

4. Danilov-Danilyan V. I. (2008). Globalnaya problema defitsita presnoy vody. Vek globalizatsii. №1. 45–56.
5. Mosin O. V. (2012). Ustanovki opresneniya morskoy vody – №1.
6. Karl F. Graff, Juan A. Gallego-Juárez.(2014). Power Ultrasonics. Applications of High-intensity Ultrasound. Woodhead Publishing, 1166.
7. J. David N. Cheeke.(2017). Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves, Second Edition. CRC series in pure and applied physics, 504.
8. Leighton T.G.(1994). The Acoustic Bubble. London: Academic Press, 611.
9. Choi, P. K. (2017). Sonoluminescence and acoustic cavitation. Japanese Journal of Applied Physics, 56(7S1), 07JA01.
10. Dezhkunov, N. V., & Leighton, T. G. (2004). Study into correlation between the ultrasonic capillary effect and sonoluminescence. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 77(1), 53-61.
11. Dezhkunov, N. V., Francescutto, A., Ciuti, P., & Ignatenko, P. (2003). Ultrasonic capillary effect and sonoluminescence. In Proc. of 5-th World Congress on Ultrasonics (WCU 2003). Paris (pp. 597-600).
12. Lang, R. J. (1962). Ultrasonic atomization of liquids. The journal of the acoustical society of America, 34(1), 6-8.
13. Mason T.J., Lorimer J.P.(2002). Applied Sonochemistry: Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing. N.Y.: Wiley&Sons, 314.
14. Suslick, K. S. (1989). The chemical effects of ultrasound. Scientific American, 260(2), 80-87.
15. Ubbenjans B., Frank-Rotsch Ch., Virbulis J., Nacke B., Rudolph P.(2010). Influence of Ultrasonic Treatment on Crystal Growth From Melt. International Scientific Colloquium, Modelling for Material Processing, Riga, 79-84.
16. John R.G. Sander, Brad W. Zeiger, Kenneth S. Suslick. (2014) Sonocrystallization and sonofragmentation. Ultrasonics Sonochemistry, 21, pp. 1908-1915.
17. Hiratsuka A. and Pathak D. (2013), "Application of Ultrasonic Waves for the Improvement of Water Treatment," Journal of Water Resource and Protection, Vol. 5 No. 6, 604-610. doi: 10.4236/jwarp.2013.56061.
18. Deora, NS, Misra, NN, Deswal, A, Mishra, HN, Cullen, PJ & Tiwari BK (2013) Ultrasound for Improved Crystallisation in Food Processing, Food Engineering Reviews, 5(1):36-44.
19. Wagh, Ashwini & Birkin, Peter & Martini, Silvana. (2016). High-Intensity Ultrasound to Improve Physical and Functional Properties of Lipids. Annual review of food science and technology. 7. 10.1146/annurev-food-041715-033112.
20. Chemat, Farid & , Zill-e-Huma & Khan, Muhammad. (2010). Applications of Ultrasound in Food Technology: Processing, Preservation and Extraction. Ultrasonics sonochemistry. 18. 813-35. 10.1016/j.ultsonch.2010.11.023.
21. Kasaa, M. (2013) Input power-mechanism relationship for ultrasonic Irradiation: Food and polymer applications. Natural Science, 5, 14-22. doi: 10.4236/ns.2013.58A2003.
22. Rikke P.(2013). Ultrasonication Affects Crystallization Mechanisms and Kinetics of Anhydrous Milk Fat. Frydenberg, Marianne Hammershøj, Ulf Andersen, and Lars Wiking. Crystal Growth & Design 13 (12), 5375-5382. DOI: 10.1021/cg4012923.
23. Kentish, Sandra & Feng, Hao. (2014). Applications of Power Ultrasound in Food Processing. Annual review of food science and technology. 5. 10.1146/annurev-food-030212-182537.
24. Burdo O. G., Milinchuk S. I., Mordynskiy V. P., Harenko D. A. (2011). Tehnika blochnogo vyimorazhivaniya. – 294.
25. Burdo O. G. (2009). Holodilnyie tehnologii v sisteme APK. – 288 c.
26. Trishyn F.A., Trach O. R., Orlovskaya Yu. V.(2018). Upravlenie potokami energii v nizkotemperaturnykh razdelitalnykh ustanovkakh. Problemi regionalnoy energetiki. №1. 72–86.

