

Погребняк Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доц., докторант кафедры оборудования пищевой и гостиничной индустрии им. М.И. Беляева, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-56; e-mail: Pogrebnyak.AV@mail.ru.

Pogrebnyak Andriy, PhD, Assoc. Prof., Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel. (057)349-45-56; e-mail: Pogrebnyak.AV@mail.ru.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. М.І. Погожих.
Отримано 15.04.2017. ХДУХТ, Харків.*

УДК 53.043:664

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПРОСТОРУ

М.І. Погожих, А.О. Пак, А.В. Пак, М.В. Жеребкін

Обґрунтовано аналіз процесу тепломасообміну в термостаті методом фазового простору як одного із способів якісного аналізу стану системи. Побудовано фазовий портрет тепломасообміну в термостаті для можливих характерних шляхів еволюції системи. На фазовому портреті ідентифіковано особливі точки. Описано та проілюстровано характерні шляхи еволюції системи між нестійким станом рівноваги та стійким. Відзначено особливості фазових траєкторій тепломасообміну в термостаті за умови реалізації індукованого тепломасообміну.

Ключові слова: індукований тепломасообмін, метод фазового простору, узагальнена координата.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИНДУЦИРОВАННОГО ТЕПЛОМАСООБМЕНА МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Н.И. Погожих, А.О. Пак, А.В. Пак, М.В. Жеребкин

Обоснован анализ процесса тепломасообмена в термостате методом фазового пространства как одного из способов анализа состояния системы. Построен фазовый портрет тепломасообмена в термостате для возможных характерных путей эволюции системы. На фазовом портрете

идентифицированы особые точки. Описаны и проиллюстрированы характерные пути эволюции системы между неустойчивым состоянием равновесия и устойчивым. Отмечены особенности фазовых траекторий теплообмена в термостате при реализации индуцированного теплообмена.

Ключевые слова: индуцированный теплообмен, метод фазового пространства, обобщенная координата.

THE ANALYSIS OF PROCESS OF THE INDUCED HEAT AND MASS TRANSFER BY THE PHASE SPACE METHOD

M. Pogozhikh, A. Pak, A. Pak, M. Zherebkin

The purpose of the investigation is the development of theoretical background of the process of the induced heat and mass transfer using phase space method. Getting new experimental data in the study of the induced heat and mass transfer and analysis of the database for the mixed heat transfer drying will make it possible to supplement and generalize information concerning physical mechanism of the induced heat and mass transfer.

Generalization of the information and development of phenomenological physical and physico-mathematical models describing kinetic and dynamic regularities, mechanisms and driving forces of heat and mass transfer will allow develop theoretical bases of the induced heat and mass transfer and explain its peculiarities.

The result of the development of theoretical bases of the induced heat and mass transfer and its modelling will be, first, identification of the opportunities of its application in different technologies and techniques and, secondly, efficient control of heat and mass transfer according to the chosen purpose of its application. The desired results or products with the predetermined qualities are to be obtained.

The analysis of heat and mass transfer in thermostat using phase space method is substantiated. The phase space method is one of the ways of qualitative analysis of the system. The temperature of thermostat internal environment, partial pressure of water vapour in it, and ratio of the energy absorbed by the thermostat internal environment to the energy dissipated by this environment are chosen as the generalized phase space coordinates for heat and mass transfer in thermostat. Phase portrait of heat and mass transfer in the thermostat for possible ways of this dynamical system evolution is designed. Specific points on phase portraits are identified: the state of unstable equilibrium, the state of stable equilibrium and bifurcation point. Characteristic ways for the system evolution between unstable and stable equilibrium are described and illustrated. The peculiarities of phase trajectories of the induced heat and mass transfer in the thermostat are specified: availability of the sites in a negative phase trajectory of the phase plane.

