ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ В АПАРАТІ З РОТАЦІЙНИМ ШНЕКОВИМ ТЕРМОСИФОНОМ

Безбах І.В., д-р техн. наук, доцент, Шишов С.В., аспірант
Одеська національна академія харчових технологій

Анотація. Представлено результати експериментальних досліджень процесу теплообміну в апараті з ротаційним шнековим термосифоном. Проведено аналіз роботи роторних теплообмінників для термообробки сировини, апаратів на базі теплових труб, що обертаються. Виявлені достоїнства й недоліки обладнання. Пропонується для термообробки харчових рідин використовувати апарати на базі ротаційних термосифонів. З точки зору надійності ці апарати більш ефективні, так як є автономними конструкціями. Поверхня термосифону, що обертається дозволяє реалізувати локальний енергетичний вплив безпосередньо на прикордонний тепловий шар в продукті. Показано, що доцільним є проведення дослідження процесів теплообміну в таких апаратах.

Розроблено експериментальні стенди і методики досліджень. Розроблено експериментальну установку для моделювання руху конденсату всередині конденсатора шнекового ротаційного термосифону. Розроблено експериментальну установку для дослідження процесу теплообміну в системі «термосифон-продукт».

Проведено моделювання внутрішньої і зовнішньої задачі теплообміну для шнекового ротаційного термосифону. Зовнішня задача враховує гідродинаміку і тепломасообмін при обтіканні конденсатора термосифона продуктом, внутрішня задача – гідродинаміку руху конденсату всередині конденсатора. Застосування шнекового конденсатора дає ряд переваг – одночасне перемішування, нагрівання, транспортування продукту. Також, на відміну від розгалуженого конденсатора, в шнековому не відбувається запирання конденсату під дією відцентрової сили. Проведені дослідження по моделюванню гідродинаміки показали, що для шнекового термосифону повернення конденсату в випарник, внутрішній теплообмін буде найбільш ефективним при кутах нахилу конденсатора 37...45 град. Виявлено, що кут нахилу ротаційного термосифону впливає на динаміку розігріву продукту. Чим більше кут нахилу, тим швидше розігрівається продукт. Це пов'язано з ефективним поверненням конденсату і зменшенням термічного опору. Отримані результати будуть використані для розробки методів розрахунку і оптимізації апаратів на базі ротаційних термосифонів.

Ключові слова: ротаційні термосифони, моделювання, теплообмін

EXPERIMENTAL SIMULATION OF HEAT EXCHANGE IN AN APPARATUS WITH ROTARY SCREW THERMOSIPHON

Bezbakh I. V., Doctor of Engineering Science, Associate Professor,
Shyshov S. V., postgraduate student
Odessa National Academy of Food Technologies

Abstract. The results of experimental researches of the heat exchange process in the device with a rotary screw thermosiphon are presented. The works of rotary heat exchangers for heat treatment of raw materials, heat exchangers with rotating heat pipes are considered. Deficiencies of the equipment are defined. It is proposed to use devices based on rotary thermosyphons for heat treatment of food liquids. From the point of view of reliability these devices are more effective as are independent designs. The surface of the rotating thermosiphon allows to realize local energy influence directly on a boundary thermal layer in a product. It is shown that it is expedient to conduct a study of heat transfer processes in such devices.

Experimental stands and research methods have been developed. An experimental setup for modeling the movement of condensate inside the condenser of a screw rotary thermosiphon has been developed. An experimental setup has been developed to study the heat transfer process in the "thermosiphon-product" system.

The modeling of the internal and external heat transfer problem for the screw rotary thermosiphon is carried out. The external problem takes into account the hydrodynamics and heat and mass transfer during the flow of the thermosiphon condenser product, the internal problem - the hydrodynamics of condensate movement inside the condenser. The use of a screw capacitor gives a number of advantages - simultaneous mixing, heating, transportation of the product. Also, unlike a branched capacitor, in the screw there is no locking of the condensate under the

action of centrifugal force. Studies on the modeling of hydrodynamics have shown that for the screw thermosyphon return of condensate to the evaporator, the internal heat exchange will be most effective at angles of inclination of the condenser 37... 45 deg. It was found that the angle of the rotary thermosyphon affects the heating dynamics of the product. The greater the angle of inclination, the faster the product heats up. This is due to the effective return of condensate and reduction of thermal resistance. The results will be used to develop methods for calculating devices based on rotary thermosyphons.