Отримано в редакцію 25.04.2018
Прийнято до друку 30.06.2018

Received 25.04.2018
Approved 30.06.2018

УДК 664.723.047.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1023>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Гаврилов А.В.¹, к.т.н., доцент, Безбах И.В.², к.т.н., доцент, Мордынский В.П.², к.т.н., доцент,
Бурдо О.Г.², д.т.н., проф.

¹Академия биоресурсов и природопользования «КФУ им. В.И. Вернадского»,

²Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Аннотация. Рассмотрены мировые тенденции на рынке сушеных продуктов и концентратов. Анализируются энерготехнологии основных процессов обезвоживания – выпарки и сушки. Сравниваются современные технологии обезвоживания и обсуждаются научно-технические противоречия процессов выпарки и сушки. Показаны энергетические преимущества выпарки и ограничения по конечному влажностному содержанию готового продукта. Приведены модели материальных балансов при комбинированных технологиях «выпарка - сушка». Представлены инновационные разработки техники обезвоживания – термомеханический агрегат и микроволновой вакуум-выпарной аппарат. Обсуждаются конструктивные варианты агрегата, возможности решать в нем параллельно задачи дробления, плющения, перемешивания и транспортировки продукта. Обоснованы механизмы интенсификации процесса теплообмена в термомеханическом агрегате. Приведены значения коэффициентов теплопередачи в термомеханических агрегатах при обработке сырья в консервных, молочных, пищевоконцентратных и винодельческих производствах. Проведено сравнение удельных энергетических затрат в термомеханическом агре-

gate и в традиционных ленточных и барабанных сушилках. Исследуются инновационные технологии обезвоживания в электромагнитных полях. Показаны перспективы сушилок с электромагнитным подводом энергии микроволнового диапазона. Исследуются процессы выпаривания в традиционных аппаратах и в вакуумных микроволновых. Приведены модели трансформации, транспорта и потерь энергии в традиционной технологии производства томатной пасты и в установке с термомеханическим агрегатом с ротационным термосифоном. Показано, что инновационная технология позволяет на 40% интенсифицировать процесс выпарки и на 35% снизить удельные расходы энергии. Обоснованы перспективы ступенчатых схем обезвоживания «выпарка - сушка». Проведено развитие методов энергетического менеджмента для исследования энергетической эффективности на основе нового числа подобия – числа энергетического действия.

Ключевые слова: процессы обезвоживания, энергетическая эффективность, термомеханический агрегат, ротационный термосифон, микроволновые аппараты.

RESEARCHING OF PROCESS ENERGY TECHNOLOGIES DEVELOPMENT OF VEGETATIVE RAW MATERIALS

Gavrilov A.V.¹, PhD in Tech. Sci., associate prof., Bezbakh I.V.², PhD in Tech. Sci., associate prof.,
Mordinsky V.P.², PhD in Tech. Sci., associate prof., Burdo O.G.², Dr. of Tech.Sci., prof.
¹Academy of bioresources and nature management «Vladimir Vernadskiy CFU»,
²Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

Abstract. The world tendencies in the dried products and concentrates market are considered. The energy technologies of the basic processes of dehydration (evaporation and drying) are analyzed. Modern dehydration technologies are compared and the scientific and technical contradictions of the processes of evaporation and drying are discussed. The energy advantages of the evaporation and the limitations by the final moisture content of the finished product are shown. Models of material balances with combined technologies of "evaporation - drying" are given. Innovative developments in dehydration engineering are presented - a thermomechanical unit and a microwave vacuum evaporator. The constructive variants of the unit are discussed, the possibilities of solving in it the tasks of crushing, flattening, mixing and transporting the product in parallel. The mechanisms of intensification of the process of heat and mass transfer in a thermomechanical aggregate are justified. The values of the heat transfer coefficients in thermomechanical aggregates are given for the processing of raw materials in canning, dairy, food-concentrates and wineries. The specific energy costs in a thermomechanical aggregate and in traditional belt and cylinder dryers are compared. Innovative technologies of dehydration in electromagnetic fields are investigated. The prospects of dryers with electromagnetic energy supply of the microwave range are shown. Evaporation processes are studied in conventional apparatuses and in vacuum microwave ones. Models of transformation, transport and energy losses in the traditional technology of tomato paste production and in a device with a thermomechanical unit with a rotary thermosyphon are presented. It is shown that the innovative technology allows to intensify the process of evaporation by 40% and to reduce the energy consumption by 35%. The prospects of stepwise dehydration schemes of "evaporation - drying" are substantiated. Energy management methods have been developed to study energy efficiency based on a new number of similarity – the number of energy actions.