Keywords: induced heat and mass transfer, phase space method, generalized coordinate.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Інтенсивний розвиток галузей промисловості, індустріалізація країн світу призвели до необхідності пошуку наукового обґрунтування рішень проблеми ефективного використання енергетичних ресурсів. При цьому перспективним є пошук дійсно «штучних» енерготехнологічних процесів, для яких один або декілька параметрів або властивостей системи не мають «спорідненості» з навколишнім середовищем і прийняті рівноважне значення можуть тільки за умови подолання деякого енергетичного активаційного бар'єра [1]. Такі процеси, як правило, характеризуються високою енергоефективністю й екологічністю [2]. Таким чином, пошук і розробка теоретичних основ «штучних» енерготехнологічних процесів є актуальним завданням в рамках всесвітньої політики та політики України у сфері енергоефективності [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливий інтерес представляє явище тепломасообміну і такий його окремий випадок застосування в промисловості, як сушіння [4]. Слід відмітити, що під час більшості способів сушіння в промисловості прагнуть до збільшення площі випаровування, зменшення дифузійного шару над сировиною, підвищення ефективності тепlopідведення до сировини, що є інтенсифікацією природного процесу за рахунок створення певних умов.

Одним із штучних способів сушіння є сушіння змішаним тепlopідводом (ЗТП-сушіння) [5–7]. «Штучність» ЗТП-сушіння полягає в тому, що за дотримання необхідних для реалізації ЗТП-процесу умов між спеціальним тепломасообмінним модулем із вологою сировиною та сушильним агентом відбувається інтенсивний масообмін. Завдяки працям М.І. Погожих, В.О. Потапова, М.М. Цуркана, О.С. Сомова, М.В. Жеребкіна, Є.М. Якушенка отримано достатньо велику кількість експериментальних результатів для різної сировини та для різних апаратних реалізацій цього способу зневоднення, розвинуто теорію процесу тепломасообміну під час ЗТП-сушіння. Проте залишається недостатньо повно описаним фізичний механізм низки особливостей протікання ЗТП-процесу, пояснити які, виходячи із теоретичних основ зазначеного процесу, наведених у працях із його дослідження, не представляється можливим. Дослідження ЗТП-сушіння, які проведені на теперішній час, дають можливість стверджувати, що ЗТП-процес є окремим випадком більш загального ефекту – ефекту індукованого тепломасообміну (ІнТМО) [8]. Отримання нових експериментальних даних під час дослідження процесу ІнТМО та аналіз існуючої бази даних щодо процесу тепломасообміну під час його окремого випадку – ЗТП-сушіння нададуть можливість розв'язання теоретичних основ процесу ІнТМО та пояснення його особливостей. Результатом розвитку

теоретичних основ процесу ІнтМО будуть, по-перше, виявлення можливостей його використання в різних технологіях та техніці, по-друге, ефективне керування процесом тепломасообміну відповідно до обраної мети його застосування з отриманням заданих результатів або продукції із заданими властивостями.

Мета статті – розвиток теоретичних основ процесу ІнтМО шляхом аналізу цього процесу методом фазового простору.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним із способів якісного аналізу стану системи (механічної, хімічної, термодинамічної та ін.) є метод фазового простору [9–10]. Скористаємося методом фазового простору для аналізу процесу ІнтМО. Під динамічною системою розуміється термостат, всередині якого знаходиться вологе ККПТ та пароповітряна суміш. Вологе ККПТ та пароповітряна суміш сполучаються з оточуючим середовищем через об'єкторатор. Ефект ІнтМО, полягає у видаленні рідкої фази з об'єму термостата під час руху системи від нестійкої рівноваги до стійкої [8]. Прагнення до рівноваги у цьому випадку по суті є явищем нагрівання системи зі змінною масою за рахунок випаровування. Тобто «стік» теплоти організовується переходом рідини у газовий стан, а «притік» теплоти забезпечується стінками термостата. Зазначені умови є одними із необхідних для організації процесу ІнтМО умов. Хоча теплота не є параметром стану, її потік обумовлений різницею температур. Таким чином, можна вважати правомірним використання температури T як параметра та однієї із узагальнених координат.

Другою узагальненою координатою є парціальний тиск пари води у внутрішньому газовому середовищі. При цьому слід вважати відповідно до феноменологічної гіпотези процесу ІнтМО [8], оскільки суцільне газове середовище знаходиться всередині термостата в «затиснутих» умовах, то парціальний тиск пари рідини в середовищі прагне до тиску насиченої пари рідини за даної температури.