Key words: rotary thermosyphons, modeling, heat exchange

Вступ. Робота присвячена дослідженню роботи обладнання для термообробки харчової сировини. Унікальність розробленого обладнання полягає в тому, що в його основі використано принципи адресної доставки енергії до елементів сировини. Це забезпечує підвищення ефективності процесів і поліпшення якості продукції. Проведено експериментальне моделювання теплообміну в апараті з ротаційним шнековим термосифоном (РТС). У лінії виробництва томатної пасты апарат з РТС може бути використаний в якості підігрівача або випарної установки.

Виробники харчової продукції приділяють велику увагу підвищенню якості готового продукту, витратам енергії, екології виробництва [1-3]. Витрати енергії на термообробку, випарювання становлять від $2,8 \cdot 10^6$ кДж на 1 т води, що випаровується (одноступінчатий процес) до $0,85 \cdot 10^5$ кДж на 1 т (багатоступінчатий процес). В процесі випарювання досить часто утворюються рідини, що не підкоряються закону внутрішнього тертя Ньютона. Високі енерговитрати при їх обробці, викликають необхідність пошуку нових ефективних способів і устаткування.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Для термообробки різних дисперсних продуктів і неньютонівських рідин (ННР) використовуються ротаційні теплообмінники, теплообмінники з ротаційними поверхнями, апарати на базі теплових труб (ТТ) або РТС. Конденсатор, що обертається, руйнує своєю поверхнею прикордонний тепловий шар, за рахунок чого інтенсифікується процес теплообміну, знижуються енерговитрати, продукт не пригоряє до гріючої поверхні.

Теплообмінники з ТТ, РТС довели свої переваги в порівнянні зі звичайними теплообмінниками в багатьох областях застосування, таких як утилізація відпрацьованого тепла, обробка відходів і сонячна енергія [4]. Але застосування і експериментальні дослідження апаратів на базі РТС в харчових технологіях обмежені.

В роботі [5] наведені результати досліджень контактного теплообміну між зернистим матеріалом і нагрівальними пластинами всередині пластинчатого роторного теплообмінника. Показано, що при обробці матеріалу переважає контактний теплообмін на поверхні гарячої стінки нагрівальних пластин. Проаналізовано вплив режимних параметрів на середній по часу коефіцієнт контактного теплообміну.

В роботі [6] проведено експериментальне дослідження часу перебування частинки в пластинчастому роторному теплообміннику. Результати показали, що середній час перебування частинок знижується зі збільшенням швидкості потоку частинок, швидкості обертання і нахилу теплообмінника.

Але експериментальні дослідження роторних теплообмінників [4 – 6] проведені для хімічної промисловості. Крім того, в роторних теплообмінниках ненадійним є вузол з'єднання ротора з нерухомим паропроводом і конденсаторопроводом. Доцільним є проведення дослідження, присвяченого апаратам на базі РТС, ТТ. З точки зору надійності ці апарати більш ефективні, так як є автономними конструкціями.

В роботі [7] досліджені теплові характеристики двофазної петлевої термосифонної прокладки, що обертається. Досліджено структури паро-рідинного потоку під впливом відцентрової сили, швидкість теплопередачі, теплові опори.

В роботі [8] представлені експериментальні дослідження впливу відцентрової сили на продуктивність ТТ, що обертається. Експерименти проводилися при різних швидкостях обертання, радіусах обертання і вхідних потужностях ТТ. Результати показують, що температура ТТ, що обертається збільшується зі зменшенням радіуса обертання і швидкості обертання, а також зі збільшенням вхідної потужності.