Key words: dehydration processes, energy efficiency, thermomechanical aggregate, rotary thermosyphon, microwave devices

Введение. Мировой рынок сушеных продуктов динамично развивается. Этому способствует интенсивный темп жизни современного человека, обуславливающий высокий спрос на такую категорию продуктов. Объем и номенклатура сушеных продуктов, порошков на них постоянно увеличивается. Расширение ассортимента сухих продуктов и внедрение инновационных энергоэффективных сушильных технологий, развитие научных основ обезвоживания продуктов и создание новых образцов техники является насущной и актуальной глобальной проблемой [1 - 5].

Концентраты из растворов получают, как правило, в результате выпаривания и последующей сушки. Это объясняется тем фактом, что рассматриваемые процессы обезвоживания серьезно отличаются, несмотря на то, что задачи у них похожие – удалить влагу из сырья. Физическая энергия, которая требуется для перевода 1 кг воды в пар, составляет 2,5 МДж. Но, если при выпарке минимум 85% подведенной энергии к сырью используется полезно, то при сушке эта величина достигает максимум 40%. Объясняется это тем, что выпаривание и сушка физически разные процессы. В первом случае движущей силой является разность температур (выпарка – классический тепловой процесс), а сушка определяется диффузи-

онной движущей силой. По сравнению с выпаркой – сушка является вялым и продолжительным процессом. Затраты энергии при сушке в 1,6...3 раза выше, чем при выпаривании.

Вторым фактором, объясняющим традиционные 2 этапа обезвоживания, является то, что основной процесс при выпарке – это теплопередача. С повышением концентрации раствора увеличивается его вязкость, растет толщина гидродинамического и теплового слоя. В результате повышается термическое сопротивление на участке «стенка - продукт», растет перегрев продукта, появляется привкус варки. В связи с этим конечные концентрации готового продукта не превышают 35 – 60%. Сгущенный в выпарном аппарате продукт поступает на дальнейшее обезвоживание в сушильные установки.

Анализ проблемы и формулировка научно-технической гипотезы. Рассмотрим традиционные схемы обезвоживания, и получения сухих продуктов предусматривают, как правило, две стадии. На первой часть влаги удаляется в выпарных аппаратах, на второй – в сушильных установках (рис.1).

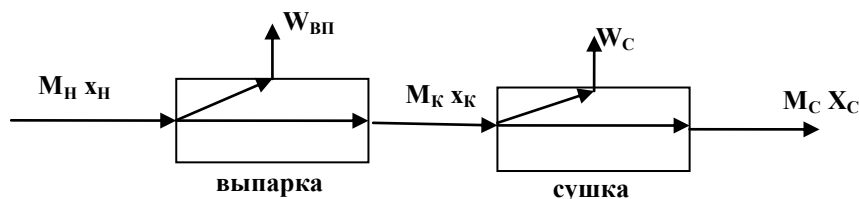


Рис.1. Двухступенчатая схема обезвоживания сырья.

На рисунке 1 приняты обозначения: M_H – начальный массовый поток сырья с концентрацией x_H ; M_K – массовый поток жидкого концентрата с концентрацией x_K ; M_C – массовый поток конечного сухого продукта с концентрацией x_C ; $W_{ВП}$ – вторичный пар после выпарки; W_C – поток пара после сушки. Балансовые модели обезвоживания имеют вид

Для процесса выпарки:

$$\left. \begin{aligned} M_H &= M_K + W_{ВП} \\ M_K X_K &= M_H X_H \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Из первого соотношения в (1) находится M_K , которое подставляется во второе уравнение и, после несложных преобразований, определяется содержание сухих веществ в концентрате на выходе из выпарного аппарата:

$$X_K = \frac{M_H X_H}{M_H - W_{ВП}} \quad (2)$$

Для процесса сушки:

$$\left. \begin{aligned} M_K &= M_C + W_C \\ M_K X_K &= M_C X_C \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Аналогично (2) находятся концентрации сухих веществ в готовом продукте:

$$X_C = \frac{M_K X_K}{M_K - W_C} \quad (4)$$

Две стадии обезвоживания поясняется энергетическими факторами. Принципиально, всю влагу можно удалить в сушильной установке. Однако самая плохая выпарка имеет тепловой КПД 85%, а самая хорошая сушка в 2 раза меньше [5]. Конструкции сушилок отличаются большим разнообразием и классифицируются по ряду признаков: способу подвода теплоты, используемому теплоносителю, взаимному направлению движения материала и сушильного агента, состояния материала и пр. [2, 4 - 8].

