ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-363-373
УДК 66.084.8

Оригинальная статья
http://fptt.ru

Обезвоживание пищевых продуктов под действием ультразвуковых колебаний с удалением влаги без фазового перехода

А. В. Шалунов, В. Н. Хмелев, С. А. Терентьев*, В. А. Нестеров, Р. Н. Голых

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийск, Россия

Дата поступления в редакцию: 15.03.2021 *Дата принятия в печать: 18.04.2021*

**e-mail: sergey@bti.secna.ru*
© А. В. Шалунов, В. Н. Хмелев, С. А. Терентьев, В. А. Нестеров, Р. Н. Голых, 2021

Аннотация.
Введение. Сушка пищевых продуктов, относящихся к термолабильным и легкоокисляемым, исключает повышение температуры выше допустимого значения. Поэтому ведутся поиски альтернативных энергетических воздействий на высушиваемый материал, способных обеспечить сушку при незначительном увеличении температуры продукта. Одним из таких способов является воздействие ультразвуковыми колебаниями. Целью работы является выявление оптимального диапазона уровней звукового давления для воздействия на высушиваемый материал и разработка конструкций сушильных установок малого объема.
Объекты и методы исследования. Процесс сушки картофеля в неподвижном тонком слое в разработанной ультразвуковой лабораторной сушильной установке. Исследования проводились при заданных температуре t = 60 ± 1 °C и скорости потока сушильного агента 0,50 ± 0,03 м/с.
Результаты и их обсуждение. Анализ экспериментальных кривых сушки позволил выявить период постоянной скорости при низких уровнях звукового воздействия и его отсутствие при высоком уровне воздействия, начиная со 160 дБ. Это свидетельствует об инициировании процесса ультразвукового диспергирования жидкости с поверхности картофеля. Диспергирование происходит за счет кавитационного распыления жидкости без фазового перехода, что снижает энергозатраты на сушку. Анализ зависимости средней скорости сушки при высоком влагосодержании от уровня звукового давления позволил установить, что повышение уровня звукового давления в диапазоне уровней от 150 до 165 дБ обеспечивает рост скорости сушки до 26 % на 5 дБ. Выявлен оптимальный диапазон ультразвукового воздействия 160–165 дБ. В нем оптимально сочетаются энергозатраты и время сушки. Предложены две конструкции барабанных сушилок горизонтального и вертикального типа с разовой загрузкой в 6 кг, позволяющие равномерно пересыпать высушиваемый материал, подвергая его ультразвуковому воздействию.
Выводы. Конвективная сушка картофеля совместно с ультразвуковым воздействием в двух видах разработанных барабанных сушилках обеспечивают сокращение времени сушки на 44–47 % относительно конвективной сушки.

Ключевые слова. Термолабильные продукты питания, обезвоживание, ультразвук, кривая скорости сушки, сушильные установки, звуковое давление, картофель

Для цитирования: Обезвоживание пищевых продуктов под действием ультразвуковых колебаний с удалением влаги без фазового перехода / А. В. Шалунов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 2. С. 363–373. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-363-373.

Original article
Available online at http://fptt.ru/eng

Ultrasonic Dehydration of Food Products with Moisture Removal without Phase Transition

Andrey V. Shalunov, Vladimir N. Khmelev, Sergey A. Terentiev*, Viktor A. Nesterov, Roman N. Golykh

Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

Received: March 15, 2021 *Accepted: April 18, 2021*

*e-mail: sergey@bti.secna.ru
© A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, S.A. Terentiev, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, 2021

Abstract.
Introduction. Dehydration of heat-sensitive and easily oxidized food products require particular temperatures. Exposure to ultrasonic vibrations is an alternative dehydration method that presupposes moderate thermal treatment. The research objective was to identify the optimal range of sound pressure and to design a small-volume dryer.
Study objects and methods. The study featured two novel ultrasonic potato dryers at t = 60 ± 1°C and a drying agent flow rate of 0.50 ± 0.03 m/s.
Results and discussion. The analysis of the drying curves revealed a period of constant flow rate at a low ultrasonic exposure and its absence at a high level of exposure of ≥ 160 dB, which indicated the start of the ultrasonic dispersion process of liquid from the potato surface. The dispersion occurred due to cavitation spraying of liquid without phase transition, which significantly reduced energy consumption. As the sound pressure increased in the range from 150 to 165 dB, the drying speed increased up to 26% by 5 dB. The optimal range of the sound pressure was 160–165 dB, which optimally combined energy consumption and drying time. The research resulted in two 6 kg horizontal and vertical drum dryers that provided even ultrasonic exposure during drying.
Conclusion. The convective ultrasonic potato drum dryers reduced the drying time by 44–47%.

Keywords. Heat-sensitive food, dehydration, ultrasonic drying rate curve, dryers, sound pressure, potatoes

For citation: Shalunov AV, Khmelev VN, Terentiev SA, Nesterov VA, Golykh RN. Ultrasonic Dehydration of Food Products with Moisture Removal without Phase Transition. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):363–373. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-363-373.

Введение

Сушка продуктов питания позволяет снизить вероятность их слеживания, смерзания, плесневения, а также уменьшает массу продукта, что удешевляет транспортировку. Однако процесс сушки является энергозатратным и длительным. Поэтому способы сушки непрерывно совершенствуются с целью снижения временных и экономических затрат для получения качественного продукта.

Любой высушиваемый продукт питания характеризуется максимально допустимой температурой обработки, после которой происходит потеря питательных веществ, витаминов и ухудшение товарного вида [1–5]. Поэтому интенсификация конвективных и кондуктивных методов сушки за счет повышения температуры не допустима [6].

В этой связи исследуются и применяются как самостоятельные методы сушки, так и способы дополнительного воздействия на высушиваемый продукт совместно с конвективной или кондуктивной сушкой. К ним относятся радиационная, высокочастотная и ультразвуковая сушка [2, 7–9]. Однако, в случае инфракрасного и высокочастотного воздействия на продукты питания, есть риск локального перегрева или неравномерного высыхания. В связи с этим в последние годы все большее внимание уделяется способам воздействия на высушиваемый материал ультразвуковыми колебаниями [10–17].