Третя узагальнена координата обрана, виходячи із таких міркувань. Запишемо систему із двох нелінійних кінетичних рівнянь із двома змінними:

$$C_{solid} \frac{dT}{d\tau} = F_T(T, w_{evapor}), \quad (1)$$

$$r \frac{dw_{evapor}}{d\tau} = F_w(T, w_{evapor}), \quad (2)$$

де C_{solid} – питома теплоємність (на 1 кг сухих речовин тіла), Дж/(К·кг сух. реч.); r – питома теплота пароутворення, Дж/кг;

$w_{\text{evapor}} = m_{\text{liquid}}/m_{\text{solid}}$ – питома кількість рідини, що перейшла в газоподібний стан (на 1 кг сухих речовин тіла), кг/ кг сух. реч.

Величина $C_{\text{solid}}(dT/dt)$ у першому рівнянні характеризує кількість теплової енергії, що надходить до середовища всередині термостата від стінок термостата за одиницю часу, а функція $F_T(T, w_{\text{evapor}})$ є значенням даної кількості енергії за поточних температури та вологовмісту. Величина $r(dw_{\text{evapor}}/dt)$ у другому рівнянні характеризує кількість енергії, яка може бути розсіяна в оточуюче середовище за рахунок фазового переходу I-го роду за одиницю часу, а функція $F_T(T, w_{\text{evapor}})$ є значенням цієї кількості енергії за поточних температури та вологовмісту.

Розділимо перше рівняння системи на друге, отримаємо:

$$\frac{C_{\text{solid}} \cdot dT}{r \cdot dw_{\text{evapor}}} = \frac{F_T(T, w_{\text{evapor}})}{F_w(T, w_{\text{evapor}})} = k_{\Psi} \cdot \Psi(T, w_{\text{evapor}}), \quad (3)$$

де k_{Ψ} – масштабний коефіцієнт.

Відношення (3) має сенс як відношення енергії, поглинутої внутрішнім середовищем термостата, до енергії, розсіяної цим середовищем. Відмінність рівняння (3) від критерію Ребіндера полягає в його фізичному сенсі. У критерії Ребіндера за умови не «штучного», а природного тепломасообміну чисельник прагне до рівноважної температури за законом теплопровідності, а знаменник – за законом Дальтона. У випадку ІнТМО закони руху до рівноваги зберігають той же вигляд, але вони «вмикаються» штучним шляхом за рахунок E_A – кінетичної енергії повітряного середовища поблизу зовнішньої відносно оточуючого середовища поверхні обтюратора. Оскільки процес ІнТМО має «запуск», «протікання», «блокування», «зрив», то фазовий портрет буде обмежуватися деякою універсальною функцією, не стільки обумовленою властивостями сировини, що характерно для критерію Ребіндера, скільки комплексом внутрішніх та зовнішніх чинників процесу (параметрів порядку, керуючих параметрів). Оскільки ІнТМО є керованим процесом, то (3) по суті відображає функцію керованості термостату як системи. Рішення рівняння (3) дозволяє визначити сімейство фазових траєкторій $\Psi(T, w_{\text{evapor}})$, або так званих інтегральних кривих на фазовій площині. Обмежимося розглядом фазового простору для процесу ІнТМО з трьома ступенями вільності. Фазовий простір складають три координати – температура T волого ККПТ у внутрішньому середовищі термостата, парціальний тиск p пари рідини внутрішнього газового середовища термостата і функція $\Psi(T, w_{\text{evapor}})$, яка дорівнює відношенню енергії, що утримує внутрішнє середовище термостата, до енергії, розсіяної цим середовищем на випаровування. Координата $\Psi(T, w_{\text{evapor}})$ обрана

безрозмірною з метою отримання зручного масштабу для виявлення характеру поведінки системи та особливих точок фазового портрету як під час тепломасообміну, так і під час ІнТМО.

Фазовий портрет процесу тепломасообміну в термостаті за двома шляхами еволюції системи наведений на рис. 1. На фазовій площині виділені п'ять точок. Точка А є точкою, положення якої обумовлюється початковими умовами для внутрішнього середовища термостата. Точки В та С є рівноважними точками. При цьому точка В є точкою динамічної рівноваги, а точка С – стійкої. Точка С є особливою точкою типу центр. Навколо такої точки система описує еліпсоїдальні траєкторії. Під час знаходження системи на еліпсоїдальній траєкторії можуть відбуватися коливання вологовмісту та температури сировини всередині термостата при асимптотичному наближенні до рівноважних величин. Такі траєкторії нейтрально стійкі: зміни параметрів можуть переводити систему з однієї траєкторії на іншу з новими амплітудою та частотою коливань температури, вологовмісту та швидкості досягнення рівноваги [11].