Дослідження [7, 8] обмежені конструкціями конденсатора ТТ, розгалужені конструкції конденсаторів не розглядаються. При моделюванні теплообміну в апаратах з РТС необхідно розглядати зовнішню і внутрішню задачі. Зовнішня задача пов'язана з моделюванням гідродинаміки і теплообміну при русі продукту назовні конденсатора РТС, внутрішня задача пов'язана з гідродинамікою руху конденсату всередині РТС.

В роботі [9] розглянуті апарати з РТС, що використовуються для термообробки харчових продуктів. Показана ефективність РТС у задачах тепло- і масообміну. Отримано вплив частоти обертання на тепловіддачу. Показано, що зі збільшенням числа обертів РТС дія консервативної сили посилюється. Конденсат пари в погано повертається у випарник, збільшується термічний опір. Досліджено кризу теплообміну в РТС. Визначена функція критичного числа Фруда. В роботі [9] не розглянуті питання, пов'язані з експериментальними дослідженнями апаратів із розгалуженим шнековим РТС.

Необхідно провести дослідження гідродинаміки руху конденсату в шнековому РТС; дослідження зовнішньої задачі тепло-масообміну в апаратах на базі шнекового РТС.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є експериментальне моделювання теплообміну в апараті зі шнековим РТС.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести експериментальне моделювання руху конденсату всередині конденсатора шнекового РТС;
- виявити вплив кута нахилу конденсатора шнекового РТС на тепловіддачу до продукту без обертання;
- отримати термограми підігріву продукту при обертанні РТС.

Матеріали та методи досліджень теплообміну в апараті зі шнековим РТС. Моделювання руху конденсату всередині РТС.

1 – випарник РТС, 2 – шнековий конденсатор РТС, 3 – мановакууметри, 4 – шарнір, 5 – запірний клапан, 6 – термостат, 7 – регулятор, 8 – вентилятор, 9 – фторопластовий підшипник, 10 – привод, 11 – ремінна передача

Рис. 1 – Експериментальний стенд для дослідження гідродинаміки руху конденсату всередині конденсатора РТС

Гідродинаміка течії конденсату всередині розгалуженого конденсатора РТС, наведеного в [9], залежить від кута нахилу, частоти обертання конденсатора РТС. Ставиться завдання підтвердити отримані аналітичні дані експериментально. Для моделювання руху конденсату всередині конденсатора РТС різного конструктивного виконання, розроблено експериментальний стенд (рис. 1). РТС виконано з хімічного термостійкого скла. В якості робочого тіла в РТС використовували етиловий спирт (об'ємна частка 96 %, обсяг 200 мл).

Нахил і напрямок обертання РТС будуть визначати можливість повернення конденсату у випарник. Для моделювання гідродинаміки руху конденсату всередині РТС проведено ряд експериментів.

Повітря з РТС відкачували за допомогою вакуум насоса. В експериментах варіювали кут нахилу РТС ($\gamma=20\ldots90$ град), частоту обертання РТС ($n=0\ldots2$ с⁻¹), тиск грючої пари ($P_{\text{абс}} = 0,1$ МПа). Підтримували стабільне кипіння робочого тіла при заданому тиску за рахунок регулятора напруги термостату.

Дослідження впливу кута нахилу конденсатора шнекового РТС на тепловіддачу до продукту без обертання. Для моделювання зовнішньої задачі теплообміну в системі «РТС-продукт» розроблено експериментальний стенд (рис. 2).

Рис. 2 – Експериментальна установка

Стенд складається з корпусу 1, парогенератора 2, шнекового конденсатора 3, завантажувальної воронки 4, клинопасової передачі 5, електродвигуна 6, пристрою для вивантаження 7, шарніра 8, клапана 9, манометра 10, аналого-цифрового перетворювача (АЦП), термопар [10]. Термопари перебували в продукті і комутувалися до АЦП. Проводили вакуумування РТС. Для цього піднімали тиск теплоносія всередині РТС, після чого надлишок повітря скидали за допомогою клапана 9. Кут нахилу РТС варіювався і становив $\gamma=15, 25$ і 45 град. Вимірювали температур у продукту за проміжки часу ($\Delta\tau=6$ с).

