

Повышение эффективности микронизации зерновых культур на СВЧ установке с использованием перегретого пара

Кухто Валерий Александрович

ВНИИ технологии консервирования (ВНИИТеК)

Адрес: 142703, Московская обл., г. Видное, ул. Школьная, 78

E-mail: kuhto.valery@yandex.ru

Морозов Александр Олегович

ЗАО «НПП «Магратеп»

Адрес: 141190, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2А

E-mail: aomorozovbig@yandex.ru

Прокопенко Александр Валерьевич

кандидат технических наук, доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Адрес: 115409, город Москва, Каширское ш., 31

ВНИИ технологии консервирования (ВНИИТеК)

Адрес: 142703, Московская обл., г. Видное, ул. Школьная, 78

E-mail: pav14@mail.ru

Филиппович Виталий Павлович

ВНИИ технологии консервирования (ВНИИТеК)

Адрес: 142703, Московская обл., г. Видное, ул. Школьная, 78

E-mail: vit_fil1@rambler.ru

В работе исследованы вопросы высокотемпературной микронизации зерновых продуктов с использованием микроволнового нагрева и комбинации тепловых методов. Исследования проведены на основе промышленной микроволновой установки «Декстрин-2» производства ЗАО «НПП «Магратеп» г. Фрязино. Установка работает на промышленной частоте 915 МГц с возможностью регулировки мощности от 10 до 25 кВт и выполнена на основе согласованной нагрузки, в которой СВЧ-энергия поглощается в малом объеме зерна. Скорость нагрева зернопродуктов при максимальной мощности в данной установке превышает 5 градусов в секунду, а производительность установки в режиме высокотемпературной микронизации превысит 300 кг/час.

В работе изучена возможность повышения производительности зерна ячменя путем введения предварительного прогрева зерна ячменя перегретым паром. В экспериментальных исследованиях обнаружено, что введение в засыпной бункер форсунки с многоточечным впрыском перегретого пара позволило не только повысить производительность установки, но и увеличить степень раскрытия зерна. Установлено, что обработка зерна паром приводит к повышению поглощения микроволновой энергии и улучшению условий работы микроволновой установки.

Проведен анализ физико-механических свойств обработанного зерна ячменя только с использованием микроволновой энергии и с предварительным прогревом продукта перегретым паром в засыпном бункере. При комбинированном нагреве зафиксировано увеличение геометрических размеров зерновок с раскрытием их не только по «рубчику» но и поперек. Также уменьшилась кажущаяся плотность зерновок ячменя. Таким образом, введение предварительного нагрева перегретым паром при микроволновой обработке в установке «Декстрин-2» позволит увеличить производительность установки и улучшить характеристики зерна при высокотемпературной микронизации.

Ключевые слова: микронизация, микроволновой нагрев, зерновые культуры, СВЧ-энергия, нагрев перегретым паром

В последнее десятилетие возобновился интерес к процессам высокотемпературной микронизации (ВТМ) зерновых культур с использованием СВЧ-энергии. Первые работы по микронизации (декстринизации) зерновых культур с использованием СВЧ-энергии для повышения питательной ценности комбикормов проводились под руководством Пахомова В. И. в начале 2000х годов (Пахомов, Каун, 2009; Бондарев, Пахомов, Каун, Михайлов, 2001). В данных работах была показана высокая эффективность ВТМ при использовании СВЧ-энергии. Данные работы носили исследовательский характер на установке с СВЧ мощностью 5 кВт. Производительность установки при такой мощности не превышала 30 кг/час, что не позволяло говорить о промышленном внедрении данного метода в кормоприготовление. Однако в данных работах были определены основные параметры микроволновой высокотемпературной микронизации: температура нагрева зерновки не менее 120°C и темп нагрева не менее 5 град/сек. С использованием электромагнитной энергии сверхвысокочастотных колебаний выполнение данных условий микронизации становится возможным. С 2013 года в ЗАО «НПП «Магратеп» стартовали работы по разработке установок по СВЧ обработке зерновых культур (Morozov, Morozov, Trebukh, Simonenko, Prokopenko, 2013; Морозов, Каргин, Морозов, Требух, Симоненко, Прокопенко, Карташов, Будников, 2013). Была разработана универсальная установка волноводного типа с бегущей волной, работающая на частоте 915 МГц мощностью 25 кВт. Проведенные исследования показали, что на данном уровне СВЧ-мощности невозможно добиться высокой скорости роста температуры, и микронизация носит лишь частичный характер. Для повышения темпа СВЧ-нагрева разрабатывалась волноводная рабочая камера в виде оконечной нагрузки, где происходит нагрев зерна в продуктопроводе объемом порядка 5 литров. В такой установке возможно получение скорости нагрева более 5 град/сек и увеличение степени микронизации зерна. Производительность установки при СВЧ мощности 25 кВт составит около 300 кг/час (Морозов, Каргин, Морозов, Требух, Симоненко, Прокопенко, Карташов, Будников, 2013; Морозов, Федотов, Габдрашитова, Прокопенко, 2017; Завьялов, Кухто, Филиппович, Морозов, Прокопенко, 2017).