Преимущественно используется конвективный способ сушки [4]. Однако в условиях острого энергетического кризиса конвективный способ сушки теряет приоритетность из-за нерационального расхода энергии, в первую очередь с отработанным теплоносителем [5].

Перспективным решением считается конструкция термомеханического агрегата (ТМА) для нагрева и обезвоживания дисперсного и вязкого продукта [7]. Оригинальным узлом такого агрегата является теплопередающий модуль, который представляет собой конденсатор автономного испарительно-конденсационного контура, работающего в режиме термосифона [8]. Именно такое исполнение модуля позволяет реализовать следующие преимущества: сократить цепь трансформации энергии; объединить в одном аппарате несколько технологических процессов; интенсифицировать теплоперенос; организовать эффективную доставку энергии к продукту; утилизировать тепловую энергию.

Конденсатор теплопередающего модуля может быть различной конструкции, что позволяет ему выполнять дополнительные функции: перемешивать, дробить, перемещать, плющить и т.п. [7]. Использование ТМА в пищевых производствах позволяет достичь существенного эффекта при обработке ненью-

тоновских жидкостей и мелкодисперсных материалов (табл.1).

Таблица 1

Области использования ТМА

Отрасль	Процесс	Продукт	Коэффициент теплопередачи, К, Вт/м ² К
Консервная, Молочная, Виноделие	нагрев, обезвоживание	Томатная паста, молоко, мезга	950.....1000
Пищеконцентратная	сушка	Крупа, горох, шлам	250

Вращение модуля способствует механическому воздействию на пограничный слой, что приводит к осязательной интенсификации теплопереноса. Сравнение данных испытаний ТМА с ротационным термосифоном (РТС) при обезвоживании вареного гороха (табл.2) с литературными данными [4 - 5] подтверждает энергетическую эффективность разработки.

Таблица 2

Энергетика сушильных установок

Тип сушильной установки	Производительность, т/час	Расход сушильного агента, 10 ⁻³ м ³ /час	Расход энергии на выпаривание 1 кг влаги, кДж
СЗСБ-8 (барабанная)	8	50	4975
СПК-30 (ленточная)	1,5	27	5850
ТМА с РТС	1,5	10	3500

Энергетические затраты на сушку зависят от температуры и частоты оборотов РТС. Так, при температуре конденсатора РТС $T_n = 143$ °С минимальные затраты энергии достигались при частоте оборотов 28 об/мин и составляли 3,2 МДж/кг. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что на испарение влаги затрачивается 69,4 %, на нагрев продукта 16,3 %, в окружающую среду теряется 13,2 %, а на подогрев воздуха около 1,1 %.

Инновационные принципы совершенствования техники обезвоживания основаны на использовании технологий адресной доставки энергии непосредственно к влаге в объеме продукта. Технически задача решается за счет электромагнитных полей []. Если традиционные сушилки способны удалять до 3 кг влаги на 1 кг использованного органического топлива, то, при организации удаления влаги из продукта в виде «тумана», технически достижимый уровень составит 50 кг влаги к 1кг топлива [5]. Сравнение удельных энергетических затрат (МДж/кг удаленной влаги) сушильной техники приведено в табл. 3.

Таблица 3

Энергетика сушилок

радиационная	кондуктивная	конвективная	сублимационная	электромагнитная	
				ТВЧ	МВ
3,2 – 4,3	5,5 – 6,2	5,5 – 9	10 – 12	6 – 11	2 – 4

По сравнению с сушкой энергетика выпаривания выглядит привлекательней (табл.4). Сравнение проведено по показателю удельных затрат энергии (j) и по числу энергетического действия (Vu) [5, 9].

Таблица 4

Энергоэффективность обезвоживания

№	Параметры энергоэффективности	Число ступеней традиционной выпарки					Инновационный МВВА
		1	2	3	4	5	
1	j, МДж/кг	2,89	1,42	1	0,82	0,68	1,9
2	Vu	1,15	0,57	0,4	0,33	0,27	0,76

Поэтому применяются ступенчатые схемы обезвоживания: «выпарка - сушка». Видно, что инновационный вакуум-выпарной аппарат (МВВА) эффективней одноступенчатой выпарки. Рассмотрим пример использования ТМА с РТС в технологии консервного производства (рис.2).