Під час ІнТМО мають місце рівноважні стани. Перший стан характеризується наявністю в термостаті рідини (для випадку, що розглядається – рідка вода), температура середовища всередині термостата асимптотично прагне до температури термостата.

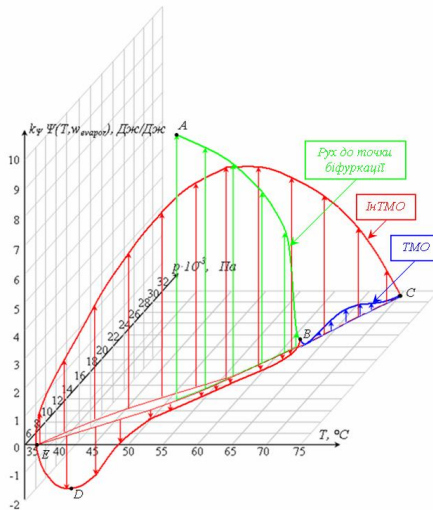


Рис. 1. Фазовий портрет процесу тепломасообміну в термостаті

Другий рівноважний стан установлюється за відсутності рідини всередині термостата та рівновазі цього внутрішнього середовища за температурою зі стінками термостата. Як поблизу першого стану рівноваги, так і поблизу другого можливе випаровування системної води із сировини та її конденсація за рахунок флуктуацій парціальних тисків води та градієнта температури, причому обидва процеси відбуваються всередині термостата, оскільки масообмін із зовнішнім середовищем обмежений фільтраційними властивостями об'єктора. Тобто відбуваються коливання парціального тиску води (відповідно і вологовмісту ККПТ всередині термостата за умови його наявності) та температури відносно рівноважних значень за сталого тиску. За цих умов молярний перенос маси не відбувається, оскільки тиск всередині термостата є сталим та дорівнює тиску зовнішнього середовища. Такі коливання температури та парціального тиску води по всьому об'єму всередині термостата характерні лише для процесу ІнТМО, оскільки, наприклад, між вологим ККПТ та оточуючим середовищем масообмін відбувається лише через границю розділу між цими об'єктами.

Як відмічено вище, точка В є точкою, в якій система знаходиться в стані динамічної або нестійкої рівноваги. Будь-яка флуктуація, випадкова чи керована, може вивести систему із такого стану, і вона почне рухатися або, іншими словами, еволюціонувати до стійкої рівноваги одним із можливих шляхів. Такі особливі точки, після проходження яких система набуває нових властивостей руху, називають точками біфуркації [10]. Точка біфуркації, виникає, якщо система рухається до максимуму (локального) вільної енергії. При цьому положення такої точки в динамічних координатах може збігатися і з природним процесом, за яким система рухається в сторону з мінімумом вільної енергії. У точці біфуркації прирощення одного із динамічних параметрів змінює знак, тобто за одним із параметрів (для процесу ІнТМО – це температура) система починає віддалятися від локальної рівноваги. Наявність точки біфуркації ще раз доводить, що система «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата», за умови відповідних для забезпечення процесу ІнТМО значень керуючих параметрів та параметрів порядку, є проточною відносно до теплової енергії динамічною системою, де можливі процеси самоорганізації, які обумовлюють ефективне розсіювання теплової енергії за рахунок фазових переходів I-го роду.

Оскільки наведення на фазовій площині $OT \times Op \times O\Psi$ всіх характерних шляхів еволюції системи під час тепломасообміну в термостаті ускладнить його аналіз, перейдемо до проєкцій фазового простору на площину $OT \times O\Psi$ (рис. 2).

