

# ПРИМЕНЕНИЕ КОНВЕЙЕРНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ КОНВЕКТИВНО-МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СУШКИ ФРУКТОВ И ОВОЩЕЙ

## THE USE OF COMBINED CONVECTION-MICROWAVE PROCESSING LINE FOR DRYING FRUITS AND VEGETABLES

**А.А. КОРОЛЕВ<sup>1,2</sup>**  
**А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования – Филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, г. Видное, Московская обл., Россия, process@vniitek.ru

<sup>2</sup> НИИ Пищеконцентратной промышленности и специальной пищевой технологии – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», Московская область, Ленинский район, поселок Измайлово, д. 22, gnuniipspt@gmail.com

**A.A. KOROLEV<sup>1,2</sup>**  
**A.V. PROKOPENKO<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> All-Russian Research Institute of Conservation Technology – Branch of the Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Center for Food Systems named after Valeriy M. Gorbatov» of RAS, Vidnoe, Russia, process@vniitek.ru

<sup>2</sup> Research Institute of Food Concentrate Industry and Special Food Technology – Branch of the Federal State Budgetary Institution for Nutrition and Biotechnology, Izmaylovo, Russia, gnuniipspt@gmail.com

В статье представлен опыт эксплуатации микроволновых сушильных установок, применяемых в технологии переработки сельскохозяйственного сырья. Предложены технологические решения, касающиеся разработки и использования конвейерных микроволновых сушильных установок для сушки растительного сырья. Полученные параметры энергопотребления и динамики процесса сушки позволяют определить близкую к оптимальной границу перехода энергоподводов. Определено оптимальное значение переходной влажности (на границе микроволнового и конвективного модулей), которое должно находиться в диапазоне от 28 до 35 %. Применение метода комбинированного энергоподвода в технологиях сушки фруктов и овощей позволяет снизить энергопотребление процесса на 20–30 %. Приводятся примеры успешного внедрения предложенного способа сушки в пищевой промышленности.

**Ключевые слова:** СВЧ, растительное сырье, сушка, сушеные овощи, сушеные фрукты, снеки, фруктовые чипсы.

The article presents the experience of operating microwave drying plants, which are used in the technology of processing agricultural raw materials. The technological solutions for the development and use of microwave conveyor drying plants for drying plant materials were proposed. The obtained parameters of energy consumption and dynamics of the drying process allowed to determine close to the optimal transition boundary of the energy supply. The optimum value of transient humidity (at the boundary of the microwave and convective modules) is determined to be in the range from 28 to 35 %. The use of the combined energy supply method in drying technologies for fruits and vegetables allows to reduce the energy consumption of the process by 20–30 %. The examples of successful implementation of the proposed drying method in the food industry are given.

**Keywords:** SHF, vegetable raw materials, drying, dried vegetables, dried fruits, snacks.

## Введение

Сушка – наиболее выгодный способ консервирования растительных материалов, позволяющий достаточно полно сохранить нативные свойства плодов, овощей, ягод, зеленых культур при минимальных материальных затратах на обезвоживание, упаковку и хранение сушеных продуктов.

Для переработки продукции сельского хозяйства применяются различные технологии сушки: естественная, аэрационная, конвективная, сушка в псевдокипящем слое, инфракрасная, сублимационная, микроволновая. Способы сушки различаются организацией процесса отъема влаги из материала и характеризуются использованием одного или нескольких процессов, определяющих всю специфику сушки. Применение способа микроволновой сушки, в том числе и комбинированной находит широкое распространение в мире [1, 2, 3]. Так, микроволновую сушку применяют для сушки древесины [4], зерна [5], овощей, фруктов [6, 1].

В настоящее время в России разработано большое количество СВЧ-установок волноводного и лучевого типа с конвективным и вакуумным удалением влаги. Более пяти организаций выпускают установки для сушки с использованием микроволновой энергии. Все установки имеют модульную конструкцию с мощностью магнетронного модуля до 1 кВт на частоте 2450 МГц. Равномерность нагрева пищевых продуктов достигается расположением модулей, очередностью подачи питающего напряжения и выбором системы передачи СВЧ-энергии. Созданные установки по микроволновой сушке рыбы, мяса, грибов, круп, овощей и фруктов характеризуются небольшим временем и относительно низкой температурой процесса. Особенно это справедливо для вакуумной сушки, когда на начальной стадии температура определяется давлением. Согласно современным тенденциям, для увеличения производительности и равномерности сушки перспективным представляется применение мощных магнетронных генераторов с частотой 915 МГц [7, 8, 9, 10], к недостаткам такого оборудования относится стоимость и сложность его эксплуатации.