Интенсификация сушки происходит только при высоких уровнях ультразвукового воздействия. В случае применения колебаний с низким уровнем звукового давления (менее 130 дБ) процесс сушки практически не отличается от конвективной [18]. Применение ультразвукового (УЗ) диапазона частот от 20 до 25 кГц для реализации воздействия обусловлено тем, что акустические колебания звукового диапазона создают серьезную опасность для здоровья и жизни человека.

Для создания на ультразвуковых частотах колебаний с уровнем звукового давления более 130 дБ используются излучатели, выполненные в виде изгибно-колеблющихся мембран, по форме представляющие пластины или диски [19]. У таких излучателей соседние участки совершают колебания в противоположных фазах. Для исключения взаимной компенсации колебаний, создаваемых участками диска или пластины, колеблющимися в противоположной фазе, сечение излучателя выполняется ступенчато-переменным по толщине. Это позволяет снизить амплитуду колебаний одной фазы относительно противоположной. Это дало возможность генерировать колебания с уровнем звукового давления до 172 дБ, которые могут быть использованы при реализации процессов сушки.

На сегодняшний день различными исследователями установлено, что использование в качестве ультразвуковых излучателей изгибно-колеблющихся пластин или дисков позволяет уменьшить время сушки макаронных изделий до 24–26 %, кипрей-чая до 30 % [20, 21]. Такая эффективность достигается при уровнях звукового давления, не превышающих 150 дБ. Получение высокого уровня звукового давления сопряжено со значительными трудностями изготовления ультразвуковых излучателей. Эффективной глубиной проникновения ультразвуковых

колебаний считается 10–30 мм в зависимости от высушиваемого материала. Это не позволяет одновременно высушивать значительные объемы продуктов питания [18].

В данной работе представлены результаты исследований по интенсификации процесса конвективной сушки путем добавления воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности, а также показана возможность создания практических конструкций ультразвуковых сушилок для увеличения объема высушиваемого продукта.

Объекты и методы исследования

Для проведения исследований по сушке продуктов питания в неподвижном тонком слое (обусловленном незначительной глубиной проникновения ультразвуковых колебаний в высушиваемый материал) была разработана и изготовлена лабораторная сушильная установка (рис. 1).

Корпус сушильной установки *1* жестко закреплен на станине (на рис. 1 не показано). На крышке *2* закреплен корпус дискового излучателя *3*. Дисковый излучатель *4* располагается в верхней части сушильного объема по центру. Через трубу подвода нагретого воздуха *5* в нижней части сушилки подается стабильный поток нагретого воздуха (± 0,03 м/с), формируемый вентилятором *6*. Температура воздуха поддерживается с точностью ± 1 °С. Воздух выходит через трубу отвода *7*, находящуюся в крышке сушильной установки.

Изгибно-колеблющийся ультразвуковой дисковый излучатель, установленный в сушильную установку, имеет диаметр 200 мм и формирует УЗ-колебания с частотой 22 кГц [22]. Внешний вид ультразвукового излучателя в сборе с электронным генератором показан на рисунке 2.

Геометрия внутреннего объема сушильной установки не позволяет получать равномерное ультразвуковое поле. Поэтому было произведено измерение уровня звукового давления L по высоте сушильного объема на оси и на радиусе 70 мм от оси (этим радиусом ограничивается размещение высушиваемого продукта в один слой). Для измерений применялся измеритель шума и вибраций Экофизика-110А/Инженер-110А (Россия) с микрофоном ВМК-401. Уровни звукового давления в сушильном объеме при различных значениях уставки мощности электронного генератора приведены на рисунке 3.

На расстоянии 180 мм от дискового излучателя наблюдается максимальный уровень звукового давления как на оси, так и в 70 мм от нее. Значения уровней звукового давления на расстоянии 180 мм от диска приведены в таблице 1.

В качестве объекта сушки был выбран картофель, т. к. он является самым распространенным овощем на территории России. Сорт картофеля «Адретта» выращен в Алтайском крае. Он 2 месяца хранился в погребе при температуре 3 ± 2 °С. Перед сушкой картофель сутки выдерживался при комнатной температуре. Затем (перед сушкой) нарезался кубиками размером 15×15×15 ± 1 мм общей массой 250,0 ± 0,1 г. Картофель помещался в центральную часть (радиусом 70 мм) решетчатого поддона в один слой на расстоянии 180 мм от УЗ дискового излучателя. Во всех экспериментах поддерживалась температура и средняя скорость воздуха t = 60 ± 1 °С и 0,50 ± 0,03 м/с соответственно. Измерения потока проводились при помощи цифрового анемометра UT363S (UNI-T, Китай). Влажность воздуха в помещении составляла 55 ± 5 %. Уровень звукового давления L в различных экспериментах составлял

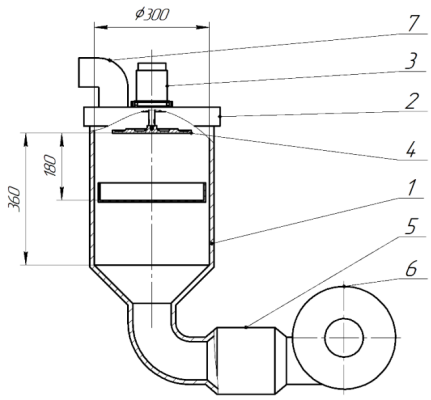

Рисунок 1. Структурная схема ультразвуковой лабораторной сушильной установки: *1* – корпус сушильной установки; *2* – крышка сушильной установки; *3* – корпус дискового излучателя; *4* – дисковый излучатель; *5* – труба подвода нагретого воздуха; *6* – вентилятор; *7* – труба отвода воздуха

Figure 1. Block diagram of an ultrasonic laboratory dryer: *1* – body; *2* – lid; *3* – disk radiator body; *4* – disk radiator; *5* – hot air supply pipe; *6* – fan; *7* – air outlet pipe