На проекції фазового портрету (рис. 2) наведено п'ять характерних шляхів еволюції системи після точки біфуркації, отримані шляхом узагальнення експериментальних досліджень. Всі інші шляхи еволюції займають проміжне положення. Еволюція системи за характерними шляхами буде такою. Якщо керуючі параметри і параметри порядку будуть такими, що система піде за шляхом 1, то кількість рідини всередині термостата змінюватися практично не буде, за температурою в термостаті встановиться рівновага. Система повернеться за вологовістом в окіл точки В. Перехід у окіл точки типу центр С для цього шляху еволюції системи відбудеться впродовж часу, значно більшого за технічний. За шляхом 2 – відбувається випаровування рідини на границі розділу «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата». Такою границею розділу може бути або зовнішня по відношенню до оточуючого середовища поверхня обтюратора, або, за умов проникнення оточуючого середовища всередину термостата, відкрита поверхня рідини чи волого ККПТ. Температура за таких умов наближається до температури термостата. Система рухається в окіл точки типу центр С на одну з її еліпсоїдальних траєкторій. За такого характеру протікання процесу завжди виконується умова $dT \geq 0$ – «запуск» процесу ІнТМО відсутній. Перехід між точками В та С для цього шляху еволюції системи відбудеться впродовж часу, більшого за технічний.

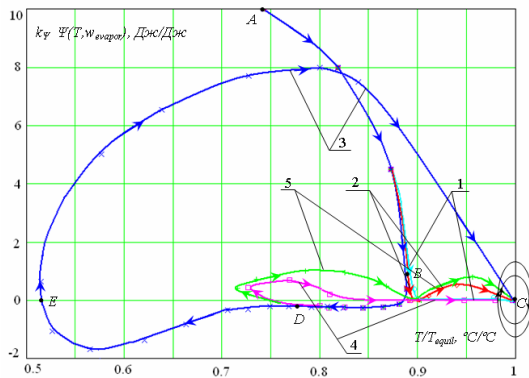


Рис. 2. Фазовий портрет для процесу ІнТМО з характерними шляхами еволюції від стану нестійкої (В) до стану стійкої (С) рівноваги: 1 – нагрівання; 2 – тепломасообмін з $E_A \geq E_B$; 3 – ІнТМО ($E_A < E_B$); 4 – зрив ІнТМО з подальшим нагріванням; 5 – зрив ІнТМО з трансформацією у тепломасообмін з $E_A \geq E_B$

За шляхом 3 система рухається до того ж рівноважного стану, що і за шляхом 2, але напрямком руху до точки типу центр С інший. Для такого шляху еволюції умова $dT \geq 0$ виконується до точки біфуркації (до точки В) та після досягнення сировиною гігроскопічного вологовмісту (після точки Е). Протягом процесу між цими точками виконується умова $dT < 0$ – має місце так званий дефіцит теплоти всередині термостата [5–7]. Відбувається самоорганізація дисипативних структур у ККПТ всередині термостата. Якщо будуть підтримуватися необхідні умови для протікання ІнтМО, то прирощення температури знову змінить свій знак лише у випадку недостатньої для подальшої самоорганізації дисипативних структур кількості системної вологи, а саме через її закінчення.

Ще два еволюційні шляхи 4 та 5 ілюструють так званий «зрив» процесу ІнтМО. За таких шляхів еволюції після точки біфуркації (точка В) виконується умова $dT < 0$, яка свідчить про процес самоорганізації дисипативних структур, але після досягнення точки D через те, що порушуються умови, необхідні для протікання процесу ІнтМО, спостерігається зміна знаку прирощення температури, тобто – $dT \geq 0$. Відбувається «зрив» процесу ІнтМО. Подальше протікання процесу можливе двома характерними шляхами: відбудеться або виродження процесу ІнтМО в процес тепломасообміну з відкритої відносно оточуючого середовища поверхні (шлях 5), або нагрівання середовища всередині термостата до температури термостата (шлях 4) з подальшим еволюціонуванням до стійкої рівноваги впродовж часу більшого, за технічний.