Использование СВЧ-энергии для сушки веществ имеет ряд преимуществ: объемный характер выделения энергии при облучении объектов электромагнитными волнами; селек-

тивность энерговыделения, что обеспечивает высокую конечную однородность объектов сушки по влажности; малое время и относительно низкая температура процесса сушки, что применительно к пищевым продуктам, а также позволяет обеспечить очень высокую (до 96–98 %) сохраняемость полезных веществ и витаминов [6].

## Цель исследования

Представить на обсуждение опыт эксплуатации микроволновых сушильных установок, применяемых в технологии переработки сельскохозяйственного сырья, а также предложить технологические решения, касающиеся разработки и использования конвейерных микроволновых сушильных установок для сушки растительного сырья.

## Методы и средства

В ООО «НПФ ЭТНА», г. Саратов, разработан ряд промышленных установок УСК конвейерного типа различной производительности и суммарной потребляемой мощности от 16,8 до 48 кВт. Принцип работы установок основан на комплексном воздействии на объекты сушки СВЧ-энергии магнетронов мощностью 800 Вт, работающих на частоте на 2450 МГц, и конвективного потока горячего воздуха при непрерывном перемешивании в рабочем канале. Такая комбинация позволяет обеспечивать равномерный нагрев всего объема обрабатываемого продукта.

### *Приготовление образцов и их обработка*

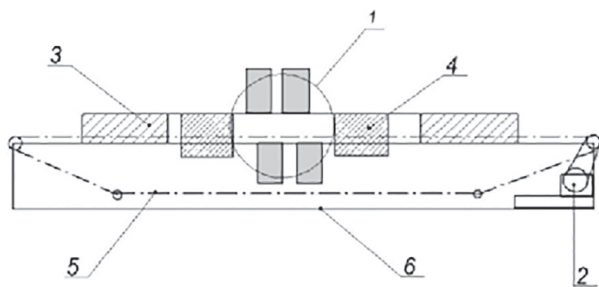
Исследования по совмещению конвективно-го и микроволнового методов сушки на разных стадиях сушки проводили на корнеплодах моркови и яблоках. Морковь мыли и очищали от кожуры, из яблок удаляли сердцевину. Для нарезки на шайбы толщиной 3–4 мм использовали промышленную резку KSM 100 (Kronen gmbh.).

Нарезанную морковь пробланшировали в кипящей воде в течение 10 мин. Порезанные на поперечные шайбы яблоки выдерживали в 0,5%-м растворе лимонной кислоты при температуре 40 °С в течение 5 мин.

Для конвективной сушки использовали камеру сушилку с тепловентилятором мощностью 7,7 кВт. Досушку в микроволновом поле проводили в лабораторной сушильной установке УСК-2м (ЭТНА, г. Саратов).

Процесс сушки проводили при следующих режимах: температуру в конвективной сушилке поддерживали в пределах 70–75 °С, СВЧ-сушилке – в пределах 50–55 °С. Насыпная масса сырья на технологические поддоны в обоих случаях составила 5 кг/м<sup>2</sup>.

На рис. 1 представлена схема конвейерной СВЧ-установки. Установка оснащена транспортером, поглощающими камерами, гарантирующими безопасный ввод продукта в электродинамическую систему и вывод из нее, снабженной электродинамической системой собственной вытяжной вентиляции водяного пара. Электродинамическая система установки выполнена на базе совокупности желобковых волноводов, объединенных в модули, которые последовательно установлены в зависимости от производительности и назначения сушилки. Нагреваемый объект слоем толщиной не более 35 мм располагается у поверхности центрального проводника желобкового волновода, что позволяет в режиме бегущей волны обеспечить высокую степень равномерности нагрева продукта. Продукт транспортируется через установку на фторопластовых технологических поддонах. Безопасность по СВЧ-облучению обеспечивают системами из четвертьволновых дросселей и экранирующими элементами, расположенными на входе и выходе продуктопровода.



