



Дослідження впливу способу організації руху сушильного агента на ефективність процесу сушіння в гравітаційній поличній сушарці

Н. О. Артюхова¹⁾

¹⁾ Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, м. Суми, Україна

Article info:

Paper received:

05 September 2016

The final version of the paper received:

05 December 2016

Paper accepted online:

16 December 2016

Correspondent Author's Address:

¹⁾ Nadinalex88@mail.ru

Стаття присвячена дослідженню ефективності здійснення процесу сушіння при застосуванні різних способів організації взаємного руху потоків сушильного агента і дисперсного матеріалу. Подано результати досліджень роботи поличної сушарки в таких умовах: протитечійний рух сушильного агента та дисперсного матеріалу; протитечійний рух сушильного агента та дисперсного матеріалу з рециркуляцією сушильного агента; протитечійний рух сушильного агента та дисперсного матеріалу з байпасуванням частини потоку сушильного агента та введенням його на окремі ступені гравітаційної поличної сушарки. Показано вплив організації руху сушильного агента на характеристики дисперсного матеріалу і сушильного агента, енергетичні витрати для здійснення сушіння та його ефективність. Подано рекомендації щодо застосування наведених способів організації руху потоків залежно від необхідної кінцевої вологості матеріалу та його фізико-хімічних властивостей. Запропоновані способи організації взаємного руху потоків дозволяють або знизити витрати на нагрівання сушильного агента, або збільшити ефективність видалення вологи при незмінних енерговитратах.

Ключові слова: полична сушарка, сушильний агент, дисперсний матеріал, ефективність, енергетичні витрати.

1. ВСТУП

Конвективне сушіння дисперсних матеріалів в апаратах завислого шару є одним із найбільш ефективних способів зневоднення, який широко використовується у хімічному, харчовому та сільськогосподарському виробництвах. Для процесу сушіння у завислому шарі найбільш перспективними є поличні апарати, що характеризуються вищою інтенсивністю та ефективністю процесу за рахунок реалізації у робочому просторі активного гідродинамічного режиму [1,2].

На сьогодні актуальним питанням, що потребує вирішення, є пошук способів зменшення енергетичних і матеріальних витрат під час сушіння у завислому шарі та вдосконалення існуючих апаратів. Одним із напрямів зменшення енергетичних витрат під час проведення конвективного сушіння дисперсних матеріалів є підбір оптимальної організації руху сушильного агента в робочому просторі апарата та його вторинне застосування [3–5]. Організація руху сушильного агента може істотно впливати на показники якості висушеного матеріалу.

Конструктивне забезпечення багатоступеневого контакту дисперсного матеріалу із сушильним агентом (зокрема, при вертикальному секціонуванні робочого простору сушарки поличними контактними елементами) також є одним із шляхів підвищення енергетичної ефективності процесу зневоднення.

Метою роботи є експериментальне визначення

оптимального способу організації руху сушильного агента в гравітаційній поличній сушарці завислого шару з активним гідродинамічним режимом, який буде найменш енергоємним та забезпечить необхідну повноту видалення вологи з дисперсного матеріалу.

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Методика проведення експериментальних досліджень

Під час експериментального дослідження організації руху сушильного агента в гравітаційній сушарці розглянуто такі способи руху взаємодіючих потоків:

– протитечійний рух сушильного агента та дисперсного матеріалу з рециркуляцією частини сушильного агента після виходу із сушарки кількістю 10 %, 25 %, 30 % та подальшого його додавання до початкового, що подається у сушарку;

– протитечійний рух сушильного агента та дисперсного матеріалу з байпасуванням частини потоку сушильного агента 25 % від загальної витрати потоку сушильного агента (інша частина сушильного агента – 75 % – уводиться перед першим ступенем сушарки) та введенням його після 1-го та 2-го ступенів за ходом сушильного агента.