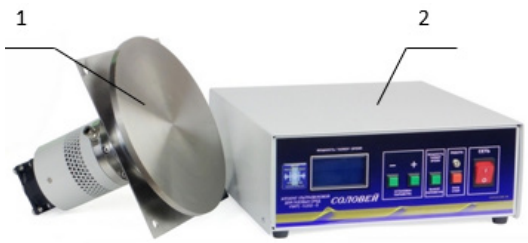

Рисунок 2. Внешний вид ультразвукового аппарата: 1 – ультразвуковая колебательная система с дисковым излучателем; 2 – электронный генератор

Figure 2. Ultrasonic device: 1 – ultrasonic vibrating system with a disk radiator; 2 – electronic generator

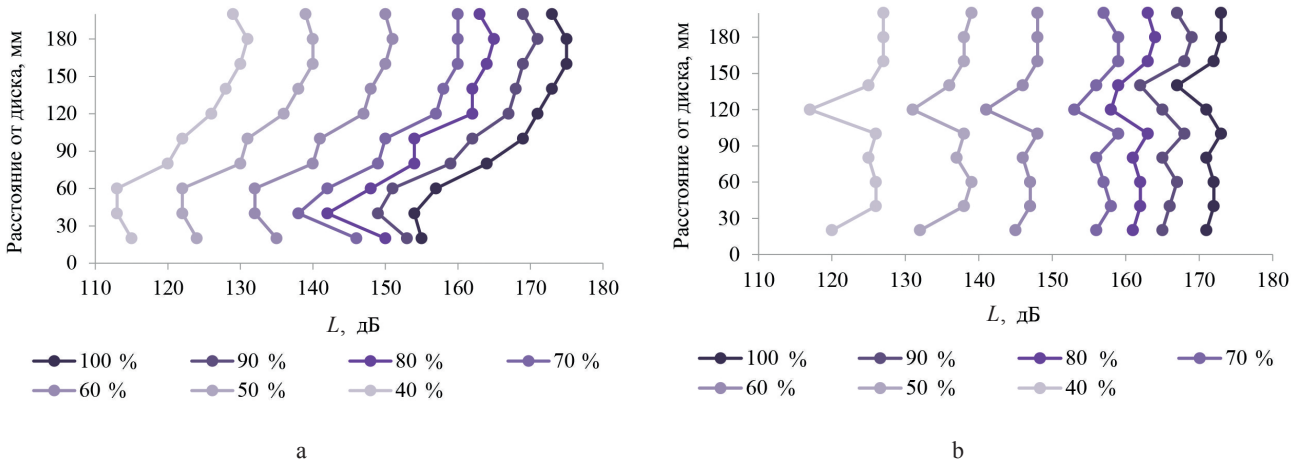

Рисунок 3. Распределение уровня звукового давления L в сушильной установке в зависимости от расстояния от излучателя и уровней уставки мощности генератора (%): a – на акустической оси диска; b – на расстоянии 70 мм от оси диска

Figure 3. Distribution of the sound pressure level L in the dryer depending on the distance from the radiator and the generator power (%): a – on the acoustic axis of the disk; b – 70 mm from the axis of the disk

Таблица 1. Уровни звукового давления на расстоянии 180 мм от дискового излучателя

Table 1. Sound pressure at 180 mm from the disc radiator

Расстояние от оси диска, мм	Уровень уставки мощности электронного генератора от максимальной мощности, %						
	40	50	60	70	80	90	100
	Уровень звукового давления L, дБ						
0	131,0	140,0	151,0	160,0	165,0	171,0	175,0
70	127,0	138,0	148,0	159,0	164,0	169,0	173,0
Среднее значение	129,0	139,0	149,5	159,5	164,5	170,0	174,0

130 ± 1, 140 ± 1, 150 ± 1, 160 ± 1, 165 ± 1, 170 ± 1 и 175 ± 1 дБ. Также был проведен контрольный эксперимент по сушке конвективным способом без ультразвукового воздействия. Взвешивание картофеля во время сушки проводилось каждые 15 мин с точностью ± 0,1 г. Все эксперименты по сушке длились до тех пор, пока общая масса картофеля не уменьшилась в 4 раза, что соответствует влагосодержанию 0,14 ± 0,01 кг/кг (кубики картофеля твердые и хрупкие).

Влагосодержание картофеля в процессе сушки определялось по формуле:

$$w^0 = \frac{W}{G_c} \quad (1)$$

где W – масса влаги; G_c – масса сухого картофеля.

Скорость сушки определялась методом численного дифференцирования:

$$\frac{dw^0}{d\tau} = -\frac{w^0_{i+1} - w^0_i}{\tau_{i+1} - \tau_i} \quad (2)$$

где w^0_i – влагосодержание картофеля в момент времени τ_i; w^0_{i+1} – влагосодержание в момент времени.

Результаты и их обсуждение

Кривые сушки картофеля конвективным способом (контрольный эксперимент) и одновременным воздействием нагретого воздуха и ультразвуковыми колебаниями с различными уровнями звукового давления представлены на рисунке 4.

Время сушки конвективным способом составило 630 мин. Ультразвуковое воздействие с уровнем звукового давления 175 дБ уменьшает время сушки до 270 мин, т. е. в 2,3 раза (табл. 2).

Эффективность сушки рассчитывалась по уменьшению времени сушки относительно конвективного способа (контрольный эксперимент). Как было указано ранее, УЗ-колебания с малым уровнем звукового давления (менее 130 дБ) не интенсифицируют процесс сушки. Эксперименты по сушке картофеля с уровнем звукового давления 140 и 150 дБ показали линейное сокращение времени процесса. Начиная со 150 и до 165 дБ, наблюдалось нелинейное ускорение процесса сушки. При более высоких уровнях звукового давления (165–175 дБ) нелинейность исчезала и эффективность падала.