**Рис. 1. Принципиальная компоновка модульной СВЧ-установки:**

- 1 – СВЧ модуль, 2 – мотор редуктор,
- 3 – СВЧ-дроссель, 4 – камера конвективной продувки, 5 – конвейерная цепь, 6 – рама

Согласованная работа магнетронных генераторов при заполнении рабочего канала сушильной установки объектами сушки обеспечивает режим бегущей волны, при котором плотность СВЧ-энергии равномерна по длине рабочей камеры, что позволяет использовать широкую транспортерную ленту для подачи образцов обрабатываемых материалов. Указанный способ подачи СВЧ-мощности обеспечива-

ет более равномерный нагрев, чем при использовании одного СВЧ-источника. Убыль массы при СВЧ-досушке определяли через 2 минуты.

*Принцип и применение технологии комбинированной конвективно-микроволновой сушки*

При конвективном методе суммарная энергоемкость процесса с учетом рециркуляции теплоносителя составляет ~2 кВт×ч/кг. Для микроволновой сушки при прохождении полного диапазона влажностей эта величина составляет 1,55 кВт×ч/кг. При оптимальном же сочетании методов удастся достичь величины порядка 1,15 кВт×ч/кг. Так, при значении переходной влажности 200 % суммарная энергоемкость  $R\Sigma$  составляет 1,22 кВт×ч/кг, а при значении переходной влажности 70 %  $R\Sigma$  – 1,28 кВт×ч/кг.

На начальных этапах процесса сушки идет равномерный прогрев и постоянный перенос влаги от внутренних к поверхностным слоям материала. Влага с поверхности объекта сушки удаляется равномерно с постоянной скоростью, влагосодержание уменьшается линейно, при этом температура поверхности постоянна и равна температуре мокрого термометра. На данном этапе сушки эффективен конвективный энергоподвод. Однако по мере высыхания продукта и связанного с этим снижения его тепло- и массопроводящих характеристик все большая доля тепловой энергии не проникает вглубь высушиваемых продуктов, а переизлучается в пространство. Энергоемкость процесса возрастает, время сушки многократно увеличивается, возникают локальные перегревы продукта.

Микроволновая сушка имеет преимущество в скорости и энергоемкости процесса на последних стадиях сушки, когда процесс масспереноса влаги замедляется. Это связано с объемным характером нагрева при облучении объектов микроволновыми электромагнитными волнами, микроволновое излучение поглощается селективно в тех областях, которые характеризуются самыми высокими диэлектрическими параметрами  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$ , то есть в тех областях, в которых имеет место наибольшее содержание влаги. При использовании микроволнового энергоподвода процесс масспереноса влаги от внутренних слоев к верхним идет постоянно и скорость сушки выше по сравнению с конвективным способом сушки.

Учитывая вышесказанное, эффективно совмещение двух механизмов сушки (конвективного и микроволнового) на различных стадиях процесса сушки.

Ход кривых изменения энергоёмкости  $R = R(w)$  и скорости сушки представлен на рис. 2 и 3. По этим кривым можно выбрать близкую к оптимальной величину переходной влажности (на границе микроволнового и конвективного модулей) – порядка 28–35 %. Для таких продуктов, как яблоки, это означает, что примерно 80–85 % всей содержащейся в исходном продукте влаги следует удалить конвективным методом и лишь оставшиеся 15–20 % – микроволновым [11, 10]. Средняя энергоёмкость процесса составляет 1,5–1,6 кВт×ч/кг, что в 1,8–2,0 раза ниже значений допускаемых в промышленности при конвективной сушке.