Для повышения производительности установок по микроволновому нагреву возможно использовать комбинированный нагрев. Например, в работах (Кириллов, Новикова, Белова, Белов, 2013; Науменко, Белов, 2015), где дополнительно кроме объемного микроволнового нагрева зерна на частоте 2450 МГц осуществляется индукционный

нагрев поверхности, на которой располагается зерно. Использование традиционной обжарки повышает скорость нагрева зерна, что приводит к увеличению производительности установки при ВТМ зерна. Однако всегда поверхностный нагрев связан со значительными рассеянием тепла в свободном пространстве. Кроме того поверхностный кондуктивный нагрев зерна не является эффективным, так как площадь контакта зерновки с нагретой поверхностью будет незначительна. Более эффективная теплопередача при ВТМ зерновых продуктов будет связана с использованием инфракрасного излучения (Зверев, 2009; Зверев, 2005).

Целью данной работы является изучение микроволнового метода ВТМ зерна ячменя с использованием двух ступенчатого нагрева. Исследования выполнены на базе установки «Декстрин-2» с бегущей волной, работающей на частоте 915 МГц мощностью 25 кВт. Для предварительного прогрева зерна до температуры 50-60°C использовался перегретый пар. Кольцевая форсунка с многоточечным впрыском устанавливалась в бункере загрузки зерна перед камерой микроволнового нагрева. Введение предварительного прогрева зерна перегретым паром позволило не только поднять температуру зерна, но и улучшить поглощение микроволновой энергии зерном. Предварительный прогрев зерна перегретым паром приводит не только к увеличению производительности установки, но и к повышению степени раскрываемости зерна. В работе выполнено исследование физико-механических свойств зерна ячменя при микроволновой ВТМ с использованием двухступенчатого нагрева.

Материалы и методы

Исследование ВТМ микронизации выполнялись на промышленной установке «Декстрин-2» с СВЧ мощностью до 25 кВт на частоте 915 МГц (Морозов, Федотов, Габдрашитова, Прокопенко, 2017). Рабочая камера установки выполнена в виде согласованной нагрузки с поглощением СВЧ-энергии в продуктопроводе объемом 7,5 литра, что позволяет достичь средней скорости нагрева зерна,двигающегося в продуктопроводе, больше чем 5 градусов в секунду. В основу расчета согласованной нагрузки положен пирамидально расширяющийся закороченный прямоугольный волновод, работающий на основной волне. По центру поперечного сечения прямоугольного волновода размещался продуктопровод в виде фторопластовой цилиндрической трубы с

внутренним диаметром 94 мм. Такая конструкция рабочей камеры обеспечивает равномерность нагрева зернового продукта в поперечном сечении продуктопровода. Для обеспечения безопасности по микроволновому излучению на концах продуктопровода устанавливались крестообразные металлические вставки толщиной 2 мм высотой 50 мм, которые обеспечивали затухание СВЧ-волны более 30 дБ, что обеспечивает безопасность работы СВЧ установки по СВЧ-излучению. Рабочая камера настраивалась на максимальное поглощение СВЧ энергии на частоте 915 ± 5 МГц в зерновом продукте (зерно пшеницы с влажностью 12-14%) с использованием штыревой вставки.