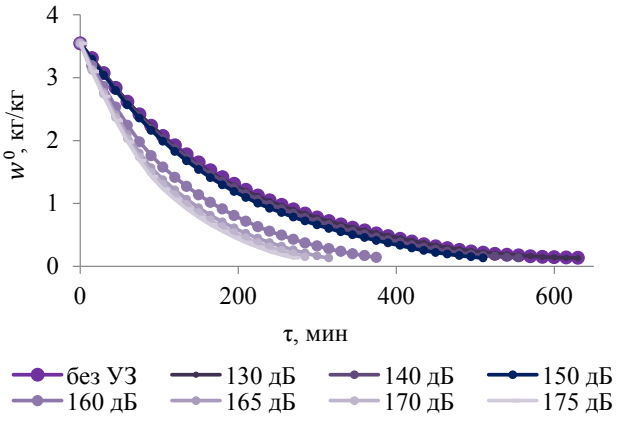

Рисунок 4. Кривые сушки картофеля в неподвижном тонком слое при различных уровнях звукового давления

Figure 4. Drying curves for a fixed thin layer of potatoes at different sound pressure levels

Анализ протекания процесса сушки во времени при различных влагосодержаниях картофеля был проведен по кривым скорости сушки (рис. 5)

В экспериментах с уровнем звукового давления до 150 дБ наблюдалась постоянная скорость сушки до влагосодержания 2,9. При воздействии высоких уровней звукового давления скорость сушки на начальном этапе имела максимум, который показал высокую эффективность обезвоживания картофеля.

Начальное влагосодержание картофеля во всех экспериментах составляло 3,56 кг/кг. Поэтому для оценки эффективности сушки на разных этапах процесса было решено разделить процесс сушки на 2 равных периода по влажности: высокое влагосодержание (более 1,78) и малое влагосодержание (менее 1,78). В этих периодах были усреднены скорости и построены их зависимости относительно уровня звукового давления (рис. 6).

В период высокого влагосодержания (более 1,78) наблюдался нелинейный рост средней скорости в диапазоне 150–165 дБ, который составлял до 26 % при увеличении уровня звукового давления на 5 дБ. В экспериментах с другими уровнями звукового давления рост скорости сушки не превышал 6 % на 5 дБ. Рост скорости сушки рассчитывался по выражению:

$$\frac{\left(\frac{dw^0}{d\tau}\right)_{i+1} - \left(\frac{dw^0}{d\tau}\right)_i}{\left(\frac{dw^0}{d\tau}\right)_0} \quad (3)$$

где $\left(\frac{dw^0}{d\tau}\right)_i$ – скорость сушки при начальном уровне звукового давления в определяемом диапазоне давлений; $\left(\frac{dw^0}{d\tau}\right)_{i+1}$ – скорость сушки при конечном уровне звукового давления в определяемом диапазоне давлений; $\left(\frac{dw^0}{d\tau}\right)_0$ – скорость сушки при уровне звукового давление $L = 0$ дБ (конвективная сушка).

Значительный рост скорости сушки в диапазоне 150–165 дБ может быть обусловлен реализацией механизма удаления влаги без фазового перехода, т. е. за счет диспергирования свободной влаги с поверхности высушиваемого материала ультразвуковыми колебаниями.

В период малого влагосодержания (менее 1,78) количество влаги на поверхности становится недостаточным для реализации ее диспергирования, поэтому скорость растет практически линейно с увеличением уровня звукового давления. Это соответствует классическим представлениям об интенсификации процесса сушки ультразвуковыми колебаниями посредством испарения.

Таким образом, эффективным уровнем звукового давления для сушки продуктов питания является диапазон 160–165 дБ. В нем наблюдается максимальный рост скорости сушки. Дальнейшее увеличение уровня звукового давления, хоть и приводит к уменьшению времени сушки, но требует значительных энергетических затрат.

Картофель высушенный конвективно и с наложением ультразвуковых колебаний был исследован органолептическими методами для сравнения характеристик по внешнему виду и внутренней структуре (рис. 7).

Картофель, высушенный только конвективным способом, имеет более темный цвет, сильнее заметны изменения геометрических размеров, внутренняя структура более хрупкая снаружи, но влажная внутри, по сравнению с картофелем, высушенным в ультразвуковом поле. Органолептическая оценка показала, что сушка при ультразвуковом воздействии позволяет получить качественный продукт питания. Основным влияющим фактором является значительная глубина проникновения ультразвука в глубину материала и уменьшенное время сушки.

Таблица 2. Время сушки картофеля до влагосодержания 0,14 при различных уровнях звукового давления

Table 2. Drying time for potatoes to a moisture content of 0.14 at various sound pressure levels

	Уровень звукового давления, дБ							
	0	130	140	150	160	165	170	175
Время сушки, мин	630	630	555	510	375	315	285	270
Эффективность сушки, %	0	0	12,7	19,0	40,5	50,0	54,8	57,1

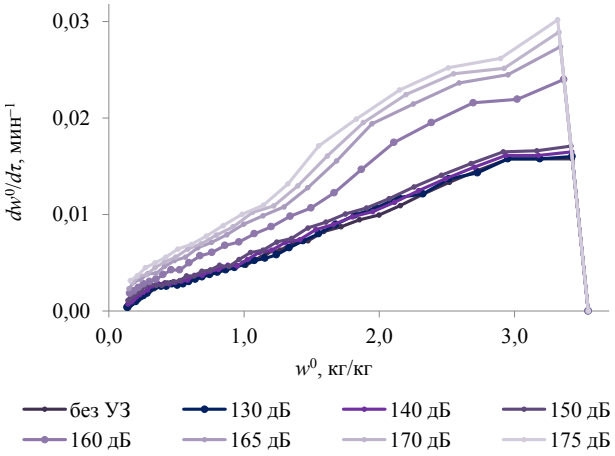

Рисунок 5. Кривые скорости сушки картофеля при различных уровнях звукового давления