На рис. 4 представлены кривые досушки порезанных на шайбы яблок и моркови, предварительно высушенных конвективным способом до 30 % влажности. На графиках видно,

что досушка в СВЧ-поле проходит быстрее более чем в 3 раза по сравнению с конвективным способом. Досушка яблок идет медленнее моркови из-за более высокого содержания сахаров, затрудняющих процесс сушки. Кроме того, более длительная и интенсивная предварительная гидро-термообработка моркови способствует разрушению клеточных стенок и повышению проводимости влаги от внутренних слоев к внешним в сырье [7]. Процесс микроволновой досушки осуществляется на относительно низких температурах сушки 45–55 °С, что способствует сохранению качества готовой продукции и снижению количества брака.

Оборудование для комбинированной сушки может дополнять и интенсифицировать работу технологических линий производства сушеной продукции (сушеных фруктов, корнеплодов, овощей), экструдатов пищевых концентратов, а также при производстве экструдированных кормов [13].

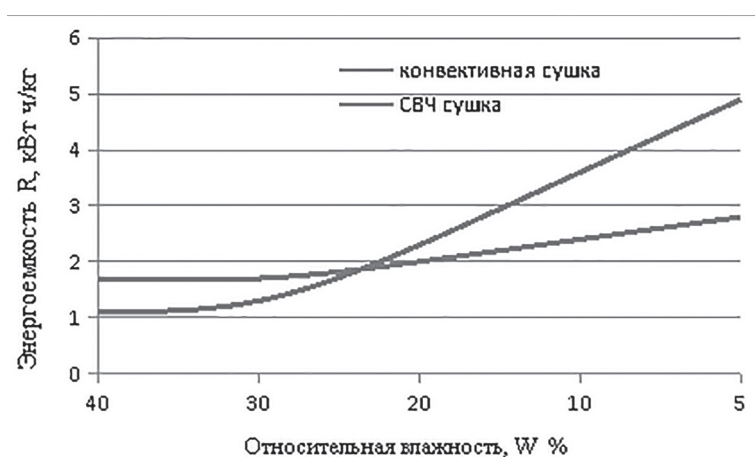


Рис. 2. Зависимость энергоёмкости  $R(w)$  для конвективного и микроволнового механизмов сушки

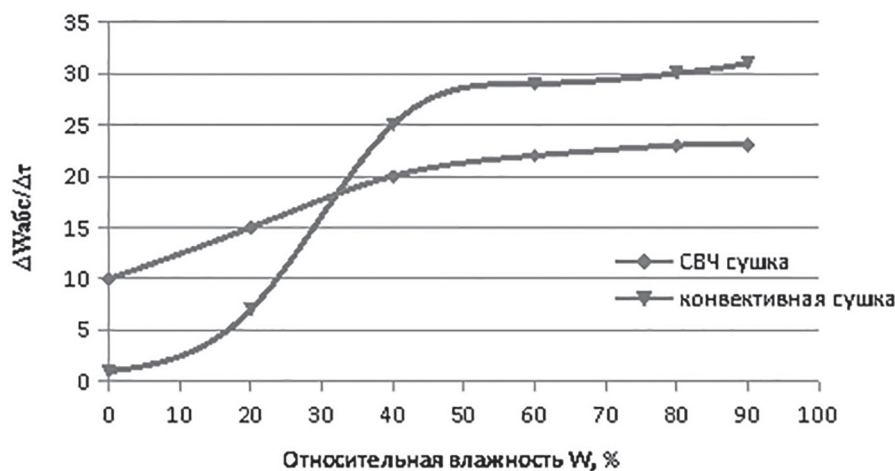


Рис. 3. Зависимость скорости сушки для конвективного и микроволнового механизмов сушки