Для забезпечення рециркуляції необхідної частини сушильного агента, а також його байпасування (відповідно до вищезазначеної схеми) використано

суматори та розподільники потоків. Витрати основного потоку, потоку рециркулянта та байпасного потоку вимірювалися за допомогою камерної діафрагми. Зміна витрати дисперсного матеріалу здійснювалася за допомогою пристрою для дозування сегментного типу, розміщеного на трубопроводі дисперсного матеріалу. Температура повітря, що надходить до калорифера, після калорифера, в об'ємі полицної сушарки та після неї, температура дисперсного матеріалу на полицях сушарки контролювалася за допомогою мультиметра. Відносна вологість повітря на вході в полицну сушарку, в апараті та на виході з нього реєструвалася за допомогою психрометра. Вологість дисперсного матеріалу контролювалася за допомогою діелькометричного вимірювача вологості.

Схему експериментальної установки наведено на рис. 1 (рециркуляційний і байпасні потоки теплоносія на схемі не показані).

Конструктивні характеристики полицної сушарки під час експериментальних досліджень (рис. 2): сушарка має прямокутну форму, всередині сушарки встановлено три контактні полиці; кут нахилу контактної полиці до горизонту $\gamma = \gamma_0 + (3-5)^\circ$; зазор між кінцем полиці та стінкою сушарки (розвантажувальний зазор) $L_{pz} = 0,3$; площа вільного перерізу полиці $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{отв}$ ($d_{відн}$ – діаметр, віднесений до фіксованого діаметра отворів полицного контакту $d_{отв}$). Умови проведення експериментальних досліджень: модельний матеріал – поліпропілен ($d_c = 3-3,5$ мм), співвідношення витрат сушильного агента і дисперсного матеріалу $G_{суш}/G_M = 2$, початкова вологість матеріалу $x_{поч} = 13\%$. Відповідно до експериментальних досліджень значення кінцевої вологості матеріалу $x_{кін}$ залежить від технологічних і конструктивних характеристик сушарки та коливається від 5 до 8% [7].

Ефективність видалення вологи на кожному ступені сушарки визначається як відношення кількості практично видаленої вологи з матеріалу до теоретично можливої кількості видаленої вологи при нескінченному часі сушіння [8].

Вплив вищезазначених способів руху взаємодіючих потоків сушильного агента та дисперсного матеріалу на енергетичні витрати під час процесу сушіння оцінюється шляхом розрахунку критерію енергетичних витрат за методикою, наведеною у [9].

2.2. Результати досліджень та їх обговорення

Проаналізуємо вплив способів організації руху сушильного агента на характер зміни параметрів дисперсного матеріалу, сушильного агента та ефективність процесу сушіння в цілому (для вище зазначених способів організації руху сушильного агента).

Результати експериментів щодо впливу рециркуляції на зміну вмісту вологи й температури дисперсного матеріалу та сушильного агента наведено на рис. 3–6.

Аналіз результатів даних експериментів засвідчив, що рециркуляція відпрацьованого сушильного агента кількістю 10% забезпечує більш інтенсивне видалення вологи з дисперсного матеріалу і відповідно вищу ефективність процесу сушіння порівняно з

іншими обраними значеннями відсотка рециркульованого сушильного агента від його загальної витрати на вході в сушарку (рис. 7). Застосування рециркуляції у вищезазначеному об'ємі зменшує енерговитрати на проведення процесу сушіння і є прийнятним для зневоднення матеріалу з необхідним кінцевим діапазоном вологості до $\pm 0,4\%$ від середньої регламентованої.

Результати експериментів із дослідження протитечійного байпасування триступеневої гравітаційної полицної сушарки подані на рис. 8–12.

Аналіз результатів показав, що залежно від властивостей матеріалу, який піддається сушінню, форми зв'язку вологи і технологічних вимог до кінцевого продукту вибирається байпасування після 1-го або 2-го ступеня сушарки.