Figure 5. Curves of potato drying rate at different sound pressure levels

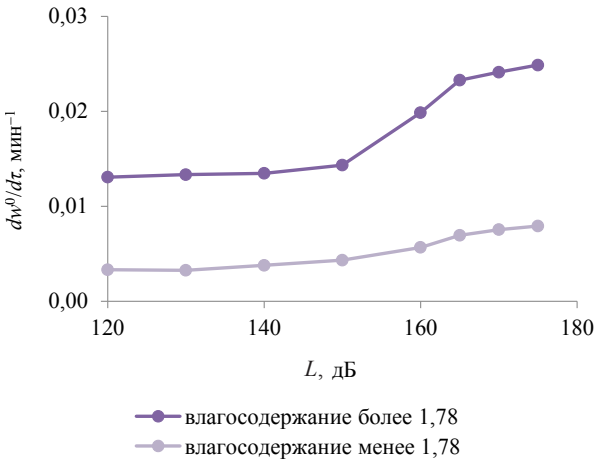

Рисунок 6. Зависимость средней скорости сушки картофеля от уровня звукового давления

Figure 6. Effect of sound pressure level on the average potato drying rate

Таким образом, проведенные эксперименты по сушке картофеля в тонком слое малой массы показали высокую эффективность ультразвукового воздействия с получением продукта питания лучшего качества. Однако для полупромышленного применения необходимо в десятки раз увеличить массу одновременно высушиваемого продукта, сохраняя незначительную толщину слоя (10–30 мм).

Для повышенной производительности сушки продуктов питания при одновременном обеспечении улучшенного качества конечного продукта было предложено два варианта ультразвуковых сушильных камер.

Первый вариант ультразвуковой сушильной камеры представляет собой горизонтально расположенный цилиндрический барабан (рис. 8). Внутри барабана *1* соосно с ним размещаются жестко закрепленные цилиндрические поверхности *2* и *3* с продольными отверстиями *5* для пересыпания высушиваемого продукта *6*. Продольно на внутренних и внешних цилиндрических поверхностях и внутренней поверхности барабана располагаются лопасти *4*, обеспечивающие удержание высушиваемого продукта в процессе вращения барабана. Перед торцевой стенкой барабана соосно расположен ультразвуковой дисковый излучатель. Ультразвуковое воздействие на высушиваемый продукт осуществляется непрерывно на частоте 22 кГц с уровнем звукового давления 160–165 дБ. Усиление ультразвуковых колебаний обеспечивается выбором расстояния (кратном половине длины волны используемых ультразвуковых колебаний в воздухе) от излучающего диска до противоположной торцевой стенки. Поток сушильного воздуха направлен от торцевой стенки барабана к противоположной торцевой стенке, возле которой находится излучатель, т. е. вдоль сушильного барабана навстречу излучателю.

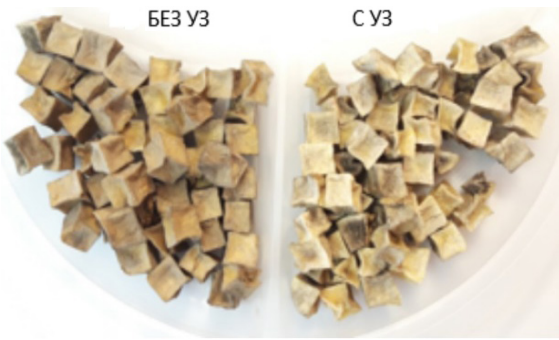

Рисунок 7. Внешний вид высушенного картофеля

Figure 7. Appearance of dried potato samples

Сыпучий продукт питания помещают через технологическое отверстие в барабан и с помощью электродвигателя начинаюn вращать с частотой 5–10 об/мин в зависимости от свойств продукта. В результате подхватывания лопастями высушиваемого материала и его пересыпания происходит равномерное размещение продукта в объеме барабана (рис. 8b). Продукт пересыпается небольшими порциями с внутренней поверхности внешнего барабана на внешнюю цилиндрическую поверхность меньшего диаметра и затем на его внутреннюю поверхность и внешнюю поверхность меньшего диаметра. Одновременно происходит обратный процесс пересыпания из цилиндрических поверхностей меньшего диаметра на поверхности большего диаметра.

Для подтверждения эффективности предложенной конструкции горизонтальной ультразвуковой сушилки

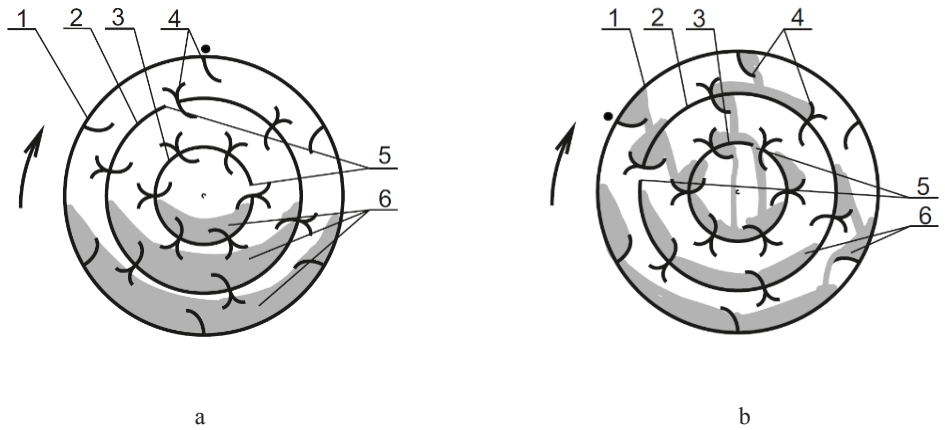

Рисунок 8. Сечение барабана сушильной камеры горизонтального типа в: a – начальный момент времени; b – процессе сушки: *1* – внешний барабан; *2*, *3* – внутренние цилиндрические поверхности; *4* – лопасти; *5* – продольные отверстия; *6* – высушиваемый продукт

Figure 8. Drum of the horizontal drying chamber: a – at the onset; b – during drying: *1* – external drum; *2*, *3* – inner cylindrical surfaces; *4* – blades; *5* – longitudinal holes; *6* – dried product

были проведены эксперименты по сушке картофеля при тех же условиях сушильного воздуха, что и сушка в неподвижном тонком слое: температура t = 60 ± 1 °С, скорость потока сушильного воздуха 0,50 ± 0,03 м/с. При этом масса продукта была увеличена до 6 кг. Эксперимент по сушке с ультразвуковым воздействием проводился при уровне звукового давления 160–165 дБ, обеспечивающим максимальную эффективность процесса. Взвешивание проводилось каждые 30 мин. Кривые сушки представлены на рисунке 9.

