюция сушильных установок [Текст] / О.Г. Бурдо, // Монография / - О., Полиграф, 2010. – 368 с.
3. Бурдо, О. Г. Кинетика сушіння пшениці в апаратах на базі термосифонів [Текст] / О. Г. Бурдо, І. В. Безбах, В. І. Донкоглоу // Наук. пр. /ОНАХТ. – О., 2009. - Вип. 36, т. 1. - С. 297-302.
4. Гинзбург, А. С. Влага в зерне [Текст] / А.С. Гинзбург, В. П. Дубровский, Е. Д. Казаков– М.: Колос, 1969. - 217 с.
5. Исаченко В. П. , Осипова В. А. , Сукомел А. С. Теплопередача М.: Энергия, 1975. – 488 с.

References

1. *Sovremennoe sostoyanie i tendencii razvitiya moshchnostej po hraneniyu zerna v hozyajstvakh Ukrainy*, Zhurnal «Hranenie i pererabotka zerna», Available at: <http://hipzmag.com>
2. Burdo O.G. (2010), *Evolyuciya sushil'nyh ustanovok* [Dryers evolution], Poligraf, Odessa, Ukraine.
3. Burdo O. G., Bezbah I. V., Donkoglov V. I. (2009), “Kinetika sushinnya pshenici v aparatah na bazi termosifoniv” *Nauk. pr. ONAFT*, Odessa, Vol. 36, Issue 1, pp. 297-302.
4. Ginzburg, A. S., Dubrovskij V. P., Kazakov E. D. (1969), *Vlaga v zerne* [Moisture in grain], Kolos, Moscow, Russia.
5. Isachenko V. P., Osipova V. A. , Sukomel A. S. (1975), *Teploperedacha* [Heat transfer], Energiya, Moscow, Russia.