За еволюційним шляхом 1 (рис. 2) сировина знаходиться за температури теплоносія за відсутності масообміну із зовнішнім середовищем впродовж часу, значно більшого за технічний. Використати цей факт можна, наприклад, для таких процесів, як проварювання [7], бланшування, пастеризація сировини та ін. За 2 та 3 еволюційними шляхами сировина переводиться із стану з більшим вологовмістом до стану з меншим, тобто відбувається її зневоднення. При цьому шлях еволюції системи визначає ефективність із точки зору енергетичних витрат та якості отримуваної сушеної продукції. Як слідує із виду кривих x , що описують зміну температури сировини зі зміною її вологовмісту, шлях 2 відповідає традиційному (нештучному), а шлях 3 – керованому штучному сушінню, а саме ЗТП-сушінню. Рух системи шляхом еволюції 3 дає можливість керувати «запуском», «зривом», «протіканням» процесу зневоднення, а також його інтенсивністю, а, відповідно, і продуктивністю апаратної реалізації, що забезпечує цей процес.

Висновки. Обґрунтовано для аналізу процесу тепломасообміну в термостаті використання методу фазового простору як одного із способів

якісного аналізу стану системи. Обґрунтовано обрання в якості узагальнених координат температури внутрішнього середовища термостата, парціального тиску пари води в ньому та координати, яка є відношенням енергії поглинутої внутрішнім середовищем термостата до енергії, розсіяної цим середовищем. Ідентифіковано на фазовому портреті особливі точки: стан нестійкої рівноваги, стан стійкої рівноваги та точку біфуркації. Описано та проілюстровано характерні шляхи еволюції системи між нестійким станом рівноваги та стійким, що доводить «штучність» процесу ІНТМО. Відзначено особливості фазових траєкторій тепломасообміну в термостаті за умови реалізації ІНТМО.

Список джерел інформації / References

1. Энерготехнологические процессы. Проблемы и перспективы / под редакцией д-ра техн. наук Л. В. Лысенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 190 с.

Lysenko, L.V. (2000), *Energotechnological processes. Problems and prospects* [*Energotekhnologicheskiye protsesy. Problemy i perspektivy*], MSTU them. N. E. Bauman, Moscow, 190 p.

2. Карпов М. О. Связь ресурсосбережения с экологичностью пищевых производств / Карпов М. О., Лей А. Г. // Научная мысль XXI века: конвергенция знаний : материалы Международной научно-практической конференции НИЦ «Поволжская научная корпорация». – 2016. – С. 157–159.

Карпов, М.О., Leu, A. G. (2016), "The relationship of resource saving with the ecology of food production" ["Svyaz resursosberezheniya s ekologichnostyu pishchevykh proizvodstv"], *Scientific Thought of the XXI Century: Convergence of Knowledge Materials of the International Scientific and Practical Conference of the Research Center Volga Region Scientific Corporation*, pp. 157-159.

3. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року [Електронний ресурс] / Державне агентство з енергозбереження та енергоефективності України. – Режим доступу : http://sae.gov.ua/sites/default/files/documents/Presentation_NAPRES_Norw_OCT_3_ukr.pdf

"National Action Plan for renewable energy for the period to 2020" ["Nacional'ny`j plan dij z vidnovlyuvanoyi energetyky` na period do 2020 roku"], State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine, available at: http://sae.gov.ua/sites/default/files/documents/Presentation_NAPRES_Norw_OCT_3_ukr.pdf.

4. Kumar, C., Karim, M. A., Joardder, M. U. H. (2014), "Intermittent drying of food products: A critical review", *Journal of Food Engineering*, T. 121, pp. 48-57.

5. Погожих М. І. Сушіння плодово-ягідної сировини способом змішаного теплопідводу зі штучним пороутворенням : монографія / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. М. Цуркан. – Харків : ХДУХТ, 2009. – 102 с.

Pogozhyh, M. I., Pak, A. O., Czurkan, M. M. (2009), *Drying of fruit and berry raw materials by the method of heat mixed transfer drying with artificial pore formation. Monograph* [Sushynnya plodovo-yagidnoyi syrovyny sposobom zmishanogo teplopivodu zi shtuchnym poroutvorennyam : monografiya], KSUFT, Kharkiv, 102 p.

6. Потапов В. А. Кинетика сушки: анализ и управление процессом: монография / В. А. Потапов – Харьков : ХГУПТ, 2009. – 250 с.

Ротаров, В.А. (2009), *Kinetics of drying: analysis and control of the process: monograph [Kinetyka sushki: analiz i upravleniye processom: monografiya]*, KSUFT, Kharkiv, 250 p.

7. Погожих М. І. Гідротермічна обробка круп із використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом : монографія / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жерібкін – Х. : ХДУХТ, 2014. – 170 с.