Схема компоновки установки Декстрин-2 приведена на Рисунке 1. Установка состоит из последовательно соединенной рабочей камеры с системой загрузки и выгрузки зернового продукта, ферритового циркулятора, магнетронного генератора на базе магнетрона М-116-25, источника высоковольтного питания и автономной замкнутой системы охлаждения магнетронного блока и циркулятора. Мощность магнетронного генератора регулировалась от 10 до 25 кВт путем изменения тока соленоида магнетрона. Система контроля и управления установки создана на основе промышленного контроллера и элементной базы отечественной фирмы «Овен». Режимы работы установки зависят от скорости подачи зерна через рабочую камеру и контролируются температурой зерна на выходе из рабочей камеры. Проведены ресурсные испытания работы установки в режиме ВМТ зерна пшеницы. Общее время наработки установки составило более 1500 часов; на высоком уровне мощности уровень паразитного излучения не превысил 5 мкВт/см² на расстоянии 50 см от любой части установки, что соответствует существующим нормам. Фотография установки «Дикстрин-2» приведена на Рисунке 2.

Выполнены исследования работы установки Декстрин-2 в режиме микронизации зерна ячменя. Температура зерна на выходе из рабочей камеры, измеренная тепловизором Fluke, составила от 104°C до 108°C, при этом температура отдельной зерновки ячменя при измерении малоинерционной термопарой К-типа составила 120°C. При этом установка работала на СВЧ-мощность 18 кВт. Дальнейшее поднятие мощности приводило к уменьшению поглощения СВЧ мощности зерном ячменя, что объясняется более низкой влажностью данного зернового продукта. Для решения этой проблемы требовалось либо выполнить подстройку рабочей камеры на зерно ячменя, либо приблизить диэлектрические характеристики ячменя к характеристикам пшеницы путем увеличения влажности продукта. Для реализации данной задачи было решено использовать предварительный прогрев и увлажнение зерна введением его предварительного нагрева перегретым паром. В качестве источника перегретого пара использовался парогенератор ПГЭ-50 с максимальной производительностью по насыщенному пару от 13 кг/час до 50 кг/час и потребляемой мощностью от 10 кВт/час до 38 кВт/час. Для предварительного нагрева зерна в накопительном бункере размещалась форсунка в виде кольца диаметром 25 см. Форсунка выполнена методом пайки из медной трубы с внутренним диаметром 10 мм, в которой выполнено 250 направленных отверстий диаметром 1 мм, и оборудована стандартным соединением с пароподводящим шлангом. Кольцевая форсунка горизонтально размещалась в накопительном бункере. Эмпирически было определено оптимальное положение форсунки, при котором осуществлялась максимальная передача энергии перегретого пара зерну в бункере. Проведено исследование работы установки «Декстрин-2» в режиме микронизации зерна ячменя с

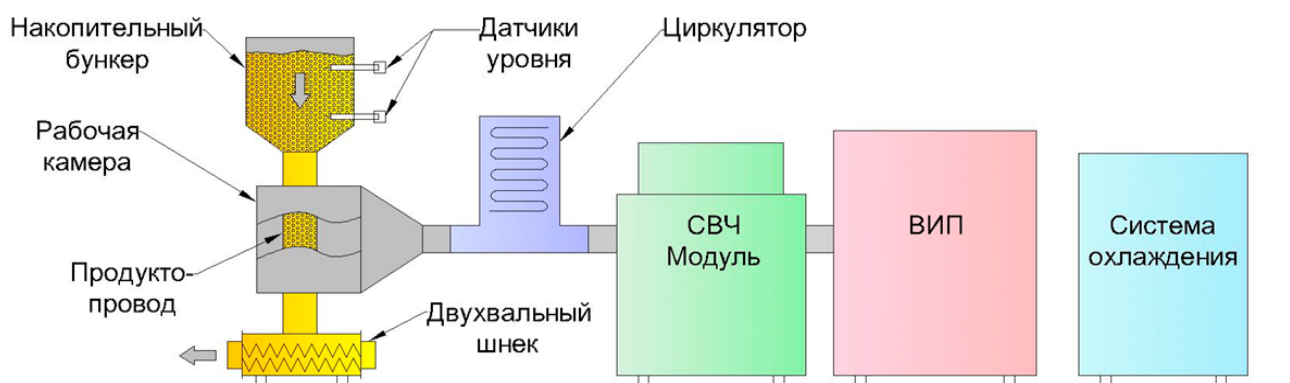


Рисунок 1. Схема компоновки установки Декстрин 2.



Рисунок 2. Общий вид установки Декстрин-2.