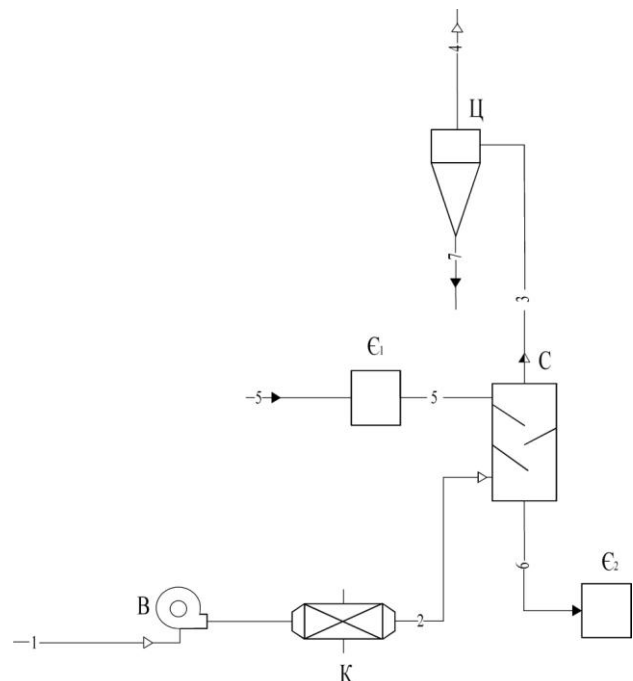


Рисунок 1 – Принципова схема експериментальної установки дослідження процесу сушіння в полицному апараті [6]:

В – вентилятор; К – калорифер; С – гравітаційна полицна сушарка; Ц – циклон; Е₁ – емність для вологого дисперсного матеріалу; Е₂ – емність для висушеного дисперсного матеріалу; 1 – атмосферне повітря; 2 – нагріте атмосферне повітря; 3 – відпрацьоване повітря; 4 – очищене відпрацьоване повітря; 5 – вологий дисперсний матеріал; 6 – висушений дисперсний матеріал; 7 – дрібнодисперсний матеріал

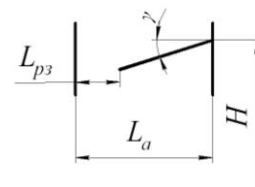


Рисунок 2 – Конструктивна схема ступеня полицної сушарки: L_{pz} – довжина розвантажувального зазору; L_a – довжина апарата; γ – кут нахилу полиці; H – висота розміщення полиці

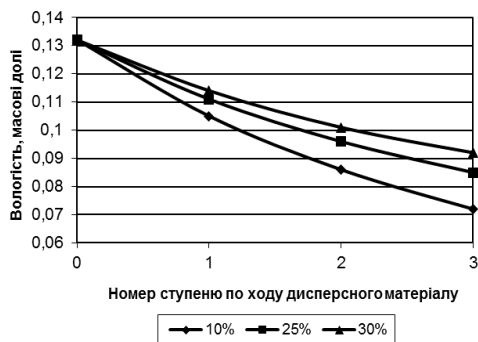


Рисунок 3 – Вплив способу рециркуляції сушильного агента на зміну вмісту води в дисперсному матеріалі

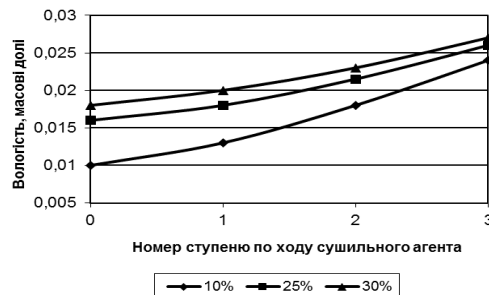


Рисунок 4 – Вплив способу рециркуляції сушильного агента на зміну вмісту води в сушильному агенті

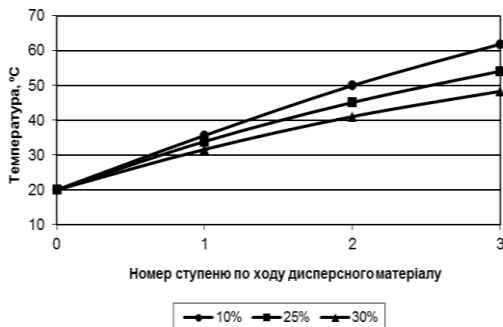


Рисунок 5 – Вплив способу рециркуляції сушильного агента на зміну температури дисперсного матеріалу

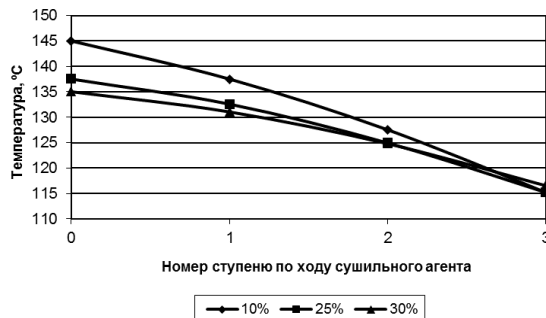


Рисунок 6 – Вплив способу рециркуляції сушильного агента на зміну температури сушильного агента