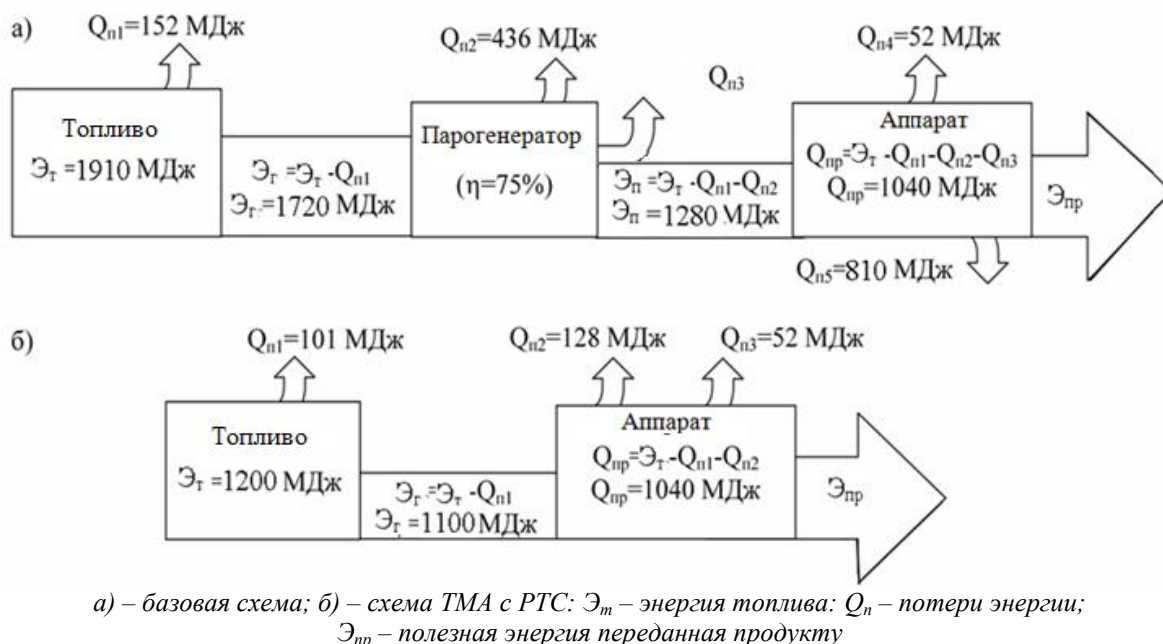


Рис. 2. Модель трансформации, транспорта и потерь энергии.

Оценки (рис.2) проведены относительно готового продукта, полученного из 500 кг сырья. Выполнены расчеты энергетических балансов в цепи «готовый продукт - топливо». Так, в базовой схеме (рис.2, а) энергия топлива трансформируется в энергию водяного пара с потерями в парогенераторе при сжигании топлива ($Q_{n1}=152$ МДж) и в окружающую среду ($Q_{n2}=436$ МДж). При транспортировке пара к аппарату теряется ($Q_{n3}=270$ МДж), а от корпуса аппарата ($Q_{n4}=52$ МДж). Значительные потери с конденсатом, который отводится из аппарата ($Q_{n5}=810$ МДж) (рис. 2).

В предложенной схеме ТМА с РТС (рис.2,б) отсутствуют потери энергии при транспортировке пара к аппарату и с конденсатом. Поэтому автономность аппарата позволяет снизить расход топлива с 46,5 кг до 30,2 кг, а также, уменьшить удельный расход энергии \mathcal{E}_y с 3,9 МДж/кг до 2,6 МДж/кг (табл.5). В расчетах площадь поверхности теплопередачи в рассматриваемых схемах принята одинаковой - 3,7 м². Стужение томатной пасты проводится в вакуум-выпарном аппарате с паровой рубашкой. В середине корпуса установлена мешалка якорного типа. Рабочий объем аппарата 750-1000 л. Томатная масса поступает в аппарат с температурой $t_n=90\pm 2$ °С.

Степень интенсификации процесса термомеханической обработки томатной пасты достигла 1,4, а время обработки сократилось с 4090 с. до 2900 с. Сравнение технических характеристик базовой схемы (№1) с инновационной (№2) приведено в табл.5.