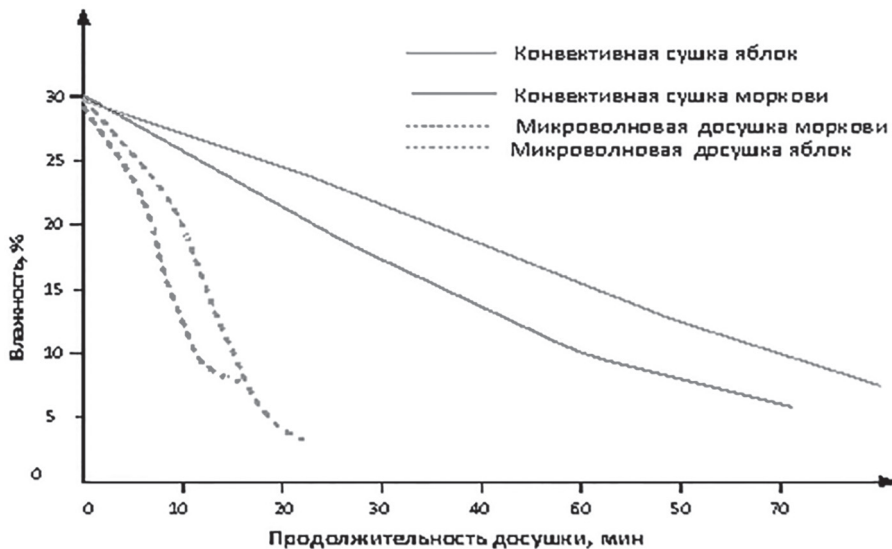


Рис. 4. Кривые скорости досушки резаных яблок и моркови для конвективного и микроволнового механизмов сушки

При экспериментальной проверке на начальной стадии сушки использовалась одноленточная сушилка СК-500 (Шебекинский машзавод, Россия) с последующей досушкой в СВЧ-установке. Технология и оборудование апробированы на предприятиях по производству сушеных корнеплодов (ИК № 1 г. Мариинск, Кемеровская область) и яблочных чипсов «Донфрукт» (Волгоградская обл., г. Дубовка).

Таким образом, использование конвективной микроволновой сушки на финальной стадии приготовления продукта позволит существенно ускорить процесс сушки и улучшить органолептические характеристики сырья.

### Выводы

На основании проведенного анализа применения микроволнового энергоподвода разработана технология комбинированной сушки плодов и овощей. На начальной стадии сушки использовалась одноленточная сушилка СК-500 (Шебекинский машзавод, Россия) с последующей досушкой в СВЧ-установке. Технология и оборудование апробированы на предприятиях по производству сушеных корнеплодов (ИК № 1 г. Мариинск, Кемеровская область) и яблочных чипсов «Донфрукт» (Волгоградская обл., г. Дубовка).

Определено оптимальное значение переходной влажности (на границе микроволнового и конвективного модулей), которое должно на-

ходиться в диапазоне от 28 до 35 %. Применение метода комбинированного энергоподвода в технологиях сушки фруктов и овощей позволяет снизить энергопотребление процесса на 20–30 %.

### Литература

1. Hao Feng, Yun Yin, Juming Tang. Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling Received: 24 October 2011 / Accepted: 4 January 2012 Springer Science+Business Media, LLC 2012 Food Eng Rev DOI 10.1007/s12393-012-9048-x.
2. Mermelstein N.H. Microwave and radiofrequency drying. Food Technol. 1998. Vol. 52, No 11. P. 84–86.
3. Pappas C., Tsami E., Marinos D. Drying Technol. 1999. 17. 1–2. С. 157–174.
4. Guanben Du, Siqun Wang, Zhiyong Cai Microwave Drying of Wood Strands Drying Technology, 23: 1–16, 2005 Copyright Q 2005 Taylor & Francis, Inc. ISSN: 0737-3937 print/1532-2300 online. DOI: 10.1080/07373930500340494.
5. Vadivambal R., Jayas D.S., Chelladurai V., White N.D.G. Preliminary study of surface temperature distribution during microwave heating of cereals and oilseed Biosystems Engg. 2009. Vol. 51, No ann. P. 3.45–3.52.
6. Королев А.А. Разработка технологии плодово-овощных чипсов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.18.01. М.: ФГБОУ ВПО МГУТУ. 2013. 24 с.
7. Гинзбург А.С. Технология сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1976. 248 с.