Из представленных кривых сушки следует, что в контрольном эксперименте (конвективная сушка) картофель достиг влагосодержания 0,14 ± 0,01 кг/кг за 510 мин. Это на 120 мин быстрее, чем

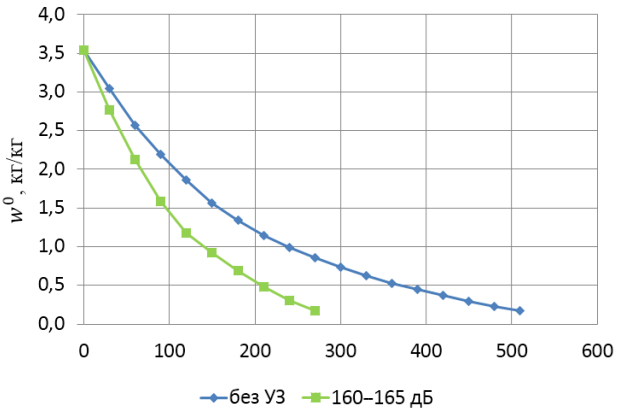

Рисунок 9. Кривые сушки картофеля в сушильной камере горизонтального типа

Figure 9. Curves for drying potatoes in the horizontal drying chamber

время сушки в неподвижном слое в лабораторной сушильной установке. Сокращение времени сушки обусловлено тем, что в сушильной установке идет непрерывное пересыпание высушиваемого материала. Наложение ультразвуковых колебаний с уровнем звукового давления 160–165 дБ в дополнение к нагретому воздуху сократило время сушки на 240 мин (на 47 %) – до 270 мин.

Сокращение времени сушки, полученное при воздействии ультразвуковыми колебаниями во вращающемся горизонтальном барабане, совпадает с результатом, полученным при том же уровне звукового давления на неподвижный слой картофеля (в лабораторной сушильной установке).

Вторым вариантом ультразвуковой сушильной камеры является вертикально расположенный барабан (рис. 10).

Высушиваемый сыпучий продукт *1* размещается в цилиндрическом барабане *2* диаметром *D* на нижней торцевой стенке и поверхностях спирального лотка *3*. Спиральный лоток внутри барабана выполнен таким образом, что его внутренний диаметр *d* увеличивается снизу вверх. Причем шаг спиралей лотка С составляет не менее 30 мм.

Перемещение продукта питания по виткам спирального лотка осуществляется за счет вибрации и вращения спирального лотка. Для этого используют вибропривод *4*, который обеспечивает механические воздействия вертикальной и горизонтальной направленности. В течение всего времени сушки происходит ультразвуковое воздействие излучателем *5* на высушиваемый продукт. При этом ультразвуковые колебания многократно перенаправляются отражателями *6*, выполненными под углом 45° на

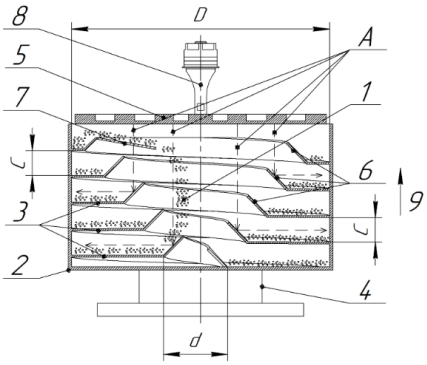

Рисунок 10. Конструкция ультразвуковой барабанной сушилки вертикального типа: *1* – высушиваемый материал; *2* – цилиндрический барабан; *3* – спиральный лоток; *4* – вибропривод; *5* – ультразвуковой излучатель; *6* – отражатель ультразвуковых колебаний; *7* – верхний виток спирального лотка; *8* – пьезоэлектрический преобразователь; *9* – направление воздушного потока; *A* – направление распространения ультразвуковых колебаний; *D* – диаметр барабана; *d* – внутренний диаметр витков спирального лотка; *C* – расстояние между витками спирального лотка

Figure 10. Vertical ultrasonic drum dryer: *1* – raw material; *2* – cylindrical drum; *3* – spiral tray; *4* – vibration drive; *5* – ultrasonic emitter; *6* – reflector of ultrasonic vibrations; *7* – upper turn of the spiral tray; *8* – piezoelectric transducer; *9* – direction of the air flow; *A* – direction of propagation of ultrasonic vibrations; *D* – drum diameter; *d* – inner diameter of the curves of the spiral tray; *C* – distance between the curves of the spiral tray

внутренней поверхности спирального лотка. При достижении продуктом верхнего витка спирального лотка *7* он ссыпается в нижнюю часть барабана.

Эксперименты по сушке картофеля в вертикальном барабане проводились в условиях аналогичным описанной выше барабанной сушилки горизонтального типа. Кривые сушки картофеля в ультразвуковом барабане вертикального типа представлены на рисунке 11.

Время конвективной сушки составило 540 мин, что на 30 мин дольше, чем в горизонтальном барабане. Это можно объяснить менее эффективным обдуванием картофеля теплым воздухом, т. е. ухудшением гидродинамических условий. Сушка в ультразвуковом поле длилась 300 мин. Эффективность ультразвуковой сушки по времени составила 44 %. Это, с точностью до погрешности на шаг дискретизации по времени, совпадает с результатом в горизонтальном барабане.