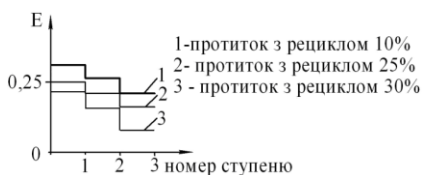


Рисунок 7 – Вплив способу рециркуляції сушильного агента на ефективність процесу сушіння

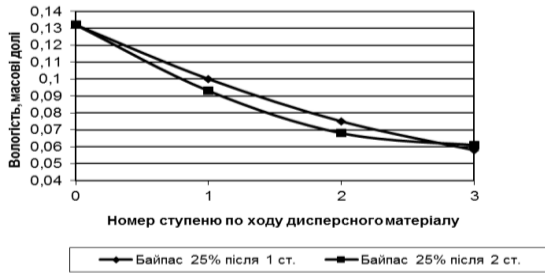


Рисунок 8 – Вплив способу байпасування сушильного агента на зміну вмісту води в дисперсному матеріалі

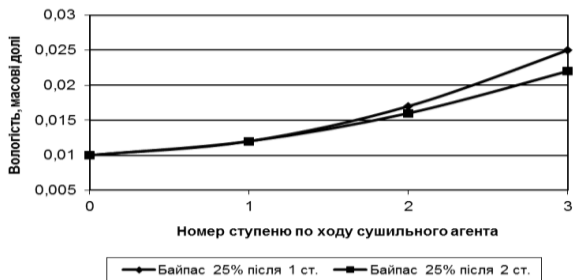


Рисунок 9 – Вплив способу байпасування сушильного агента на зміну вмісту води в сушильному агенті

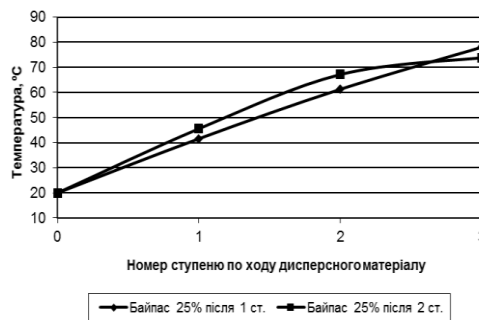


Рисунок 10 – Вплив способу байпасування сушильного агента на зміну температури дисперсного матеріалу

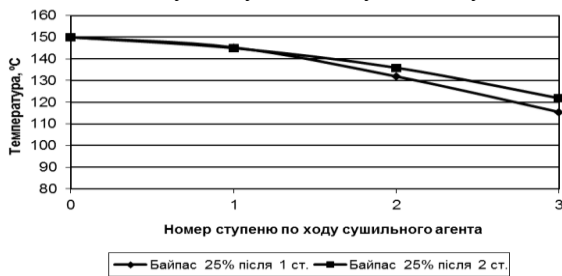


Рисунок 11 – Вплив способу байпасування сушильного агента на зміну температури сушильного агента

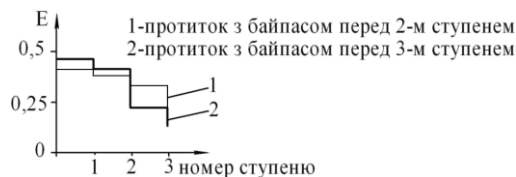


Рисунок 12 – Вплив способу байпасування сушильного агента на ефективність процесу сушіння (нумерація ступенів – за ходом матеріалу)

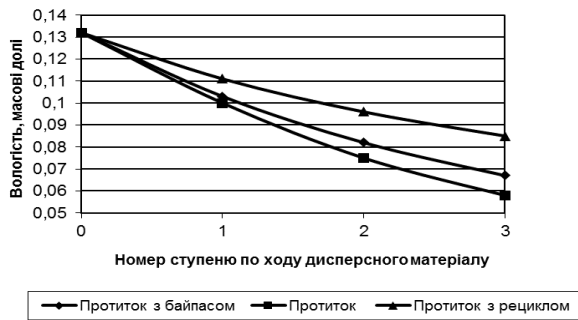


Рисунок 13 – Вплив організації руху сушильного агента на зміну вмісту вологи в дисперсному матеріалі