предварительный прогревом перегретым паром. В проведенном эксперименте производительность парогенератора на кольцевую форсунку составила 25-30 кг/час, а мощность СВЧ генератора из-за повышения коэффициента поглощения в зерне ячменя удалось довести до 25 кВт. Введение предварительного парового нагрева зернопродукта позволило повысить температуру зерна, поступающего на сверхбыстрый микроволновый нагрев, с 20°C до 60°C, что было зафиксировано в эксперименте. Средняя температура зерна на выходе из рабочей камеры, померенная тепловизором Fluke, достигла 110°C, а температура отдельной зерновки ячменя при измерении малоинерционной термопарой К-типа стала 130°C. Экспериментально измеренное значение производительности установки составило 500-550 кг/час. Таким образом, введение предварительного прогрева зерна ячменя перегретым паром позволило решить проблему низкой влажности зернопродукта и повысить производительность установки «Декстрин-2» в режиме ВТМ.

Результаты исследований по высокотемпературной микронизации зерна ячменя и их обсуждение

Проведены исследования физико-механических

характеристик зерновок ячменя, обработанных в микроволновой установке «Декстрин-2» с предварительным нагревом зерна перегретым паром. Для исследования от ЗАО «НПП «Магратеп» в феврале 2018 года были получены три образца ячменя массой по 400 граммов каждый. Первый образец ячменя является контрольным, не подвергавшемся микроволновому воздействию. Второй образец подвергался микронизации на установке Декстрин-2 при СВЧ-мощности порядка 18 кВт и производительности порядка 250 кг/час. Третий образец, кроме микроволновой обработки, подвергался предварительному нагреву перегретым паром с расходом 25-30 кг/час. Внешний вид поступивших образцов ячменя представлен на Рисунке 3.

Из фотографии, представленной на Рисунке 3, видно, что образцы зерновок значительно отличаются по внешнему виду. Однако в отличие от микронизации зерна пшеницы (Завьялов, Кухто, Филиппович, Морозов, Прокопенко, 2017) изменение в цвете зерновки ячменя практически отсутствуют. Представленные образцы зерновок ячменя были подвергнуты следующим исследованиям:

Штанген-циркулем с ценой деления 0,1 мм измерены диаметры D и длина L зёрен ячменя по 40-50 штук в каждой пробе и далее вычислены



Рисунок 3. Образцы ячменя.

а) – контрольное зерно; б) зерно обработанное в микроволновой установке; в) зерно обработанное перегретым паром и в микроволновой установке

средние значения размеров для каждого представленного образца.

Определены кажущаяся плотность для представленных образцов ячменя путем их засыпки в мензурку объемом 25 см³ с вибрационным уплотнением и последующим взвешиванием на аналитических весах АДВ-200 с точностью 5 мг.

Определена влажность представленных образцов на влагомере «Элвас-2М» (абсолютная погрешность измерения влажности в зависимости от анализируемого материала $\pm 0,2\%$ - $\pm 1,5\%$) при параметрах определения по методике прибора: температура нагрева 130°C, опросе 4 секунды и пороге прекращения измерений 0,03%.

Результаты измерений представлены в Таблице 1. Из таблицы следует, что степень микронизации зерна ячменя, подвергнутого предварительному нагреву перегретым паром и дальнейшей обработке в установке «Декстрин-2», существенно выше, чем у зерна, которое прошло только микроволновую обработку. Усредненные размеры и кажущаяся плотность ячменя микронизированного с предварительным прогревом перегретым паром больше чем у зерна,

которое микронизованно только с использованием СВЧ-энергии. Из Рисунка 2 видно, что вспучивание крахмала в предварительно пропаренной зерновке происходит не только вдоль «рубчика», но и поперек семядоли. Явления значительной карамелизации зерна ячменя не наблюдалось. Таким образом, введение предварительного нагрева зерна ячменя перегретым паром перед микроволновой обработкой существенно улучшает эффект высокотемпературной микронизации.

Заключение

С использованием микроволновой промышленной установки «Декстрин-2» выполнено исследование процессов высокотемпературной микронизации зерна ячменя. Для увеличения производительности установки и повышении степени микронизации зерна исследовалась возможность использования перед микроволновой обработкой осуществлять прогрев зерна перегретым паром. Проведенные исследования физико-механических свойств обработанного зерна ячменя свидетельствует о несомненном изменении биохимических свойств зерна и появления эффекта ВТМ. Показано, что введение предварительного

Таблица 1
Результаты исследования ячменя

Вид сырья	Усредненные характеристики сырья		
	Размеры зёрен D и L, мм	Кажущаяся плотность, г/см ³	Влажность сырья, %
Ячмень не обработанный	D = 3,43 L = 8,65	0,598	8,12
Ячмень после микроволновой микронизации	D = 4,01 L = 8,91	0,482	6,75
Ячмень после микроволновой микронизации с предварительным прогревом перегретым паром	D = 4,14 L = 8,24	0,386	6,17

нагрева зерна ячменя перегретым паром перед микроволновой обработкой существенно улучшает эффект высокотемпературной микронизации зерна ячменя. Полученные результаты позволяют говорить, что данная технология высокотемпературной микронизации может использоваться для создания функциональных продуктов питания на основе зерновых культур.