В якості модельного продукту використовували воду. Потужність електричного нагрівача в випарнику РТС $N=1500$ Вт. Експерименти проводили в діапазоні (табл. 1).

Таблиця 1

Умови експериментальних досліджень

Кут нахилу РТС γ , град	Частота обертання РТС, n , с ⁻¹	Тиск пари всередині РТС, $P_{абс}$, МПа	Коефіцієнт завантаження ємності, %
15...45	0	0,05...0,13	50

Дані первинних перетворювачів температури через АЦП вводилися в ПК. Температуру вимірювали в різних точках об'єму, після чого усереднювали. Вимірювали тиск теплоносія за інтервал $\Delta\tau=300$ с. Температуру теплоносія отримували по таблиці властивостей водяної пари [11] по відповідному тиску. Температура поверхні РТС підтримувалася постійною.

Моделювання теплообміну при обертанні РТС. Експерименти проведені на установці (рис. 2). В якості продукту використовували томатну масу 10% СР. Умови експериментальних досліджень наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Умови експериментальних досліджень

Кут нахилу РТС γ , град	Частота обертання РТС, n , с ⁻¹	Тиск пара всередині РТС, $P_{абс}$, МПа	Коефіцієнт завантаження ємності, %
45	20	0,11...0,14	50

Додатково вимірювали частоту обертання РТС за допомогою тахометра марки Testo 465. Температуру продукту визначали з інтервалом 60 с.

Результати дослідження роботи апарату зі шнековим РТС. Результати експериментального моделювання руху конденсату всередині РТС. Без обертання шнекового РТС конденсат накопичується в нижній частині витків шнека. У деяких випадках парі доводиться долати гідравлічний опір шару рідини. Спостерігається пародинамічний ефект.

При частоті обертання $0,2$ с⁻¹ і збільшенні кута нахилу РТС, продуктивність шнека по конденсату збільшується (рис. 3).

а – схема; б, в – фото

Рис. 3 – Розподіл пари-конденсату в конденсаторі шнекового РТС, $n=0,2$ с⁻¹, $\gamma=20^\circ$

При обертанні шнекового РТС конденсат ефективно повертається у випарник незалежно від напрямку руху. При правосторонньому обертанні конденсат за рахунок сили тяжіння рухається в нижню частину конденсатора і викидається в центральну трубку. При лівосторонньому – конденсат піднімається у верхню частину конденсатора і також викидається в центральну трубку, яка з'єднана з випарником [12].

Результати експериментальних досліджень тепловіддачі до продукту без обертання РТС. За результатами досліджень видно, що присуття невелика ділянка розігріву самої установки, до 500 секунд, після

чого починається розігрів продукту. Температура теплоносія (рис. 4) в процесі експериментів була практично постійною для різних кутів нахилу.

Рис. 4 – Вплив кута нахилу РТС на тепловіддачу до продукту. Температури продукту при куті нахилу: 1 – 15 град , 2 – 25 град, 3 – 45 град

Кут нахилу РТС впливає на динаміку розігріву продукту. Чим більше кут нахилу, тим швидше розігрівається продукт. Це пов'язано з ефективним поверненням конденсату і зменшенням термічного опору.

Результати експериментальних досліджень тепловіддачі до продукту при обертанні РТС. Період нагріву розчину (рис. 5) до температури 80 °C близько 400 с. Після чого відбувається випаровування вологи з поверхні продукту. Розчин випаровується при атмосферному тиску. Температура поверхні РТС практично постійна і сягає 110 °C.

1 – температура продукту, 2 – температура поверхні РТС

Рис. 5 – Термограми розігріву томатної маси в апараті зі шнековим РТС

Криві 1 і 2 апроксимуються поліноміальними залежностями. Для характеристики ступеня близькості ліній тренду до вихідних даних розраховано коефіцієнт кореляції R^2 . Для кривих 1 і 2 $R^2 = 0,98$, що говорить про високу точність обробки вихідних даних.