Проведенные исследования показали эффективность применения ультразвука для интенсификации процесса сушки и перспективность предложенных и разработанных конструкций сушильных камер, обеспечивающих равномерное распределение

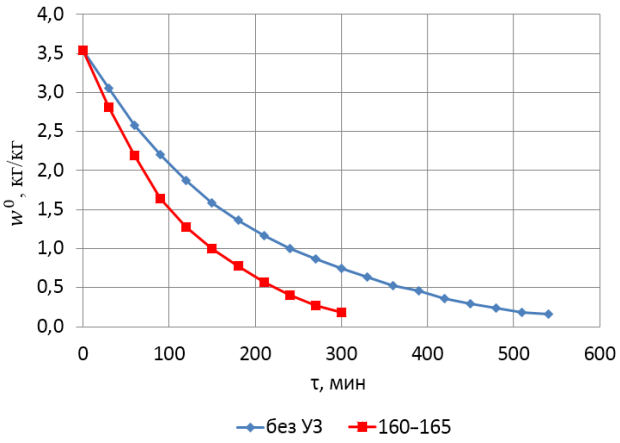

Рисунок 11. Кривые сушки картофеля в вертикальном барабане

Figure 11. Curves for drying potatoes in the vertical drum

(пересыпание) высушиваемого материала и резонансное усиление ультразвуковых колебаний, для промышленного применения.

Выводы

В предложенной работе достигнуты следующие результаты:

1. Показана перспективность конвективной сушки совместно с ультразвуковым воздействием на примере сушки картофеля (сокращение времени процесса и улучшение внешнего вида высушенного продукта);

2. Установлено, что максимальный эффект ультразвукового воздействия на процесс конвективной сушки овощей достигается при уровне звукового воздействия в пределах 160–165 дБ;

3. Для практической реализации конвективной сушки совместно с ультразвуковым воздействием в условиях выявленных оптимальных уровней ультразвукового давления предложены и разработаны конструкции сушильных установок, реализующих непрерывное перемещение (пересыпание) высушиваемого материала:

– с горизонтальным барабаном;

– с вертикальным барабаном;

4. Проведенные исследования функциональных возможностей изготовленных образцов сушилок при конвективной сушке совместно с ультразвуковым воздействием показали возможность сокращения времени сушки на 44–47 % по сравнению с конвективной сушкой без ультразвукового воздействия.

Критерии авторства

Все авторы внесли равный вклад в создание исследования, обработку и анализ полученных результатов, а также в оформлении статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All authors equally contributed to the research development, processing, data analysis, and manuscript design.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango / R. A. B. de Medeiros [et al.] // LWT – Food Science and Technology. 2016. Vol. 67. P. 167–173. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.049.

2. Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot / J. Szadzińska [et al.] // Drying Technology. 2020. Vol. 38. № 1–2. P. 93–107. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1624565.

3. Kowalski S. J. Ultrasound in wet materials subjected to drying: A modeling study // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 84. P. 998–1007. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.086.

4. Omolola A. O., Jideani A. I. O., Kapila P. F. Quality properties of fruits as affected by drying operation // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. Vol. 57. № 1. P. 95–108. https://doi.org/10.1080/10408398.2013.859563.

5. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits and aquatic products / M. Zhang [et al.] // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. Vol. 57. № 6. P. 1239–1255. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.979280.

6. Снежкин Ю. Ф., Шапарь Р. А. Обоснование режимов низкотемпературной сушки // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений. Курск, 2015. С. 134–136.

7. Onwude D. I., Hashim N., Chen G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops // Trends in Food Science and Technology. 2016. Vol. 57. P. 132–145. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.012.

8. Junqueira J. R. J., Correa J. L. G., Ernesto D. B. Microwave, convective, and intermittent microwave–convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices // Journal of Food Processing and Preservation. 2017. Vol. 41. № 6. https://doi.org/10.1111/jfpp.13250.

9. Ghavidelan M. A., Chayjan R. A. Modeling engineering characteristics of hazelnut kernel during infrared fluidized bed drying // Journal of Food Measurement and Characterization. 2017. Vol. 11. № 2. P. 460–478. https://doi.org/10.1007/s11694-016-9414-0.

10. Musielak G., Mierzwa D., Kroehnke J. Food drying enhancement by ultrasound – A review // Trends in Food Science and Technology. 2016. Vol. 56. P. 126–141. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.08.003.

11. Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: A review of current technologies / D. I. Onwude [et al.] // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2017. Vol. 43. P. 223–238. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.010.

12. Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: effects on quality / O. Rodrıguez [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2018. Vol. 98. № 5. P. 1660–1673. https://doi.org/10.1002/jsfa.8673.

13. Applications of airborne ultrasonic technology in the food industry / C. M. G. Charoux [et al.] // Journal of Food Engineering. 2017. Vol. 208. P. 28–36. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.030.

14. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel / E. M. G. C. Do Nascimento [et al.] // Journal of Food Engineering. 2015. Vol. 170. P. 108–118. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.09.015.

15. Influence of air velocity and temperature on ultrasonically assisted low temperature drying of eggplant / J. V. Santacatalina [et al.] // Food and Bioproducts Processing. 2016. Vol. 100. P. 282–291. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.07.010.

16. Use of ultrasound for dehydration of mangoes (*Mangifera indica L.*): kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective air-drying / F. A. N. Fernandes [et al.] // Journal of Food Science and Technology. 2019. Vol. 56. № 4. P. 1793–1800. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03622-y.

17. Mendez-Calderon E. K., Ocampo-Castano J. C., Orrego C. E. Optimization of convective drying assisted by ultrasound for mango tommy (*Mangifera indica* L.) // Journal of Food Process Engineering. 2018. Vol. 41. № 1. https://doi.org/10.1111/jfpe.12634.

18. Розенберг Л. Д. Физика и техника мощного ультразвука: (в 3 кн.). М.: Наука, 1967–1970.

19. Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Нестеров В. А. Повышение равномерности амплитуд колебаний анизотропных ультразвуковых дисковых излучателей для газовых сред // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. Т. 25. № 1. С. 20–24. https://doi.org/10.25699/SSSB.2019.25.27602.