Pohozhykh, M.I., Pak, A.O., Pak, A.V., Zherebkin, M.V. (2014), *Hydrothermal processing of cereals using the principles of heat mixed transfer drying : monograph [Hidrotermichna obrobka krup iz vykorystamyam pryntsyupiv sushinniya zmishanym teplopidvodom : monografiya]*, KSUFT, Kharkiv, 170 p.

8. Pogozhikh, M., Pak, A. (2017), "The development of an artificial energotechnological process with the induced heat and mass transfer", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №1/8 (85), pp. 50-58.

9. Jordan, D.W., Smith, P. (2007), *Non-Linear Ordinary Differential Equations: Introduction for Scientists and Engineers (4th ed.)*, Oxford University Press, 560 p.

10. Steven, Strogatz (2001), *Non-linear Dynamics and Chaos: With applications to Physics, Biology, Chemistry and Engineering*, 515 p.

11. Анищенко В.С. Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций : монография / В. С. Анищенко, В. В. Астахов, Т. Е. Вадивасова. – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 312 с.

Anishchenko, V. S., Astakhov, V. V., Vadivasova, T. E. (2009), *Regular and chaotic self-oscillations. Synchronization and influence of fluctuations: monograph [Regulyarnyye i khaoticheskiye avtokolebaniya. Sinkhronizatsiya i vliyaniye fluktuatsiy : monografiya]*, Intellect, Dolgoprudny, 312 p.

Погожих Микола Іванович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Ключківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-86; e-mail: m.pogozhikh@hduht.edu.ua.

Погожих Николай Иванович, д-р техн наук, проф., зав. кафедрой физико-математических и инженерно-технических дисциплин, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Ключковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-86; e-mail: pogozhikh@hduht.edu.ua.

Pogozhikh Micola, Doctor of Technical Sciences, professor, head of Department of Physical, Mathematical and Engineering Subjects, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-86; e-mail: m.pogozhikh@hduht.edu.ua.

Пак Андрій Олегович, канд. техн. наук, доц., кафедра фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Ключківська, 333, м. Харків, Україна. Тел. (057)349-45-86; e-mail: apak@hduht.edu.ua.

Пак Андрей Олегович, канд. техн. наук, доц., кафедра физико-математических и инженерно-технических дисциплин, Харьковский

государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-86; e-mail: apak@hduht.edu.ua

Pak Andrey, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of Department of Physical, Mathematical and Engineering Subjects, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-86; e-mail: a.pak@hduht.edu.ua.

Пак Аліна Володимирівна, канд. техн. наук, викл., кафедра товарознавства та експертизи якості товарів, Харківський торговельно-економічний інститут Київського національного торговельно-економічного університету. Адреса: пров. О. Яроша, 8, м. Харків, Україна. Тел. (057)349-45-86; e-mail: pak.alina1984@gmail.com.

Пак Алина Владимировна, канд. техн. наук, преп., кафедра товароведения и экспертизы качества товаров, Харьковский торгово-экономический институт Киевского национального торгово-экономического университета. Адрес: пер. О. Яроша, 8, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-86; e-mail: pak.alina1984@gmail.com.

Pak Alina, Candidate of Technical Sciences, associate professor of department of merchandising and examining the quality of goods, Kharkiv Institute of Trade and Economics of Kyiv National University of Trade and Economics. Address: O. Yarosha str., 8, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-86; e-mail: pak.alina1984@gmail.com.

Жеребкін Максим Васильович, канд. техн. наук, асист., кафедра холодильної та торговельної техніки і прикладної механіки, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська 333, м. Харків, Україна. Тел. (057)349-45-86; e-mail: Zherebkin.maxim@gmail.com.

Жеребкин Максим Васильевич, канд. техн. наук, ассист., кафедра холодильной и торговой техники и прикладной механики, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-86; e-mail: Zherebkin.maxim@gmail.com.

Zherebkin Maxim, Candidate of Technical Sciences, assistant of department of physical and mathematical and engineering-technical disciplines, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-86; e-mail: Zherebkin.maxim@gmail.com.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. В.О. Потаповим.
Отримано 15.04.2017. ХДУХТ, Харків.*