Висновки. Застосування шнекового конденсатора дає ряд переваг – можливість реалізувати одночасне перемішування, нагрівання, транспортування продукту. Також, на відміну від конденсатора, описаного в [9], в шнековому не відбувається запирання конденсату під дією відцентрової сили.

Проведені дослідження по моделюванню гідродинаміки в конденсаторі шнекового РТС показали, що повернення конденсату в випарник буде найбільш ефективним при кутах нахилу конденсатора 37...45 град. Отримані результати будуть використані для розробки методів розрахунку і оптимізації апаратів на базі РТС.

Кут нахилу РТС впливає на динаміку розігріву продукту. Чим більше кут нахилу РТС, тим швидше розігрівається продукт. Це пов'язано з ефективним поверненням конденсату і зменшенням термічного опору (рис. 4).

References

1. Pereira, R.N., Vicente, A.A. (2010). Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing. *Food Research International*, 43(7), 1936–1943.
2. Nevenka Hrovatin, Nives Dolsak, Jelena Zoric (2016). Factors impacting investments in energy efficiency and clean technologies: empirical evidence from Slovenian manufacturing firms. *Journal of Cleaner Production*, 127, 475–486.
3. Steven Meyers, Bastian Schmitt, Mae Chester-Jones, Barbara Sturm (2016). Energy efficiency, carbon emissions, and measures towards their improvement in the food and beverage sector for six European countries. *Energy*, 104, 266–283.
4. Jouhara, H., Chauhan, A., Nannou, T., Almahmoud, S., Delpech, B., Wrobel, L. C. (2017). Heat pipe based systems - Advances and applications. *Energy*, 128, 729-754, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.028>.
5. Luanfang Duan, Chonggang Qi, Xiang Ling, Hao Peng (2018). The contact heat transfer between the heating plate and granular materials in rotary heat exchanger under overloaded condition. *Results in Physics*, 8, 600-609, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.018>.
6. Luanfang Duan, Zhengyu Cao, Guihuan Yao, Xiang Ling, Hao Peng (2017). Visual experimental study on residence time of particle in plate rotary heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 111, 213-222, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.087>.
7. Kamal, M. M., Amer, I. & Aboelnasr, M. (2010). Rotating Heat Pipe Performance with Internal Wire Mesh Screens. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 224(7), 993–1005. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE962>
8. Hamdy Hassan, Souad Harmand (2017). An experimental work on the effect of the radius of rotation on the performance of revolving heat pipe (RVHP). *Applied Thermal Engineering*, 123, 537-545, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.133>;
9. Bezbah, I.V., Burdo O. G. (2008). Rotating heat pipes in devices for heat treatment of the food-stuffs. *Applied Thermal Engineering*, 28(4), 341–343, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.021>.
10. Burdo, O.H., Bezbakh, I. V., Zikov, O.V., Shyshov S.V. (2018). Doslidzhennya vplyvu rezhyimnykh i konstruktyvnykh parametriv pry obrobtsi v'yazkykh ta dyspersnykh produktiv v aparatakh na bazi rotatsiynykh termosyfoniv. *Naukovi pratsi Natsional'noho universytetu kharchovykh tekhnolohiy*, 24(6), 80-89.
11. Vukalovich, M.P., Rivkin, S.L., Aleksandrov, A.A. (1969). *Tablitsy teplofizicheskikh svoystv vody i vodyanogo para*. Moskva.
12. Bezbakh, I. V., Shyshov, S. V. (2020). *Modelyuvannya protsesiv teploobminu v shnekovomu aparati na bazi rotatsiynoho termosyfonu*. Enerhiya. Biznes. Komfort: materialy rehional'noyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi (20 hrudnya 2019 r.). Odesa: ONAKhT, 45-78.

Отримано в редакцію 03.07.2020

Прийнято до друку 20.10.2020

Received 03.07.2020

Approved 20.10.2020