20. Верболоз Е. И., Николюк О. И. Применение ультразвука при сушке макаронных изделий с белковыми добавками // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2017. Т. 79. № 1 (71). С. 50–54. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-1-50-54.

21. Юдин А. В., Верболоз Е. И. Эффективность сушки кипрей-чая с применением ультразвука // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО: Материалы XLVI научной и учебно-методической конференции. СПб, 2017. С. 332–335.

22. Ультразвуковая сушилка: пат. 195247U1 Российская Федерация. № 2019128227 / Хмелев В. Н. [и др.]; заявл. 06.09.2019; опубл. 21.01.2020, Бюл. № 11. 1 с.

References

1. de Medeiros RAB, Barros ZMP, de Carvalho CBO, Neta EGF, Maciel MIS, Azoubel PM. Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango. LWT – Food Science and Technology. 2016;67:167–173. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.049.

2. Szadzińska J, Mierzwa D, Pawłowski A, Musielak G, Pashminehazar R, Kharaghani A. Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. Drying Technology. 2020;38(1–2):93–107. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1624565.

3. Kowalski SJ. Ultrasound in wet materials subjected to drying: A modeling study. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015;84:998–1007. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.086.

4. Omolola AO, Jideani AIO, Kapila PF. Quality properties of fruits as affected by drying operation. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017;57(1):95–108. https://doi.org/10.1080/10408398.2013.859563.

5. Zhang M, Chen H, Mujumdar AS, Tang J, Miao S, Wang Y. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits and aquatic products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017;57(6):1239–1255. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.979280.

6. Snezhkin YuF, Shapar RA. The argumentation of low-temperature drying conditions of thermolabile materials. Aktual′nye problemy sushki i termovlazhnostnoy obrabotki materialov v razlichnykh otraslyakh promyshlennosti i agropromyshlennom komplekse: sbornik nauchnykh statey Pervykh Mezhdunarodnykh Lykovskikh nauchnykh chteniy [Relevant issues of drying and thermal and moisture treatment of materials in various industries and agriculture: Proceedings of the First International Lykov scientific readings]; 2015. Moscow. Kursk: University Book; 2015. p. 133–136. (In Russ.).

7. Onwude DI, Hashim N, Chen G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. Trends in Food Science and Technology. 2016;57:132–145. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.012.

8. Junqueira JRJ, Correa JLG, Ernesto DB. Microwave, convective, and intermittent microwave–convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices. Journal of Food Processing and Preservation. 2017;41(6). https://doi.org/10.1111/jfpp.13250.

9. Ghavidelan MA, Chayjan RA. Modeling engineering characteristics of hazelnut kernel during infrared fluidized bed drying. Journal of Food Measurement and Characterization. 2017;11(2):460–478. https://doi.org/10.1007/s11694-016-9414-0.

10. Musielak G, Mierzwa D, Kroehnke J. Food drying enhancement by ultrasound – A review. Trends in Food Science and Technology. 2016;56:126–141. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.08.003.

11. Onwude DI, Hashim N, Janius R, Abdan K, Chen G, Oladejo AO. Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: A review of current technologies. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2017;43:223–238. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.010.

12. Rodrıguez O, Eim V, Rosselló C, Femenia A, Cárcel JA, Simal S. Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: effects on quality. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2018;98(5):1660–1673. https://doi.org/10.1002/jsfa.8673.

13. Charoux CMG, Ojha KS, O'Donnell CP, Cardoni A, Tiwari BK. Applications of airborne ultrasonic technology in the food industry. Journal of Food Engineering. 2017;208:28–36. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.030.

14. Do Nascimento EMGC, Mulet A, Ascheri JLR, De Carvalho CWP, Cárcel JA. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel. Journal of Food Engineering. 2015;170:108–118. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.09.015.

15. Santacatalina JV, Soriano JR, Cárcel JA, Garcia-Perez JV. Influence of air velocity and temperature on ultrasonically assisted low temperature drying of eggplant. Food and Bioproducts Processing. 2016;100:282–291. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.07.010.

16. Fernandes FAN, Braga TR, Silva EO, Rodrigues S. Use of ultrasound for dehydration of mangoes (*Mangifera indica L.*): kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective air-drying. Journal of Food Science and Technology. 2019;56(4):1793–1800. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03622-y.

17. Mendez-Calderon EK, Ocampo-Castano JC, Orrego CE. Optimization of convective drying assisted by ultrasound for mango tommy (*Mangifera indica* L.). Journal of Food Process Engineering. 2018;41(1). https://doi.org/10.1111/jfpe.12634.

18. Rozenberg LD. Fizika i tekhnika moshchnogo ul′trazvuka: (v 3 kn.) [Physics and technology of powerful ultrasound: (in 3 vols.)]. Moscow: Nauka; 1967–1970. (In Russ.).

19. Khmelev VN, Shalunov AV, Nesterov VA. Increasing of uniformity of amplitude of vibrations of anisotropic ultrasonic disk radiators for gaseous media. South-Siberian Scientific Bulletin. 2019;25(1):20–24. (In Russ.). https://doi.org/10.25699/SSSB.2019.25.27602.

20. Verboloz EI, Nikolyuk OI. The use of ultrasound in the process of drying pasta with protein supplements. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2017;79(1)(71):50–54. (In Russ.). https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-1-50-54.

21. Yudin AV, Verboloz EI. Ehffektivnost′ sushki kiprey-chaya s primeneniem ul′trazvuka [Efficiency of drying fireweed tea using ultrasound]. Al′manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO: Materialy XLVI nauchnoy i uchebno-metodicheskoy konferentsii [Almanac of scientific works of young researchers of ITMO University: Proceedings of XLVI research and academic conference]; 2017; St. Petersburg. St. Petersburg: ITMO University; 2017. p. 332–335. (In Russ.).

22. Khmelev VN, Shalunov AV, Khmelev MV, Nesterov VA, Tertishnikov PP, Tsyganok SN. Ul′trazvukovaya sushilka [Ultrasound dryer]. Russia patent RU 195247U1. 2020.