Литература

- [1] Пахомов В. И., Каун В. Д. Оптимизация тепловой обработки фуражного зерна СВЧ-энергией // Механизация и электрофикация сельского хозяйства. 2000. № 9. С. 8-10.
- [2] Бондарев А. Н., Пахомов В. И., Каун В. Д., Михайлов В. А. Результаты испытаний малогабаритной установки для микронизации зерновых культур «Микронизатор-1» // Обоснование и разработка новых технологий и технических средств в животноводстве. Черноград: Российская академия сельскохозяйственных наук; Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства (ВНИПТИМЭСХ), 2001. С. 110-117.
- [3] Morozov A. O., Morozov O. A., Trebukh V. P., Simonenko A. N., Prokopenko A. V. Development of industrial microwave installation for grain processing // 23rd Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2013). Sevastopol, 2013. P. 1000-1001.
- [4] Морозов О. А., Каргин А. Н., Морозов А. О., Требух В. П., Симоненко А. Н., Прокопенко А. В., Карташов С. Г., Будников Д. А. Микроволновая установка большой производительности для обработки злаковых культур // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 3 (121). С. 178-183.
- [5] Морозов А. О., Федотов В. В., Габдрашитова Д. В., Прокопенко А. В. СВЧ-установка для обработки зерновых продуктов // III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз 2017. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 64.
- [6] Завьялов М. А., Кухто В. А., Филиппович В. П., Морозов А. О., Прокопенко А. В. Исследование процессов микронизации зерна пшеницы в установках СВЧ-энергетики // Хранение и переработка сельхозсырья. 2017. № 6. С. 9-14.
- [7] Кириллов Н. К., Новикова Г. В., Белова М. В., Белов А. А. СВЧ-индукционная установка для микронизации зерна / Патент № 2502450 от 20.01.2013 Бюл. № 2.
- [8] Науменко О. В., Белов А. А. Термообработка фуражного зерна диэлектрическим и индукционным нагревом // Модернизация современного общества: проблемы, пути развития и перспективы. 2015. № 6. С. 96-101.
- [9] Зверев С. В. Высокотемпературная микронизация в производстве зернопродуктов. М.: ДеЛи принт, 2009. 222 с.
- [10] Зверев С. В. Моделирование процесса ИК нагрева зерна // Хранение и переработка сельхозсырья. 2005. № 12. С. 25-26.

Improving the Efficiency of Micronization of Grain Crops on the Microwave Installation Using Superheated Steam

Valery A. Kuhkto

*Russian Research Institute of Canning Technology
78, Skolnay street, Vidnoye, Moscow area, 142703, Russian Federation
E-mail: kuhto.valery@yandex.ru*

Aleksandr O. Morozov

*Joint stock company «Scientific-production enterprise «Magraterp»
2A, Vokzalnay street, Fryazino, Moscow area, 141190, Russian Federation
E-mail: aomorozovbig@yandex.ru*

Aleksandr V. Prokopenko

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russian Federation
Russian Research Institute of Canning Technology
78, Skolnay street, Vidnoye, Moscow area, 142703, Russian Federation
E-mail: pav14@mail.ru*

Vitaliy P. Filippovich

*Russian Research Institute of Canning Technology
78, Skolnay street, Vidnoye, Moscow area, 142703, Russian Federation
E-mail: vit_fil1@rambler.ru*

The problems of high-temperature micronization of grain products using microwave heating and combination of thermal methods are investigated. The research was conducted on the basis of industrial microwave installation «Dextrin-2» manufactured by ZAO «NPP «Magraterp» Fryazino. The plant operates at an industrial frequency of 915 MHz with the ability to adjust the power from 10 to 25 kW. It is based on consistent load in which the microwave energy is absorbed in a small amount of grain. The rate of grain products heating at the maximum power in this installation is 5 degrees per second, and the productivity of the installation in the high-temperature micronization regime will exceed 300 kg / h.