8. Королев А.А., Пенто В.Б., Прокопенко А.В., Явчуновский В.Я. Разработка и применение конвейерной СВЧ-установки в пищевой промышленности в сборнике: лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2017. Сборник научных трудов III Международной конференции. 2017. С. 74.
9. Лыков А.В. Теория сушки. М: Энергия, 1968. 472 с.
10. Явчуновский В.Я. Микроволновая и комбинированная сушка: физические основы, технологии и оборудование. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. 213 с.
11. Королев А.А., Пенто В.Б., Явчуновский В.Я. Сравнительный анализ современных технологий и оборудования для сушки плодовоовощных продуктов // Консервная промышленность сегодня: технологии, маркетинг, финансы. № 5–6, 2011. С. 6–11.
12. Orikasa T. Koide S., Sawada M., Sanka T., Sasaki K., Watanabe T., Ando Y., Nakamura N., Muramatsu Y., Shiina T. Tagawa A. Influence of Different Blanching Conditions on Changes in Several Quality Parameters and Physiological Properties of Carrot for Determination of Optimum Blanching Conditions. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers*, 2017. Vol. 79, No 2. P. 122–130.
13. Darvishi H., Hadi Khoshtaghaza M., Najafi G., Zarein M. Characteristics of sunflower seed drying and microwave energy consumption *Intern. Agrophysics*. 2013. Vol. 27, No 2. P. 127–132.
5. Vadivambal R., Jayas D.S., Chelladurai V., White N.D.G. Preliminary study of surface temperature distribution during microwave heating of cereals and oilseed *Biosystems Engg.* 2009. Vol. 51. No ann. P. 3.45–3.52.
6. Korolev, A.A. Razrabotka tekhnologii plo-doovoshchnyh chipsov. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Development of technology for fruit and vegetable chips: Abstract to dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. 05.18.01. Moscow: FGBOU VPO MGUTU Publ. 2013 24 p.
7. Ginzburg A.S. Tekhnologiya sushki pishchevyh produktov [Food drying technology]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1976. 248 p.
8. Korolev A.A., Pento V.B., YAvchunovskij V.YA. Comparative analysis of modern technologies and equipment for drying fruit and vegetable products. *Konservnaya promyshlennost' segodnya: tekhnologii, marketing, finansy*. 2011. No 5–6, pp. 6–11.
9. Lykov A.V. Teoriya sushki [Theory of drying]. Moscow: Energiya Publ., 1968. 472 p.
10. YAvchunovskij V.YA. Mikrovolnovaya i kombinirovannaya sushka: fizicheskie osnovy, tekhnologii i oborudovanie [Microwave and combined drying: physical foundations, technologies and equipment]. Saratov: Izd-vo Sarat. Un-ta Publ., 1999. 213 p.
11. Korolev A.A., Pento V.B., Prokopenko A.V., YAvchunovskij V.YA. Development and application of microwave conveyor systems in the food industry in the collection: laser, plasma research and technology LAPLAZ-2017. *Sbornik nauchnyh trudov III Mezhdunarodnoj konferencii* [Collection of scientific papers of the III International Conference]. 2017, pp. 74.

## References

1. Hao Feng, Yun Yin, Juming Tang. Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling Received: 24 October 2011 / Accepted: 4 January 2012 Springer Science+Business Media, LLC 2012 *Food Eng Rev* DOI 10.1007/s12393-012-9048-x.
2. Mermelstein N.H. Microwave and radiofrequency drying. *Food Technol.* 1998. Vol. 52, No 11, pp. 84–86.
3. Pappas S., Tsami E., Marinos D. *Drying Technol.* 1999. 17. 1–2, pp. 157–174.
4. Guanben Du, Siqun Wang, Zhiyong Cai Microwave Drying of Wood Strands *Drying Technology*, 23: 1–16, 2005 Copyright Q 2005 Taylor & Francis, Inc. ISSN: 0737-3937 print/1532-2300 online. DOI: 10.1080/07373930500340494.
12. Orikasa T. Koide S., Sawada M., Sanka T., Sasaki K., Watanabe T., Ando Y., Nakamura N., Muramatsu Y., Shiina T. Tagawa A. Influence of Different Blanching Conditions on Changes in Several Quality Parameters and Physiological Properties of Carrot for Determination of Optimum Blanching Conditions. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers*, 2017. Vol. 79, No 2, pp. 122–130.
13. Darvishi H., Hadi Khoshtaghaza M., Najafi G., Zarein M. Characteristics of sunflower seed drying and microwave energy consumption *Intern. Agrophysics*. 2013. Vol. 27. No 2, pp. 127–132.