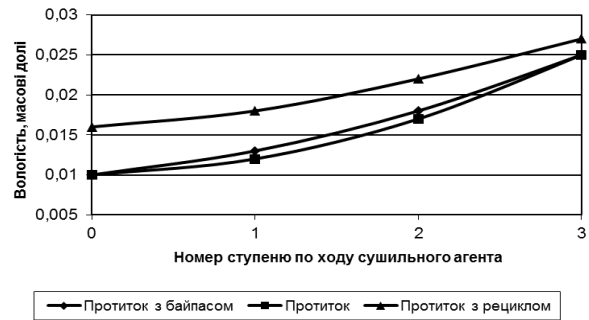


Рисунок 14 – Вплив організації руху сушильного агента на зміну вмісту вологи в сушильному агенті

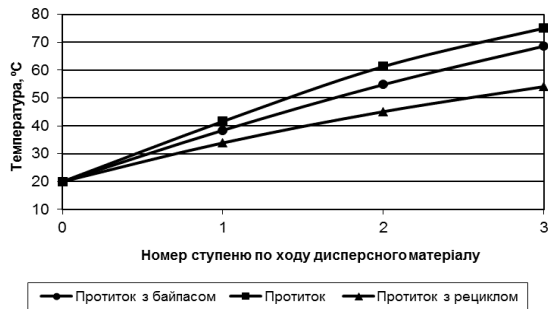


Рисунок 15 – Вплив організації руху сушильного агента на зміну температури дисперсного матеріалу

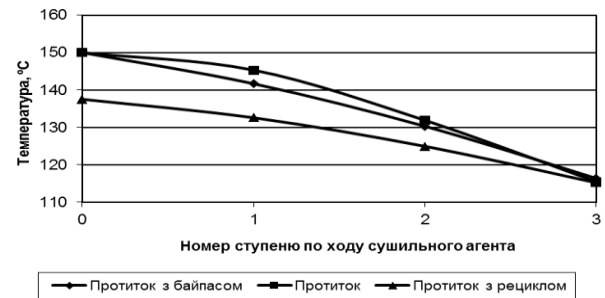


Рисунок 16 – Вплив організації руху сушильного агента на зміну температури сушильного агента

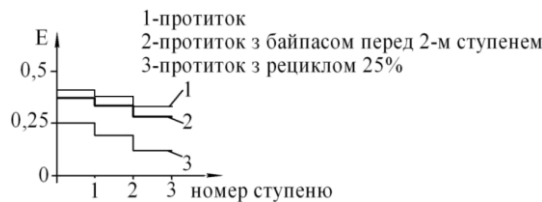


Рисунок 17 – Вплив організації руху сушильного агента на ефективність процесу сушіння (нумерація ступенів – за ходом матеріалу)

Наприклад, для видалення незв'язаної вологи з поверхні частинок, яке відбувається на 3-му ступені (верхній полиці) полицної сушарки та відповідає стадії прогрівання матеріалу і його подальшого сушіння із постійною швидкістю, раціональним є застосування байпасування потоку сушильного агента після 2-го ступеня. У цьому випадку згідно з рис. 12 ефективність процесу сушіння на останньому ступені буде найвищою. Для видалення адсорбційно зв'язаної вологи з матеріалу, яке потребує більших витрат енергії, доцільним є введення частини сушильного потоку після 1-го ступеня (нижньої полиці), з подальшим здійсненням на середній полиці процесу сушіння матеріалу в періоді швидкості, що знижується.

Зіставлення ефективності запропонованих способів організації руху сушильного агента в гравітаційній полицній сушарці наведено на рис. 13–17. Результати досліджень протиточного руху потоків у сушарці раніше було досліджено в роботі [3].

3. ВИСНОВКИ

Аналіз даних експериментальних досліджень свідчить про істотний вплив способу організації руху сушильного агента на ефективність процесу сушіння у гравітаційній полицній сушарці та енергетичні витрати для здійснення цього процесу. Залежно від необхідної кінцевої вологості матеріалу та його фізико-хімічних властивостей має місце той чи інший зазначений спосіб. Зважаючи на те, що значна частина витрат енергії на процес сушіння відбувається за двома статтями – нагрівання сушильного агента та його нагнітання – запропоновані способи організації взаємного руху потоків дозволяють або знизити витрати на нагрівання сушильного агента, або збільшити ефективність видалення вологи при незмінних енерговитратах.