The possibility of increasing the productivity of barley grain by introducing preheating of barley grain with superheated steam has been studied. In experimental studies, it was found that the introduction of nozzle with multi-point injection of superheated steam into the filling bin allowed not only to increase the productivity of the installation, but also to increase the degree of grain opening. It was found that the processing of grain by steam leads to increased absorption of microwave energy and improve the working conditions of the microwave installation.

The physical and mechanical properties of the processed barley grain are analyzed only with the use of microwave energy and with the preliminary heating of the product by superheated steam in the backfill hopper. With combined heating, an increase in the geometric dimensions of the granules is recorded with their opening not only along the «scab» but also across. Also, the apparent density of barley grains decreased. Thus, the introduction of pre-heating by superheated steam during microwave treatment in the «Dyextrin-2» installation will increase the productivity of the installation and improve grain characteristics in high-temperature micronization.

Keywords: micronization, microwave heating, grain crops, microwave energy, heating with superheated steam

References

- [1] Pahomov V. I., Kaun V. D. Optimizatsiya teplovoj obrabotki furazhnogo zerna SVCH-ehnergiej [Optimization of heat treatment of feed grain by microwave energy]. Mekhanizatsiya i ehlektrofikatsiya selskogo hozyajstva, 2000, no. 9, 8-10.
- [2] Bondarev A. N., Pahomov V. I., Kaun V. D., Mihajlov V. A. Rezultaty ispytaniy malogabaritnoj ustanovki dlya mikronizatsii zernovykh kultur «Mikronizator-1» [The results of testing small plants for micronized substance crops «Micronisation-1»]. Obosnovanie i razrabotka novykh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv v zhivotnovodstve. Zernograd: Rossiyskaya akademiya sel'skohozyajstvennykh nauk; Vserossiyskij nauchno-issledovatel'skij i proektno-tekhnologicheskij institut mekhanizatsii i ehlektifikatsii selskogo hozyajstva (VNIPTIMEHSKH), 2001. P. 110-117.
- [3] Morozov A. O., Morozov O. A., Trebukh V. P., Simonenko A. N., Prokopenko A. V. Development of industrial microwave installation for grain processing. 23rd Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2013), Sevastopol, 2013. P. 1000-1001.
- [4] Morozov O. A., Kargin A. N., Morozov A. O., Trebukh V. P., Simonenko A. N., Prokopenko A. V., Kartashov S. G., Budnikov D. A. Mikrovolnovaya ustanovka bolshoj proizvoditelnosti dlya obrabotki zlakovykh kultur [Large capacity microwave unit for processing cereal crops]. Alternativnaya ehnergetika i ehkologiya, 2013, no. 3(121), 78-183.
- [5] Morozov A. O., Fedotov V. V., Gabdrashitova D. V., Prokopenko A. V. SVCH-ustanovka dlya obrabotki zernovykh produktov [Microwave installation for processing of grain products]. III Mezhdunarodnaya konferentsiya «Lazernye, plazmennye issledovaniya i tekhnologii» LaPlaz 2017. Moscow: NIYAU MIFI, 2017. P. 64.
- [6] Zavyalov M. A., Kuhto V. A., Filippovich V. P., Morozov A. O., Prokopenko A. V. Issledovanie processov mikronizatsii zerna pshenicy v ustanovkakh SVCH-ehnergetiki [Study of the processes micronized substance of wheat in the installations of microwave energy]. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya, 2017, no. 6, 9-14.
- [7] Kirillov N. K., Novikova G. V., Belova M. V., Belov A. A. SVCH-indukcionnaya ustanovka dlya mikronizatsii zerna [Microwave induction plant for grain micronization]. Patent № 2502450 ot 20.01.2013 Byul. no. 2.
- [8] Naumenko O. V., Belov A. A. Termoobrabotka furazhnogo zerna dielektricheskim i indukcionnym nagrevom [Modernization of modern society: problems, ways of development and prospects]. Modernizatsiya sovremennogo obshchestva: problemy, puti razvitiya i perspektivy, 2015, no. 6, 96-101.
- [9] Zverev S. V. Vysokotemperaturnaya mikronizatsiya v proizvodstve zernoproduktov [High-temperature micronization in the production of grain products]. Moscow: DeLi print., 2009. 222 p.
- [10] Zverev S. V. Modelirovanie processa IK nagreva zerna [Modeling of infrared heating of the grain]. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya, 2005, no. 12, 25-26.