Таблица 5

Сравнение технических характеристик

Схема	загрузка аппарата, т	Расход энергии, \mathcal{E}_T	Расход топлива		Время цикла, τ	Удельный расход энергии, \mathcal{E}_y
	кг		кг	%		
1	500	1910	46,5	100	4090	3,9
2	500	1200	30,2	63	2900	2,6

Выводы. Энергетические преимущества процесса обезвоживания в вакуум-выпарных аппаратах по сравнению с сушкой общепризнанны. Однако традиционные выпарные аппараты, реализующие процессы теплопередачи, ограничены по значениям влагосодержания готового продукта. Перспективным путем решения этих противоречий являются инновационные микроволновые выпарные аппараты, работающие по принципу объемного подвода энергии. Но анализ таких аппаратов требует поиск новых подходов к оценке эффективности инновационной техники. Традиционная оценка по значениям коэффициента теплопередачи теряет смысл, поскольку существенно отличаются принципы подвода энергии. Похожие

проблеми виникають при аналізі ефективності комбінованих схем обезвоживання «выпарка - сушка».

В роботі пропонується задачі оцінки енергетическої ефективності вирішувати методами енергетического менеджмента, і розраховувати витрати енергії на одиницю продукту (МДж/кг або МДж/л і т.п.). Ефект дії електромагнітного поля оцінюється новим безрозмірним комплексом – числом енергетического дії, яке враховує співвідношення витрат енергії інноваційної і традиційної технологій. Проведені за такою методикою порівняння показали перспективність розробок.

Литература.

1. Hosovskyi R. et al. Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks // *Chemistry & Chemical technology*. – 2016. – № 10, № 4. – С. 459-464.
2. Atamanyuk, V., Huzova, I., & Gnativ, Z. Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production. // *Харчова наука та технологія*, –2017. – 11(4). – С. 21-28.
3. Ul'ev L. M., Vasil'ev M. A. Heat and power integration of processes for the refinement of coking products // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2015. – Т. 49. – №. 5. – С. 676-687.
4. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка – Киев: Академперіодика, 2011.- 376 с.
5. Бурдо О. Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368 с.
6. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes / Oleg Burdo, Valentyna Bandura, Aleksandr Zikov, Igor Zozulyak, Julia Levtrinskaya, Elena Marenchenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 4/11(88). P. 34-42.
7. Безбах, И. В. Исследование работы термосифонов при обработке дисперсных и вязких пищевых сред [Текст] / И.В. Безбах, Омар Саид Ахмед, В.И. Донкоглов // *Problemele energeticii regionale. Revista stiintifica, informational – analitica si ingenerasca / Academia de Stiinta a Moldovei institutul de energieca*. – Chisinau, 2009. – № 1. – С. 73 – 80.
8. Патент України 97592 МКІ F26 В 17/10. Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів / Бурдо О. Г. , Безбах І. В. , Зиков О. В. ; заявник і патентовласник ОНАХТ. - № u 2014 10150, опубл. 25. 03. 2015; Бюл. № 6.
9. Бурдо О. Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244 с.

References

1. Hosovskyi, R., & Kindzera, D. (2016). Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks. *Chemistry & Chemical technology*, (10, № 4), 459-464.
2. Atamanyuk, V., Huzova, I., & Gnativ, Z. (2017). Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production. *Харчова наука та технологія*, 11(4), 21-28.
3. Ul'ev, L. M., & Vasil'ev, M. A. (2015). Heat and power integration of processes for the refinement of coking products. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 49(5), 676-687.
4. Dolinskiy, A. A. (2011). *Raspylitelnaya sushka*: Kiev: Akademperiodika, 376.
5. Burdo, O. G. (2010). *Evolutsiya sushilnykh ustanovok*, 368.
6. Burdo, O., Bandura, V., Zikov, A., Zozulyak, I., Levtrinskaya, J., & Marenchenko, E. (2017). Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 11-88, 34-42.
7. Bezbah, I. V., Ahmed, O. S., & Donkoglov, V. I. (2009). *Issledovanie raboty termosifonov pri obrabotke dispersnykh i vyazkikh pischevykh sred. Problemy regionalnoy energetiki*, (1), 73- 80.
8. Burdo, O. G. , Bezbah, I. V. , Zikov, O. V. (2014) Patent Ukraine 97592 МКІ F26 В 17/10. Pristriy dlya sushinnya dispersnih materialiv, U2014 10150, 25. 03. 2015; 6.
9. Burdo, O. G. (2008). *Energeticheskiy monitoring pischevykh proizvodstv*. Odessa: Poligraf, 244..

Отримано в редакцію 31.04.2018
Прийнято до друку 25.06.2018

Received 31.04.2018
Approved 25.06.2018