Investigation of influence of drying agent movement on the drying process effectiveness in the gravitational shelf dryer

Artyukhova, N. O.¹⁾

¹⁾ *Sumy State University, 2, Rymaskogo-Korsakova Str., 40007, Sumy, Ukraine*

The article stands for a research of the drying process efficiency of various approaches of reciprocal movement organization of drying agent and disperse material. It focuses on the results of shelf dryer investigation. The test condition was as follows: backflow of the drying agent and disperse material movement; backflow of the drying agent and disperse material movement with the drying agent recirculation; backflow of the drying agent and disperse material movement with the bypassing of drying agent and it's putting on separate stage of gravitational shelf dryer. The influence of the drying agent movement organization on the characteristics of disperse material and drying agent, energy costs for this process and its efficiency is shown. The recommendations of usage of represented approaches of flows movement organization depending on the desired final moisture of the material as well as its physical and chemical properties are given. The proposed ways of reciprocal flows movement organization allow to reduce the costs of drying agent heating or to increase the efficiency of moisture removal at constant energy consumption.

Keywords: shelf dryer, drying agent, disperse material, efficiency, energy costs.

Исследование влияния способа организации движения сушильного агента на эффективность процесса сушки в гравитационной полочной сушилке

Н. А. Артюхова¹⁾

¹⁾ *Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007, г. Сумы, Украина*

Статья посвящена исследованию эффективности проведения процесса сушки в случае применения различных способов организации взаимного движения потоков сушильного агента и дисперсного материала. Представлены результаты исследований работы полочной сушилки в следующих условиях: противоточное движение сушильного агента и дисперсного материала; противоточное движение сушильного агента и дисперсного материала с рециркуляцией сушильного агента; противоточное движение сушильного агента и дисперсного материала с байпасом части потока сушильного агента и введением его на отдельные ступени гравитационной полочной сушилки. Показано влияние организации движения сушильного агента на характеристики дисперсного материала и сушильного агента, энергетические расходы для осуществления сушки и его эффективность. Приведены рекомендации по применению представленных способов организаций движения потоков в зависимости от требуемой конечной влажности материала и его физико-химических свойств. Предложенные способы организации взаимного движения потоков позволяют или снизить затраты на нагрев сушильного агента, или увеличить эффективность удаления влаги при неизменных энергозатратах.

Ключевые слова: полочная сушилка, сушильный агент, дисперсный материал, эффективность, энергетические затраты.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сажин Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. – Москва : Химия, 1984. – 320 с.
2. Воробьёв А. М. Сушильные аппараты с активным гидродинамическим режимом / А. М. Воробьёв, Г. С. Кормильцин, А. А. Горелов, С. П. Рудобашта // Вестник ТГУ, 2001. – Т. 6, Вып. 2. – С. 227–229.
3. Артюхова Н. О. Вплив організації руху сушильного агента на якість сушіння матеріалів у гравітаційних полицних апаратах / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко, О. Б. Шандиба // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2012. – Т. 2, Вып. 41. – С. 234–238.
4. Артюхова Н. О. Гравітаційні полицні апарати для сушіння зернистих матеріалів / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко, М. О. Кочергін // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – Луганськ, 2012. – № 17 (188), Ч. 1. – С. 234–239.
5. Artyukhova N. A. Multistaged drying-classification apparatus of energy recovery / N. A. Artyukhova, N. P. Yukhimenko // II International Kazakhstan-Russian Conference on Chemistry and Chemical Engineering. – Karaganda, Kazakhstan, 2012. – Vol. 1. – P. 41–43.
6. Артюхова Н. О. Визначення оптимальної конструкції та раціонального режиму роботи гравітаційних полицних сушарок / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Хімічна промисловість України, 2013. – № 3 (116). – С. 62–67.
7. Артюхова Н. О. Експериментальне дослідження гідродинаміки руху потоків на каскаді полиць у багатоступінчастих гравітаційних сушарках / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки». – Суми : СумДУ, 2013. – № 1. – С. 42–51.
8. Артюхова Н. О. Експериментальне дослідження кінетики видалення вологи з зернистих матеріалів у багатоступеневій гравітаційній полицній сушарці / Н. О. Артюхова // Наукові праці ОНАХТ, 2014. – Т. 3, Вып. 45. – С. 146–149.
9. Артюхова Н. А. Оценка энергетической эффективности многоступенчатой конвективной сушки концентратов и минерального сырья / Н. А. Артюхова, А. Б. Шандыба, А. Е. Артюхов // Научный вестник Национального горного университета. – 2014. – № 1. – С. 92–98.

REFERENCES

1. Sazhin, B.S. (1984). *Osnovni tehniki sushki [Fundamentals of drying equipment]*. M.: Himiya [in Russian].
2. Vorobyov, A. M., Kormiltsin, G. S., Gorelov, A. A., & Rubodashta, S. P. (2001). Sushilnyie apparaty s aktivnym gidrodinamicheskim rezhimom [Dryers with active hydrodynamic regime]. *Vestnik TGU. – Bulletin of TSU*, 6, 2, 227–229 [in Russian].
3. Artyukhova, N. O., Yukhimenko, M. P., & Shandyba, O. B. (2012). Vplyv organizatsiyi ruhu sushylnogo agenta na yakist sushynny materialiv v gravitatsiynih polychnih aparatih [The drying agent traffic impact on the dried material quality in a gravitation shelf type devices]. *Naukovi pratsi ONAHT. – Scientific Works of the Odessa National Academy of Food Technologies*, 2, 41, 234–238 [in Ukrainian].
4. Artyukhova, N. O., Yukhimenko, M. P., Kochergin, M. O. (2012). Gravitatsiyni polychni apparaty dlya sushinnia zernystykh materialiv [Gravitational shelving apparatus for granular materials drying]. *Visnyk Shidnoukrayinskogo natsionalnogo universitetu imeni V. Dalya. – Bulletin of East-Ukrainian National University*, 17, 188, 234–239 [in Ukrainian].
5. Artyukhova, N. A., & Yukhimenko, N. P. (2012) Multistaged drying-classification apparatus of energy recovery. – *Materials of the II International Kazakhstan-Russian Conference on Chemistry and Chemical Engineering dedicated to the 40th anniversary of academician E.A. Buketov KarSu*, Karaganda: Publishing House of KSU, Vol 1, 41–43.
6. Artyukhova, N. A., & Yukhimenko, N. P. (2013). Vyznachennya optymальноi konstruktsiyi ta ratsionalnogo rezhymu roboty gravitatsiynih polychnih susharok [The determination of optimal design and the rational work regime of gravitational shelf dryers]. *Himichna promyslovisht Ukrainy. – Chemical Industry of Ukraine*, 3, 116, 62–67 [in Ukrainian].
7. Artyukhova, N. A., & Yukhimenko, N. P. (2013). Eksperymentalne doslidzhennya gidrodynamiky ruhu potokiv na kaskadi polyts' u bagatostupinchastykh gravitatsiynih susharokah [Experimental study of hydrodynamics of flows traffic on the shelves cascade in multistage gravitational dryer]. *Visnyk Sumskogo derzhavnogo universitetu. Seriya "Tehnichni nauky" – Bulletin of Sumy State University. Series "Technical sciences"*, 1, 42–51 [in Ukrainian].
8. Artyukhova, N. A. (2014). Eksperymentalne doslidzhennya kinetyky vydalennya volozhy z zernystykh materialiv v bagatostupeneviy gravitatsiyniy polychniy sushartsi [The experimental studies of the moisture removal kinetics from the grained materials in multistage gravitational shelf dryer]. *Naukovi pratsi ONAHT. – Scientific Works of the Odessa National Academy of Food Technologies*, 3, 45, 146–149 [in Ukrainian].
9. Artyukhova, N. A., Shandyba, A. B., & Artyukhov, A. E. (2014) Otsenka energeticheskoy effektivnosti mnogostupenchatoy konvektivnoy sushki koncentratov i mineralnogo syr'ya [Energy efficiency assessment of multistage convective drying of concentrates and mineral raw materials]. *Nauchnyy vestnik Natsyonalnogo gornogo universitetu. – Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 92–98 [in Russian].